МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ИЗВЕСТИЯ ВОЛГОГРАДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Серия

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ И ИНФОРМАТИКИ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Выпуск 16

№ 8(111) Межвузовский сборник научных статей 2013
Издается с января 2004 г.

Волгоград
2013

УДК 881.3

Учредитель: ГОУ высшего профессионального образования
«Волгоградский государственный технический университет»

Сборник зарегистрирован в Управлении регистрации и лицензионной работы в сфере массовых коммуникаций федеральной службы по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия ПИ № ФС77–25660 от 13 сентября 2006 г.

Главный редактор сборника «Известия ВолгГТУ»
академик РАН *И. А. Новаков*

Редакционная коллегия серии:

засл. деят. науки РФ д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ *В. А. Камаев* (научный редактор)

д-р техн. наук, профессор БрГТУ *В. И. Аверченков*
д-р техн. наук, профессор ПензГУ *А. М. Бершадский*
д-р хим. наук, профессор ВолгГТУ *Л. Н. Бутенко*
д-р техн. наук, профессор МГТУ СТАНКИН *Г. Д. Волкова*
д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ *А. С. Горобцов*
д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ *А. М. Дворянкин*
д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ *А. В. Заболеева-Зотова*
д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ *А. Г. Кравец*
д-р техн. наук, профессор ТагГРТУ *В. М. Курейчик*
д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ *В. С. Лукьянов*
д-р техн. наук, профессор АстрГТУ *И. Ю. Петрова*
д-р техн. наук, профессор АстрГТУ *О. М. Проталинский*
д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ *А. Н. Шилин*
д-р техн. наук, профессор *Юрген Баст* (Технический ун-т Горной Академии, г. Фрайберг, Германия)
д-р философии *Ле Квет Тан* (Университет г. Канто, Вьетнам)
д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ *С. А. Фоменков* (ответственный секретарь)

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

Известия Волгоградского государственного технического университета : межвуз. сб. науч. ст. № 8(111) / ВолгГТУ. – Волгоград : ИУНЛ ВолгГТУ, 2013. – 172 с. (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 16).
ISBN 978–5–9948–1192–4

Содержит работы ученых высших учебных заведений России по следующей тематике: математическое моделирование и численные методы, системный анализ и обработка информации, управление в социальных и экономических системах, автоматизированное проектирование, построение сетей и защита информации.

Ил. 117. Табл. 41. Библиогр.: 256 назв.

ISBN 978–5–9948–1192–4

© Волгоградский государственный технический университет, 2013

СОДЕРЖАНИЕ

Часть I. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

Гетманский В. В., Горобцов А. С., Измайлов Т. Д.
Распараллеливание расчета напряженно-деформированного состояния тела в многотельной модели методом декомпозиции расчетной области..... 5

Ермолаев А. В., Оленникова О. А., Поляков И. В.
Математическое моделирование процесса конкуренции видов колебаний при возбуждении комбинационных составляющих в спектре генерации магнетрона..... 10

Жога В. В., Скакунов В. Н., Филимонов А. В., Голубев Д. В.
Динамика маршевых режимов движения робота с ортогональными движителями..... 14

Крохалев А. В., Харламов В. О., Авдеюк О. А., Кузьмин С. В., Лысак В. И.
Компьютерный расчет физических условий сжатия при взрывном прессовании порошков на металлических подложках..... 22

Крохалев А. В., Харламов В. О., Авдеюк О. А., Кузьмин С. В., Лысак В. И.
Компьютерное термодинамическое моделирование фазового состава твердых сплавов на основе карбида хрома..... 24

Крохалев А. В., Харламов В. О., Авдеюк О. А., Кузьмин С. В., Лысак В. И.
Компьютерное моделирование температурного поля карбидных частиц при ударно-волновом прессовании твердых сплавов..... 26

Михайлов В. К., Плешаков И. А.
Работа алгоритма управления температурой для простейших моделей термокамеры: формирование управляющей функции для тепловой модели с косвенным подогревом..... 29

Мохов А. Д., Олейников А. С.
Использование широковещательного канала для минимизации временных задержек в системе управления шагающим движителем мобильного робота..... 31

Симонов Б. В., Симонова И. Э.
Соотношения между модулями гладкости в разных метриках..... 34

Часть II. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Алешкин В. В.
Рекуррентные алгоритмы нелинейной фильтрации для гироскопического измерителя вектора угловой скорости..... 39

Брызгалин Г. И.
Нормализованный текст Игорева слова..... 44

Дмитриев А. С.
Адаптация комбинированной пространственно-темпоральной логики для обработки в системах машинного обучения..... 55

Дмитриев А. С.
Обработка пространственной и темпоральной информации для повышения качества семантического анализа текстов..... 59

Кизим А. В., Денисов М. В.
Поддержка принятия решений для проведения дорожных работ и мониторинга техники..... 64

Овчинников С. А.
Управление проектом по разработке программного обеспечения с целью повышения качества на основе анализа проектных рисков..... 67

Садовникова Н. П.
Оценка эколого-экономической эффективности планов территориального развития..... 72

Часть III. УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Девятых Д. В., Гергет О. М., Михаленко И. В.
Применение искусственных нейронных сетей для прогнозирования развития перинатального поражения нервной системы..... 77

Леонард А. В.
Цикловый шагающий движитель с направляющими. Свойства. Управление. Пути совершенствования…..... 81

Леонард А. В., Брискин Е. С.
Особенности движения шагающей машины с поворотным движителем, образованным сдвоенными механизмами шагания……..……..... 86

Олифер Н. О., Сычёв О. А.
Визуализация структур данных отлаживаемых программ и ее применение при обучении работе с динамическими структурами данных на языке С++….. 91

Парыгин Д. С.
Оценка эффективности стратегий управления городским районом на основе сценарных моделей.....……..... 98

Пугина Н. Н., Брумштейн Ю. М.
Методы и результаты оценки межвузовской конкуренции за абитуриентов в Астраханской области…..... 103

Ужва А. Ю., Дворянкин А. М., Жукова И. Г.
Алгоритм адаптивного поиска образовательных коллекций на основе рассуждений по прецедентам и онтологической модели представления знаний.....…….…….…..... 109

Фирсов И. В., Чигиринский Ю. Л.
Алгоритмическое и информационное обеспечение проектирования планов механической обработки.....…….....….. 113

Чигиринская Н. В.
Статистическое моделирование затрат на проектирование трубопроводов… 117

Часть IV. АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Еркин Д. А., Алимов А. А., Шабалина О. А.
Применение декларативного описания графического пользовательского интерфейса при разработке игровых приложений..... 121

Зинченко Е. Е.
Инвариантный алгоритм формирования Парето-расслоений для структурирования альтернатив в САПР..... 124

Исмагулова А. И.
Структурная схема автоматизации управления электроприводов в системах нефтедобычи на основе штанговых глубинно-насосных установок..... 131

Кандырин Ю. В., Кононов М. Е.
Алгоритм автоматизированного выбора аналогов по прототипам в частичных порядках…….....……..... 137

Кандырин Ю. В., Чивилев А. Д.
Автоматизированный выбор нехудших вариантов передачи «винт-гайка» в приводах зеркальных антенн.....…… 145

Коробкин Д. М., Чекашкина К. С., Фоменков С. А.
Методика извлечения описаний физических эффектов.....…… 152

Леонтьев В. Г., Кизим А. В.
Морфологический анализ и синтез набора оборудования систем коммерческого учета потребляемой энергии.....…… 155

Ульянов Д. Г.
Архитектура системы управления модульного типа.....…… 160

Часть V. ПОСТРОЕНИЕ СЕТЕЙ И ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

Лукьянов В. С., Гаевой С. В., Аль-Хадша Ф. А. Х.
Оценка показателей надежности сетей в стационарном режиме.....….. 165

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

УДК 004.94

В. В. Гетманский, А. С. Горобцов, Т. Д. Измайлов

РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЕ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТЕЛА В МНОГОТЕЛЬНОЙ МОДЕЛИ МЕТОДОМ ДЕКОМПОЗИЦИИ РАСЧЕТНОЙ ОБЛАСТИ

Волгоградский государственный технический университет

victor.getmanskiy@gmail.com

Рассмотрен параллельный метод моделирования напряженно-деформированного состояния тела в составе динамической модели системы тел. Реализована многопоточная версия расчетного модуля, приведены алгоритмы синхронизации и пример моделирования деформируемого рычага подвески в составе многотельной модели автомобиля.

Ключевые слова: мультифизическое моделирование, многопоточность, напряженно-деформированное состояние, декомпозиция, динамика систем тел.

V. V. Getmanskiy, A. S. Gorobtsov, T. D. Ismailov

PARALLELIZATION OF STRESS-STRAIN SOLVER COUPLED WITH MULTIBODY SOLVER USING DOMAIN DECOMPOSITION

Volgograd State Technical University

A parallel method of stress-strain simulation of single body in multibody dynamic model is proposed. Multithreaded implementation using POSIX threads library. Custom synchronization algorithms are implemented and example of deformable lower arm simulation in multibody truck model is given.

Keywords: multiphysics simulation, multithreading, stress strain solver, domain decomposition, multibody dynamics.

Введение

Для моделирования напряженно-деформированного состояния предлагается использовать параллельный метод дискретных элементов. Традиционным для решения таких задач является метод конечных элементов (МКЭ), который имеет ряд недостатков в случае больших нелинейностей и позволяет получить только квазистатические напряжения при динамическом расчете.

При проектировании машин актуальной является задача определения напряжений в деталях, подверженных наибольшим динамическим нагрузкам. Одним из примеров является нижний рычаг подвески автомобиля. Для расчета напряжено-деформированного состояния (НДС) используются реакции в связях, с помощью которых рычаг крепится ко всей конструкции. Эти реакции можно получить из динамического расчета пространственной модели системы тел со связями. В предлагаемом методе используется слабое связывание [1] динамической модели и модели НДС, т. е. передача реакций происходит на шагах синхронизации времени из решателя модели автомобиля в решатель НДС рычага подвески. Для расчета динамической модели используется расширенная постановка Лагранжа в физических координатах [2, 3].

При численном интегрировании системы дифференциальных уравнений, описывающих динамическую модель системы тел, распараллеливание вычислений возможно только в рамках одной итерации. При большом количестве итераций малое время выполнения параллельных участков кода относительно общего времени расчета не позволяет эффективно использовать потоки OpenMP из-за высоких накладных расходов [4]. Для повышения эффективности параллельных вычислений в рамках рассматриваемой задачи был разработан метод

синхронного параллельного расчета НДС, основанного на декомпозиции области с использованием стандартных потоков POSIX и собственной реализации примитивов синхронизации.

Метод дискретных элементов для представления упругих свойств тел

Нижний рычаг подвески автомобиля испытывает сильные динамические нагрузки, поэтому при его проектировании необходимо проводить анализ надежности. Использование МКЭ дает квазистатическое распределение напряжений. Такой подход описан, к примеру, в работе [6], он имеет ряд недостатков, связанных с плохим соответствием результатов расчета в сильно нелинейном случае. Для расчета деформаций в упругом теле используется аппроксимация тела дискретными твердотельными элементами с шестью степенями свободы, при этом расчетная область представляет собой регулярную ортогональную сетку. Каждый дискретный элемент имеет от одного до шести связей с соседними по граням элементами. Из-за одинаковой формы дискретных элементов значительно упрощается составление системы уравнений движения в физических координатах, так как матрица инерции является диагональной, а все элементы с точностью до количества связей описываются одинаковыми обыкновенными дифференциальными уравнениями вида

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{y}} = \mathbf{q}(\dot{\mathbf{y}}, \mathbf{y}, t) - \mathbf{M}\mathbf{a}(t) + \mathbf{s}(\dot{\mathbf{y}}, \mathbf{y}), \qquad (1)$$

где $\mathbf{y}$ – координаты дискретных элементов; $\mathbf{M}$ – матрица инерции; $\mathbf{a}$ – вектор, составленный из компонент вектора ускорений твердого тела, входящего в полную динамическую модель; $\mathbf{s}(\dot{\mathbf{y}}, \mathbf{y})$ – силы стабилизации.

Функция $\mathbf{q}(\dot{\mathbf{y}}, \mathbf{y}, t)$ описывает силы между дискретными элементами. Случайные возмущения, передаваемые от динамической модели, могут вызывать смещение дискретных элементов, поэтому для их привязки к опорному телу введены силы стабилизации $\mathbf{s}(\dot{\mathbf{y}}, \mathbf{y})$. Уравнение (1) записано в системе координат опорного тела, поэтому правая часть (1) также содержит силы инерции, рассчитываемые на основе ускорений опорного тела из динамической модели.

Деформируемое тело привязано к твердому телу, которое связано с другими телами в системы тел. Как показано на рис. 1, связи могут быть двух типов: упруго-демпфирующая $\mathbf{f}_1 = \mathbf{f}$ и шарнирная (жесткая связь) $\mathbf{f}_2 = (\mathbf{r}_x, \mathbf{r}_y, \mathbf{r}_z)$. Для

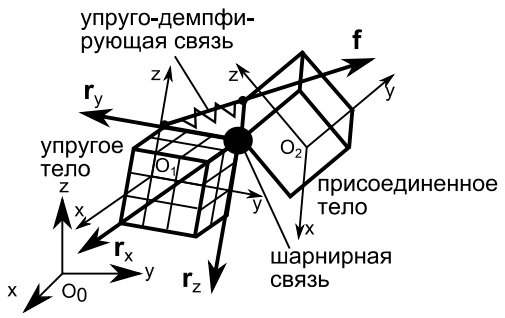


Рис. 1. Связи упругого тела с присоединенным телом

уравнений, описывающих граничные узлы, в правые части добавляются силы реакций, возникающие в связях. Уравнение для граничного элемента с использованием равномерного распределения внешних сил по граничным узлам имеет вид:

$$\mathbf{M}_i\ddot{\mathbf{y}}_i = \mathbf{f}(t)/|F| + \mathbf{q}_i(\dot{\mathbf{y}}, \mathbf{y}, t) - \mathbf{M}_i\mathbf{a}_i(t) + \mathbf{s}_i(\dot{\mathbf{y}}, \mathbf{y}), \quad i \in F, \qquad (2)$$

где F – множество индексов узлов, входящих в границу, к которой приложена сила $\mathbf{f}$.

Таким образом, данные, полученные из динамической модели, позволяют определить силы инерции и силы, возникающие в связях.

Уравнение (1) интегрируется явным методом Рунге – Кутта 4 порядка. При обновлении результатов расчета динамической модели происходит обновление правых частей для решателя НДС. Вспомогательная модель связана с динамической моделью в определенные шаги времени, которые могут не совпадать. Оба решателя итерационные, с шагами по времени Δt_{sub} для вспомогательной модели и Δt_{main} для основной. Для упрощения будем использовать только кратные шаги, т. е. если $\Delta t_{\text{sub}} < \Delta t_{\text{main}}$, $\Delta t_{\text{main}} = N \cdot \Delta t_{\text{sub}}$, где N – целое число. Так как шаги могут быть неодинаковыми, вводится общий счетчик времени с минимальным шагом Δt и счетчик времени для связывания с максимальным шагом Δt_{upd}. На каждом временном шаге вычисляются смещения дискретных элементов, по которым можно рассчитать деформации и напряжения, возникающие в упругом теле.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \psi & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \psi & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{13} \\ 2\varepsilon_{12} \end{bmatrix}, \qquad (3)$$

где σ – напряжения; ε – деформации; $\psi = \lambda + 2\mu$; $\lambda = E \cdot \nu / \left(1 - \nu^2\right)$; $\mu = E / \left(2 \cdot (1 + \nu)\right)$; E – модуль упругости материала.

Приведенные напряжения вычисляются в соответствии с гипотезой Мизеса:

$$\sigma = \sqrt{0{,}5 \sum_{i=1}^{2} \sum_{j=i+1}^{3} \left(\left(\sigma_{ii} - \sigma_{jj} \right)^2 + 6\sigma_{ij}^2 \right)}. \qquad (4)$$

Параллельный метод расчета НДС

При интегрировании используется понижение порядка уравнения (1) переходом к вектору неизвестных $\mathbf{x} = \left(\mathbf{y} \quad \dot{\mathbf{y}}\right)^{\mathrm{T}}$, при этом уравнение записывается в упрощенном виде как

$$\dot{\mathbf{x}} = \tilde{\mathbf{q}}(t, \mathbf{x}). \qquad (5)$$

Для шага интегрирования h:

$$\mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{x}_i + 1/6 \cdot \left(\mathbf{k}_1 + 2\mathbf{k}_2 + 2\mathbf{k}_3 + \mathbf{k}_4\right), \qquad (6)$$

где коэффициенты зависят от функций правых частей: $\mathbf{k}_1 = \tilde{\mathbf{q}}(t_i, \mathbf{x}_i)$; $\mathbf{k}_2 = \tilde{\mathbf{q}}(t_i + h/2, \mathbf{x}_i + \mathbf{k}_1/2)$; $\mathbf{k}_3 = \tilde{\mathbf{q}}(t_i + h/2, \mathbf{x}_i + \mathbf{k}_2/2)$; $\mathbf{k}_4 = \tilde{\mathbf{q}}(t_i + h, \mathbf{x}_i + \mathbf{k}_3)$.

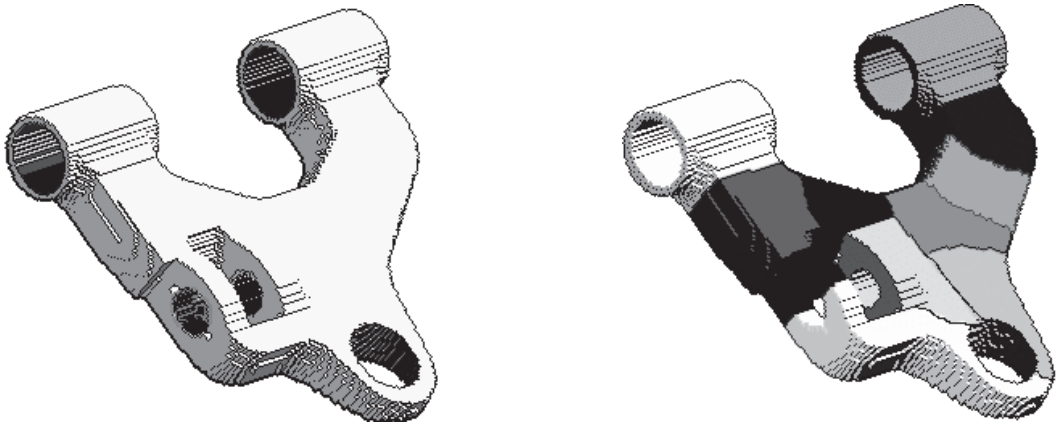
При расчете каждого из коэффициентов $\mathbf{k}_i$ происходит вычисление правых частей уравнения (5). При декомпозиции на подсистемы [5], для учета зависимостей по правым частям, после получения векторов коэффициентов, соответствующих полной модели, необходимо проводить пересылку данных из внутренних узлов во внешние для каждой пары смежных подмоделей; таким образом, необходимо четыре барьера: после вычисления каждого вектора коэффициентов $\mathbf{k}_1$, $\mathbf{k}_2$, $\mathbf{k}_3$, $\mathbf{k}_4$. Алгоритм параллельного метода приведен в таблице.

Параллельный алгоритм

1.	$t \leftarrow 0$, $t_{\text{sub}} \leftarrow 0$, $t_{\text{main}} \leftarrow 0$, $\Delta t \leftarrow \min\left(\Delta t_{\text{sub}}, \Delta t_{\text{main}}\right)$, $\Delta t_{\text{upd}} \leftarrow \max\left(\Delta t_{\text{sub}}, \Delta t_{\text{main}}\right)$
	Поток основной модели
2.	Пока $t < T$
3.	Если $t = t_{\text{main}}$
4.	Расчет реакций в связях для текущего времени
5.	$t_{\text{main}} \leftarrow t_{\text{main}} + \Delta t_{\text{main}}$
6.	Если $t = t_{\text{upd}}$
7.	Отправка реакций вспомогательным подмоделям
8.	Барьер
9.	Запись результатов расчета
10.	$t \leftarrow t + \Delta t$
	Поток каждой подмодели
11.	Пока $t < T$
12.	Если $t = t_{\text{upd}}$
13.	Барьер
14.	Обновление правых частей уравнений для решателя НДС
15.	$t_{\text{upd}} \leftarrow t_{\text{upd}} + \Delta t_{\text{upd}}$
16.	Если $t = t_{\text{sub}}$
17.	Расчет НДС для времени t_{sub} методом РК4
18.	Для $i \leftarrow 1$ до 4
19.	Расчет k_i
20.	Шаг обмена
21.	Барьер между подмоделями
22.	Расчет $y(t)$
23.	$t_{\text{sub}} \leftarrow t_{\text{sub}} + \Delta t_{\text{sub}}$
24.	Запись результатов расчета
25.	$t \leftarrow t + \Delta t$

Для получения высокой эффективности распараллеливания по данным с использованием декомпозиции критическими факторами являются сбалансированное разбиение и минимизация связей между подобластями.

1. Для декомпозиции области использованы многоуровневые методы декомпозиции графов [7], решающие NP-полную задачу минимизации сечений при декомпозиции графа с сохранением требуемого соотношения количества вершин в подграфах.



а *б*

Рис. 2. Модель нижнего рычага подвески до (*а*) и после (*б*) декомпозиции

Для декомпозиции использован многоуровневый алгоритм из библиотеки METIS [7], сохраняющий неразрывность подобластей. Результаты декомпозиции показаны на рис. 2, *б*. Для оценки качества декомпозиции использовались показатели избыточности R_n и дисбаланса D_n для разбиения на n частей, в каждой из которых N_i узлов, а требуемая относительная доля узлов P_i:

$$R_n = \sum_{i=1}^{n} \frac{N_i}{N}, \quad D_n = \max_i \left(\frac{|N_i - N \cdot P_i|}{N_i} \right). \quad (7)$$

Неравномерность распределения нагрузки в худшем случае составляет $R_{32} = 3\ \%$, а избыточность – для 32 частей $D_{32} = 4\ \%$.

Многопоточная реализация

Для распараллеливания использована библиотека для работы со стандартными потоками POSIX. Параллельная версия программы использует два примитива синхронизации потоков: барьер и сигнал без ожидания. При собственной реализации синхронизации используется ограниченный набор примитивов синхронизации, например, мьютексы, через которые можно создавать более сложные примитивы [8].

Механизм барьерной синхронизации гарантирует, что код, находящийся в программе после вызова барьера, не будет исполняться текущим потоком, пока число ожидающих в этом методе потоков не станет равно N. Используемая реализация допускает повторное использование барьера, необходимое для корректной работы циклической части программы. Барьер предотвращает преждевременное исполнение кода программы, расположенного после точки синхронизации, обеспечивая равную скорость работы нескольких потоков при их неравномерной загрузке.

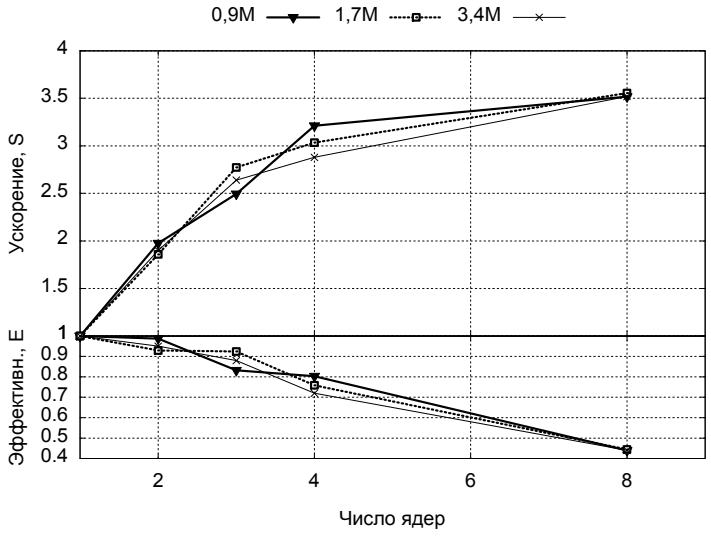
Синхронизация с использованием сигнала без ожидания расширяет функциональность условной переменной для использования в циклических частях программы. Сигнал без ожидания гарантирует, что поток, вызвавший метод ожидания, блокируется до тех пор, пока число вызовов этим потоком данного метода не окажется равным количеству срабатываний сигнала в сигнализирующем потоке. Сигнал без ожидания предотвращает исполнение кода программы, расположенного после точки синхронизации, ожидающими потоками до получения сигнала от сигнализирующего потока.

Результаты

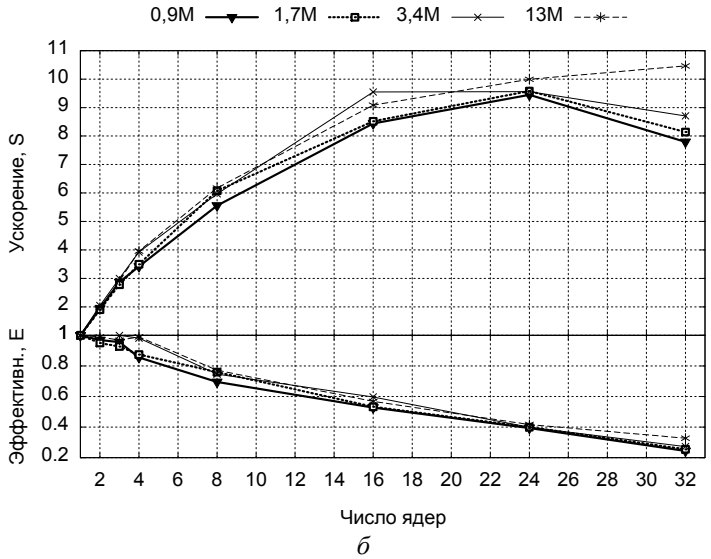
Исследовалось моделирование напряжений в рычаге подвески грузового автомобиля. Использовалась пространственная многотельная модель автомобиля [9] и дискретноэлементная модель деформируемого рычага (рис. 2). Результаты моделирования поля напряжений на одном из шагов по времени показаны на рис. 3.

Рис. 3. Результаты расчета НДС нижнего рычага подвески

Для расчетов использовались модели различной размерности. При параллельном расчете на небольшом количестве ядер, например, на ЭВМ с процессором Core i7-920 (рис. 4, *а*) ускорение практически не зависит от размерности. При использовании ЭВМ с двумя процессорами Opteron 6276 по 16 ядер каждый, ускорение продолжает расти после 24 ядер только на большой сетке с размерностью в 13 млн. дискретных элементов (рис. 4, *б*). При использовании сеток меньшей размерности ускорение падает из-за архитектуры с неоднородным доступом к памяти и сетевой деградации вычислений.



а



б

Рис. 4. Ускорение и эффективность параллельного расчета на платформе с одним 4-ядерным процессором Core i7 (*а*) и двумя 16-ядерными процессорами Opteron 6276 (*б*)

Полученное максимальное ускорение в 10 раз при использовании разработанного алгоритма синхронизации многопоточной программы превосходит получаемое с помощью распараллеливания с OpenMP почти в два раза, так как при использовании OpenMP возникают высокие на-

кладные расходы при порождении потоков на каждой итерации. Полученные результаты по ускорению и эффективности хорошо согласуются с исследованием, посвященным накладным расходам для многопоточных программ с OpenMP [10]. Разработанный параллельный метод применим для систем с распределенной памятью, так как предполагает независимый расчет подмоделей с синхронизацией.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Arnold, M.* Numerical methods for simulation in applied dynamics / M. Arnold // Simulation Techniques for Applied Dynamics / Ed. M. Arnold, W. Schiehlen. – Springer Vienna, 2008. – С. 191–246. – Англ.

2. *Bayo, E.* A modified Lagrangian formulation for the dynamic analysis of constrained mechanical systems / E. Bayo, J. Garcia de Jalon, M.A. Serna // Comput. Methods Appl. Mech. Eng. – 1988. – Vol. 71(2). – С. 183–195. – Англ.

3. *Valasek, M.* Multibody formalism for real-time application using natural coordinates and modified state space / M. Valasek, Z. Sika, O. Vaculin // Multibody System Dynamics. – 2007. – Vol. 17. – С. 209–227. – Англ.

4. *Carribault, P.* Enabling low-overhead hybrid MPI/OpenMP parallelism with MPC / P. Carribault, M. Pérache, H. Jourdren // Proc. of the 6th international conference on Beyond Loop Level Parallelism in OpenMP: accelerators, tasking and more. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. – С. 1–14. – Англ.

5. *Гетманский, В. В.* Решение задач большой размерности в системах моделирования многотельной динамики с использованием параллельных вычислений / В. В. Гетманский, А. С. Горобцов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 9 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 3). – С. 9–12.

6. *Rahman, M. M.* Modeling, analysis and fatigue life prediction of lower suspension arm / M.M. Rahman, M.M. Noor, K. Kadirgama, M.A. Maleque, R.A. Bakar // Advanced Materials Research. – 2011. – Vol. 264. – С. 1557–1562. – Англ.

7. *Karypis, G.* Multilevel algorithms for multi-constraint graph partitioning / G. Karypis, V. Kumar // Proc. of the 1998 ACM/IEEE conference on Supercomputing IEEE Computer Society. – Washington, DC, USA, 1998. – С. 1–13. – Англ.

8. *Downey, A. B.* The little book of semaphores 2nd edition / A.B. Downey. – CreateSpace, 2009. – 294 с. – Англ.

9. Concurrent simulation of multibody systems coupled with stress-strain and heat transfer solvers / В. В. Гетманский, А. С. Горобцов, Е. С. Сергеев, Т. Д. Измайлов, О. В. Шаповалов // Journal of Computational Science. – 2012. – Vol. 3, Iss. 6. – С. 492–497. – Англ.

10. *Fürlinger, K.* Analyzing overheads and scalability characteristics of OpenMP applications / K. Fürlinger, M. Gerndt // Proc. of the 7th international conference on High performance computing for computational science. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. – С. 39–51. – Англ.

УДК 537.53.001.5

А. В. Ермолаев, О. А. Оленникова, И. В. Поляков

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОНКУРЕНЦИИ ВИДОВ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ КОМБИНАЦИОННЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ В СПЕКТРЕ ГЕНЕРАЦИИ МАГНЕТРОНА

Волгоградский государственный технический университет

magnetton@rambler.ru, kovolum@yandex.ru, liichkap@mail.ru

Рассматривается принцип построения самосогласованной математической модели магнетронного генератора. Показано, что при взаимодействии сигнала основного π-вида и побочного сигнала $\frac{N}{2}+1$-вида малой мощности в спектре выходного сигнала возможно появление комбинационных составляющих.

Ключевые слова: математическая модель, магнетронный генератор, сигнал, двухчастотное взаимодействие, комбинационные составляющие.

A. V. Ermolaev, O. A. Olennikova, I. V. Polyakov

MODELING OF THE BEHAVIOR OF THE ELECTRONIC EXCITATION OF COMBINATIONAL COMPONENTS IN THE SPECTRUM OF THE GENERATION OF THE MAGNETRON

Volgograd State Technical University

The principle of the construction of mathematical model of the magnetron generator is considered. It is shown that at interaction of the main signal π-mode and side signal $\frac{N}{2}+1$-mode of low power, in spectrum of output signal can appear combinational components.

Keywords: mathematical model, magnetron generator, signal, two-frequency interaction, combinational components.

В электронике приборов СВЧ компьютерное моделирование, широко развиваясь последние 50 лет, прочно утвердилось в качестве одного из основных инструментов исследования. Использование результатов компьютерного моделирования позволяет сократить время и стои-

мость разработки приборов, наметить новые пути повышения их эффективности. Развитие средств вычислительной техники позволяет усложнять математические модели, что приводит к тому, что появляется возможность анализировать «внутренние» характеристики электронно-волнового взаимодействия, недоступные в реальном эксперименте.

Большинство современных математических моделей используют метод самосогласованного поля. Такая математическая модель включает в себя уравнения движения заряженных частиц; уравнения, описывающие электрическое и магнитное поля; уравнения, описывающие эмиссию частиц.

При моделировании магнетронного генератора уравнения движения заряженных частиц в скрещенных электрическом и магнитном полях имеют вид [1]:

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} = |\eta| E_r + \frac{v_\varphi^2}{r} - \omega v_\varphi;$$

$$\frac{\partial v_\varphi}{\partial t} = |\eta| E_\varphi - 2\frac{v_r v_\varphi}{r} + \omega v_r; \qquad \frac{\partial v_z}{\partial t} = |\eta| E_z.$$

Здесь r,φ, z – координаты частицы в цилиндрической системе; v_r, v_φ. v_z – координатные составляющие скорости; E_r, E_φ, E_z – компоненты вектора суммарной напряженности высокочастотного, кулоновского и статического полей; ω – частота циклотронных колебаний.

Входящая в правую часть уравнений движения напряженность электрического поля представляется в виде суперпозиции напряженностей высокочастотного поля, постоянного поля приложенного между анодом и катодом и поля пространственного заряда [2]:

$$\mathbf{E} = \widetilde{\mathbf{E}} + \mathbf{E_0} + \mathbf{E'}.$$

Для нахождения распределения поля пространственного заряда решается уравнение Пуассона, записанное в цилиндрической системе координат:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial U}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = \rho(r,\varphi,z),$$

а затем, из соотношения

$$\mathrm{E}' = -grad\boldsymbol{U}\left(\mathrm{r},t\right)$$

вычисляется напряженность поля $\mathbf{E'}$ в точке нахождения частицы.

Высокочастотное поле $\widetilde{\mathbf{E}}$ резонансной системы представляют в виде разложения по структурным функциям электродинамической структуры магнетрона с коэффициентами, зависящими от времени:

$$\widetilde{\mathbf{E}} = \Sigma A_{\mathrm{n}}(t)\boldsymbol{e}_{\mathrm{n}}(x,y,z).$$

Амплитудная часть находится из системы уравнений возбуждения [3]:

$$\left(\frac{dA_n}{dt} - \delta_n A_n\right)\mathbf{e}^{-\delta_n t} =$$

$$= -\frac{1}{\pi N_n \omega_n \varepsilon_0}\int_{t-T_n}^{t}\int_V \frac{\partial \mathbf{j}}{\partial t}\mathbf{e}_{\mathrm{n}}\, dV\, cos\left(\omega_n \tau + \psi_n\right) d\tau;$$

$$\frac{d\psi_n}{dt} = -\frac{1}{\pi N_n \omega_n \varepsilon_0 A_n}\int_{t-T_n}^{t}\int_V \frac{\partial \mathbf{j}}{\partial t}\mathbf{e}_{\mathrm{n}}\, dV\, sin\left(\omega_n \tau + \psi_n\right) d\tau,$$

где N_n – эквивалентная емкость замедляющей системы или норма; T_n – период колебаний с номером n; j – возбуждающий ток; e_n – структурная функция поля данного вида колебаний.

$$e_r = -\frac{N\theta}{\pi kr}\sum_{m=-\infty}^{\infty}\gamma\left(\frac{\sin\gamma\theta}{\gamma\theta}\right)\frac{Z_\gamma(kr)}{Z'_\gamma(kr_a)}\sin(\gamma\varphi)\sin\left(\frac{\pi}{w}z\right),$$

$$e_\varphi = \frac{N\theta}{\pi}\sum_{m=-\infty}^{\infty}\left(\frac{\sin\gamma\theta}{\gamma\theta}\right)\frac{Z_\gamma(kr)}{Z'_\gamma(kr_a)}\cos(\gamma\varphi)\sin\left(\frac{\pi}{w}z\right),$$

где Z_γ и Z'_γ – комбинация функций Бесселя и Неймана:

$$Z_\gamma(kr) = \mathbf{J}_\gamma(kr) - \frac{\mathbf{J}_\gamma(kr_k)}{N_\gamma(kr_k)}N_\gamma(kr),$$

$$Z'_\gamma(kr) = \mathbf{J}'_\gamma(kr) - \frac{\mathbf{J}'_\gamma(kr_k)}{N'_\gamma(kr_k)}N'_\gamma(kr),$$

N – количество резонаторов в замедляющей системе; $\gamma = n + mN$ – постоянная распространения; k – волновое число; θ – половинный размер щели резонатора.

Предполагается, что взаимодействие заряженных частиц с электрическими и магнитными полями происходит в цилиндрическом трехмерном пространстве объемом V, ограниченном поверхностями анода и катода в радиальном направлении, а в аксиальном направлении – торцевыми экранами, которые в общем случае находятся под потенциалом катода.

Электронный поток представляется совокупностью модельных заряженных частиц-облаков («крупных частиц») объемом $dV = rdrd\varphi dz$, массой $m = Mm_e$ и зарядом $q = M e$, где M – коэффициент укрупнения; m_e и e – соответственно масса и заряд электрона. Выбор этого коэффициента влияет на соотношение между точностью модели и затратами основного ресурса ЭВМ-процессорного времени. Выбирается он таким образом, чтобы суммарный заряд всех частиц Nm_e и средняя плотность пространственного заряда $p = Nm_e/V$ в модели были бы такими же, как и в моделируемой фи-

зической системе. Число частиц N в модели должно удовлетворять условию $N>> n_d >> 1$, $n_d=n_0\ \lambda^3$ – дебаевское число, т. е. количество перекрытых облаков [4]; λ – дебаевский радиус экранировки; n_0 – концентрация частиц в рассматриваемом объеме. M имеет порядок нескольких миллионов, при этом количество частиц примерно составляет тысячи на одну пару резонаторов магнетрона. Такое представление заряда обычно называют CIC-методом [4].

Количество частиц N в модели с течением времени меняется вследствие поступления и ухода частиц через границы области. В реальной системе эти процессы обусловлены термоэмиссией и вторичной эмиссией.

В модели плотность тока частиц, эмитируемых с катода, задается в долях тока Ленгмюра цилиндрического диода в магнитном поле по формуле

$$j_L = 0,44\, j_L^* \left(1-\sqrt{1-\left(\frac{B_{\text{кр}}}{B}\right)^2}\right)\left(\frac{B}{B_{\text{кр}}}\right)^2 .$$

Координаты точек вылета частиц с поверхности катода определяются с помощью генератора псевдослучайных чисел с равномерным законом распределения, поскольку предполагается равномерность эмиссионных характеристик на площади катода. Для определения коэффициента вторичной эмиссии используется формула Паньшина [5]:

$$\sigma = 1,57\sigma_{\max}\left(\frac{E_{\text{кин}}}{E_{\max}}\right)^{0.45} \exp\left(-0,55\frac{E_{\text{кин}}}{E_{\max}}\right),$$

где $\sigma_{\max}$ – максимальный коэффициент вторичной эмиссии; $E_{\text{кин}}$ – кинетическая энергия первичной частицы; $E_{\max}$ – максимальная кинетическая энергия.

Вычисляемый с помощью формулы Паньшина коэффициент вторичной эмиссии, соответствующий кинетической энергии данной частицы, используется в качестве математического ожидания для генератора псевдослучайных чисел с пуассоновским законом распределения. Выходная целочисленная случайная величина рассматривается как количество вторично-эмиссионных частиц (обычно оно не больше 10), выбитых данной первичной частицей. Для того, чтобы избежать «налипания» частиц одной и той же порции друг на друга, они равномерно (точнее, псевдослучайно) распределяются в небольшой окрестности точки падения.

Работа программы начинается с обработки входных параметров и подготовки некоторых объектов модели, затем на печать выводятся значения редко изменяемых переменных, меняющихся в каждом цикле.

После этого начинается цикл по времени. Первым шагом в теле цикла является запуск порции частиц, моделирующий термоэмиссию с катода. Следующий этап – запуск вторично-эмиссионных частиц.

Моделирование поля пространственного заряда начинается с обнуления массива потенциала поля, заполнения его граничными условиями и раздачи заряда по узлам сетки по алгоритму «облако в ячейке», после чего решается уравнение Пуассона и находится распределение потенциала в пространстве взаимодействия.

Затем решаются уравнения движения, находятся распределение заряда на текущем временном шаге и интеграл взаимодействия.

На следующем этапе моделируются высокочастотные поля. Для каждого вида колебаний решается уравнение возбуждения и находятся амплитуды высокочастотного поля.

Тело цикла заканчивается выводом на печать изменяемых на каждом временном шаге переменных, необходимых для дальнейшей обработки.

После окончания работы цикла проводится окончательная обработка результатов (например, спектральный и корреляционный анализ), подготовка и вывод на печать графиков.

Рассмотренная модель позволяет исследовать широкий круг процессов, происходящих в магнетронном генераторе при взаимодействии электронного потока с высокочастотным полем сложного спектрального состава, отслеживать динамику электронного потока в этих процессах, вычислять основные выходные характеристики и спектральный состав выходного сигнала генератора [6].

Одной из интереснейших задач, решаемых с помощью этой модели, является исследование динамики электронного потока при конкуренции видов колебаний. В таких режимах помимо основного, π-вида колебаний, в генераторе возбуждается колебание побочного вида, чаще всего с номером $\frac{N}{2}\pm 1$. Долгое время такие колебания считались паразитными, от них старались избавляться, разделяя частоты колебаний так, чтобы частоты паразитных видов лежали далеко от достаточно узкой полосы пропуска-

ния генератора. Однако современные исследования процессов взаимодействия электронных потоков с полем полигармонической электромагнитной волны показывают, что влияние высокочастотного побочного сигнала может приводить к ряду эффектов, применение которых в классических магнетронах способно существенно расширить область применения этих приборов в устройствах электронной техники.

Одним из таких востребованных техникой эффектов является возбуждение в спектре генерации комбинационных составляющих и возможность управления частотой и уровнем этих гармоник. Так, в работе [7] показано, что комбинационные составляющие возбуждаются при подаче маломощного высокочастотного сигнала на дополнительный вход магнетрона.

Численные эксперименты, проведенные с использованием рассматриваемой модели, показывают, что возбуждение комбинационных составляющих возможно также при возбуждении в магнетроне $(N/2)+1$ вида колебаний с частотой, лежащей вне полосы пропускания. Для моделирования такого режима работы высокочастотное поле магнетрона рассматривается как суперпозиция полей π-вида и $(N/2)+1$ вида. Для расчета поля $(N/2)+1$ вид задаются его структурные функции e_r и e_φ, для вычисления амплитуды и фазы решается система уравнений возбуждения.

На приведенном ниже рисунке изображен спектр выходного сигнала магнетрона М-155, полученный для такого режима. Резонансная частота π-вида задается равной 2,45 ГГц, колебания $(N/2)\pm1$ равной 3,00 ГГц. Добротность побочного вида $Q_{\frac{N}{2}+1}$ = 1, однако норма (энергоемкость) этого сигнала подбирается таким образом, чтобы началось взаимодействие видов колебаний.

Для вычисления спектра используется дискретное преобразование Фурье в виде:

$$G(\omega_k)=\frac{1}{N}\sum_{m=1}^{N}P_m\exp(-i\frac{2\pi mk}{N}),$$

где P_m – значение анодного тока на m-м временном шаге интервала разложения; $\omega_k = k\Omega$ – частота k-й гармоники; N – число временных интервалов дискретизации, приходящихся на фундаментальный период.

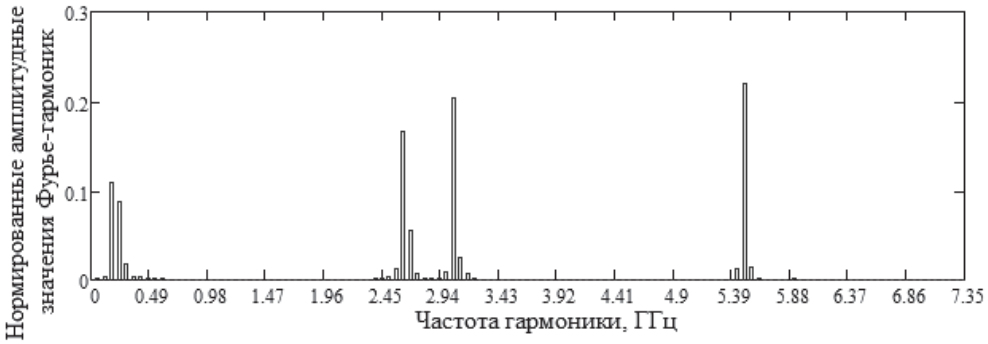
Полученные таким образом абсолютные значения амплитуд гармоник мощности на графике представляются в нормированном виде:

$$\frac{\left|G(\omega_k)\right|^2}{\sum_{j=1}^{M}\left|G(\omega_j)\right|^2},$$

где $\left|G(\omega_k)\right|^2$ – мощность приходящаяся на k-ю гармонику; $\sum_{j=1}^{M}\left|G(\omega_j)\right|^2$ – мощность всего спектра. Значение M (номер гармоники, на которой обрывается суммирование), зависит от распределения мощности в спектре электронного потока.

Спектр ВЧ-сигнала рассматривается в виде амплитудно-частотной характеристики, полученной разложением в ряд Фурье зависимости мгновенной электронной мощности от времени. По оси абсцисс на графике отложена частота гармоники. По оси ординат откладываются амплитудные значения Фурье-гармоник, нормированные на мощность спектра.

Для выделения гармоник, возникающих в спектре электронной мощности сигнала π-вида под влиянием сигнала побочного вида, Фурье-анализ сигнала проводится на интервале сигнала, составляющем около 40 периодов колебаний π-вида.



Колебания основного π-вида: добротность Q_π = 90. Колебания побочного $(N/2)+1$-вида: добротность $Q_{\frac{N}{2}+1}$ = 1. Анодное напряжение U_a=3,90 кВ

Спектр сигнала в двухчастотном режиме работы магнетронного генератора

Влияние побочного вида приводит к тому, что частота генерации основного вида колебания смещается на частоту 2,63 ГГц. Кроме того, в спектре появляются гармоники комбинационных составляющих. Одна из них, с частотой 3,04 ГГц, имеет уровень, равный –13,8 дБ, что превышает уровень основной гармоники, составляющей – 15,6 дБ. Две другие комбинационные составляющие: низкочастотная – 0,18 ГГц и высокочастотная – 5,49 ГГц. Уровень низкочастотной гармоники (–19,2 дБ), близок к уровню гармоники основного вида, а уровень высокочастотной (–13,2 дБ), к уровню гармоники, соответствующей частоте побочного вида колебаний.

Таким образом, использование рассмотренной математической модели классического магнетронного генератора позволяет рассчитывать режимы работы прибора, в которых взаимодействие электронного потока с несколькими возбуждаемыми высокочастотными сигналами приводит к насыщению спектра выходного сигнала комбинационными составляющими.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трехмерные цилиндрические уравнения движения электронов в неоднородных скрещенных полях / В. Б. Байбурин [и др.] // Радиотехника и электроника. – 2000. – Т. 45. – № 4. – С. 492–498.

2. *Моносов, Г. Г.* К решению уравнения Пуассона для пространства взаимодействия цилиндрического магнетрона на ЭЦВМ методом Фурье / Г. Г. Моносов // Электронная техника. Серия «Электроника СВЧ». – 1970. – Вып. 3. – С. 47–54.

3. Магнетроны сантиметрового диапазона / пер. с англ. под ред. С. А. Зусмановского. – М.: Советское радио, 1950. – Ч. 1. – 420 с.

4. *Хокни, Р.* Численное моделирование методом частиц : пер. с англ. / Р. Хокни, Дж. Иствуд. – М.: Мир, 1987. – 640 с.

5. *Паньшин, В. В.* Приближенный расчет энергии удара электронов об анод в магнетронных приборах / В. В. Паньшин // Электронная техника. Серия «Электроника СВЧ». – 1970. – Вып. 9. – С. 23–35.

6. *Снигур, А. А.* Экспериментальное исследование комбинационных составляющих в спектре излучения магнетронного генератора / А. А. Снигур, А. В. Ермолаев // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 3(63) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь» ; вып. 4). – С. 53–56.

УДК 519.71

В. В. Жога, В. Н. Скакунов, А. В. Филимонов, Д. В. Голубев

ДИНАМИКА МАРШЕВЫХ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ РОБОТА С ОРТОГОНАЛЬНЫМИ ДВИЖИТЕЛЯМИ

Волгоградский государственный технический университет

zhoga@vstu.ru, svn@vstu.ru

Разработанная математическая модель предназначена для параметрической оптимизации геометрических, массовых и энергетических характеристик робота, анализа его поведения в процессе эксплуатации, а также для синтеза системы управления движением.

Ключевые слова: робот с ортогональными движителями, математическая модель, алгоритмы движения робота, система управления.

V. V. Zhoga, V. N. Skakunov, A. V. Filimonov, D. V. Golubev

MARCHING DYNAMICS MODES OF THE ROBOT WITH ORTOGONAL PROPULSORS

Volgograd State Technical University

The developed mathematical model is designed to optimize the parametric geometry, mass and energy characteristics of the robot, the analysis of its behavior during operation, as well as for the synthesis of motion control systems.

Keywords: robot with orthogonal propulsors, mathematical model, algorithms of motion of the robot, control system.

Введение

Моделируется движение робота с шагающими движителями, схема которого изображена на рис. 1 [1]. Достоинства выбранного механизма состоят в надежности механизмов, исполнительные органы которых совершают поступательное движение; достаточности двух, независимо работающих приводов, осуществляющих курсовое движение и адаптацию к опорной поверхности; энергетической эффективности, обусловленной отсутствием затрат энергии на поддержание веса машины; простоте алгоритмов управления траекторией и законом движения опорной точки.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-08-00301-а)

Блочно-модульный принцип построения конструкции мобильного робота с использованием стандартных функциональных мехатронных модулей, имеет значительные преимущества при разработке специализированных роботов, наиболее полно отвечающих требованиям решения конкретной задачи и не обладающих избыточностью функций.

Предлагаемая математическая модель предназначена для параметрической оптимизации геометрических, массовых и энергетических характеристик робота, анализа его поведения в процессе эксплуатации, а также для синтеза системы управления движением. Достоверность информации, полученной при исследовании динамики движения робота с помощью математической модели, зависит от ее адекватности исходному физическому аналогу.

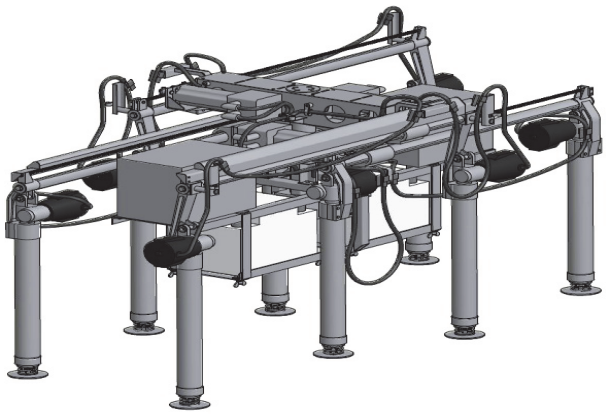


Рис. 1. Конструктивная схема робота

На практике часто используют несколько моделей [2, 3] для изучения характеристик одной и той же системы в разных режимах функционирования с учетом наиболее существенных для данного процесса факторов. Однако на этапе проектирования экспериментальные результаты зачастую отсутствуют, что не позволяет судить о приемлемости принятых допущений. Кроме того, мобильный робот с шагающими движителями представляет собой сложную мехатронную систему, состоящую из большого числа взаимосвязанных элементов, поэтому в ряде случаев анализ ее поведения не может быть выполнен с достаточной степенью точности исследованием простых моделей. В этих условиях целесообразно иметь универсальную динамическую модель пространственного движения робота по деформируемой опорной поверхности произвольного профиля, которая может быть трансформирована (на основании преемственности результатов) в более простые модели, предназначенные для решения частных задач.

Расчетная схема

Рассматриваемый робот (рис. 2) состоит из механической части, электродвигателей с редукторами, блока системы управления, системы очувствления и энергетической установки. Робот компонуется из модулей вертикальной адаптации и горизонтального перемещения.

Механическая часть представляется в виде шести массовых абсолютно твердых тел. На нижней части корпуса (*1*) массой m_1 размещены блок системы управления и энергетическая установка. Верхняя часть корпуса (*4*) массой m_4 связана с нижней частью корпуса цилиндрическим шарниром пятого класса. На каждой из частей корпуса закреплены по две направляющих, в которых с возможностью горизонтального перемещения установлены штанги (*2, 3, 5, 6*), каждая массой m_2, m_3, m_5, m_6, связанные с приводами горизонтального перемещения. На корпусе робота размещены энергетическая установка и блок системы управления. Корпус состоит из верхней и нижней частей, на каждой из которых закреплены пары направляющих. В направляющие пары установлены подвижные рамы с возможностью горизонтального перемещения, связанные с приводами горизонтального перемещения. На концах рамы смонтированы выдвижные вертикальные опорные стойки (рис. 1), связанные с приводами вертикального перемещения. На концах штанг смонтированы выдвижные опорные стойки, взаимодействующие с несущей поверхностью в точке, а реакция поверхности сводится к силам $\vec{N}_i$ ($i = 1 \div 8$).

Расчетная схема робота показана на рис. 2. Рассматривается движение робота относительно неподвижной системы отсчета $O\xi\eta\varsigma$ без маневрирования, т. е. без поворота верхней части робота относительно нижней. Оси координат C_1XYZ связаны с центром масс нижней части корпуса и перемещаются поступательно относительно неподвижной системы координат. Положение центра масс определяется радиус-вектором $\vec{r}_1$, вектором скорости $\vec{V}$ и вектором его угловой скорости $\vec{\omega}$. С каждым из твердых тел, составляющих механическую часть робота, связываются подвижные системы координат $C_kX_kY_kZ_k$ ($k = 1 \div 6$), оси которых являются главными центральными осями инерции.

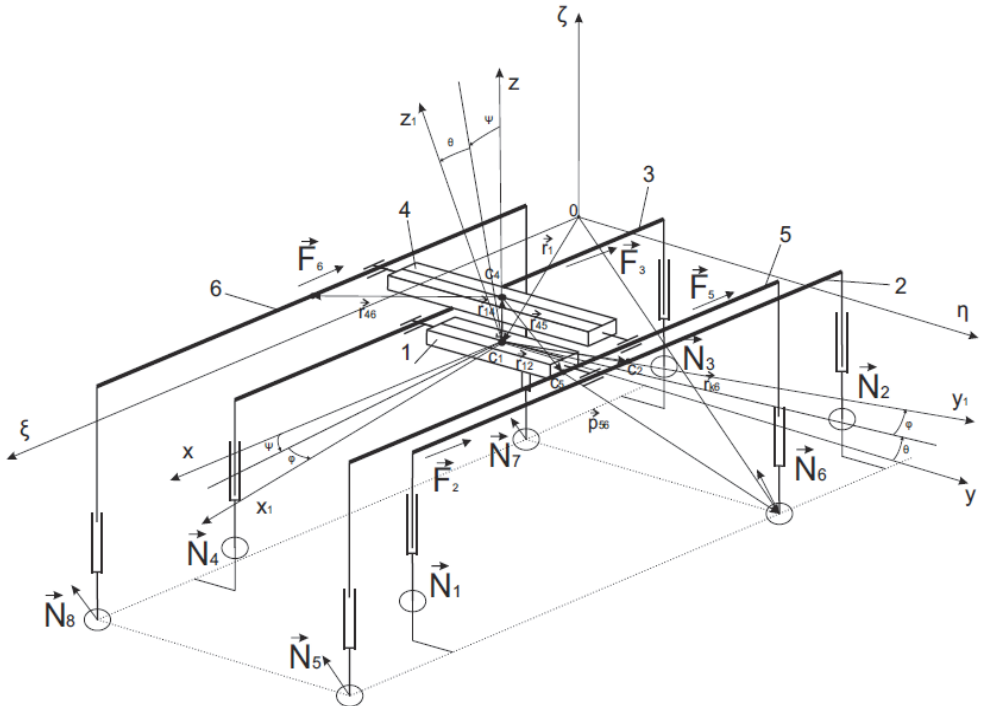


Рис. 2. Расчетная схема мобильного робота

В силу конструктивных особенностей робота и описываемого характера движений ориентация в пространстве главных центральных осей инерции всех частей робота одинакова. Их положения относительно осей C_1XYZ, перемещающихся поступательно, задаются с помощью корабельных углов Эйлера φ. ψ, θ. Статическая устойчивость робота возможна только при условии нахождения в контакте с опорной поверхностью не менее трех опорных стоек, расположенных по разные стороны оси продольной симметрии. Перемещение корпуса возможно при нахождении в опоре всех восьми опорных стоек. Таким образом, исследуемый робот представляет собой механическую систему переменной структуры. Его конфигурация, с учетом деформаций опорной поверхности, описывается минимум шестью, максимум восемью обобщенными координатами.

Математическая модель

Уравнения движения робота под действием сил тяжести, сил реакций опорной поверхности в точках контакта опорных плит составлялись в форме уравнения Лагранжа 2-го рода. Кинетическая энергия робота, как системы абсолютно твердых тел определяется выражением:

$$T = \sum_{i,k=1}^{i=3,k=6} \left(\frac{1}{2} m_k \dot{r}_k^2 + \frac{1}{2} I_{ik} \omega_{ik}^2\right), \qquad (1)$$

где $\dot{r}_k$ – скорость центра масс k части робота в абсолютной системе координат; I_{ik}, ω_{ik} – главные центральные моменты инерции и проекции вектора угловой скорости каждой из частей робота на оси подвижной связанной системы координат; $\vec{r}_{12}$, $\vec{r}_{13}$, $\vec{r}_{14}$ – радиус-векторы, определяющие положения центров масс второй, третьей (подвижные штанги) и четвертой (верхняя часть корпуса) частей робота, заданные своими проекциями в подвижной системе координат $C_1X_1Y_1Z_1$ нижней части корпуса; $\vec{r}_{45}$, $\vec{r}_{46}$ – радиус-векторы, определяющие положения центров масс пятой и шестой (подвижные штанги) части робота, заданные своими проекциями в подвижной системе координат $C_4\ X_4\ Y_4\ Z_4$ верхней части корпуса.

Радиус-векторы r_k в абсолютной системе координат, их производные по времени $\dot{r}_k$ определяются следующими выражениями (рис. 2):

$$\begin{aligned}
&\vec{r}_2 = \vec{r}_1 + \vec{r}_{12}, \quad \vec{r}_3 = \vec{r}_1 + \vec{r}_{13}, \quad \vec{r}_4 = \vec{r}_1 + \vec{r}_{14}, \quad \vec{r}_5 = \vec{r}_1 + \vec{r}_{14} + \vec{r}_{45}, \quad \vec{r}_6 = \vec{r}_1 + \vec{r}_{14} + \vec{r}_{46},\\
&\dot{\vec{r}}_2 = \dot{\vec{r}}_1 + \dot{\vec{r}}_{12} + \vec{r}_{12} \times \vec{\omega}, \qquad \dot{\vec{r}}_3 = \dot{\vec{r}}_1 + \dot{\vec{r}}_{13} + \vec{r}_{13} \times \vec{\omega}, \qquad \dot{\vec{r}}_4 = \dot{\vec{r}}_1 + \dot{\vec{r}}_{14} + \vec{r}_{14} \times \vec{\omega},\\
&\dot{\vec{r}}_5 = \dot{\vec{r}}_1 + \dot{\vec{r}}_{14} + \vec{r}_{14} \times \vec{\omega} + \dot{\vec{r}}_{45} + \vec{r}_{45} \times \vec{\omega}, \qquad \dot{\vec{r}}_6 = \dot{\vec{r}}_1 + \dot{\vec{r}}_{14} + \vec{r}_{14} \times \vec{\omega} + \dot{\vec{r}}_{46} + \vec{r}_{46} \times \vec{\omega},
\end{aligned} \qquad (2)$$

где $\dot{\vec{r}}_{12}$, $\dot{\vec{r}}_{13}$, $\dot{\vec{r}}_{14}$, $\tilde{r}_{45}$, $\dot{\vec{r}}_{46}$ – относительные производные радиус-векторов второй, третьей, четвертой, пятой и шестой частей робота.

Проекции вектора $\vec{r}_1$ в абсолютной системе координат: ξ,η,ς – обобщенные координаты. Проекции векторов $\vec{r}_{12}$, $\vec{r}_{13}$, $\vec{r}_{14}$, $\vec{r}_{45}$, $\vec{r}_{46}$ в собственных координатных системах: $x_{12}(t)$, $x_{13}(t)$, $x_{45}(t)$, $x_{46}(t)$ – относительные перемещения штанг (управляемые параметры, в режиме переноса опорных плит); y_{12}, z_{12}, $y_{13}=-y_{12}, z_{13}=z_{12}$, x_{14}, $y_{14}=0$, z_{14}, $y_{45}, y_{46}=-y_{45}$, $z_{45}=z_{46}$ – постоянные конструктивные параметры робота. Преобразование проекций векторов, заданных в подвижной системе к проекциям, заданным в абсолютной системе координат, осуществляется с помощью ортогональной матрицы поворота (направляющих косинусов).

Для принятого характера движения робота допустимо считать углы Эйлера малыми, тогда матрица поворота имеет вид:

$$\alpha=\begin{vmatrix} 1 & \varphi & -\psi \\ -\varphi & 1 & \theta \\ \psi & -\theta & 1 \end{vmatrix}, \qquad (3)$$

а проекции вектора угловой скорости робота $\vec{\omega}$, одинаковые для всех тел системы, на подвижные оси координат равны $\omega_1=\dot{\theta}$; $\omega_2=\dot{\psi}$; $\omega_3=\dot{\varphi}$.

Уравнения (2) с учетом (3) записываются в виде:

$$X_k=\xi+\alpha^T X_{1k}, \qquad (4)$$

где X_k – матрица столбец с элементами проекций векторов $\vec{r}_k$ (k=2,3,4); X_k – матрица столбец с элементами проекций векторов $\vec{r}_{1k}$ (k=2,3,4); ξ – матрица-столбец с элементами проекций вектора $\vec{r}_1$; α^T – транспонированная матрица поворота (3).

Аналогичные выражения имеют место и для векторов $\vec{r}_5, \vec{r}_6$.

Дифференциальные уравнения движения робота в матричной форме имеют вид:

$$A\ddot{q}=B(q,\dot{q})+F(t)+N(q,\dot{q}), \qquad (5)$$

где A – 10x10 симметричная матрица коэффициентов инерции; $B(q,\dot{q})$ – матрица-столбец слагаемых, зависящих от обобщенных координат и скоростей; $F(t)$ – матрица-столбец управляющих сил; $N(q,\dot{q})$ – матрица-столбец сил реакций опорной поверхности. Элементы матриц A и B:

$a_{11}=M$; $a_{12}=0; a_{13}=0$; $a_{14}=0$; $a_{15}=m_2(z_{12}+z_{13})-z_{14}(m_4+2m_5)-m_5(z_{45}+z_{46}); a_{16}=0; a_{17}=m_2$;

$a_{18}=m_3; a_{19}=m_5$; $a_{110}=m_6; a_{22}=M$; $a_{23}=0$;

$a_{24}=-m_2(z_{12}+z_{13})-z_{14}(m_4+2m_5)-m_5(z_{45}+z_{46})$; $a_{25}=0$;

$a_{26}=m_2(x_{12}+x_{14})+x_{14}(m_4+2m_5)+m_5(x_{45}+x_{46}); a_{27}=m_2\varphi; a_{28}=m_3\varphi; a_{29}=m_5\varphi; a_{210}=m_6\varphi$;

$a_{33}=M; a_{34}=0; a_{35}=-m_2(x_{12}+x_{13})+x_{14}(m_4+2m_5)+m_5(x_{45}+x_{46}); a_{36}=0; a_{37}=-m_2\psi$;

$a_{38}=-m_3\psi; a_{39}=-m_5\psi$; $a_{310}=-m_6\psi; a_{44}=I_{1\Sigma}$; $a_{45}=-I_{1xy}$; $a_{46}=-I_{1xz}$; $a_{47}=-m_2(z_{12}\varphi+y_{12}\psi)$;

$a_{48}=-m_3(z_{13}\varphi+y_{13}\psi); a_{49}=-m_5\left[(z_{14}+z_{45})\varphi+y_{45}\psi)\right]$; $a_{410}=-m_6\left[(z_{14}+z_{46})\varphi+y_{46}\psi\right]$;

$a_{55}=I_{2\Sigma}$; $a_{56}=0$; $a_{57}=m_2(z_{12}+x_{12}\psi)$; $a_{58}=m_3(z_{13}+x_{13}\psi)$; $a_{59}=m_5\left[(z_{14}+z_{45})+(x_{14}+x_{45})\psi\right]$;

$a_{510}=m_6\left[(z_{14}+z_{46})+(x_{14}+x_{46})\psi\right]; a_{66}=I_{3\Sigma}$; $a_{67}=-m_2(y_{12}-x_{12}\varphi)$; $a_{68}=-m_3(y_{13}-x_{13}\varphi)$;

$a_{69}=-m_5\left[y_{45}-(x_{14}+x_{45})\varphi\right]$; $a_{610}=-m_6\left[y_{46}-(x_{14}+x_{46})\varphi\right]$;

$a_{77}=m_2$; $a_{78}=0$; $a_{79}=0; a_{710}=0$;

$a_{88}=m_3$; $a_{89}=0$; $a_{810}=0; a_{99}=m_5$; $a_{910}=0$; $a_{1010}=m_6$.

$$b_1=\sum_{k=1}^{8}N_{k\xi}; b_2=-2\dot{\varphi}\left(m_2\dot{x}_{12}+m_3\dot{x}_{13}+m_5\dot{x}_{45}+m_6\dot{x}_{46}\right)+\sum_{k=}^{N}N_{k\eta};$$

$$b_3=2\dot{\psi}\left(m_2\dot{x}_{12}+m_3\dot{x}_{13}+m_5\dot{x}_{45}+m_6\dot{x}_{46}\right)+\sum_{k=1}^{8}N_{k\xi}-Mg;$$

$$b_4 = 2m_2\dot{x}_{12}\left(z_{12}\dot{\varphi} + y_{12}\dot{\psi}\right) + 2m_3x_{13}\left(z_{13}\dot{\varphi} + y_{13}\dot{\psi}\right) + 2m_5x_{45}\left[\left(z_{14} + z_{45}\right)\dot{\varphi} + y_{45}\dot{\psi}\right] + \\ + 2m_6x_{46}\left[\left(z_{14} + z_{46}\right)\dot{\varphi} + y_{46}\dot{\psi}\right] + M_\xi;$$

$$b_5 = \dot{\theta}\frac{dI_{1xy}}{dt} - \dot{\psi}\frac{dI_{2\Sigma}}{dt} + M_\eta; b_6 = -\dot{\varphi}\frac{dI_{3\Sigma}}{dt} + M_\xi;\ \ b_7 = -2m_2\varphi\dot{\varphi}\dot{x}_{12} - m_2\psi\dot{\psi}\dot{x}_{12};$$

$$b_8 = -2m_3\dot{x}_{13}\left(\varphi\dot{\varphi} + \psi\dot{\psi}\right);\ \ b_9 = -2m_5\dot{x}_{45}\left(\varphi\dot{\varphi} + \psi\dot{\psi}\right);\ \ b_{10} = -2m_6\dot{x}_{46}\left(\varphi\dot{\varphi} + \psi\dot{\psi}\right).$$

Опорные реакции

Для определения сил реакций взаимодействия опорной плиты с грунтом необходимо найти абсолютные координаты $\xi_i^\kappa, \eta_i^\kappa, \varsigma_i^\kappa$ точки входа ее в контакт с опорной поверхностью, т. е. координаты точки, одновременно удовлетворяющие уравнениям траектории опорной точки *i* штанги и поверхности грунта:

$$\begin{aligned} \varsigma_i^\kappa &= \varsigma + \alpha_{13}x_i + \alpha_{23}y_i + \alpha_{33}z_i, \\ \varsigma_i^\kappa &= f(\xi_i^\kappa, \eta_i^\kappa), \end{aligned} \qquad (6)$$

где ς – абсолютная координата центра масс корпуса робота; x_i, y_i, z_i – относительные координаты *i*-й опорной точки; α_{pq} – направляющие косинусы углов между осями $C_1X_1Y_1Z_1$ и C_1XYZ; $f\left(\xi_i^k, \eta_i^k\right)$ – уравнение опорной поверхности.

Для сокращения времени вычислений и выполнения условий устойчивости интегрирования момент касания опорной точки с грунтом определяется в точке пересечения прямой $\left[\left(\xi_i^k\right)^n, \left(\xi_i^k\right)^{n+1}\right]$ на *n* шаге интегрирования с уравнением поверхности $f\left(\xi_i^k, \eta_i^k\right)$ [4]. При дальнейшем взаимодействии опорной стойки с грунтом проекции силы реакции на оси неподвижной системы координат $O\xi\eta\varsigma$ определяются в соответствии с принятой реологической моделью грунта. При воздействии опоры шагающего движителя на грунт в нем возникают деформации, величина и характер которых обусловлены действием внешних и внутренних сил, вызывающих относительное смещение частиц. Наиболее простой моделью, описывающей характер взаимодействия опоры с грунтом, является вязко-упругая модель. Для нормальных реакций она имеет вид:

$$N = c_N\Delta_N + k_N\dot{\Delta}_N, \qquad (7)$$

где *N* – нормальная реакция грунта; Δ_N, $\dot{\Delta}_N$ – деформация и скорость деформации грунта; C_N – приведенный коэффициент жесткости грунта; k_N – приведенный коэффициент вязкого трения. Для касательных реакций

$$T = \begin{cases} c_\tau\Delta_\tau + k_\tau\dot{\Delta}_\tau, & \text{при } |T| < T_П, \\ f_{ск}N sign(\dot{\Delta}_\tau), & \text{при } |T| < T_П, \end{cases} \qquad (8)$$

где Δ_τ, $\dot{\Delta}_\tau$, c_τ, k_τ – имеют тот же смысл, что и для нормальных реакций; $T_П$ – сила трения покоя; $f_{ск}$ – коэффициент трения скольжения.

Описанная модель грунта является приближенной, однако ее применение оправдывается не только простотой, но и слабой корреляцией между характером деформирования грунта и большинством анализируемых параметров движения робота.

Программный комплекс расчета параметров шагающего робота

Математическая модель, описывающая динамику пространственного движения робота, реализована в виде комплекса программ на языке C# с использованием .NET Framework 4. Основной задачей программы является расчет и визуализация движения робота по результатам интегрирования дифференциальных уравнений движения. Файл исходных данных содержит управляющие переменные и параметры модели. В состав исходных данных входит признак продолжения решения – ноль или любое положительное целое число. При нулевом значении признака интегрирование начинается с нулевого значения времени и начальных условий по стандартной процедуре. При значении признака, отличного от нуля, интегрирование начинается с начальными условиями, записанными при предыдущем вызове программы. Это позволяет проводить последовательный расчет следующих друг за другом моделируемых режимов движения робота. Так, определение точных значений начальных условий проводилось в результате расчета динамики движения с неработающими приводами шагающих движи-телей.

Основной экран программы представлен на рис. 3. Окно разделено на несколько областей: область «Параметры модели» (рис. 4) отвечает за редактирование, сохранение и загрузку геометрических, весовых и динамических пара-

метров модели робота. Изначально уже установлены предполагаемые значения, однако имеется возможность изменить их во время работы программы.

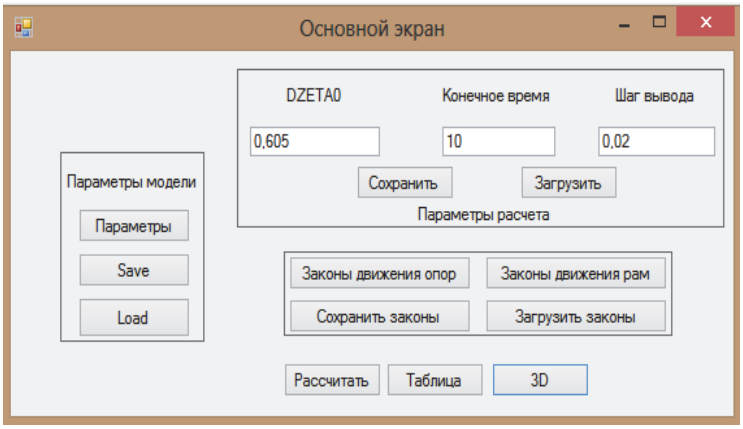


Рис. 3. Основной экран программы

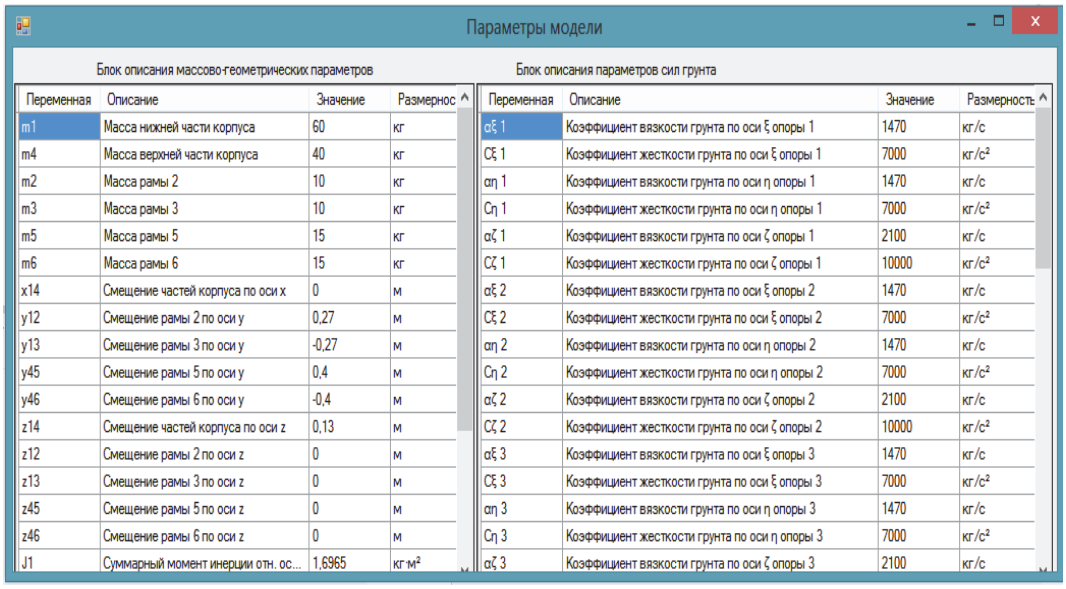


Рис. 4. Окно параметров модели

Блок «Параметры расчета» отвечает за установку начальной высоты, времени расчета, шага вывода данных расчета. Кнопками «Сохранить» и «Загрузить» осуществляется установка начального положения в пространстве робота.

Законы движения опор и рам задаются в соответствующих окнах (рис. 5, 6). В данном случае в полях левое и правое ограничение задаются временные промежутки действия законов, в поле $F(t)$ задается сила, действующая на соответствующую раму в соответствующий промежуток времени, выбрать которую можно в выпадающем списке в нижней правой части окна. В полях $X(t)$ и производная $X(t)$ задаются законы изменения скорости и координат опор.

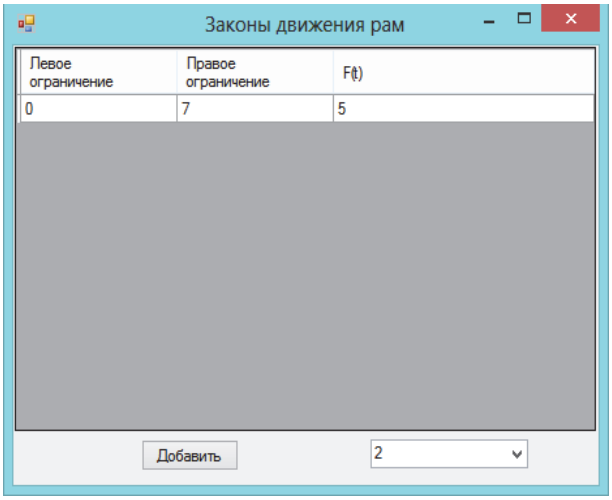


Рис. 5. Окно установки законов движения рам

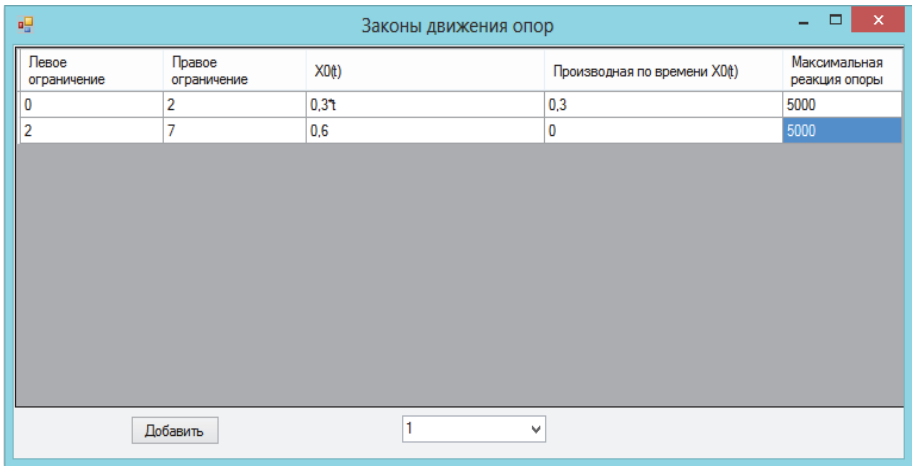


Рис. 6. Окно установки законов движения опор

После нажатия кнопки «Рассчитать» основного окна осуществляется интегрирование системы линейных дифференциальных уравнений по методу Рунге – Кутта – Мерсона. После окончания расчетов выдается таблица, содержащая полученные результаты. Для удобства анализа данных имеется возможность вывода графиков.

Визуализация полученных результатов (рис. 7) осуществляется при нажатии кнопки «3D» основного окна. Модуль визуализации предоставляет возможность наглядного отображения сил реакции опоры, пошагового отображения, перехода на шаг назад и перемотки на начало.

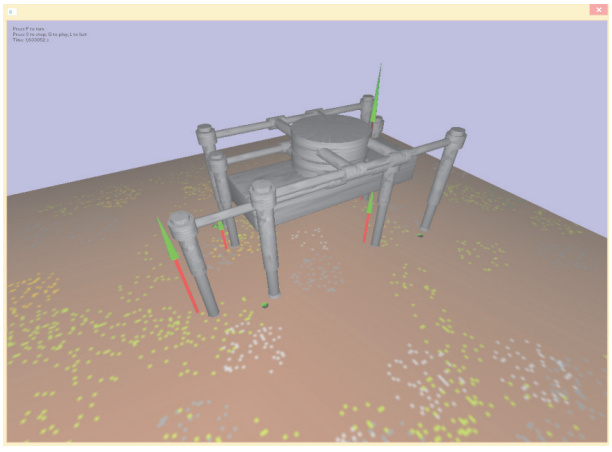


Рис. 7. Модуль визуализации

Математическая модель пространственного движения шагающего робота с ортогональными движителями позволяет решать задачи динамического анализа, проводить проверку допустимости упрощающих предположений при выборе динамических моделей различной сложности, используемых при решении частных задач – устойчивости, распределения реакций в опорах робота при задаваемых траекториях движения, а также определять энергозатраты на перемещение робота [4].

Результаты численного моделирования

При численном моделировании движений робота задавалась циклическая походка с постоянным коэффициентом режима [5]. Расчеты проводились для параметров робота и грунта, приведенных в таблице (рис. 4). На рис. 8 представлены расчетные зависимости нормальных реакций на опорных стойках одного левого борта (рис. 2) при движении по одному из множества старт-стопных режимов [6].

На первом интервале (этапе) движения определяются начальные условия робота, находящегося в покое на деформируемой поверхности. На втором участке движения происходит подъем опорных стоек второй и третьей рам робота. Реакции № 1 и № 2 (рис. 8) становятся нулевыми, а № 5 и № 6 соответственно увеличиваются. Горизонтальное перемещение второй и третьей рам происходит на третьем участке временной характеристики нормальных реакций, что отражается в незначительном изменении реакций пятой и шестой опор (№ 5, № 6). Четвертый участок соответствует опусканию опорных стоек второй и третьей рам (появляются реакции № 1 и № 2). На пятом участке происходит перемещение корпуса робота, обозначенного как части конструкции *1* и *2* на рис. 2.

Проведенные численные исследования позволили сформулировать технические требования к приводам экспериментального образца мобильного робота описанной конструкции.

1. Механическая мощность привода опорных стоек не менее 80 Вт; динамическое усилие – 500 Н; максимальная скорость – 0,17 м/с; ход максимальный – 400 мм; напряжение питания электродвигателя – 24 В.

2. Механическая мощность привода горизонтального перемещения – 160 Вт; максимальный момент на валу привода – 4 Нм; угловая скорость на приводном валу – 425 об/мин.

3. Механическая мощность привода поворота – 60 Вт; максимальный момент на валу привода – 34 Нм; угловая скорость на приводном валу – 17 об/мин.

Рис. 8. Временные диаграммы нормальных реакций

Выводы

Математическая модель пространственного движения шагающего робота с ортогональными движителями позволяет решать задачи динамического анализа, проводить проверку допустимости упрощающих предположений при выборе динамических моделей различной сложности, используемых при решении частных задач – устойчивости, распределения реакций в опорах робота при задаваемых траекториях движения, а также определять энергозатраты на перемещение робота.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Жога, В. В.* Оптимальный закон горизонтального перемещения мобильного робота с ортогональными шагающими движителями / В. В. Жога, А. Е. Гаврилов, А. В. Еременко // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 6(66) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 8). – С. 28–32.

2. *Жога, В. В.* К оценке эффективности шагающих движителей / В. В. Жога // Теория механизмов и машин. № 47. – Харьков, 1989. – С. 3–7.

3. *Гаврилов, А. Е.* Синтез оптимального программного закона перемещения робота с ортогональными шагающими движителями / А. Е. Гаврилов, В. В. Жога, П. В. Федченков // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2011. – № 5. – С. 174–183.

4. *Жога, В. В.* Система показателей качества шагающих транспортных машин / В. В. Жога // Справочник. Инженерный журнал. № 5. – М.: Машиностроение, 1997. – С. 21–28.

5. *Жога, В. В.* Динамический алгоритм стабилизации походки шагающей машины / В. В. Жога, А. Е. Гаврилов // Искусственный интеллект. – 2008. – № 3. – С. 428–443.

6. *Жога, В. В.* Программные движения робота с ортогональным шагающим движителем / В. В. Жога, Ан. Е. Гаврилов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 9(82) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 11). – С. 22–28.

УДК 621.762.4.044

А. В. Крохалев, В. О. Харламов, О. А. Авдеюк, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак

КОМПЬЮТЕРНЫЙ РАСЧЕТ ФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ СЖАТИЯ ПРИ ВЗРЫВНОМ ПРЕССОВАНИИ ПОРОШКОВ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОДЛОЖКАХ

Волгоградский государственный технический университет

kroch@vstu.ru

В работе рассмотрена методика расчетной оценки физических условий сжатия при взрывном нагружении порошков на металлических подложках, основанная на построении (P, u)-диаграмм процесса сжатия.

Ключевые слова: ударная волна, прессование порошков, ударная адиабата.

A. V. Krokhalev, V. O. Kharlamov, O. A. Avdeuk, S. V. Kuzmin, V. I. Lysak

COMPUTER CALCULATION OF COMPRESSION IN EXPLOSIVE LOADING POWDERSON METAL SUBSTRATES

Volgograd State Technical University

In this paper the technique of estimation of the physical conditions of compression under explosive loading of powders on metal substrates, based on the construction of (P, u)-diagrams of the compression process.

Keywords: shock of wave, compression of powders, shock adiabat.

При нанесении на поверхность деталей машин износостойких порошковых покрытий [1] оптимальной является схема нагружения, изображенная на рис. 1 и предусматривающая размещение исходной порошковой смеси непосредственно на поверхности металлической подложки и ее нагружение с помощью накладного заряда ВВ, отделенного от порошка промежуточной прокладкой.

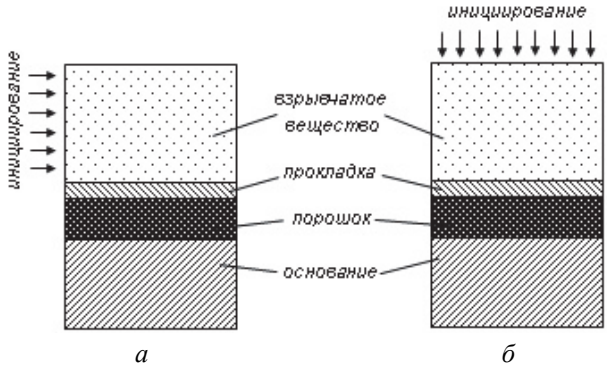


Рис. 1. Схема нагружения порошка взрывом:
а – скользящее нагружение; *б* – нагружение нормально падающей детонационной волной

Большинство имеющихся в настоящее время расчетных моделей оценки физических условий сжатия, реализуемых при использовании данной схемы, основано на решении задачи о метании продуктами детонации тел переменной массы и не учитывает процессов прохождения ударной волной самой прокладки и ее отражений от поверхности подложки и промежуточной прокладки. Это обстоятельство ограничивает расчет рассмотрением только первой ударной волны, распространяющейся по исходному неуплотненному порошку, и не позволяет оценить параметры его сжатия в отраженных ударных волнах. В полном объеме и точной постановке, однако, рассматриваемая задача практически не поддается решению, в связи с чем авторами была разработана методика приближенного решения, основанная на использовании метода (P, u)-диаграмм, базирующегося на поэтапном определении характеристик падающих и отраженных волн путем анализа пересечений ударных адиабат прокладки, порошка, основания и продуктов детонации в координатах «давление – массовая скорость» [4].

Необходимые для проведения расчетов ударные адиабаты продуктов детонаций, прокладки, порошка и основания строились по известной методике [2]. С целью реализации расчетов была составлена программа [3], общий вид основного рабочего окна которой приведен на рис. 2.

В окне предусмотрен выбор схемы нагружения и ввод необходимых для моделирования характеристик ВВ, порошкового материала, а также материалов промежуточной прокладки и основания, на котором располагается порошок. В результате расчета в поле табличного вывода выдаются параметры падающих и отраженных ударных волн в прокладке, порошке и основании, по которым может быть построена полная (P, u)-диаграмма процесса (рис. 3).

Помимо перечисленных параметров программа выдает время действия импульса макси-

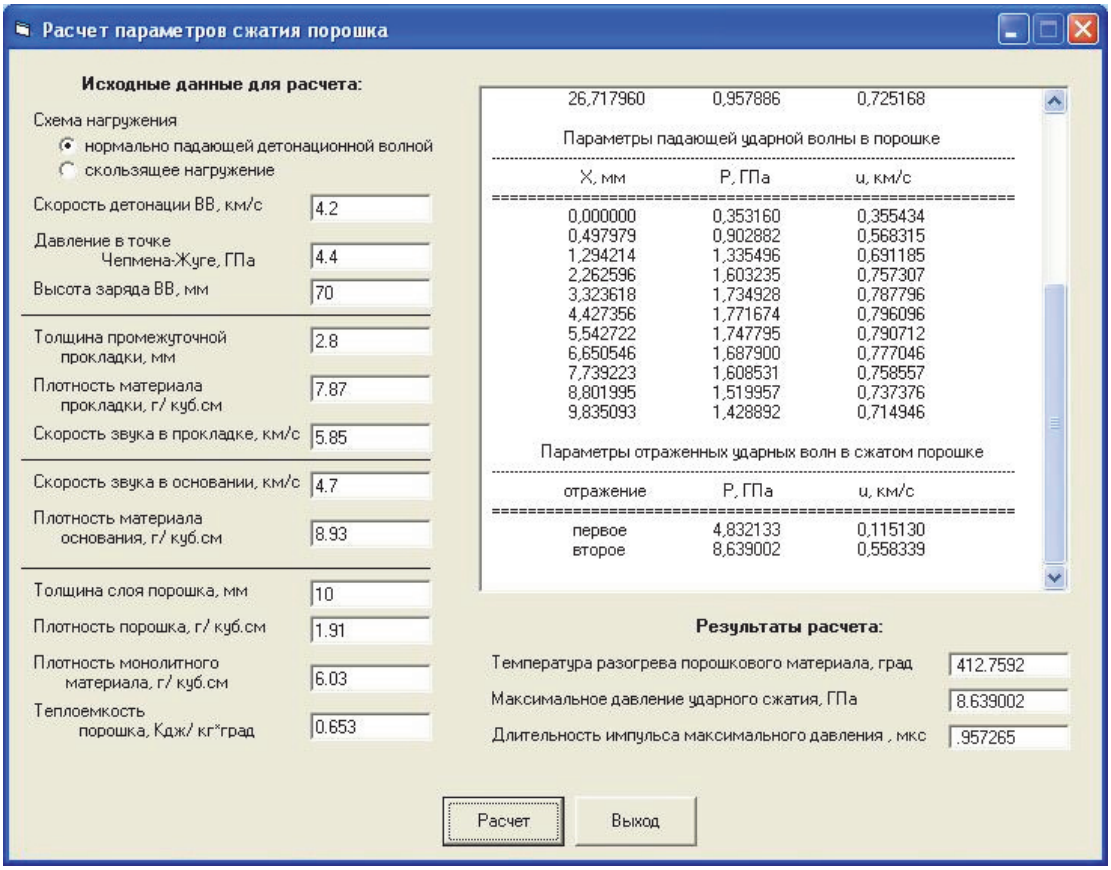


Рис. 2. Вид рабочего окна программы

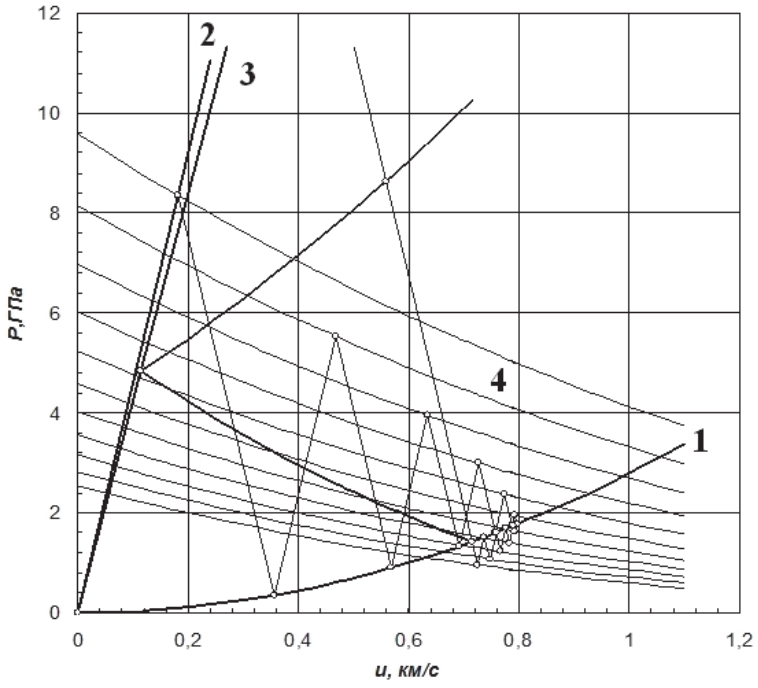


Рис. 3. Пример (P, u)-диаграммы процесса взрывного прессования:
1 – ударная адиабата порошкового материала; *2* – ударная адиабата промежуточной прокладки;
3 – ударная адиабата основания; *4* – адиабаты взрывчатого вещества в различные моменты времени

мального давления при взрывной обработке, которое для рассматриваемой схемы нагружения равно удвоенному времени прохождения ударной волной промежуточной прокладки,

и температуру разогрева порошка, вычисленную на основании приращения его внутренней энергии за фронтом падающей ударной волны.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Получение износостойких покрытий из смесей порошков карбида хрома с металлической связкой с использованием взрывного нагружения / А. В. Крохалев, В. О. Хаарламов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 5 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Сварка взрывом и свойства сварных соединений» ; вып. 4). – С. 117–122.

2. Компьютерный расчет параметров сжатия при нанесении порошковых покрытий взрывом / А. В. Крохалев, В. О. Харламов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 5 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Сварка взрывом и свойства сварных соединений» ; вып. 4). – С. 110–116.

3. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2010616142 (РФ). Программа для расчета параметров сжатия порошковых материалов при импульсном нагружении (взрывное компактирование) / А. В. Крохалев, В. О. Харламов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак. – 2010.

4. Компьютерный расчет параметров сжатия при взрывном нагружении порошков на металлических подложках / А. В. Крохалев, В. О. Харламов, О. А. Авдеюк, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак / Тезисы МНПК «Инновационные информационные технологии», Прага, 23–27 апреля 2012 г. – С. 210–212.

УДК 669.018.25.017

А. В. Крохалев, В. О. Харламов, О. А. Авдеюк, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак

КОМПЬЮТЕРНОЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ КАРБИДА ХРОМА

Волгоградский государственный технический университет

kroch@vstu.ru

Приведены результаты термодинамического моделирования фазовых равновесий в системах Cr-C-Cu, Cr-C-Ni и Cr-C-Cr. Описаны особенности возможного взаимодействия между компонентами карбидохромовых твердых сплавов с различной связкой.

Ключевые слова: компьютерное термодинамическое моделирование, квазибинарное сечение, фазовый состав сплавов.

A. V. Krokhalev, V.O. Kharlamov, O. A. Avdeuk, S. V. Kuzmin, V. I. Lysak

COMPUTER SIMULATION OF THE PHASE HARD ALLOYS BASED ON CHROMIUM CARBIDE

Volgograd State Technical University

The results of thermodynamic modeling of phase equilibria in the systems Cr-C-Cu, Cr-C-Ni and Cr-C-Cr. The features of possible interact-tion between the components karbidohromovyh hard alloys with a different band.

Keywords: computational thermodynamic modeling, quasi-binary section, phase composition of alloys.

В настоящее время твердые сплавы чаще всего получают путем прессования исходных смесей порошков тугоплавких карбидов с металлами и спекания. Это накладывает определенные ограничения на подбор состава материалов, связанные, прежде всего, с химической совместимостью компонентов сплавов, и не позволяет принципиально повысить их эксплуатационные свойства. Решение этих проблем может быть найдено путем использования при компактировании порошковых смесей карбидов с металлами энергии взрыва. Взрывная обработка порошков позволяет одновременно достигать и давлений, достаточных для уплотнения порошков до практически беспористого состояния, и температур, достаточных для сварки структурных компонентов порошкового материала в единое целое [1, 2].

Для анализа процессов, происходящих при ударно-волновом воздействии на порошковые смеси, большое значение имеет информация о характере межфазного взаимодействия между их компонентами. При использовании новых, малоизученных составов твердых сплавов подобная информация, как правило, отсутствует. В этих условиях приходится прибегать к проведению компьютерного термодинамического моделирования. Так, например, при исследовании триботехнических твердых сплавов на основе карбида хрома Cr_3C_2 с медной, никелевой и титановой связкой нами с использованием программного комплекса Thermo-Calc 5 были построены политермические разрезы тройных систем Cr-C-Cu, Cr-C-Ni и Cr-C-Cr, соответствующие квазибинарным системам Cr_3C_2-Cu, Cr_3C_2-Ni и Cr_3C_2-Ti (рис. 1–3).

Анализ полученных разрезов показал, что при использовании медной связки химическое взаимодействие между компонентами сплава практически отсутствует и жидкая фаза может

появляться при температуре плавления меди. Сплавы с никелевой связкой являются классическими квазиэвтектическими сплавами: жидкая фаза может появляться в них при температуре выше 1200 ºС, что существенно ниже температуры плавления никеля. При этом карбидная фаза способна растворяться в жидкости при нагреве и выпадать из нее при охлаждении. В результате при комнатной температуре фазовый состав сплавов будет близок к исходному.

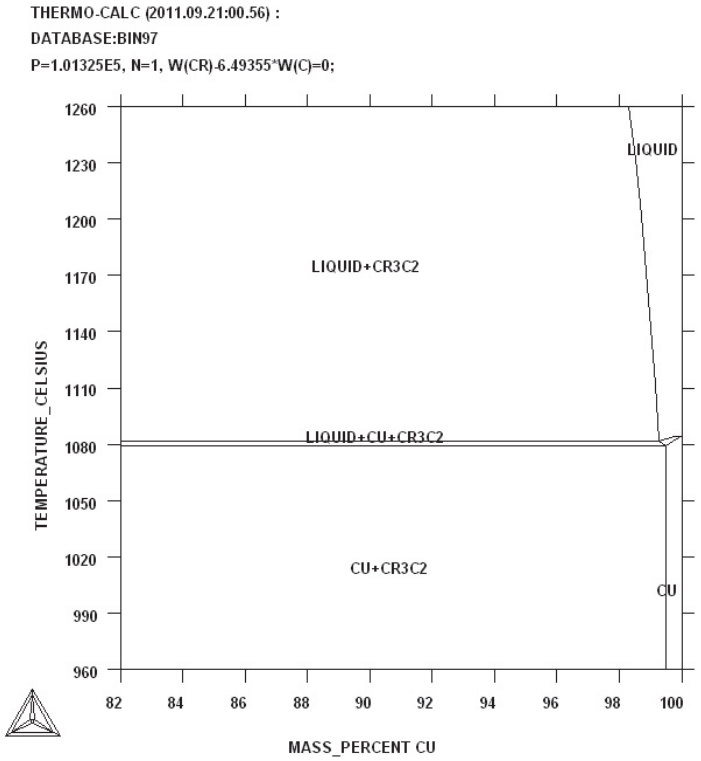


Рис. 1. Квазибинарное сечение Cr_3C_2-Cu системы Cr-C-Cu

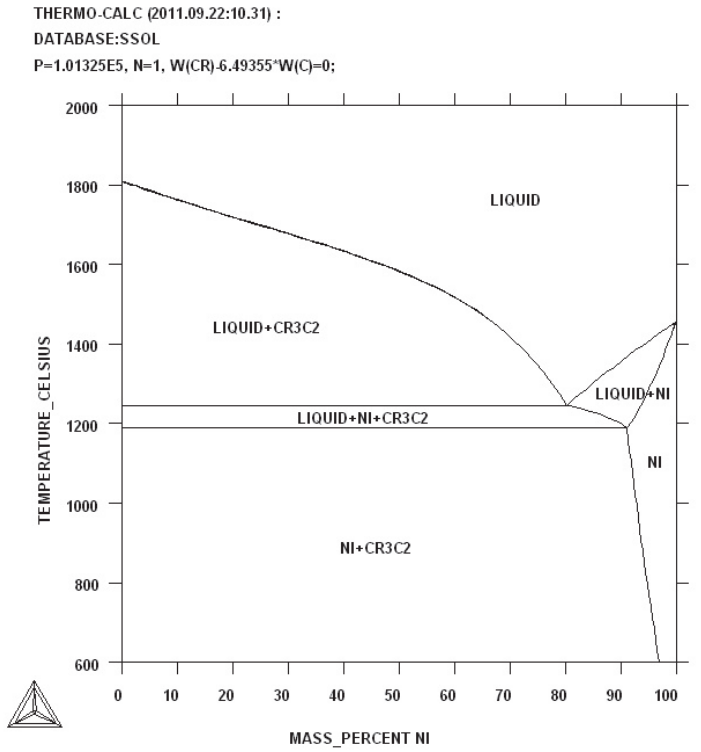


Рис. 2. Квазибинарное сечение Cr_3C_2-Ni системы Cr-C-Ni

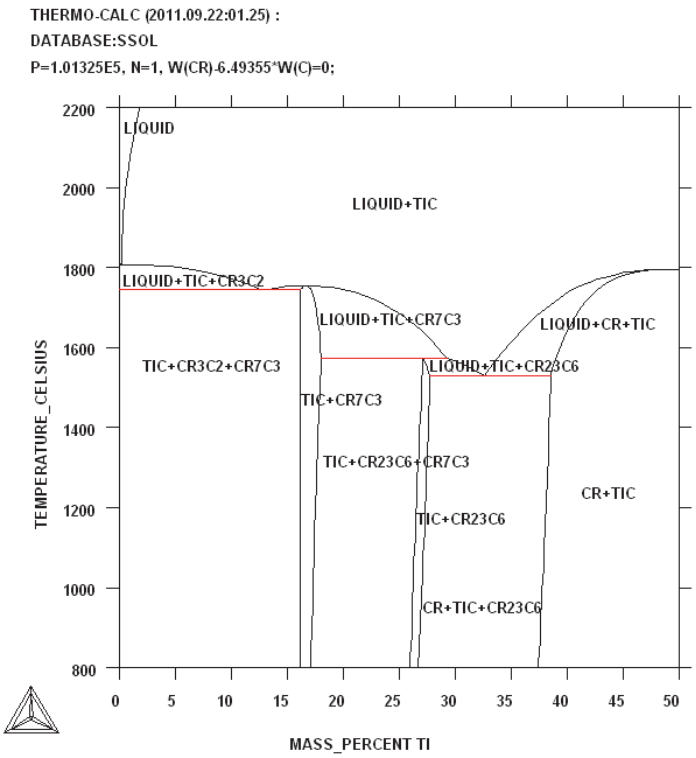


Рис. 3. Квазибинарное сечение Cr_3C_2-Ti системы Cr-C-Ti

В сплавах карбида хрома с титаном возможно химическое взаимодействие компонентов, ведущее к образованию карбида титана и обедненных углеродом карбидов хрома или даже чистого хрома. Спекание таких сплавов в отличие от сплавов с медью и никелем без изменения фазового состава практически невозможно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Получение износостойких покрытий из смесей порошков карбида хрома с металлической связкой с использованием взрывного нагружения / А. В. Крохалев, В. О. Харламов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 5 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Сварка взрывом и свойства сварных соединений» ; вып. 4). – С. 117–122.

2. Компьютерное моделирование фазового состава твердых сплавов на основе карбида хрома / А. В. Крохалев, В. О. Харламов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак // Тезисы МНПК «Инновационные информационные технологии», Прага, 23–27 апреля 2012 г. – С. 207–209.

УДК 621.762.4.044

А. В. Крохалев, В. О. Харламов, О. А. Авдеюк, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ КАРБИДНЫХ ЧАСТИЦ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ ПРЕССОВАНИИ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

Волгоградский государственный технический университет
kroch@vstu.ru

Приведены модельные представления и результаты расчетов кинетики выравнивания температуры по сечению частиц порошка при обработке ударными волнами.

Ключевые слова: математическая модель процесса, конечно-разностная аппроксимация, моделирование процесса сжатия порошка в ударных волнах.

A. V. Krokhalev, V. O. Kharlamov, O. A. Avdeuk, S. V. Kuzmin, V. I. Lysak

COMPUTER SIMULATION OF THE TEMPERATURE FIELD IN CARBIDE PARTICLES EXPLOSIVE PRESSING HARD ALLOYS

Volgograd State Technical University

Presents model concepts and results of calculations of the kinetics of temperature equalization in the cross section of powder particles in the processing of shock waves.

Keywords: mathematical model of the process, the finite-difference approximation, the simulation of the compression of powder in shock waves.

Расчет параметров ударно-волнового сжатия при взрывной обработке порошковых слоев на монолитных подложках может достаточно точно предсказать значение максимального давления, времени его действия и средней температуры разогрева порошка в процессе обработки [1…3]. Достоверность первых двух параметров особых сомнений не вызывает. Использование третьего требует, однако, определенной осторожности, так как известно, что при прохождении ударной волны по порошку распределение температуры по сечению его частиц может быть существенно неравномерным вследствие сосредоточенности процессов высокоскоростной деформации в поверхностных слоях частиц [4]. В этой связи оценка времени выравнивания температуры по сечению частиц порошка является важным этапом моделирования процесса сжатия порошка в ударных волнах.

Для осуществления этой оценки авторами были использованы следующие модельные представления: форма частиц порошка принималась сферической; температурное поле внутри частицы – центрально симметричным; выделение тепла при пластической деформации считалось сосредоточенным в поверхностном слое толщиной, соответствующей 10 % радиуса частицы. Температура в центральной части частицы в начальный момент времени принималась равной исходной температуре порошка, а в поверхностном слое выбиралась, исходя из равенства теплосодержания частицы до и после выравнивания температуры по ее сечению.

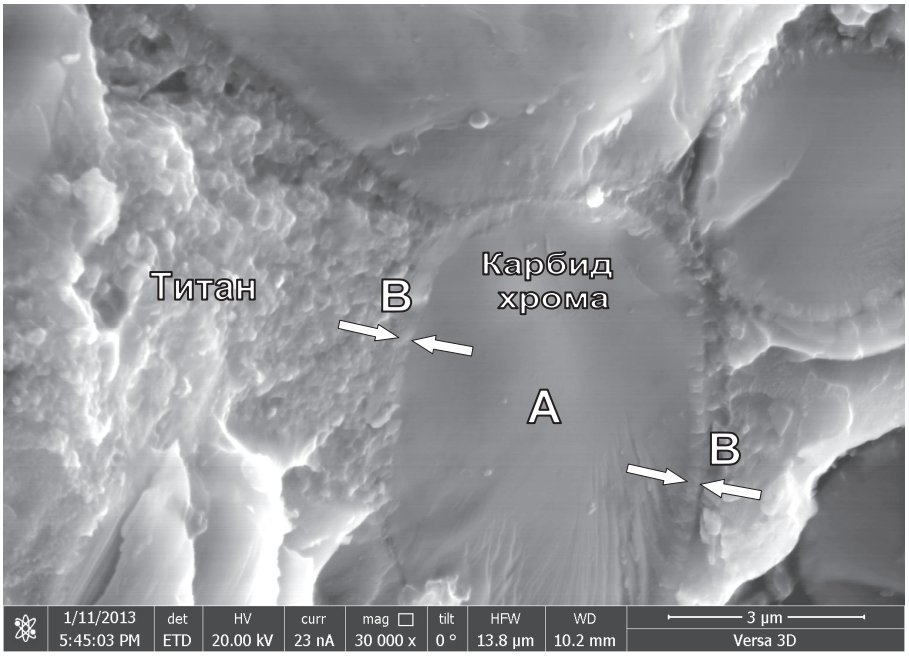


Рис. 1. Транскристаллитный излом твердого сплава карбида хрома с титаном, полученного взрывом

Основой подобных допущений послужили результаты фрактографических исследований твердых сплавов на основе карбида хрома, выполненных с использованием многофункционального сканирующего электронного микроскопа Versa 3D, в результате которых была выявлена округлая форма частиц карбидной фазы (рис. 1) и обнаружено существенное различие в свойствах и, соответственно, в характере разрушения центральной части частицы (зона А) и ее поверхностного слоя, толщиной приблизительно в 10…20 раз меньшей, чем размер частицы (зона В).

Принятые допущения позволили записать математическую модель процесса в виде:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial t}{\partial \tau} = \dfrac{\lambda}{c\rho}\cdot\left(\dfrac{\partial^2 t}{\partial x^2} - \dfrac{2}{S-x}\cdot\dfrac{\partial t}{\partial x}\right) \\ \left(\dfrac{\partial t}{\partial x}\right)_{x=0} = 0 \\ \left(\dfrac{\partial t}{\partial x}\right)_{x=S} = 0 \\ t(x,0) = \begin{cases} t_{\max}, & \text{при} \quad 0 < x < 0{,}1\cdot S \\ t_0, & \text{при} \quad 0{,}1\cdot S < x < S \end{cases} \end{cases},$$

где $t = t(x,\tau)$ – температура; λ, c, ρ – теплопроводность, теплоемкость и плотность материала частиц порошка; τ – время; S – радиус частицы

порошка; $x = 0$ и $x = S$ – поверхность и центр частицы.

Полученная система уравнений решалась методом конечных разностей с использованием четырех точечной неявной разностной схемы. Для конечно-разностной аппроксимации граничных условий использовали метод неопределенных коэффициентов [5]. Использование численного метода решения уравнения позволяет учитывать нелинейный характер коэффициентов, задающих тепловые параметры материала.

Расчет проводился для случая взрывного нагружения слоя порошковой смеси карбида хрома с 14 % титана высотой 7 мм на стальной подложке накладным зарядом взрывчатого вещества через стальную промежуточную прокладку толщиной 0,75 мм по известной схеме [6]. Размер карбидных частиц в исходной порошковой смеси был равен 3,5 мкм.

Процесс взрывной обработки при использовании выбранной схемы нагружения сопровождается распространением по порошковой смеси падающей ударной волны и ее отражением от поверхности монолитной подложки и промежуточной прокладки. При этом рост температуры порошкового материала происходит в основном в первой волне, движущейся по невозмущенному порошку, а максимальное давление его сжатия достигается в отраженных ударных волнах.

Расчеты, выполненные по методике [1, 2], показывают, что длительность распространения по порошку падающей ударной волны в нашем случае составляет величину порядка 23 мкс, длительность импульса максимального давления в отраженных ударных волнах – 0,256 мкс. При этом в процессе обработки достигается средняя температура 600 ºС и давление 12,3 ГПа. В рамках принятых допущений о первоначальном распределении температуры по сечению частиц порошка это означает, что температура на их поверхности может достигать 1500 ºС.

Результаты расчета кинетики выравнивания температуры по объему частицы порошка приведены на рис. 2. Из рисунка следует, что первоначальная разница температур в 1500 ºС падает до 200 ºС за 0,08 мкс, а через 0,2 мкс температуры поверхности и центра частицы становятся практически одинаковыми.

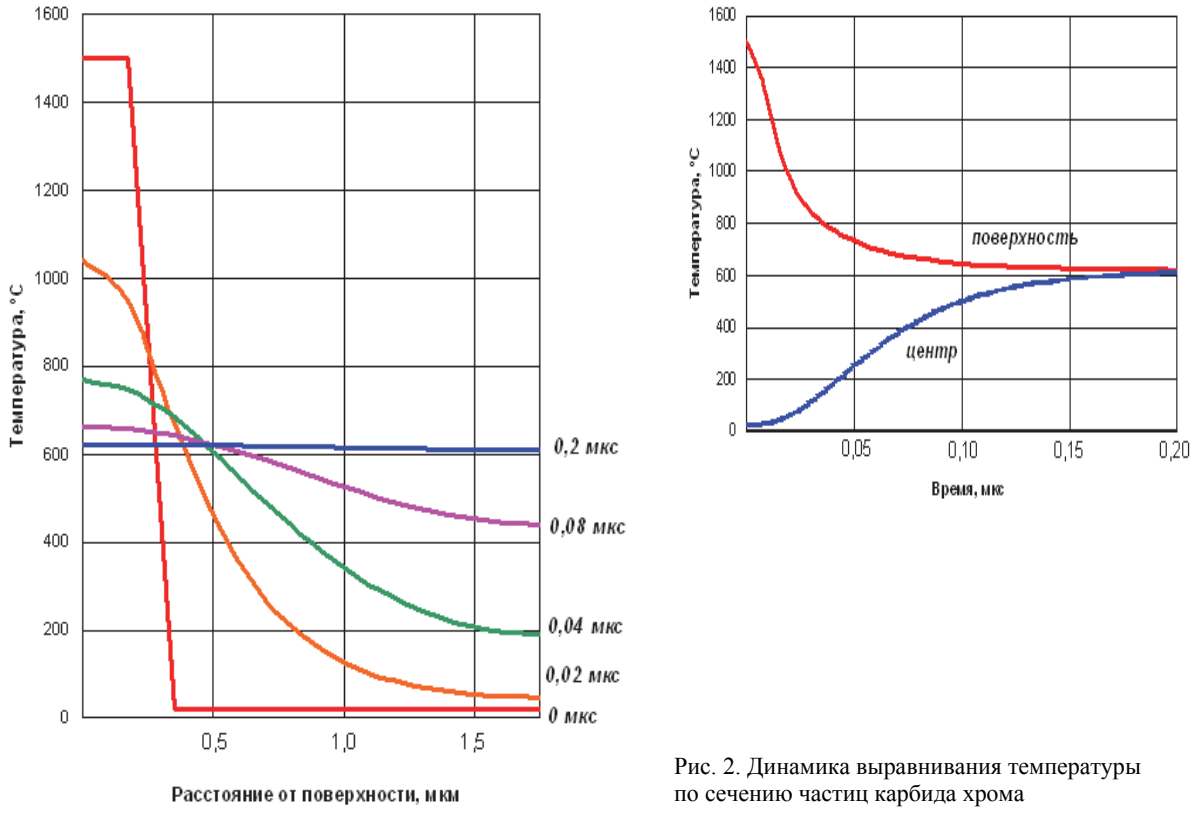


Рис. 2. Динамика выравнивания температуры по сечению частиц карбида хрома

Применительно к нашему случаю это означает, что к моменту окончательного сжатия порошковой смеси импульсом максимального давления температура порошка соответствует расчетной средней температуре 600 ºС.

Подводя итоги, следует констатировать, что

неоднородность температурного поля по сечению частиц порошка при взрывном прессовании по схемам, использующим многократное отражение ударных волн, будет проявляться на заключительных стадиях прессования лишь в случае достаточно крупнозернистых порошков (с размером частиц, превышающим по крайней мере 3,5 мкм).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Компьютерный расчет параметров сжатия при нанесении порошковых покрытий взрывом / А. В. Крохалев, В. О. Харламов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 5 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Сварка взрывом и свойства сварных соединений» ; вып. 4). – С. 110–116.

2. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2010616142 (РФ). Программа для расчета параметров сжатия порошковых материалов при импульсном нагружении (взрывное компактирование) / А. В. Крохалев, В. О. Харламов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак. – 2010.

3. Компьютерное моделирование температурного поля карбидных частиц при взрывном прессовании твердых сплавов / А. В. Крохалев, В. О. Харламов, О. А. Авдеюк, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак // Тезисы МНПК «Инновационные информационные технологии», Прага, 23–27 апреля 2012 г. – С. 248–250.

4. *Рогозин, В. Д.* Взрывная обработка порошковых материалов : монография / В. Д. Рогозин; ВолгГТУ. – Волгоград, 2002. – 136 с.

5. Элементы теории систем и численные методы моделирования процессов тепломассопереноса / В. С. Швыдкий [и др.]. – М.: Интермет Инжиниринг, 1999. – 528 с.

6. Получение износостойких покрытий из смесей порошков карбида хрома с металлической связкой с использованием взрывного нагружения / А. В. Крохалев, В. О. Харламов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 5 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Сварка взрывом и свойства сварных соединений» ; вып. 4). – С. 117–122.

УДК 681.586:621.37

В. К. Михайлов, И. А. Плешаков

РАБОТА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ ДЛЯ ПРОСТЕЙШИХ МОДЕЛЕЙ ТЕРМОКАМЕРЫ: ФОРМИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЮЩЕЙ ФУНКЦИИ ДЛЯ ТЕПЛОВОЙ МОДЕЛИ С КОСВЕННЫМ ПОДОГРЕВОМ

Волгоградский государственный технический университет
ephys@vstu.ru

Построен алгоритм управления температурой в рабочем объеме термокамеры известной конструкции с косвенным подогревом на основе разработанного ранее подхода.

Ключевые слова: алгоритм управления, линейный инерционный объект, тепловая модель термокамеры.

V. K. Mikhailov, I. A. Pleshakov

THE WORK OF ALGORITHM OF CONTROL IN TEMPERATURE FOR THE ELEMENTARY MODELS OF A HEAT-CHAMBER: FORMATION OF THE OPERATING FUNCTION FOR THE THERMAL MODEL WITH INDIRECT HEATING

Volgograd State Technical University

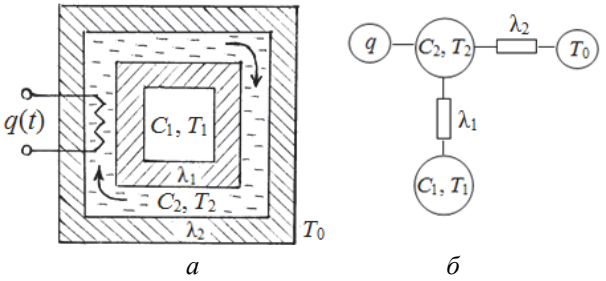
The algorithm of control the temperature in working volume of a heat chamber of a known design with indirect heating on the basis of developed before the approach is constructed.

Keywords: algorithm of the control, linear inertial object, thermal model of a heat-chamber.

Ранее, в работе [1], нами был предложен алгоритм управления температурой в рабочем объеме термокамеры при прямом подогреве на основе подхода, изложенного в статьях [2, 3].

Рассмотрим теперь простейшую модель термокамеры с косвенным нагреванием рабочего объема, в случае, когда тепло от нагревателя передается непосредственно какому-либо другому телу, например, воде, которая, циркулируя по замкнутой и охватывающей рабочий объем оболочке, передает ему часть полученного тепла через теплопроводящие стенки, как показано на рисунке, поз. *а*.

Тепловой граф, соответствующий такой модели, изображен на рисунке, поз. *б*. На основе этого



а *б*

Модель термокамеры с косвенным нагреванием рабочего объема (*а*) и ее тепловой граф (*б*):
$q(t)$ [Дж/с] – тепловая мощность, поступающая от нагревателя; λ_1 [Дж/(К·с)] – теплопроводность стенок между водой и рабочим объемом; λ_2 [Дж/(К·с)] – теплопроводность внешних стенок камеры; T_1 [К] – температура в рабочем объеме; T_2 [К] – температура подогреваемой воды; C_1 [Дж/К] – теплоемкость рабочего объема; C_2 [Дж/К] – суммарная теплоемкость воды и тонкостенной оболочки; T_0 [К] – температура окружающей среды

графа легко составить уравнения теплового баланса для тел C_1 и C_2:

$$\left.\begin{aligned} C_1\frac{dT_1}{dt} &= \lambda_1(T_2 - T_1),\\ C_2\frac{dT_2}{dt} &= q(t) - \lambda_1(T_2 - T_1) - \lambda_2(T_2 - T_0)\end{aligned}\right\}.$$

Полагая T_0=0, т. е. ведя отсчет температур T_1 и T_2 от температуры окружающей среды T_0, получаем:

$$\left.\begin{aligned} C_1\frac{dT_1}{dt} &= \lambda_1(T_2 - T_1),\\ C_2\frac{dT_2}{dt} &= q(t) - \lambda_1(T_2 - T_1) - \lambda_2 T_2\end{aligned}\right\}. \qquad (1)$$

Поскольку в этой модели, как и в предыдущей, два эквитемпературных тела C_1 и C_2, и описывается она двумя дифференциальными уравнениями (1), то эта модель термокамеры также будет являться моделью второго порядка. Матрица структуры A [2] для системы (1) будет такой:

$$\mathrm{A} = \begin{bmatrix} -\frac{\lambda_1}{C_1} & \cdots & \frac{\lambda_1}{C_1} \\ \cdots & & \cdots \\ \frac{\lambda_1}{C_2} & \cdots & -\frac{\lambda_1+\lambda_2}{C_2} \end{bmatrix},$$

а матрица управления [2]:

$$\mathrm{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/C_2 \end{bmatrix}.$$

Построим теперь управление $q(t)$ температурой T_1 в рабочем объеме камеры, считая, что эталонный закон ее изменения $\theta_1(t)$ задан, а структурные параметры C_1, C_2, λ_1 и λ_2 известны.

Пусть температура T_1 изменяется точно в соответствии со своей *эталонной функцией* $\theta_1(t)$, т. е. $T_1(t) = \theta_1(t)$. Тогда *вспомогательная эталонная функция* $\theta_2(t)$, которой будет следовать температура T_2, сразу определяется из первого уравнения системы (1):

$$\theta_2 = \theta_1 + \frac{C_1}{\lambda_1}\frac{d\theta_1}{dt}, \qquad (2)$$

а управление $q(t)$ – из второго:

$$q(t) = \frac{C_1C_2}{\lambda_1}\frac{d^2\theta_1}{dt^2} + (C_1\frac{\lambda_1+\lambda_2}{\lambda_1} + C_2)\frac{d\theta_1}{dt} + \lambda_2\theta_1. \qquad (3)$$

Следует отметить, что здесь функции $\theta_2(t)$ и $q(t)$ не зависят от начального условия $T_2(0)$. Это объясняется тем, что в данной модели внутри рабочего объема C_1 нет источников тепла и, следовательно, температура T_1 определяется только температурой внешнего тела C_2, т. е. если функция $T_1(t)=\theta_1(t)$ задана, то этот заданный закон $\theta_1(t)$ может быть обеспечен только вполне определенным законом изменения температуры $T_2(t)$, определяемым из первого уравнения системы (1) и задаваемым формулой (2).

Проведем, как и ранее, линеаризацию эталонной функции $\theta_1(t)$, т. е. аппроксимируем ее на каждом интервале управления отрезком

$$\theta_1 = at + b,$$

где a и b – коэффициенты на данном интервале. Тогда для этого интервала вместо (2) и (3) можно записать:

$$\theta_2 = at + b', \qquad (4)$$

где $b' = b + a\frac{C_1}{\lambda_1}$,

$$q = \lambda_2 at + \lambda_2 b + a\left(C_1\frac{\lambda_1+\lambda_2}{\lambda_1} + C_2\right). \qquad (5)$$

Управление (5) является идеальным, т. е. когда температуры T_1 и T_2 изменяются по своим эталонным законам $\theta_1(t)$ и $\theta_2(t)$. Если же $T_2(t)$ отклонилась от своей эталонной функции $\theta_2(t)$ на некотором интервале, то управление $q(t)$ следует скорректировать, не дожидаясь, пока через некоторое время задержки $\tau_з$ начнет отклоняться и температура T_1 в рабочем объеме. Для этого на следующем интервале вместо эталонной функции (4) вводится *корректирующая*

$$\tilde{\theta}_2(t) = \tilde{a}t + \tilde{b},$$

где $\left.\begin{aligned}\tilde{b} &= T_2(0),\\ \tilde{a} &= \frac{1}{\tau}(\theta_2(\tau) - T_2(0))\end{aligned}\right\}$; τ – интервал управления; $T_2(0)$ – реальная температура, измеренная в начале следующего интервала управления.

Тогда корректирующее управление на интервале, следующем после обнаружения ошибки $\Delta T_2(0)=T_2(0)-\theta_2(0)$, будет определяться из второго уравнения системы (1) подстановкой в него $\theta_1=at+b$ вместо T_1, и $\tilde{\theta}_2(t) = \tilde{a}t + \tilde{b}$ вместо T_2:

$$q = C_2\frac{d\tilde{\theta}_2}{dt} + (\lambda_1+\lambda_2)\tilde{\theta}_2 - \lambda_1\theta_1 =$$
$$= \left[(\lambda_1+\lambda_2)\tilde{a} - \lambda_1 a\right]t + \left[\tilde{a}C_2 + \tilde{b}(\lambda_1+\lambda_2) - \lambda_1 b\right].$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Михайлов, В. К.* Работа алгоритма управления температурой для простейших моделей термокамеры. Формирование управляющей функции для тепловой модели с прямым подогревом / В. К. Михайлов, И. А. Плешаков // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. научн. ст. № 15(102) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 15). – С. 23–26.

2. *Михайлов, В. К.* Принцип построения алгоритма управления состоянием линейных инерционных объектов / В. К. Михайлов, И. А. Плешаков // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. научн. ст. № 10(97) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 14). – С. 36–41.

3. *Михайлов, В. К.* Принцип построения алгоритма управления от одного источника / В. К. Михайлов, И. А. Плешаков // Извести\ ВолгГТУ : межвуз. сб. научн. ст. № 15(102) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 15). – С. 19–22.

4. *Янушевский, Р. Т.* Управление объектами с запаздыванием / Р. Т. Янушевский. – М.: Наука, 1978. – 416 с.

5. *Разоренов, Г. Н.* Теория и системы оптимального управления / Г. Н. Разоренов, А. А. Самарин. − М.: МО, 2007.− 476 с.

6. *Разоренов, Г. Н.* Метод синтеза законов «мягкого» и «сверхмягкого» управления конечным состоянием динамических систем / Г. Н. Разоренов // Мехатроника, автоматизация, управление. − 2011. − № 4. – С. 2–11.

7. *Семенов, В. Г.* Математическая модель микроклимата теплицы / В. Г. Семенов, Е. Г. Крушель // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. научн. ст. № 6 (54) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 6). – С. 32–35.

УДК 62-529

А. Д. Мохов, А. С. Олейников

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШИРОКОВЕЩАТЕЛЬНОГО КАНАЛА ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ВРЕМЕННЫХ ЗАДЕРЖЕК В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ШАГАЮЩИМ ДВИЖИТЕЛЕМ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

Волгоградский государственный технический университет

vm@vstu.ru

Рассмотрена проблема минимизации временных задержек при передаче управляющих сигналов в системах управления большой размерности. В работе приводится архитектура системы управления, взаимодействие между элементами в которой происходит с использованием широковещательной передачи сообщений. Приведено сравнение временных задержек для систем управления с последовательным режимом передачи сообщений для системы управления роботом с ортогонально-поворотными движителями.

Ключевые слова: система управления, шагающий движитель, широковещательный канал.

A. Mokhov, A. Oleynikov

USING BROADCASTING FOR MINIMIZE TIME DELAYS IN THE CONTROL SYSTEM OF MOBILE ROBOT WITH WALKING DRIVER

Volgograd State Technical University

The problem of minimizing the time delay in the transmission of control signals in the control systems of large dimension is described. The architecture of the control system, in which the interaction between elements carries out with use of broadcast mode communications, is proposed. The article contains comparison of the time delays for control systems with sequential mode of communication for the system of the robot with orthogonally-rotating drive.

Keywords: control system, motion motor, broadcasting.

В системах управления движениями робототехнических систем особенно актуальна такая характеристика, как время передачи сообщений между элементами системы управления. С увеличением количества исполнительных механизмов и сенсоров время опроса устройств начинает оказывать значительное влияние на формирование управляющих сигналов, которое необходимо учитывать.

Для любого из вариантов рабочих циклов системы управления роботом [1] одной из центральных проблем является сокращение времени опроса нескольких или всех измерительных устройств.

В большинстве подобных систем управляющие сигналы направляются одному выбранному элементу. К примеру, для систем, построенных на основе TORP: The Open Robot Project [2], доступен метод, осуществляющий запрос значения измеряемой величины только с одного датчика.

В системе, управляющей движением шагающей машины с ортогонально-поворотными движителями [4], применен коммуникационный протокол Modbus. Программные драйвера для работы с Modbus-сетями реализованы для большинства систем контроля и управления. ModBus реализует последовательный режим передачи сообщений, в связи с этим запрос в такой сети отправляется каждому устройству отдельно, поэтому при увеличении количества устройств в сети временные задержки при опросе нескольких устройств будут достаточно велики. Экспериментально для вышеуказанной

системы управления шагающей машиной, в составе которой присутствуют 20 датчиков и 20 исполнительных механизмов, получено время постоянной сетевой задержки такой операции – 305 мс. Тогда во время движения привода с максимальной скоростью – 635 мм/с – ошибка в определении положения стойки достигает

$$\delta = 305 \text{ мс} * 635 \text{ мм/с} = \\ = 0{,}305 \text{ с} * 0{,}635 \text{ м/с} \approx 19 \text{ см}.$$

Предлагаемым вариантом решения вышеописанной проблемы является создание такой системы управления, в которой будет возможность передачи сигналов с запросами одновременно нескольким устройствам.

Для реализации взаимодействия функциональных элементов шагающей машины может быть использован широковещательный канал [3]. Это позволит сократить количество формируемых запросов на получение данных, что уменьшит, соответственно, время, необходимое для составления полной картины состояния робота. Функциональная схема системы на основе широковещательного канала приведена на рис. 1.

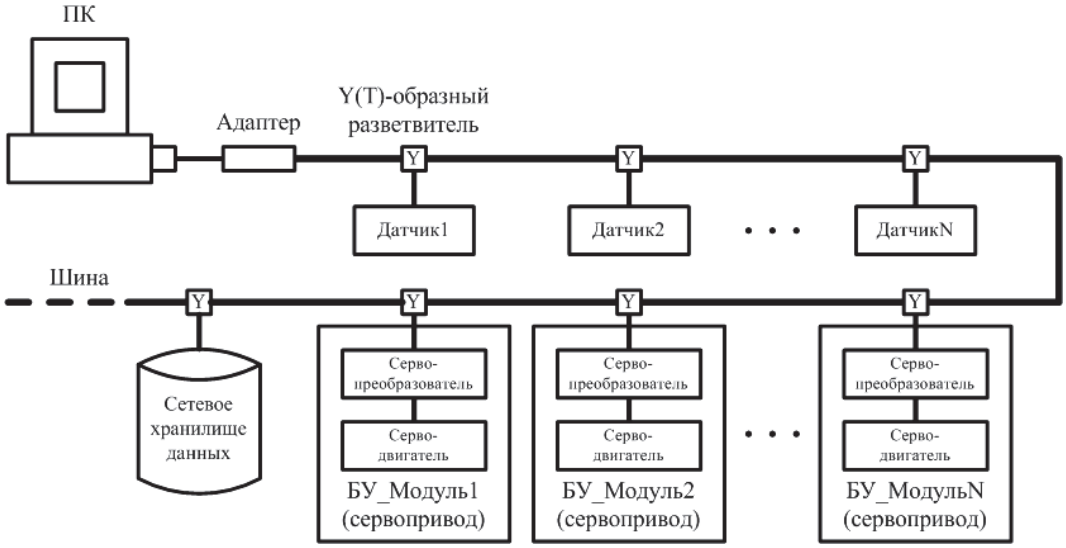


Рис. 1. Функциональная схема системы управления шагающей машины с ортогональными движителями на основе широковещательного канала

Для подключения персонального компьютера к шине необходим адаптер, преобразующий пересылаемые данные в кадры, соответствующие формату, который используется в системе. Связь может быть реализована с помощью любого интерфейса персонального компьютера.

Подключение измерительных и исполнительных устройств производится Y(T)-образными разветвителями.

Сервоприводы, выступающие в роли исполнительных устройств, состоят из блоков управления – сервопреобразователей, имеющих соответствующий интерфейс для взаимодействия с общей шиной, и непосредственно серводвигателей.

Для оценки и сравнения временных задержек рассмотрим семейство протоколов, позволяющих осуществлять широковещательную передачу сообщений – протоколы, основанные на промышленном стандарте CAN. Основным преимуществом стандарта CAN является высокая устойчивость к помехам, что в условиях постоянных вибраций при движении является одним из важных критериев выбора коммуникационного протокола.

Для нижней оценки времени реакции системы на внешние запросы примем, что общая длина шины CAN не более 40 м. В таком случае кадры будут пересылаться со скоростью 1 Мбит/с. Также допустим, что преобразование кадра в адаптере происходит мгновенно и время задержки датчиков для формирования ответа незначительно.

Базовый формат кадра данных CAN приведен в таблице.

Таким образом, общая длина кадра составляет 44–108 бит. Примем, что поле данных содержит один байт информации. Тогда длина кадра будет составлять 52 бита.

Для управления одним или несколькими двигателями достаточно отправить в сеть запрос, состоящий из одного кадра CAN. Ответа можно не ожидать, так как ошибки в пересылке данных через сеть стандарта CAN фиксируются на нижних уровнях протокола.

Базовый формат кадра данных, соответствующего стандарту CAN

Поле	Длина (в битах)
Начало кадра	1
Идентификатор	11
Запрос на передачу	1
Бит расширения идентификатора	1
Зарезервированный бит	1
Длина данных	4
Поле данных	0-64 (0–8 байт)
Контрольная сумма	15
Разграничитель контрольной суммы	1
Промежуток подтверждения	1
Разграничитель подтверждения	1
Конец кадра	7

Время передачи кадра CAN:

$$t = \frac{52 \text{ бит}}{1 \text{ Мбит/с}} = \frac{52 \text{ бит}}{1048576 \text{ бит/с}} \approx 50 \text{ мкс}.$$

Временная диаграмма операции приведена на рис. 2.

В результате время для реакции системы на операцию управления будет не менее 50 мкс.

Для сбора информации с датчиков в системе присутствует сетевое хранилище данных, которое периодически производит опрос измерительных устройств и хранит актуальные значения измеряемых величин. Произведение одной операции опроса требует отправления одного кадра с запросом и получения по одному кадру с ответом от каждого из датчиков.

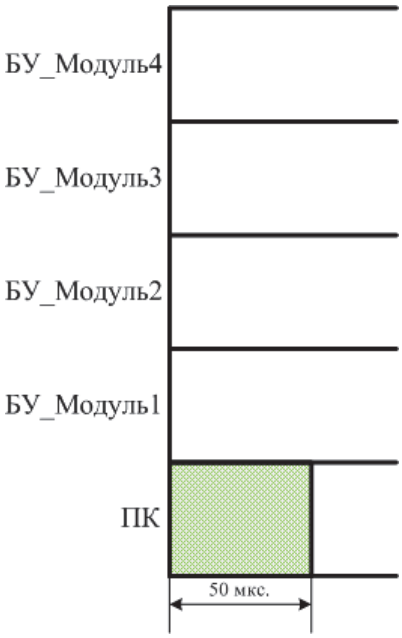


Рис. 2. Временная диаграмма сетевого обмена операции управления

Предположим, что шагающая машина имеет четыре модуля-ноги, каждая из которых имеет по одному однотипному сенсору. Тогда длительность выполнения операции будет определяться длительностью пяти CAN-кадров. Временная диаграмма приведена на рис. 3.

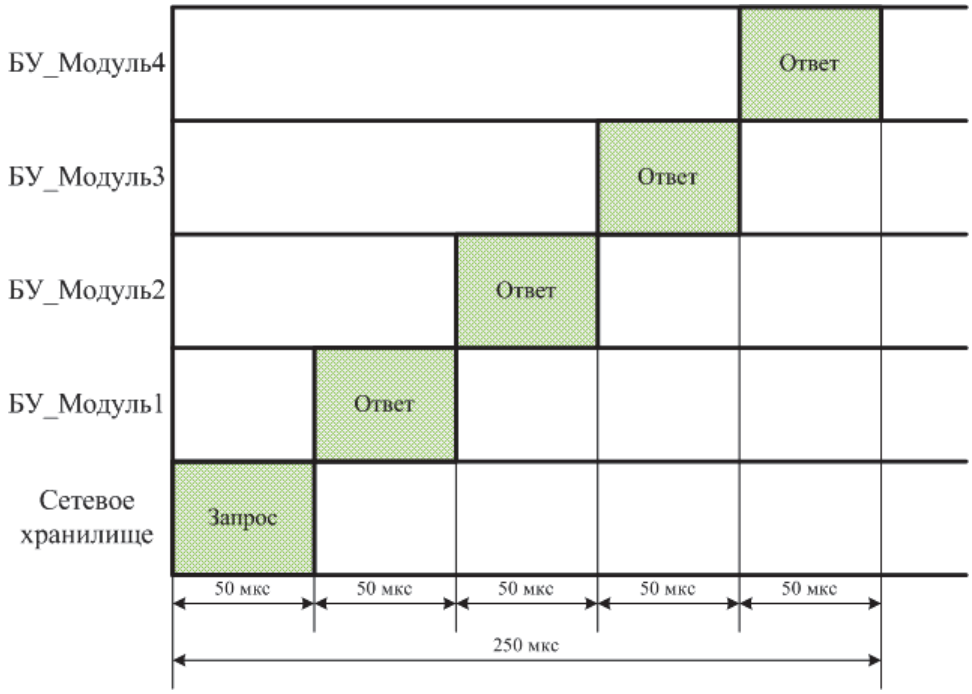


Рис. 3. Временная диаграмма сетевого обмена операции сбора данных с датчиков

В итоге время выполнения операции сбора данных будет не менее 250 мкс.

Таким образом, для получения актуальных данных персональному компьютеру будет достаточно принять и отправить по одному CAN-кадру. Поле данных принимаемого кадра должно содержать информацию по всем сенсорам, поэтому, принимая для каждого датчика один байт данных, в нашем случае длительность пересылки кадра ответа будет

$$t = \frac{44+4*8\ \text{бит}}{1\ \text{Мбит/с}} = \frac{76\ \text{бит}}{1048576\ \text{бит/с}} \approx 72\ \text{мкс}.$$

Временная диаграмма приведена на рис. 4.

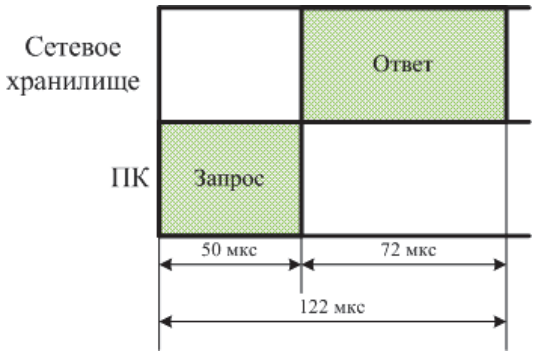


Рис. 4. Временная диаграмма сетевого обмена операции получения персональным компьютером актуальных значений измеряемых величин

Ошибка в определении положения стойки тогда составит

$$\delta = 72\ \text{мкс} * 635\ \text{мм/с} = 7{,}2 * 10^{-5}\ \text{с} * 0{,}635\ \text{м/с} \approx 0{,}05\ \text{мм},$$

что значительно меньше рассчитанной ранее ошибки при использовании протокола Modbus.

Для качественного управления движениями шагающего движителя необходим постоянный контроль за исполнительными устройствами и своевременное получение данных о состоянии системы. Применение предлагаемого решения позволит минимизировать временные задержки в системах управления большой размерности и повысить точность системы управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Rosenblatt, J. K.* A Fine-Grained Alternative to the Subsumption Architecture for Mobile Robot Control / J. K. Rosenblatt, D. W. Payton // Hughes Artificial Intelligence Center. – 1992. – Vol. 2. – P. 317–323.

2. *Simões, A.* da S. TORP: The Open Robot Project / A. da S. Simões, Colombini E. L., Matsuura J. P., Franchin M. N. // Journal of Intelligent & Robotic Systems. – 2012. – Vol. 66. – P. 3–22.

3. *Денисенко, В. В.* Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием / В. В. Денисенко. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – С. 83–94.

4. *Шурыгин, В. А.* Моделирование движения шагающей машины с ортогонально-поворотными движителями / В. А. Шурыгин, В. А. Серов, Н. Г. Шаронов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 9(82) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 11). – С. 41–44.

УДК 517.5

Б. В. Симонов, И. Э. Симонова

СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ МОДУЛЯМИ ГЛАДКОСТИ В РАЗНЫХ МЕТРИКАХ*

Волгоградский государственный технический университет

simonov-b2002@yandex.ru, simonova-vstu@mail.ru

В работе доказана справедливость неравенства между модулями гладкости дробного порядка функций из пространств L_p и C.

Ключевые слова: неравенство, пространство, дробный модуль гладкости.

B. V. Simonov, I. E. Simonova

CONNECTIONS BETWEEN MODULUS OF SMOOTHNESS IN DIFFERENT METRICS

Volgograd State Technical University

Validity of inequality between fractional moduli of smoothness of functions in spaces L_p and C is established in this paper.

Keywords: inequality, space, fractional modulus of smoothness.

* Исследования первого автора проводились при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 13-01-00043) и программы ведущих научных школ (грант НШ-979-2012-1).

1. Введение

Одним из основных инструментов изучения гладкости функций является модуль гладкости. В данной работе рассматриваются модули гладкости дробного порядка в пространствах Лебега. Получены неравенства, описывающие взаимосвязь между модулями гладкости функции в разных метриках. Полученные оценки могут использоваться в теории вложения функциональных пространств. В свою очередь, теоремы вложения используются при исследовании решений задач, моделируемых уравнениями математической физики.

Пусть $L_p(1 \le p < \infty)$ – пространство 2π – периодических измеримых функций с нормой $\|f\|_p = \left(\int_0^{2\pi} |f(x)|^p \, dx \right)^{\frac{1}{p}}$; L_∞ – пространство 2π – периодических непрерывных функций с нормой $\|f\|_\infty = \max_{0 \le x \le 2\pi} |f(x)|$; $f^{(p)}(x)$ – производная в смысле Вейля порядка $p (p > 0)$ функции $f(x)$ [1]; $T_n(x) = \sum_{v=0}^{n} (a_v \cos vx + b_v \sin vx)$ – тригонометрический полином порядка не выше n; $E_n(f)_p = \inf_{T_n(x)} \|f(x) - T_n(x)\|_p$ – наилучшее приближение функции $f(x) \in L_p$ при помощи тригонометрических полиномов порядка не выше n в метрике L_p; $S_n(f)$ – частная сумма ряда Фурье функции $f(x)$; $V_0(f) = S_0(f)$, $V_n(f) = \frac{S_n(f) + \cdots + S_{2n-1}(f)}{n} (n = 1,2,\ldots)$ – сумма Вале – Пуссена функции $f(x)$; $\omega_\alpha(f,t)_p$ – модуль гладкости функции $f(x) \in L_p$ порядка $\alpha (\alpha > 0)$ в метрике L_p, т. е.

$$\omega_\alpha(f,t)_p = \sup_{|h| \le t} \left\| \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k C_\alpha^k f\left(x + (\alpha - k)h\right) \right\|_p ,$$

где $C_\alpha^k = 1$ для $k = 0$; $C_\alpha^k = \alpha$ для $k = 1$; $C_\alpha^k = \frac{\alpha(\alpha-1)\cdots(\alpha-k+1)}{k!}$ для $k \ge 2$.

В работах [2], [3] П. Л. Ульянов нашел связь между модулями гладкости первого порядка в разных материках. Он доказал следующее неравенство: если $f(x) \in L_p$, $1 \le p < q < \infty$, то для любого $\delta \in (0,1)$

$$\omega_1(f,\delta)_q \le C_1 \left(\int_0^{\delta} \left(t^{-\frac{1}{p}+\frac{1}{q}} \omega_1(f,t)_p \right)^q \frac{dt}{t} \right)^{\frac{1}{q}}, \quad (1)$$

где C_1 – положительная постоянная, не зависящая от f и δ.

Заметим, что все эти и нижеследующие неравенства понимаются таким образом: из конечности правой части следует конечность левой части. Далее, C_1, C_2, … – положительные постоянные, не обязательно одинаковые в различных формулах; $C_1(\alpha), C_2(\alpha), \ldots$ – положительные постоянные, зависящие лишь от фиксированного α и, вообще говоря, разные в разных формулах.

В работе [4] В. А. Андриенко доказал, что если $f(x) \in L_p$, $1 \le p < \infty$, то для любого $\delta \in (0,1)$

$$\omega_1(f,\delta)_\infty \le C_2 \int_0^{\delta} t^{-\frac{1}{p}} \omega_1(f,t)_p \frac{dt}{t}, \quad (2)$$

где C_2 – положительная постоянная, не зависящая от f и δ.

Заметим, что здесь через $\omega_1(f,\delta)_\infty$ (и далее через $\omega_\alpha(f,\delta)_\infty$) обозначается модуль гладкости первого порядка (порядка α) функции $g \in L_\infty$, эквивалентной f.

В работе [5] В. И. Коляда усилил неравенства (1) и (2). Он доказал, что если $f(x) \in L_p$, $1 < p < q \le \infty$, то для любого $\delta \in (0,1)$

$$\delta^{1-\frac{1}{p}+\frac{1}{q}} \left(\int_\delta^1 (t^{\frac{1}{p}-\frac{1}{q}-1} \omega_1(f,t)_q)^p \frac{dt}{t} \right)^{\frac{1}{p}} \le$$

$$\le C_3 \left(\int_0^{\delta} (t^{-\frac{1}{p}+\frac{1}{q}} \omega_1(f,t)_p)^{q^*} \frac{dt}{t} \right)^{\frac{1}{q^*}}, \quad (3)$$

где $q^* = q$, если $q < \infty$ и $q^* = 1$, если $q = \infty$, C_3 – положительная постоянная, не зависящая от f и δ.

В работе [6] неравенство (1) было усилено по-другому: если $f(x) \in L_p$, $1 < p < q < \infty$, то для любого $\delta \in (0,1)$

$$\omega_1(f,\delta)_q \le C_4 \left(\int_0^{\delta} \left(t^{-\frac{1}{p}+\frac{1}{q}} \omega_{1+\frac{1}{p}-\frac{1}{q}}(f,t)_p \right)^q \frac{dt}{t} \right)^{\frac{1}{q}}, \quad (4)$$

где C_4 – положительная постоянная, не зависящая от f и δ.

Неравенства, аналогичные неравенствам (1)–(4) могут быть получены и для модулей гладкости порядка $\alpha > 0$ (см., например, [7], [8], [9]).

Неравенство (4) следует из более общей теоремы А.

Т е о р е м а А ([6],[10]). *Пусть* $f(x) \in L_p$, $1 < p < q < \infty$ *или* $1 = p < q = \infty$, $\alpha > 0$. *Тогда для любого* $\delta \in (0,1)$

$$\omega_\alpha\left(f,\delta\right)_q \le C_5\left(\int_0^\delta\left(t^{-\frac{1}{p}+\frac{1}{q}}\omega_{\alpha+\frac{1}{p}-\frac{1}{q}}\left(f,t\right)_p\right)^{q^*}\frac{dt}{t}\right)^{\frac{1}{q^*}}, \quad (5)$$

где $q^* = q$, *если* $q < \infty$ *и* $q^* = 1$, *если* $q = \infty$, C_5 – *положительная постоянная, не зависящая от* f *и* δ.

В работе [11] показано, что в предельных случаях $1 = p < q < \infty$ или $1 < p < q = \infty$ неравенство (5) несправедливо.

В работе [10] С. Ю. Тихоновым доказана следующая теорема.

Т е о р е м а В ([10]). *Пусть* $f(x) \in L_p$, $1 = p < q < \infty$ *или* $1 < p < q = \infty$, $\alpha > 0$. *Тогда для любого* $\delta \in (0,1)$

$$\omega_\alpha(f,\delta)_q \le$$

$$\le C_6\left(\int_0^\delta\left(t^{-\frac{1}{p}+\frac{1}{q}}\left(\ln\frac{2}{t}\right)^{\max\left(1-\frac{1}{p},\frac{1}{q}\right)}\omega_{\alpha+\frac{1}{p}-\frac{1}{q}}(f,t)_p\right)^{q^*}\frac{dt}{t}\right)^{\frac{1}{q^*}}, \quad (6)$$

где $q^* = q$, *если* $q < \infty$ *и* $q^* = 1$, *если* $q = \infty$, C_6 – *положительная постоянная, не зависящая от* f *и* δ.

В данной работе уточняются неравенства (1), (2) и (6) в предельных случаях, когда $1 = p < q < \infty$ или $1 < p < q = \infty$.

Сформулируем основную теорему.

Т е о р е м а. *Пусть* $f(x) \in L_p$, $1 = p < q < \infty$ *или* $1 < p < q = \infty$, $\beta > \alpha > 0$, $r \ge 0$. *Тогда для любого* $\delta \in (0,1)$

$$\omega_\alpha\left(f^{(r)},\delta\right)_q \le C_7\left(\delta^{\alpha q^*}\int_\delta^1\left(t^{-r-\alpha-\frac{1}{p}+\frac{1}{q}}\omega_{\beta+r+\frac{1}{p}-\frac{1}{q}}\left(f,t\right)_p\right)^{q^*}\frac{dt}{t}+\int_0^\delta\left(t^{-r-\frac{1}{p}+\frac{1}{q}}\omega_{\beta+r+\frac{1}{p}-\frac{1}{q}}\left(f,t\right)_p\right)^{q^*}\frac{dt}{t}\right)^{\frac{1}{q^*}}, \quad (7)$$

где $q^* = q$, *если* $q < \infty$ *и* $q^* = 1$, *если* $q = \infty$, C_7 – *положительная постоянная, не зависящая от* f *и* δ.

2. Вспомогательные утверждения

Л е м м а 1 ([12–14]). *Пусть* $f(x) \in L_p$, $1 \le p \le \infty$, $\alpha > 0$, $m \in N$. *Тогда*

$$C_1\left(m^{-\alpha}\left\|V_m^{(\alpha)}(f)\right\|_p + E_m(f)_p\right) \le$$

$$\le \omega_\alpha\left(f,\frac{1}{m}\right)_p \le C_2\left(m^{-\alpha}\left\|V_m^{(\alpha)}(f)\right\|_p + E_m(f)_p\right),$$

где положительные постоянные C_1 *и* C_2 *не зависят от* f *и* m.

Л е м м а 2. *Пусть* $f(x) \in L_p$, $1 \le p < q \le \infty$, $\alpha > 0$, $n = 0,1,\ldots$ *Тогда*

$$E_n(f)_q \le C_3 \times$$

$$\times\left((n+1)^{\frac{1}{p}-\frac{1}{q}}E_n(f)_p + \left(\sum_{k=n+1}^\infty k^{q^*\left(\frac{1}{p}-\frac{1}{q}\right)-1}E_k^{q^*}(f)_p\right)^{\frac{1}{q^*}}\right),$$

где $q^* = q$, *если* $q < \infty$ *и* $q^* = 1$, *если* $q = \infty$, C_3 – *положительная постоянная, не зависящая от* f *и* n.

Лемма 2 при $q < \infty$ доказана в [3], а при $q = \infty$ – в [15].

Л е м м а 3 ([16]). Пусть $a_k \ge 0, b_k \ge 0$, $\sum_{k=1}^n a_k = a_n\gamma_n$. Тогда, если $1 \le p < \infty$, то

$$\sum_{k=1}^\infty a_k\left(\sum_{n=k}^\infty b_n\right)^p \le p^p\sum_{k=1}^\infty a_k(b_k\gamma_k)^p.$$

Л е м м а 4. *Пусть* $f(x) \in L_p$, $1 \le p < q \le \infty$, $n = 0,1,\ldots$, $q^* = q$, *если* $q < \infty$ *и* $q = 1$, *если* $q = \infty$. *Тогда*

$$\left\|V_{2^n}(f) - V_0(f)\right\|_q \le$$

$$\le C_4\left(\sum_{k=0}^n 2^{kq^*\left(\frac{1}{p}-\frac{1}{q}\right)}\left\|V_{2^k}(f) - V_{\left[2^{k-1}\right]}(f)\right\|_p^{q^*}\right)^{\frac{1}{q^*}},$$

где $[m]$ – *целая часть числа* m; *постоянная* $C_4 > 0$ *не зависит от* n *и* f.

Доказательство.

Применяя леммы 2 и 3, имеем

$$\left\|V_{2^n}(f)-V_0(f)\right\|_q \le C_5\left(\sum_{k=0}^{n}2^{kq^*\left(\frac{1}{p}-\frac{1}{q}\right)}\left\|V_{2^n}(f)-V_{\left[2^{k-1}\right]}(f)\right\|_p^{q^*}\right)^{\frac{1}{q^*}} \le$$

$$\le C_6\left(\sum_{k=0}^{n}2^{kq^*\left(\frac{1}{p}-\frac{1}{q}\right)}\left(\sum_{m=k}\left\|V_{2^m}(f)-V_{\left[2^{m-1}\right]}(f)\right\|_p\right)^{q^*}\right)^{\frac{1}{q^*}} \le C_7\left(\sum_{k=0}^{n}2^{kq^*\left(\frac{1}{p}-\frac{1}{q}\right)}\left\|V_{2^k}(f)-V_{\left[2^{k-1}\right]})(f)\right\|_p^{q^*}\right)^{\frac{1}{q^*}},$$

где $C_7>0$ не зависит от n и f.

Лемма 4 доказана.

Лемма 5 ([17]). *Пусть* $1\le p\le\infty,\alpha>0$, $T_n(x)$ *– тригонометрический полином порядка не выше* $n(n\in N)$. *Тогда*

$$\left\|T_n^{(\alpha)}\right\|_p \le C_8(\alpha)n^{\alpha}\left\|T_n\right\|_p.$$

Лемма 6 ([18]). *Пусть* $f(x)\in L_p, 1\le p\le\infty$. *Тогда* $\left\|f-V_n(f)\right\|_p \le C_9E_n(f)_p$, *где положительная постоянная* C_9 *не зависит от* f *и* n.

3. Доказательство теоремы

Пусть $r=0$. Применяя леммы 1, 2, 4, 5 и 6, будем иметь для $n=1,2,...$

$$\omega_{\alpha}\left(f,2^{-n}\right)_q \le C_{10}\left(2^{-n\alpha}\left\|V_{2^n}^{(\alpha)}(f)\right\|_q+E_{2^n}(f)_q\right)\le$$

$$\le C_{11}\left(2^{-n\alpha}\left(\sum_{m=0}^{n}2^{mq^*\left(\frac{1}{p}-\frac{1}{q}\right)}\left\|V_{2^m}^{(\alpha)}(f)-V_{\left[2^{m-1}\right]}^{(\alpha)}(f)\right\|_p^{q^*}\right)^{\frac{1}{q^*}}+\left(\sum_{m=n-1}^{\infty}2^{mq^*\left(\frac{1}{p}-\frac{1}{q}\right)}E_{2^m}^{q^*}(f)_p\right)^{\frac{1}{q^*}}\right)\le$$

$$\le C_{12}\left(2^{-n\alpha}\left(\sum_{m=0}^{n}2^{mq^*\left(\alpha+\frac{1}{p}-\frac{1}{q}\right)}E_{\left[2^{m-1}\right]}^{q^*}(f)_p\right)^{\frac{1}{q^*}}+\left(\sum_{m=n-1}^{\infty}2^{mq^*\left(\frac{1}{p}-\frac{1}{q}\right)}E_{2^m}^{q^*}(f)_p\right)^{\frac{1}{q^*}}\right)\le$$

$$\le C_{13}\left(2^{-n\alpha}\left(\sum_{m=0}^{n}2^{mq^*\left(\alpha+\frac{1}{p}-\frac{1}{q}\right)}\omega_{\beta+\frac{1}{p}-\frac{1}{q}}^{q^*}\left(f,2^{-m}\right)_p\right)^{\frac{1}{q^*}}+\left(\sum_{m=n+1}^{\infty}2^{mq^*\left(\frac{1}{p}-\frac{1}{q}\right)}\omega_{\beta+\frac{1}{p}-\frac{1}{q}}^{q^*}\left(f,2^{-m}\right)_p\right)^{\frac{1}{q^*}}\right),$$

где положительная постоянная C_{13} не зависит от f и n.

Доказательство теоремы при $r>0$ проводится аналогично.

Теорема доказана.

4. Замечания

Покажем, что при $1=p<q<\infty$ или $1<p<$ $<q=\infty$ неравенство (7) при $r=0$ точнее неравенств (1), (2) и (6).

Введем обозначение. Будем писать $F(f,\delta)\approx$ $\approx G(f,\delta)$, если существуют положительные постоянные C_1 и C_2, не зависящие от f и δ, такие, что $C_1\cdot G(f,\delta)\le F(f,\delta)\le C_2\cdot G(f,\delta)$.

А. Пусть $f_0(x)=\sin x$. Тогда для этой функции правые и левые части неравенства (7) имеют следующие соотношения:

$$\omega_{\alpha}\left(f_0,\delta\right)_q \approx \delta^{\alpha},$$

$$\left(\delta^{\alpha q^*}\int_{\delta}^{1}\left(t^{-\alpha-\frac{1}{p}+\frac{1}{q}}\omega_{\beta+\frac{1}{p}-\frac{1}{q}}\left(f_0,t\right)_p\right)^{q^*}\frac{dt}{t}+\int_{0}^{\delta}\left(t^{-\frac{1}{p}+\frac{1}{q}}\omega_{\beta+\frac{1}{p}-\frac{1}{q}}\left(f_0,t\right)_p\right)^{q^*}\frac{dt}{t}\right)^{\frac{1}{q^*}}\approx\delta^{\alpha},$$

т. е. имеют один порядок.

Для этой функции правые и левые части неравенств (1) и (2) имеют следующие соотношения:

$$\omega_1\left(f_0,\delta\right)_q \approx \delta,$$

$$\left(\int_0^{\delta}\left(t^{-\frac{1}{p}+\frac{1}{q}}\omega_1\left(f_0,t\right)_p\right)^{q^*}\frac{dt}{t}\right)^{\frac{1}{q^*}} \approx \delta^{1-\frac{1}{p}+\frac{1}{q}},$$

т. е. имеют разный порядок.

Для этой функции правые и левые части неравенства (6) имеют следующие соотношения:

$$\omega_\alpha\left(f_0,\delta\right)_q \approx \delta^{\alpha},$$

$$\left(\int_0^{\delta}\left(t^{-\frac{1}{p}+\frac{1}{q}}\left(\ln\frac{2}{t}\right)^{\max\left(1-\frac{1}{p},\frac{1}{q}\right)}\omega_{\alpha+\frac{1}{p}-\frac{1}{q}}\left(f_0,t\right)_p\right)^{q^*}\frac{dt}{t}\right)^{\frac{1}{q^*}} \approx \delta^{\alpha-\frac{1}{p}+\frac{1}{q}}\left(\ln\frac{2}{\delta}\right)^{\max\left(1-\frac{1}{p},\frac{1}{q}\right)},$$

т. е. имеют разный порядок.

Б. При $1=p<q<\infty$ или $1<p<q=\infty$ имеют место следующие неравенства:

$$\left(\delta^{\alpha q^*}\int_{\delta}^{1}\left(t^{-\alpha-\frac{1}{p}+\frac{1}{q}}\omega_{\beta+\frac{1}{p}-\frac{1}{q}}\left(f,t\right)_p\right)^{q^*}\frac{dt}{t}+\int_0^{\delta}\left(t^{-\frac{1}{p}+\frac{1}{q}}\omega_{\beta+\frac{1}{p}-\frac{1}{q}}\left(f,t\right)_p\right)^{q^*}\frac{dt}{t}\right)^{\frac{1}{q^*}} \le C_3\left(\int_0^{\delta}\left(t^{-\frac{1}{p}+\frac{1}{q}}\omega_{\alpha}\left(f,t\right)_p\right)^{q^*}\frac{dt}{t}\right)^{\frac{1}{q^*}},$$

где положительная постоянная C_3 не зависит от f и δ.

С. При $1=p<q<\infty$ или $2\le p<q=\infty$ имеют место следующие неравенства:

$$\left(\delta^{\alpha q^*}\int_{\delta}^{1}\left(t^{-\alpha-\frac{1}{p}+\frac{1}{q}}\omega_{\beta+\frac{1}{p}-\frac{1}{q}}\left(f,t\right)_p\right)^{q^*}\frac{dt}{t}+\int_0^{\delta}\left(t^{-\frac{1}{p}+\frac{1}{q}}\omega_{\beta+\frac{1}{p}-\frac{1}{q}}\left(f,t\right)_p\right)^{q^*}\frac{dt}{t}\right)^{\frac{1}{q^*}} \le$$

$$\le C_4\left(\int_0^{\delta}\left(t^{-\frac{1}{p}+\frac{1}{q}}\left(\ln\frac{2}{t}\right)^{\max\left(1-\frac{1}{p},\frac{1}{q}\right)}\omega_{\alpha+\frac{1}{p}-\frac{1}{q}}\left(f,t\right)_p\right)^{q^*}\frac{dt}{t}\right)^{\frac{1}{q^*}},$$

положительная постоянная C_4 не зависит от f и δ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Зигмунд, А.* Тригонометрические ряды. Т. 2 / А. Зигмунд. – М.: Мир, 1965. – 538 с.

2. *Ульянов, П. Л.* Вложение некоторых классов функций H_p^{ω} / П. Л. Ульянов // Известия АН СССР. Сер. математическая, 1968. – Т. 32, № 3. – С. 649–686.

3. *Ульянов, П. Л.* Теоремы вложения и соотношения между наилучшими приближениями (модулями непрерывности) в разных метриках / П. Л. Ульянов // Математический сборник, 1970. – Т. 81(123), № 1. – С. 104–131.

4. *Андриенко, В. А.* Вложение некоторых классов функций / В. А. Андриенко // Известия АН СССР. Сер. математическая, 1967. – Т. 31, № 6. – С. 1311–1326.

5. *Коляда, В. И.* О соотношениях между модулями непрерывности в разных материках / В. И. Коляда // Труды математического института АН СССР, 1988. – Т. 181. – С. 117–136.

6. *Потапов, М. К.* О соотношениях между модулями гладкости в разных метриках / Б. В. Симонов, С. Ю. Тихонов // Вестник Московского университета. Математика. Механика, 2009. – № 3. – С. 17–25.

7. *Ильясов, Н. А.* К неравенству между модулями гладкости различных порядков в разных метриках / Н. А. Ильясов // Математические Заметки, 1991. – Т. 50, № 2. – С. 153–155.

8. *Гольдман, М. Л.* Критерий вложения разных метрик для изотропных пространств Бесова с произвольными модулями непрерывности / М. Л. Гольдман // Труды математическог института РАН, 1992. – Т. 201. – С. 186–218.

9. *Trebels, W.* Inequalities for moduli of smoothness versus embeddings of function spaces // Arch. Math., 2010. – V. 94. – P. 155–164.

10. *Tikhonov, S.* Weak type inequalities for moduli of smoothness: the case of limit value parameters // J. Fourier Anal. Appl., 2010. – V. 16, Is. 4. – P. 590–608.

11. *Simonov, B.* Sharp Ul'yanov-type inequalities using fractional smoothness / S. Tikhonov // J. of Approximation Theory, 2010. – V. 162. – P. 1654–1684.

12. *Симонов, Б. В.* Некоторые вопросы теории приближений / Б. В. Симонов // Кандидатская диссертация. – М., 1985. – 125 с.

13. *Potapov, M. K.* On interrelation of the generalized Besov-Nikol'skiĭ and Veyl-Nikol'skiĭ classes of functions / Simonov B. V. // Anal. Math.,1996. – V. 22. – P. 299–316.

14. *Симонов, Б. В.* Теоремы вложения в конструктивной теории приближений / Б. В. Симонов, С. Ю. Тихонов // Математический сборник, 2008. – Т. 199, № 9. – С. 107–148.

15. *Конюшков, А. А.* Наилучшее приближение тригонометрическими полиномами и коэффициенты Фурье / А. А. Конюшков // Математический сборник, 1958. – Т. 44(86). – С. 53–86.

16. *Потапов, М. К.* Об одной теореме вложения / М. К. Потапов // Mathematica (Румыния, Клуж), 1972. – V. 14(37). – P. 123–146.

17. *Taberski, R.* Differences, moduli and derivatives of factional orders // Roczn. Pol. tow. mat., 1977. – V. 19. – № 2. – P. 389–400.

18. *Дзядык, В. К.* Введение в теорию равномерного приближения функций полиномами. – М.: Наука, 1977. – 511 с.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 531.383

В. В. Алешкин

РЕКУРРЕНТНЫЕ АЛГОРИТМЫ НЕЛИНЕЙНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ ГИРОСКОПИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ВЕКТОРА УГЛОВОЙ СКОРОСТИ

Саратовский государственный технический университет

aleshkinvv@yandex.ru

Получены рекуррентные алгоритмы асимптотического оценивания вектора угловой скорости на основе уравнений обратной задачи для блока трех гиротахометров. Изучены условия числовой устойчивости и особенности частотных характеристик. Получены численные оценки периода квантования и погрешностей определения компонентов вектора угловой скорости по полному и упрощенным алгоритмам.

Ключевые слова: блок гиротахометров, методические погрешности, алгоритмическая компенсация, рекуррентные алгоритмы, результаты моделирования.

V. V. Aleshkin

RECURRENT ALGORITHMS OF A NONLINEAR FILTRATION FOR GYROSCOPIC MEASURE OF ANGULAR VELOSITY VECTORE

Saratov state technical university

Recurrent algorithms for asymptotic evaluation of angular velocity vectore, based on equations of the three gyrotachometers reverse problem are built. Computation stability conditions and features of the frequency response characteristics are learned. Time sample needed and angular rate components calculation errors of the full and simplified algorithms are evaluated.

Keywords: block of gyroscopes, methodic errors, algorithmic compensation, recurrent algorithms, results of modeling.

Введение

Как показано в [1, 2], использование уравнений обратной задачи в качестве алгоритма определения компонентов вектора абсолютной угловой скорости объекта по сигналам тройки гиротахометров (ГТ) позволяет теоретически точно компенсировать, а с учетом инструментальных погрешностей гироскопов – существенно снизить погрешности перекрестных связей, нелинейностей масштабных коэффициентов, погрешности от действия угловых ускорений объекта и динамические погрешности ГТ. Степень компенсации этих погрешностей зависит от собственных динамических свойств системы дифференциальных уравнений обратной задачи, реализуемых в бортовом вычислителе в реальном масштабе времени. В настоящей работе изучены динамические характеристики рекуррентных алгоритмов, получены оценки погрешностей определения компонентов вектора угловой скорости по этим алгоритмам.

Числовая устойчивость рекуррентных алгоритмов

Реализация алгоритмов вычисления оценок угловых скоростей в бортовом вычислителе налагает ограничения на период квантования (шаг вычисления) T. Оценим допустимую величину T исходя из условий числовой устойчивости и влияния T на качество переходных процессов и частотные характеристики дискретных алгоритмов асимптотического оценивания угловых скоростейна основе уравнений обратной задачи для блока трех гиротахометров.

Нелинейная нестационарная система трех дифференциальных уравнений обратной задачи в матричной форме может быть записана в виде [1]:

$$\dot{\mathbf{V}} = -h\mathbf{D}_1^{-1}\mathbf{D}_2\mathbf{V} - \frac{B}{A}\mathbf{D}_1^{-1}\mathbf{S} + \mathbf{D}_1^{-1}\mathbf{F}, \qquad (1)$$

$\mathbf{S}=[S_i\ (V)]$ – матрица 3×1 с элементами $S_i = y_i z_i$,

где
$$y_i = d_{21}^i V_1 + d_{22}^i V_2 + d_{23}^i V_3;$$
$$z_i = d_{31}^i V_1 + d_{32}^i V_2 + d_{33}^i V_3; \qquad (2)$$

$\mathbf{V} = [V_1, V_2, V_3]^T$; $\mathbf{F} = [f_i]$; – матрица 3×1 элементов f_i

$$f_i = -\ddot{\beta}^i - \frac{n}{A}\dot{\beta}^i - \frac{1}{A}Q^i \quad (i=1, 2, 3);$$

$$h = H / A; \qquad (3)$$

Q^i и β^i – моменты датчиков моментов и углы относительных поворотов чувствительных элементов (ЧЭ) ГТ, соответственно; H, A – кинетические моменты и моменты инерции ЧЭ ГТ вокруг их выходных осей; B – разность моментов инерции поплавка и всего ЧЭ вокруг двух других осей; V_1, V_2, V_3 – оценки входных угловых скоростей; d^i_{kj} – элементы κ-х строк матриц $\mathbf{D}_i$.

Матрицы $\mathbf{D}_1$, $\mathbf{D}_2$, $\mathbf{D}_3$, соответствующие ориентации осей ГТ, полученной в [2], имеют вид:

$$\mathbf{D}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.406736 & -0.913545 \\ 0.85886 & 0.200455 & -0.471355 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{D}_2 = \begin{bmatrix} 0 & \cos\beta^1 & \sin\beta^1 \\ -\cos\beta^2 & 0.913545\sin\beta^2 & 0.406736\sin\beta^2 \\ -0.34322\cos\beta^3 + & 0.908311\cos\beta^3 + & -0.239103\cos\beta^3 + \\ +0.380208\sin\beta^3 & +0.367135\sin\beta^3 & +0.848913\sin\beta^3 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{D}_3 = \begin{bmatrix} 0 & \sin\beta^1 & \cos\beta^1 \\ \sin\beta^2 & 0.913545\cos\beta^2 & 0.406736\cos\beta^2 \\ 0.34322\sin\beta^3 + & -0.908311\sin\beta^3 + & 0.239103\sin\beta^3 + \\ +0.380208\cos\beta^3 & +0.367135\cos\beta^3 & +0.848913\cos\beta^3 \end{bmatrix}. \qquad (4)$$

Рекуррентные уравнения, соответствующие (1), запишем с помощью формулы Эйлера для интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\mathbf{V}_{n+1} = \mathbf{V}_n - hT\mathbf{D}_1^{-1}\mathbf{D}_{2n}\mathbf{V}_n - dT\mathbf{D}_1^{-1}\mathbf{S} + \mathbf{D}_1^{-1}T\mathbf{F}_\mathbf{n}. \qquad (5)$$

Индекс n означает, что элементы соответствующих матриц вычислены или измерены в n-й тактовый момент времени. Применение более сложных методов, с одной стороны, затруднит аналитическую оценку величины периода квантования, с другой, при практической реализации этих методов, потребуется вычисление правых частей не только в моменты времени, кратные T, но и в промежуточных точках. Последнее возможно при увеличении частоты опроса датчиков, либо при применении алгоритмов интерполяции, что усложнит реализацию системы в целом. Применение неявных методов [3] в данном случае невозможно, так как алгоритмы работают в реальном времени.

Для оценки числовой устойчивости воспользуемся уравнением возмущенного движения системы (1):

$$\mathbf{y}' = -h\mathbf{D}_1^{-1}\mathbf{D}_2\mathbf{y} + d\mathbf{D}_1^{-1}\mathbf{R}(\mathbf{y}, \mathbf{x}^0) \qquad (6)$$

$$y' = dy / d\tau; \quad \tau = ht; \quad h = H / A; \quad d = B/A,$$

где $\mathbf{x}^0(x_1{}^0, x_2{}^0, x_3{}^0)$ – невозмущенное движение; $\mathbf{y}(y_1, y_2, y_3)$ – возмущения; $\mathbf{R}(\mathbf{y}, \mathbf{x}^0)$ – матрица нелинейных членов уравнения. В отличие от (2), коэффициенты уравнения (6) не зависят от параметров гироскопов в первом приближении.

Уравнения первого приближения возмущенного движения для системы (6)

$$\mathbf{y}' = -h\mathbf{N}_1^{-1}\mathbf{N}_2\mathbf{y} \qquad (7)$$

могут быть записаны в рекуррентной форме с помощью матричной экспоненты

$$\mathbf{Y}_{n+1} = \mathbf{\Phi}\mathbf{Y}_n; \; \mathbf{\Phi} = e^{\mathbf{M}T} = \mathbf{E} + \mathbf{M}T + \mathbf{M}^2T^2 / 2! + \ldots, \qquad (8)$$

где $\mathbf{M} = -h\mathbf{N}_1^{-1}\mathbf{N}_2$; $\mathbf{N}_1$, $\mathbf{N}_2$ – матрицы $\mathbf{D}_1$, $\mathbf{D}_2$ при $\beta^i = 0$. Ограничиваясь двумя членами разложения и выполнив z-преобразование, получим характеристическое уравнение

$$\det(\mathbf{E}z - \mathbf{\Phi}) = 0,$$

корни которого имеют вид:

$$z_j = S_j hT \; (j=1,2,3),$$

где S_j – корни характеристического уравнения системы (7).

Условия устойчивости дискретной системы (8) $|z_j| < 1$ позволяют в первом приближении оценить допустимый период квантования

$$T < 1/\left|S_j^{\max}\right| h. \qquad (9)$$

Приведем численную оценку величины T для блока трех ГТ с параметрами:

h=10^{3}с;

$$S_{1,2} = (-1,4667 \pm i2,945)h; \quad S_3 = -2,5709h. \quad (10)$$

Из (9) следует T<0,3*10^{-3}с.

Оценка (9) должна уточняться по результатам моделирования работы вычислителя по полным нелинейным алгоритмам. На рис. 1 приведены графики изменения значений оценки одного компонента V_1 вектора угловой скорости, вычисленного по алгоритму вида (1) при единичном скачке входных угловых скоростей $\omega_j(t)$ $(j=1,2,3)$.

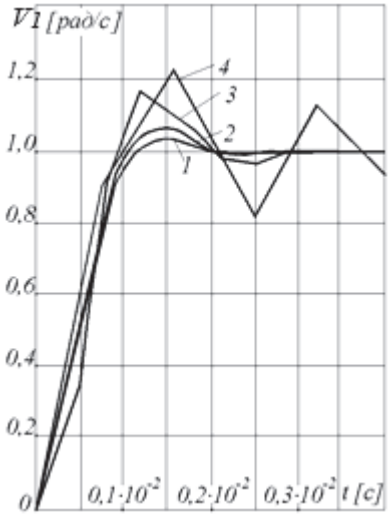


Рис. 1. Переходные процессы $V_1(t)$

Кривые *1, 2, 3, 4* соответствуют T=0,1*10^{-4} с; 0,1*10^{-3} с; 0,4*10^{-3} с; 0,8*10^{-3} с. Максимальное значение T, при котором решения сходятся, – 1.4*10^{-3}с (рис. 2). Однако при этом время переходных процессов в оценках увеличивается с 0.25*10^{-2}с до 0.14*10^{-1}с, что снижает эффективность алгоритмов. Заметим, аналогичный параметр в самих ГТ равен 0.6*10^{-1}с. Из графиков также следует, что вычислять оценки угловых скоростей по алгоритму (1) с параметрами (4,10) с шагом, меньшим 0.1*10^{-3}с, нецелесообразно, так как это незначительно улучшает динамику решений.

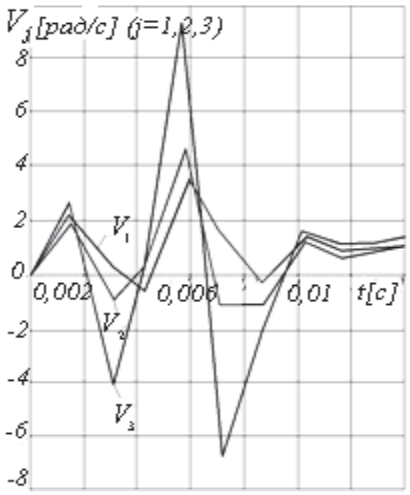


Рис. 2. Переходные процессы в оценках $V_j(t)$

Частотные характеристики

Сопоставим частотные характеристики дискретной системы (5) с АФЧХ аналоговых алгоритмов (1), приведенных в [1]. Получим z-передаточные функции уравнений первого приближения системы (5)

$$\mathbf{V}_{n+1} = \mathbf{V}_n - hT\mathbf{D}_1^{-1}\mathbf{D}_{2n}\mathbf{V}_n + \mathbf{D}_1^{-1}T\mathbf{F}_\mathbf{n}. \quad (11)$$

Передаточная матрица W(z), элементами которой являются z-передаточные функции Wij от входов fi к выходам Vi (i,j=1.2.3), имеет вид

$$\mathbf{W}(z) = [\mathbf{E}(z-1) + hT\mathbf{D}_1^{-1}\mathbf{D}_2]^{-1}\mathbf{D}_{-1}^{1}T$$

Элементы Wij(z) матрицы W(z) уравнений первого приближения (βi=0) при T=0.1*10-3 с имеют числители, приведенные в табл. 1, и знаменатель

$$z^3 - 2.435z^2 + 2.037z - 0.5806.$$

Таблица 1

Числители передаточных функций

Wi,j	1	2	3
1	$-0.00028z^2 - 9.151\cdot10^{-5}z +$ $+0.00037$	$-0.00023z^2 + 2.347\cdot10^{-5}z +$ $+0.1866\cdot10^{-3}$	$0.00044z^2 - 7.269\cdot10^{-5}z -$ $-3.676\cdot10^{-4}$
2	$0.0069z^2 - 0.01368z +$ $+0.006786$	$0.004221z^2 - 0.008237z +$ $+0.4017\cdot10^{-2}$	$-0.007957z^2 + 0.01593z -$ -0.007972
3	$0.003075z^2 - 0.00604z +$ $+0.003046$	$0.001771z^2 - 0.3478\cdot10^{-2}z +$ $+0.1737\cdot10^{-2}$	$-0.003545z^2 + 0.007031z -$ -0.003574

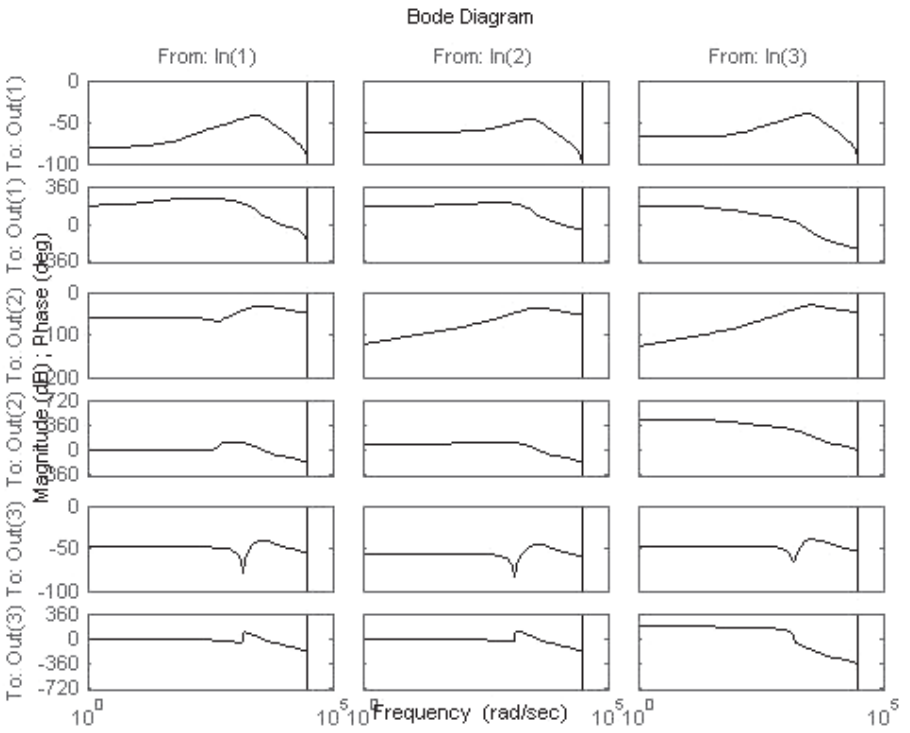


Рис. 3. АФЧХ дискретной системы при T=0.0001 с

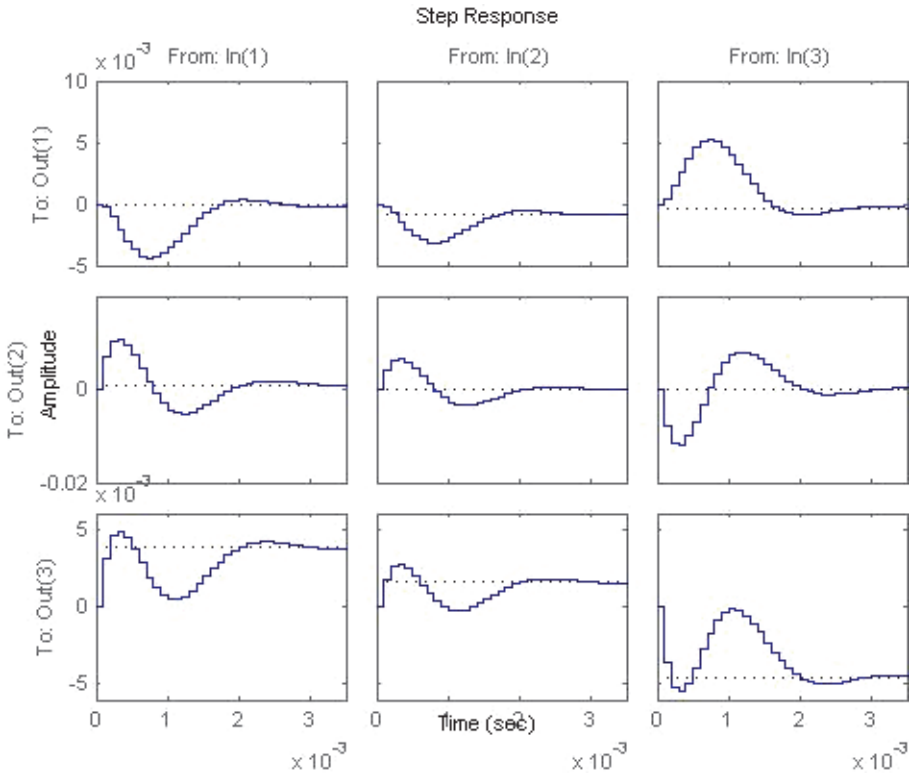


Рис. 4. Переходные процессы в дискретной системе

На рис. 3 приведены АФЧХ системы, из которых следует, что до частоты Шеннона характеристики дискретной системы (11) по форме совпадают с соответствующими характеристиками непрерывной системы. То же самое можно сказать и о переходных процессах, графики которых приведены на рис. 4.

Это означает, что в соответствии с результатами, полученными в [1], и фазо-частотными характеристиками рис. 3, часть каналов много-

мерной системы являются неминимально-фазовыми и при оценивании низкочастотных гармонических сигналов возможно изменение знака оценок по каналам W11(z), W23(z), W33(z) на противоположный из-за сдвига фазы в 180° на низких частотах. В связи с этим рассмотрим упрощенные рекуррентные алгоритмы.

Упрощенные алгоритмы. Результаты моделирования

Если в качестве исходных уравнений движения ЧЭ ГТ использовать прецессионные уравнения, соответствующее уравнение обратной задачи приобретает вид

$$h\mathbf{D}_2\mathbf{V}=\mathbf{F};\ f_i=\frac{1}{A}Q^i, \qquad (12)$$

решением которого является выражение

$$\mathbf{V}=h^{-1}\mathbf{D}_2^{-1}\mathbf{F}. \qquad (13)$$

Учитывая «чистое запаздывание» на период квантования при вычислении оценок, получим выражение

$$\mathbf{V}_{n+1}=h^{-1}\mathbf{D}_{2n}^{-1}\mathbf{F}_n. \qquad (14)$$

Условия существования и единственности решений (13) налагают ограничения на ориентацию только осей чувствительности ГТ в блоке, в отличие от этих условий для системы (1). Они выполняются как при ориентации, полученной в [2], так и при более простой, например, взаимно-ортогональной ориентации осей ГТ. Матрицы направляющих косинусов $\mathbf{N}_i$ (i=1,2,3) осей гироскопов в этом случае имеют, например, вид

$$\mathbf{N}_1=\mathbf{E};\ \mathbf{N}_2=\begin{bmatrix}0&0&1\\1&0&0\\0&1&0\end{bmatrix};\ \mathbf{N}_3=\begin{bmatrix}0&1&0\\0&0&1\\1&0&0\end{bmatrix}.$$

Определитель матрицы гироскопических коэффициентов d^i_{2j} (i,j=1,2,3) равен

$$\det\mathbf{D}_2=-\Pi\sin\beta^i-\Pi\cos\beta^i \qquad (15)$$

и не обращается в нуль ни при каких, достаточно малых, β^i (i=1,2,3). Таким образом, алгоритм вычисления оценок V_j угловых скоростей $\omega_j\,(j=1,2,3)$ имеет вид конечных выражений (14), в котором *fi* заданы выражением (3). Соответствующая матричная передаточная функция $\mathbf{W}(z)$ имеет вид:

$$\mathbf{W}(z)=\mathbf{E}z^{-1}h^{-1}\mathbf{D}_2^{-1}(z).$$

В первом приближении $\mathbf{D}_2=\mathbf{N}_2$, поэтому динамические погрешности системы сводятся к «чистому запаздыванию» по фазе на время вычисления оценок (14).

Алгоритм (14) может быть дополнен нелинейными членами уравнения (1)

$$\mathbf{V}_{n+1}=h^{-1}\mathbf{D}_{2,n}^{-1}(\mathbf{F}_n-d\mathbf{S}). \qquad (16)$$

Результаты моделирования работы блока ГТ и вычисления V_j по алгоритмам (5), (14), (16) с шагом $0.1*10^{-3}$с при ступенчатом и гармоническом изменениях угловых скоростей с частотой 2.5 Гц сведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты моделирования

Параметры	$t_{пп}$, с	σ, %	$\delta\omega_{уст}$, %	$\delta\omega_{max}$, %
Алг.(5)	0.055	12,28	$0,6*10^{-8}$	$0,62*10^{-4}$
Алг.(14)	0.0001	0,005	0,1086	0,628
Алг.(16)	0.0001	0,005	$0,6*10^{-8}$	$0,24*10^{-6}$

Здесь $t_{пп}$ – время переходных процессов; σ – перерегулирование; $\delta\omega_{уст}$ – погрешность определения угловой скорости в установившемся режиме; $\delta\omega_{max}$ – максимальное значение погрешности при гармоническом изменении угловых скоростей по отношению к амплитудному значению.

Видим, что применение рекуррентных алгоритмов асимптотического оценивания (16), построенных на основе упрощенных уравнений обратной задачи, позволяет практически полностью компенсировать методические погрешности блока трех ГТ как в установившемся режиме, так и при гармонических колебаниях объекта с частотой в несколько герц.

Полученные численные оценки погрешностей справедливы при точном задании параметров ГТ, точном съеме сигналов по Q^i, β^i и производным, и периоде квантования $0.1*10^{-3}$ с.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Алешкин, В. В*. Частотные свойства алгоритма асимптотического оценивания компонентов вектора угловой скорости / В. В. Алешкин // Вестник СГТУ. – Саратов, 2012. – № 2 (65). – Вып. 1. – С. 105–111.

2. *Алешкин, В. В*. Оптимизация ориентации гиротахометров в блоке при алгоритмической компенсации их погрешностей / В. В. Алешкин // Вестник ТГТУ. – Тамбов, 2011. – Т. 17. – № 2. – С. 333–341.

3. *Джон, М. Смит*. Математическое и цифровое моделирование для инженеров и исследователей / Джон М. Смит ; пер. с англ. Н. П. Ильиной ; под ред. О. А. Чембровского. – М.: Машиностроение, 1980. – 271 с.

УДК 882 – 1 «11» +882.09 – 1 «11» 519.25

Г. И. Брызгалин

НОРМАЛИЗОВАННЫЙ ТЕКСТ ИГОРЕВА СЛОВА

Волгоградский государственный технический университет

vm@vstu.ru

В настоящей статье [7]–[9] приведен несколько уточненный нормализованный текст «Слова о полку Игореве», сопровождаемый объяснением всех его отклонений от П1800. Раскрываются количественные свойства структуры, симметрия и смыслы уникального поэтического произведения.

Ключевые слова: текст, структура, симметрия, смыслы, количественные свойства текста.

G. I. Bryzgalin

NORMALISED TEXT OF IGORS WORD

Volgograd State Technical University

This paper [7]–[9] presents normalised text of the «Slovo o polku Igoreve» and explanations for every case of changing the signs in the First Print Book of 1800 Year. The original quantities of the poetical text and symmetry of sences are describing.

Keywords: text, structure, symmetry, meaning, the quantitative properties of the text.

Попытки исправления текста «Слова о полку Игореве», дошедшего до нас в форме первого печатного издания 1800 года (П1800), широко ведущиеся исследования специалистами в разных областях знания, в частности [1]–[12], свидетельствуют о следующем факте: *оригинальный порядок Авторского текста, а также отдельные слова и выражения претерпели со временем существенные нарушения*. В [7]–[9] обосновано утверждение, что кроме накопления естественных искажений при переписках, текст пережил в своей истории две фундаментальные катастрофы. С использованием математических расчетов были опознаны и отделены друг от друга перестановки частей в каждой из катастроф, разработана и записана в формах, обусловленных технологией восстановления, новая версия, названная *нормализованным текстом Авторских листов «Слова о полку Игореве*. В настоящей статье, продолжающей эти работы, приведен несколько уточненный нормализованный текст, сопровождающийся объяснением всех его отклонений от П1800. Раскрываются количественные свойства структуры, симметрия и смыслы уникального поэтического произведения.

1. Нормализация текста. Одним из достоверных источников, на основе которых ведутся исследования «Слова», кроме П1800 и Екатерининской рукописи, служит реабилитированный Н. К. Гаврюшиным известный Щукинский список [2], [4]. Ценность его прирастает за счет его особенной неполноты: текст производит впечатление аккуратно сокращенного (примерно на 2000 букв) списка с протографа П1800 с сохранением порядка этого печатного издания и удалением «темных» мест». При этом субъективно приобретается существенно большая ясность прочтения, полагаться на достоверность которой, разумеется, приходится с осторожностью.

Как признано исследователями, системно занимавшимися этим вопросом, оригинальный Авторский список «Слова» был создан на рубеже 11–12 веков. Используемая в [7]–[9] версия его дальнейшей судьбы предполагает (по-видимому, случайную) перестановку части Авторских листов перед записью первой рукописной книги (1-я катастрофа текста). Потом книга этого, скажем, *первого рукописного издания*, или может быть список с нее, претерпела примерно через 300 лет физическое разрушение с разрывом отдельных листов на части (2-я катастрофа текста). Все листы в начале 16 века были собраны и с них восстановлены два текста: дошедший до нас в виде Щукинского списка, сокращенный и в виде Екатерининского списка – полный.

Триединая цель нормализации:

1) восстановить Авторский порядок текста, понять логику и смыслы повествования;

2) исправить описки и «темные места»;

3) записать древний текст современными буквами, расставив (предположительно) ударения, поддерживающие стихотворный ритм и размер, и разбив на смысловые части.

При достижении этой цели используется гипотеза о наличии условного куплета, как единицы длины текста в 120 буквомест, и ра-

венстве общего объема Авторского текста 120 таким куплетам. Все «Слово» при этом занимает ровно 120^2=14 400 буквомест.

Будем понимать нормализацию произведения как запись его текста буква в букву с заменой каждой старинной на современную. Исключение составляют лишь явно пропущенные либо ошибочно вставленные буквы, а главное – так называемые «темные места», где править приходится искаженные группы слов, иногда с утраченным смыслом.

Процесс исправления средневековой рукописной книги по дошедшим до нас *спискам со списков* отчасти можно считать обработкой текстовой информации посредством замены ее языкового носителя на другой, более приемлемый носитель. В более полном понимании следует вести речь также об осознании смыслов и сохранении художественной ценности поэтического произведения, для чего приходится учитывать не только фактуру информации, но личность автора, его связи и мировоззрение.

Относительно имени Автора исследуемого здесь произведения, ограничимся декларацией, что оно четко и традиционно указано в заглавиях обоих сохранившихся полных источников древнего текста «Слова о полку Игореве *Игоря сына Святславля внука Ольгова*» [7].

Что касается языка, то он, конечно, был другим, но не настолько, чтобы его совсем нельзя было понимать современному человеку, не порвавшему связи с русским народным говором и достаточно восприимчивым к разнообразию его ударений и иных признаков местных форм. Можно, например, быстро приспособиться к тому, что вместо одной буквы «о» в старинном тексте используются две: краткое «ъ» и долгое «о», или когда вместо двух привычных букв «и», «ы» применяется набор из четырех, выражавших целый спектр звуков «ї, і, и, ы». Однако к искажениям ряда хорошо знакомых нам слов, таких как «полки», «волки», которые почти так же писались и произносились в конце 12 века, но в последующие годы получили написание с перестановкой соседних гласного и согласного «плъкы», «влъци» (болгарское влияние), – привыкнуть трудно. Обстоятельства такого рода обусловили запись нормализованного текста буквами современной русской азбуки. Собственно, это всего лишь следование веками сложившейся традиции, когда теряется Авторское написание букв, а значит, результат такой работы уже нельзя назвать восстановлением.

Несомненно, что строгость соблюдения в поэтическом тексте доступно измеримых размеров его частей объективно служит *повышению живучести* рукописного произведения. Не исключено, что Автор «Слова», подбирая стандартные размеры стихов, тем самым позаботился снабдить будущих переписчиков, говоря современным жаргоном, «критериями оценки эксплуатационной пригодности ветшающих текстов». Во всяком случае, близость размера стихов П1800 к значениям, кратным 120 буквоместам, рассматривается здесь как один из признаков сохранности имеющегося в наших руках текста. Насколько именно должна соблюдаться точность этих размеров – вопрос тонкий, ведь перед нами удивительно чувствительное к нюансам ритма и смысла творение, так что само по себе, без некой высшей цели, количества букв в стихах вряд ли заботили Автора.

2. Структура и статистика нормализованного текста. Формальным критерием (разумеется, не абсолютным) правильности нормализуемого текста служит точность соблюдения кратности размеров стихов, глав и разделов с введенной единицей измерения – мерным куплетом из 120 буквомест (119 букв) при условии согласования смыслов и художественного качества поэмы. Собственно, *реально достигаемый на этом пути оптимум и называется нормализованным текстом*.

С тем, чтобы любой мог легко проверять эту близость, текст приведен здесь без знаков препинания. При работе над ним количество букв помеченного фрагмента выводилось на экран одним щелчком управляющего устройства («мышки»). Эта возможность современных компьютерных средств не просто облегчила продвижение в описываемых изысканиях, но качественно обеспечила получение итоговых фактов, а благодаря им и чисто литературоведческих выводов.

Следует оговорить, что гипотеза о покуплетном строении текста с размером куплета a=119 буквам не предполагает наличия самостоятельных одиночных куплетов, имеющих в точности этот размер. Стихи (короткие части поэмы с относительно самостоятельным смыслом), содержащие количество букв, точно кратное 119, изредка встречаются, но чаще имеют отклонения в ту или иную сторону. Причем, судя по их конкретному смыслу – в частности по личности, которой они посвящены, – такая избирательность в точности раз-

мера частей текста и количестве букв в них не вполне случайна, а определяется особым отношением Автора к этим лицам или тематике стихов. Весь нормализованный текст «Слова», состоящий из 14 280 букв, разбит на 4 раздела (крупные структурно и тематически определенные части), 16 глав и 40 стихов. Представленный ниже текст с последними поправками снабжен заголовками, дающими возможность отслеживать место и смысл отдельных частей в общей структуре произведения.

Обозначения структурных характеристик постишного и сквозного счета:

a_i – длина стиха в буквах; $a_i = 119k_i + \delta_i$; k_i – длина стиха в куплетах; ***δ_i – погрешность в кратности $\delta_i = a_i - ak_i$***;

***A_i – накопленная длина текста постишно: $A_i = 119K_i + \Delta_i$.; K_i – текущее количество накопленных куплетов*;**

$\Delta_i = A_i - 119K_i = \Sigma\delta_i$ – накопленная погрешность с начала произведения до конца i-го стиха.

Логическое обоснование утверждения, что *постишная структура всех частей произведения из условных куплетов, кратных по количеству букв числу 119, выстроена самим Автором «Слова»*, состоит в следующем:

1) количество букв в стихотворном куплете подчиняется законам поэтического творчества и, как правило, не укладывается в заранее заданные формальные рамки, так что *размеры реальных стихотворных куплетов поэмы, измеренные в буквах, можно признать величинами случайными*;

2) стих, глава и раздел поэмы составляются из куплетов, так что *размеры более крупных частей и все произведение в целом можно признать суммами случайных величин* – размеров отдельных реальных стихотворных куплетов;

3) если признать, что Автор подчинялся только своему вдохновению и не управлял количеством букв в поэме и ее отдельных частях, то определённые *выше случайные величины должны быть в совокупности независимыми друг от друга*;

4) согласно известной теореме теории вероятностей *дисперсия суммы независимых случайных величин равна сумме их дисперсий*. Из нее следует, что *при объединении куплетов в стихи, главы, разделы и все произведение в целом средние квадратические отклонения от размера куплета a=119 среднестатистически* ***должны возрастать***;

5) на деле, как при внимательном (даже и неформальном) анализе бесспорно обнаруживается из представленных ниже таблиц постишной структуры, *отклонения от значений, кратных a=119*, ***в целом явно убывают*** *с ростом числа куплетов в части произведения,* ***достигая нуля*** *для всех четырех больших разделов произведения.*

Следовательно, ***размеры частей поэмы не являются независимыми случайными величинами***. Некое целенаправленное воздействие обеспечивало систематическое убывание величин, которые должны бы возрастать.

Заключительное замечание. Произведенные изменения в тексте П1800 непосредственно опирались на предложения исследователей самых разных профессий, либо избирательно учитывали догадки, попытки, соображения, накопленные за восемь столетий трудом радетелей «Слова» по его сохранению (см., в частности, [1]–[5], [10]–[12].

ПРИЛОЖЕНИЯ

I. Перечень исправлений букв текста Первого печатного издания (П1800)

Обозначения источников сведений о количестве *добавленых* (либо *изъятых* (тогда при них ставится знак «минус») букв в определенном слове или группе слов):

Щ – Щукинский список по [2]; **Г** – Гудзий [3]; **Т** – Творогов [5]; **П** – П 1800

(Е) – подтверждение в списке для Екатерины II по данным Н. К. Гаврюшина в [2].

В последнем (правом) столбце по центру – количество принятых здесь исправлений букв в соответствии с указанными источниками; а слева в этом же столбце жирным шрифтом – счет, так сказать, «отсебятины» автора этой статьи.

* – знак, подтверждающий принятое исправление таким же написанием в другом месте П 1800.

	П1800	Исправленное	Щ	Г	Т	П	Счет добавленных букв
1.	мыслію	мыс**е**лью					**1**
2	бо рече	бо реко**ша**					**2**
3	песь, песь,песьми	пес**н**ь, пес**н**ь, пес**ньми**(E)	1	1	1	*	3
4	Олга, Олзе, …	Ол**ь**га, Ол**ь**ге,…				*	5
5	Половец**ь**кую	Половецкую				*	-**1**
6	Рус**ь**кую, Рус**с**кую	Рускую				*	-**1** -1
7	славы	славо**ю**	1				1
8	зби	**въ**зби**ся**		2	2		**2** 2
9	пяткъ	пят**ъ**къ		1	1		1
10	не былонъ	не было **о**но	1	1	1		1
11	тоже звон	то**й** же звон		1	1		1
12	Даж**дь** – Божа	Дажьбожа				*	-**1**
12	дебрь Кисаню и не сошлю	дебрь**с**ки сани и несоша		1			
13	опу**с**тоша	опуташа(E)	-1	-1	-1		-1
14	убуди	убуди**ста**		3	3		3
15	Кіевскый, … Кіевскаго	Киев**ь**ский (E)	1				**1** 2
16	Святславъ	Свят**ъ**славъ(E)	1		1	*	3
17	бес щитовь	без**ъ** щитовъ				*	1
18	злачены**м**и	злачёные	-1				-1
19	Галичкы	Галичкы́**й**	1				1
20	Угорскыи	Угор**ь**ские(E)	1			*	1
21	утрпе	утр**ъ**пе(E)	1		1		1
22	Мстисла́вичи	Мстислав**л**ичи (E)	1				1
23	кровать и рекъ	кровь а т**ой** и рекъ		1			**1** 1
24	не бысь	не быс**т**ь	1	**1**	1		1
25	воз**з**ни	вонзи			-1	*	-1
26	от**т**вори	отвори			-1	*	-2
27	Полотске	Полот**ь**ске(E)	1				1
28	се**го** бо ныне	се бо ныне					-**2**
29	роз**и** нося	розно ся		-1	-1		-1
30	гласъ слышитъ	гласъ **ся** слышитъ		2			2
33	въшуме	въ**с**шуме	1				1
34	вежи ся подвизаша**ся**	вежи ся подвизаша					**-2**
35	Ростиславя	Ростислав**л**я		1	1		1
36	стугою	с**ъ** тугою		1			1
37	преклонило	преклонило**ся**		2	2	*	2
38	втроскóташа	в**с**троскоташа		1			1
39	тол**ь**ко	толко(E)	-1	-1			-1
40	сокол**ь**ца	соколца	-1			*	-1
		Изменено букв:					**14** **14**+47 = 61
		удалено					**–7** **–7–**9 = –16
		добавлено					**7** **7**+38 = 45
		увеличено на					**0** **0**+29 = 29

II. Таблицы стихотворной структуры нормализованного текста: $a=119$, $a^2=14\,280$

Раздел I. НАЧАЛА. Букв 3332=28 *a*

I	1. ОБАЯНИЕ СТАРЫХ СЛОВЕС 811=7*a*–22		2. СВЯТОСЛАВИЧИ 752=6*a*+38		3. К СИНЕМУ ДОНУ 828=7*a*–5		4. В ПОЛЕ ПОЛОВЕЦКОМ 941=8*a*–11	
	Пролог	**Зачин**	***Запев***	***Братья***	***Решение***	**В пути**	**Первый бой**	**Предчувствия**
a_i	621	346	217	379	355	473	483	458
k_i	5	3	2	3	3	4	4	4
K_i	5	8	10	13	16	20	24	28
δ_i	26	–11	–21	22	–2	–3	7	–18
Δ_i	26	15	–6	16	14	11	18	**0**
A_i	621	967	1184	1563	1918	2391	2874	**3332=28*a***

Раздел II. ГЛАВНЫЕ СОБЫТИЯ. Букв 3689=31 *a*.

II	5. ОЛЕГ ГОРИСЛАВИЧ 714=6*a*		6. БИТВА 1182=10*a*–8			7. ПОСЛЕДСТВИЯ 843=7*a*+10		8. СОН СВЯТОСЛАВА 950=8*a*–2	
	Память Ольговича	***Былые усобицы***	***Западня***	***Всеволод***	**Поражение**	**Вести беды**	**Обиды и напасти**	***Мутен сон***	***Речи бояр и дружины***
a_i	248	466	253	329	**600**	370	473	333	617
k_i	2	4	2	3	5	3	4	3	5
K_i	30	**34**	36	39	44	47	51	54	59
δ_i	10	–10	15	–28	5	13	–3	–24	22
Δ_i	10	**0**	15	–13	–8	5	2	–22	**0**
A_i	3580	4046	4299	4628	5228	5598	6071	6404	**7021=59*a***

Раздел III. СУД И РАЗБОРКИ. Букв: 3451=29 *a*

III	9. МНЕНИЕ ЕВРОПЫ 481=4*a*+5		10. УПРЕКИ СВЯТОСЛАВА 1004=8*a*+52			
	Кают Игоря	***Славят Святослава «грозного»***	**Игорю и Всеволоду Северским**	**Брату Ярославу Черниговскому**	**О себе и Владимире Переяславском**	**Всеволоду Суздальскому и рязанским князьям**
a_i	104	377	346	214	225	219
k_i	1	3	3	2	2	**1**
K_i	60	63	66	68	70	71
δ_i	–15	20	–11	–24	–13	100
Δ_i	–15	5	–6	–30	–43	57
A_i	7125	7502	7848	8062	8287	8506

III	11. ПРИЗЫВЫ СВЯТОСЛАВА 1266=11*a*–431				12. АСИММЕТРИЧНЫЙ ОТВЕТ 700=6*a*–14		
	Рюрику и Давыду	**Ярославу Галицкому**	**Роману Волынскому**	**Турово-Пинским князьям**	**Сушь на Руси**	**Изяслав Городенский**	**Автор новгородскому и полоцким князьям**
a_i	217	346	484	219	114	380	206
k_i	2	3	4	2	1	3	2
K_i	73	76	80	82	83	86	88
δ_i	–21	–11	8	–19	–5	23	–32
Δ_i	36	25	33	14	9	32	**0**
A_i	8723	9069	9553	9772	9886	10266	**10472=88 *a***

Раздел IV. РУСЬ НЕПОДСУДНАЯ. Букв: 3808 букв=32 *а*

IV	13. ВСЕСЛАВ ПОЛОЦКИЙ 973=8*а*+21			14. ЯРОСЛАВНА **800**=7*а*–33		15. ОСВОБОЖДЕНИЕ 1083=9*а*+12			16. ВОЗВРАЩЕНИЕ 952=8*а*	
	Дерзость и удачи	**Власть и судьба**	**Святой Владимир**	**Весть на Дунай**	**Мольбы Ярослав-ны**	**Знак Божий**	**Побег**	**Донец и Стугна**	**Погоня**	**Русь!**
a_i	375	466	132	**200**	**600**	109	496	478	476	476
k_i	3	4	1	2	5	1	4	4	4	4
K_i	91	95	96	98	103	104	108	112	116	**120**
δ_i	18	–10	13	–38	5	–10	20	2	1	–1
Δ_i	18	8	21	–17	–12	–22	–2	**0**	**0**	**0**
A_i	10647	11313	11445	11645	12245	12354	12850	**13328**	13804	**14280**

III. Нормализованный текст «Слова о полку Игореве»

◄ *Первая половина текста*	► *Вторая половина текста*	Пояснения
I. НАЧАЛА **1. Обаяние старых словес** ***Пролог*** **СЛОВО О ПО́ЛКУ ИГО́РЕВЕ** И́горя сына Святъсла́вля Внука Ольго́ва Не ле́по ли ны́ бяшеть бра́тие Нача́ти стары́ми слове́сы Трудныхъ пове́стий О по́лку Иго́реве Игоря Святъсла́влича Нача́ти же ся́ тъй песни По былинамъ сего времени А не по́ замышле́нию Бо́яню Боянъ бо вещий аще кому Хотяще песнь творити То растека́шется Мы́селью по́ древу Серымъ вълко́мъ по зе́мли Сизымъ орломъ подъ о́блакы Помня́шеть бо ре́коша Первыхъ времёнъ усобицы Тогда пу́щашеть Ї соко́ловъ На стадо лебе́дей Который доте́чаше Та́ преди песнь поя́ше Старо́му Яро́слову Храброму Мсти́славу И́ же зареза Реде́дю Предъ по́лкы Касо́жьскыми Красному Романови Святъсла́вличу Боянъ же братие не Ї соко́ловъ На стадо лебе́дей пуща́ше Но своя вещиа пе́рсты На живая струны въсклада́ше Они же сами Княземъ славу роко́таху ***Зачин*** Почнёмъ же братие повесть сию О́тъ стара́го Владимира До ныне́шняго Игоря И́ же истя́гну умъ Крепостию своею И́ поостри́ Сердца своего мужествомъ Наполнився ратнаго духа Наведе́ своя храбрыя по́лкы На землю Поло́вецкую	**III. СУД И РАЗБОРКИ** **9. Мнение Европы** ***Кают Игоря*** Ту́ немцы́ и вене́дицы Ту́ грецы́ и морава Поютъ славу Святъсла́влю Кають князя Иго́ря И́ же погрузи жиръ Во́ дне Каялы ре́кы поло́вецкия ***Славят Святослава*** Тии бо два́ храбра́я Святъсла́влича Иго́рь и Всево́лодъ Уже лжу убуди́ста Которую то бя́ше успи́лъ Отецъ ихъ Святъсла́въ Грозный великый Кие́вьскый Грозою бяшеть притрепалъ Своими сильными по́лкы И́ харалу́жными ме́чи На́ступи́ на землю Поло́вецкую Притопта хълмы и яру́гы Взмути́ реки и о́зеры И́ссуши́ потоки́ и болота А поганаго Ко́бяка изъ луку моря Отъ железныхъ великихъ Полковъ половецкихъ Яко вихрь выто́рже И па́деся Ко́бякъ въ граде Кие́ве Въ гридни́це Святъсла́вли **10. Упрёки Святослава** ***Игорю и Всеволоду*** Тогда великий Святъславъ И́зрони́ злато сло́во Слеза́ми смеше́но и ре́че О моя сыновча Игорю и Всево́лоде Рано е́ста нача́ла Половецкую землю ме́чи квели́ти А себе славы искати Но́ не честно́ одоле́сте Не честно бо Кро́вь поганую про́лиясте Ваю храбрая се́рдца Въ жесто́цемъ хара́лузе скована А въ буести закалена́	Подтвержденные другими источниками вставки (или изъятия) очевидным образом пропущенных (лишних) букв обычно не комментируются. И счет изменения числа букв здесь для них не ведется Текст «Слова» записан двумя столбцами: в левом разделы I-II ◄, в правом ►III-IV. Так удобно прослеживать организованную его Автором смысловую перекличку двух половин произведения ► Уже лжу убуди́ста. В П1800: *убуди..* Немцы и венедцы утверждают, что Игорь и Всеволод убудили, возбудили зло. Убуди́ста – старинная форма глагола при подлежащем в двойственном числе. ► П1800: *Киевский* (см. ниже) ◄ П1800: *мыслию.* Следуя мнению, что речь идет о белке, следовало бы писать «мысью» или «мышелью». Полагаем, однако, что в слово «мы́селью» или, например, «мысьлию» Автор мог вложить два смысла: это звучит и как *белка,* и как *мысль*. Первый выстраивает ряд предварительных состояний деятельности и познания Бояна: как белка, волк, орёл. Второй связывается дальнейшими творческими действиями, см. конец следующего стиха. **+1** ◄ **П**омня́шеть бо ре́ко**ша** – Вспоминал, как говорили... Прошедшее в прошедшем времени. **+2** ◄ пес**нь** – вставлена пропущенная «н». . ►Святъслав**ъ** – вставлен «ъ» ◄ В двух словах «Половецькую, Руськую» из текста П 1800 удален «**ь**», потому что далее в этих же словах П1800 он отсутствует **–2**

За́ землю Рускую О Бояне Соловию стараго времени Абы ты́ сиа по́лкы ущекоталъ Ска́ча славию́ по мы́слену древу Летая умомъ подъ о́блакы Свивая славою О́баполы́ сего времени Рыща въ тропу Трояню Чрезъ по́ля на го́ры **2. Святославичи** ***Запев*** Пети было песнь Иго́реви Того О́льга внуку Не буря соко́лы зане́се Чрезъ по́ля широкая Га́лицы ста́ды бежать Къ Дону Великому Чи́ли воспети было Вещий Боя́не Велесовь вну́че Ко́мони ржуть за Сулою Звенить слава въ Кие́ве Трубы трубять въ Новегра́де Стоять стязи въ Путивле ***Братья*** Игорь ждётъ Мила брата Всево́лода И рече ему Буй Туръ Всево́лодъ Оди́нъ бра́тъ Одинъ све́тъ светлый Ты Игорю Оба есве Святъсла́влича Седлай брате Свои бо́рзыи ко́мони А мои ти готовы осе́дланы У Курьска напе́реди А мои ти куряни све́домы къме́ти Подъ трубами по́вити По́дъ шело́мы възлеле́яны Конецъ ко́пия въскоръмлены Пути имъ веду́мы Яру́ги и́мъ знаемы Луки у нихъ напряжёны Ту́лы отво́рены Сабли изъо́стрены Сами скачуть Аки серые во́лки въ поле Ищучи себе чти́ а князю славы **3. К Синему Дону** ***Решение*** Тогда И́горь възре На светлое солнце И ви́де отъ него тьмою Вся́ своя во́я прикрыты И ре́че Игорь Къ дружине своей Братие и дружино Лу́це жъ бы по́тяту быти Не́же поло́нену быти А вся́демъ братие На свои бо́рзыя ко́мони Да по́зримъ Синего Дону Спала́ князю умъ похо́ти Искусити Дону Великаго И жалость ему знаме́ние за́ступи Хощу бо рече Копие́ приломи́ти Конець поля поло́вецкаго Съ вами ру́сичи хо́щу Главу свою приложи́ти А ли́бо испи́ти шело́момъ Дону	Нъ рекосте мужа́имеся сами Пре́днюю славу сами похитимъ А задню́ю ся сами поделимъ Се́ ли створи́сте Моей сребре́ней еди́не ***Брату Ярославу*** А́ уже не́ вижду власти Сильнаго и богатаго И многово́и брата моего Ярослава Съ черниговьскими быля́ми Съ мо́гуты и съ татра́ны И́ съ шельби́ры и съ то́пчакы И́ съ ревуги и съ о́льберы Тии бо́ безъ щито́въ съ засапо́жникы Кликомъ полкы побеждаютъ Звоня́чи въ прadéднюю славу ***О себе и Владимире Переяславском*** А чи ди́во ся братья Ста́ру по́молоди́ти Ко́ли соколъ въ мы́техъ бываетъ Вы́соко́ птицъ възбиваетъ Не дастъ гнезда своего въ обиду Но се́ зло́ Княже ми непособие На ниче си годины обрати́ша Се у Ри́мъ кричатъ Подъ сабля́ми поло́вецкыми А Володи́миръ подъ ранами Туга́ и тоска сыну Глебову ***Всеволоду Суздальскому и Рязанским*** Великый княже Всево́лоде Не мыслию ти прелете́ти изда́леча О́тня зла́та стола́ поблюсти́ Ты бо можеши Волгу Вёслы раскропити А Донъ шеломы выльяти А же́ бы ты бы́лъ То была бы чага́ по ногате А кощей по резане Ты бо можеши по́суху Живыми шере́ширы стре́ляти У́далы́ми сыны Глебовы **11. Призывы Святослава русским князьям:** ***Киевскому областному и Смоленскому*** Ты́ буй Рюриче и Давыде Не ваю́ ли злачёные ше́ломы По́ крови пла́ваша Не ваю́ ли хра́брая дру́жина Ры́кають а́ки туры́ Ране́ны сабля́ми калёными На поле незна́еме Вступита господи́на Въ злата́ стремена́ За обиду сего времени За́ землю Рускую за раны Иго́ревы Буего Святъславлича ***Галицкому*** Га́личкы́й Осмомы́сле Яро́славе Высо́ко еди́ши На́ своёмъ златоко́ваннемъ сто́ле По́дперъ го́ры Уго́рьскыи Своими железными по́лки Заступивъ коро́леви путь Затворивъ Дунаю воро́та Меча бремены чрезъ облаки Суды рядя́ до Дуная Гро́зы твоя по зе́млямъ тукъ̀тъ Отворя́еши Киеву вра́та	◄ Ранее подобно белке, скачущей по реальному дереву, а теперь соловьем-поэтом по древу своих мыслей. ◄ В П1800 было «славы». Добавлена буква +**1** ◄О́льга – Добавлен «**ь**». Это слово «О́лга», записано без «**ь**» в П1800, с удивительным единодушием все это слово исключается в авторитетных современных прочтениях. Представляется, однако, невероятным, чтобы составители П1800, которые буква в букву следовали имевшемуся у них древнему списку, позволили себе исключить целое слово. Именно благодаря тому, что переписчики в течение сотен лет следовали этому правилу и могла сохраниться количественная структура оригинального текста «Слова». Согласно статье Н. К. Гаврюшина в [2], слово «Олга» отсутствует в тексте Щукинского списка и в цитатах из поэмы в «Истории государства Российского» Карамзина, но сохранено в списке для императрицы Екатерины и в выписках А. Ф. Малиновского. Учитывая значительное сокращение Щукинского списка по сравнению с Мусин-Пушкинским (в нем исключены практически все «темные места»), исключение это не следует считать аргументом. А вот В. А. Жуковский, прочтение которого высоко ценил А. С. Пушкин, сохранил это слово, см. [2]. Всего в П1800 имя Олег в разных формах используется 11 раз, из них в 5 словах буква «е» исключена, в 4 словах редуцирована в «ь», а в двух сохранена в полной форме. В нормализованном тексте исключения этой буквы заменены на редуцированный вариант «ь», поскольку в поэтическом произведении это давало Автору степень свободы для сохранения ритма стиха ► П1800: злачён**ыми** П1800: Уго́рскыи, однако ранее в главе об Олеге Святославиче читаем «Между уго́рьскими иноходьцы». Здесь принят вариант с «**ь**»

В пути Тогда въступи́ Игорь князь Въ златъ стре́мень И поеха по чистому полю Солнце ему тьмою путь заступа́ше Но́щь стонущи ему грозою Птичь убуди́ Свистъ зверинъ въста Възби́ся Ди́въ Кличетъ ве́рху древа Велитъ послу́шати зе́мли незна́еме Вълзе́ и Помо́рию и́ Посули́ю И Суро́жу и Ко́рсуню И́ тебе́ Тьму́торока́ньский болванъ А поло́вци негатовами дорогами Побегоша къ Дону Великому Крычатъ телегы полу́нощи Рцы лебе́ди роспу́жены Игорь къ Дону во́и ведётъ Уже бо бе́ды его Пасётъ птичь по дубию Волки грозу воскрожа́ть по яру́гамъ Орлы клёктомъ на кости Звери зовутъ Лисицы брешутъ На́ чърлёные щиты **4. В поле половецком** ***Первый бой*** О Руская зе́мля Уже за шело́мянемъ е́си Долго ночь меркнетъ Заря светъ запала́ Мъгла по́ля покрыла Щёкотъ славий успе́ Говоръ гали́чь убуди́ Русичи вели́кая по́ля Чьрлёными щи́ты пре́городи́ша Ищучи себе чти́ а князю славы Съ зара́ния въ пя́тъкъ пото́пташа Поганыя по́лкы поло́вецкыя И рассу́шась стре́лами по́ полю По́мчаша красныя девкы поло́вецкыя А съ ними злато и па́волокы И драгыя оксами́ты Орьтъма́ми И я́пончица́ми и ко́жухы Начаша мосты мости́ти По болотомъ и гря́зивымъ ме́стомъ И вся́кыми узо́рочьи Поло́вецкыми Чьрленъ стягъ Бе́ла хорю́говь Чьрлена чёлка Сре́брено стру́жие Храброму Святъсла́вличу ***Предчувствия*** Дремлетъ въ поле Ольго́во хоро́брое гне́здо Далече залетело Не бы́ло оно обиде поро́ждено Ни́ соко́лу ни кре́чету Ни́ тебе чёрный воронъ Поганый поло́вчине Гзакъ бежитъ серымъ вълко́мъ Кончакъ ему следъ править Къ Дону Великому Дру́гаго дня́ велми ра́но Кровавыя зо́ри Светъ поведаютъ Чёрныя тучи съ моря идутъ Хотятъ прикрыти 4 солнца	Стреляеши съ отня зла́та стола Салтаны за зе́млями Стреляй господи́не Кончака Поганого кощея За́ землю Рускую за раны Иго́ревы Буего Святъсла́влича ***Волынским*** А ты буй Рома́не и Мсти́славе Храбрая мысль Носитъ вашъ умъ на де́ло Высо́ко плава́еши На дело въ буести Яко соколъ на ве́трехъ ширя́яся Хотя птицу въ буйстве́ одоле́ти Суть бо у ваю железныи па́порзи Подъ шело́мы латинскими Теми тре́сну земля и многи страны Хино́ва Литва́ Ятвя́зи Дере́мела И́ поло́вцы сулицы своя повергоша А главы своя́ подклони́ша Подъ тыи мечи́ харалу́жныи Нъ уже княже Иго́рю Утрьпе со́лнцю светъ А древо не бологомъ листвие срони По Рси́ и по Су́ли грады поделиша А Иго́рева храбраго по́лку не́ кресити́ Донъ ти княже кличетъ И зовёть князи́ на победу Ольго́вичи храбрыи кня́зи Доспе́ли на брань ***Турово-Пинским*** Инъгва́рь и Всево́лодъ И все́ три Мстисла́вличи Не ху́да гнезда шестокры́лцы Не победными жребии Собе власти расхы́тисте Ко́е ваши златыи шело́мы И сули́цы ляцки́и и щи́ты За́городи́те Полю воро́та Своими острыми стрелами За́ землю Рускую за раны Иго́ревы Буего Святъсла́влича **12. Асимметричный ответ** ***Сушь на Руси*** Уже́ бо Сула́ не течётъ Сребрёными струями Къ граду Пе́реясла́влю И́ Двина болотомъ течёть О́нымъ грознымъ поло́чаномъ Подъ кликомъ поганыхъ ***Изяслав Городенский*** Еди́нъ же Иза́славъ Сынъ Василько́въ позвони́ Своими острыми ме́чи О шело́мы литовския Притрепа славу Деду свое́му Всеславу И самъ подъ чьрлёными щи́ты На кроваве траве Притре́панъ литовскыми ме́чи Исходи́ юна кро́вь А той и рекъ Дружину твою княже Птичь крылы́ приоде́ А звери кровь полиза́ша Не бы́сть ту брата Брячи́слава Ни́ другаго Всево́лода Единъ же изрони же́мчужну душу Изъ хра́бра тела Чрезъ злато́ ожере́лие Уныли голо́сы пони́че весе́лие Трубы трубятъ городе́ньскии	► П1800: «оттвори́еши». Хотя пятью строками выше «Затво́ривъ Дунаю воро́та». Возможно формальное правописание переписчика, приставляющего соответствующие приставки «за» и «от» ◄**Въ**зби́**ся** Ди́въ – добавлено 4 буквы к «зби́». Первые две из них неподтверждены, вторые подтверждены в приведённой литературе. Естественное прочтение на современном русском: «взвился» **+2** ► П1800: «утрпе». Принято написание в **Щ** и Екатерининском списке. В переводе на современный: «оттрепетал» ◄ В П1800 «пя́тъкъ», современное «пято́к», пятница как пятый день недели. ► В П 1800 довольно невразумительное: «И схоти ю на кровать и рекъ». «Той» значит тот. **+1** .

А въ нихъ трепещуть
Синии молнии
Быти грому великому
Итти дождю стрелами
Съ Дону Великаго
Ту ся копиéмъ приламáти
Ту ся саблѧмъ потручáти
О шелóмы полóвецкыя
На реке на Каѧле
У Дону Великаго
О Руская зéмле
Уже за шелóмянемъ еси

II. ГЛАВНЫЕ СОБЫТИЯ

5. Олег Святославич

Память Ольговича

Были вéчи Трояни
Минула лета Ярославля
Были пóлки Ольгóвы
Ольга Святъслáвлича
Тóй бо Олегъ
Мечёмъ крамóлу ковáше
И стрелы по зéмли сеѧше
Ступаетъ въ златъ стрéмень
Въ граде Тьмуторокáне
Той же звонъ слы́ша
Давный великый
Ярóславь сынъ Всевóлодъ
А Владимиръ по вся утра
Уши́ закладáше въ Чернигове

Усобицы

Бориса же Вѧчеслáвлича
Слáва на судъ приведé
И на Кáнину зéлену нáполому́
Постлá за обиду Ольгóву
Храбра и млáда князя
Съ тоѧ же Каѧлы Святóпълкъ
Повелé я отца своегó
Между угóрьскими иноходьцы
Ко святей Софии къ Киеву
Тогда при Ользé Горислáвличи
Сеяшется
И растѧшеть усобицами
Погибашеть жизнь
Дажьбóжа внука
Въ кнѧжихъ крамóлахъ
Вецú человéкомъ скратúшась
Тогда по Руской земли
Ретко ратáеве кúкахуть
Но часто врáны граѧхуть
Трупиа себе делѧче
А галицы свою речь говорѧхуть
Хотять полетети на уедúе
То бы́ло въ ты рати
И въ ты́ полкы
А сúцеи рати не слы́шано

6. Битва.

Западня

Се вéтри Стрибóжи внуци
Веютъ съ моря стрелами
На храбрыя пóлкы Игóревы
Зéмля тутнéтъ
Реки мутно текуть
Порóси поля прикрываютъ
Стязи глаголютъ полóвцы
Идуть отъ Дона и óтъ моря
И отъ всехъ странъ
Руские пóлкы обстýпиша
Дети бесови кликомъ
Пóля прегорóдиша
А храбрыи русичи прéградúша
Чьрлёными щиты

Автор Ярославу Владимировичу Новгородскому и Полоцким князьям

Ярославе
И вси внуце Всеславли
Уже понúзить стязи свои
Вонзить свои мéчи вережены
Уже бо выскóчисте
Изъ дéдней славы
Вы́ бо своими крамóлами
Начасте наводити поганыя
Нá землю Рускую
На жизнь Всеславлю
Которóю бо бéше насилие
Отъ зéмли Полóвецкыи

IV. РУСЬ НЕПОДСУДНАЯ

12. Всеслав Брячиславич

Дерзость и удачи

На седьмомъ веце Трояни
Вържé Всеславъ жребий
О девúцу себе любу
Утро же вонзи стрикусы
Отвори врата Новуграду
Расшибе славу Ярóславу
Скочи вълкóмъ
До Немúги съ Дудýтокъ
На Немúзе снопы
Стелятъ головами
Молóтятъ цéпы харáлужными
На тóце живóтъ кладутъ
Вéютъ душу отъ тела
Немúзе кровавы брéзе
Не бологомъ бѧхуть посéяны
Посéяны кóстьми
Рускихъ сыновъ
Тóй клюкáми подпрéся о кóни
И скочú къ граду Киéву
И дотчеся стружиемъ
Злáта стóла Киéвьскаго

Власть и судьба

Всеславъ князь любемъ судѧше
Кнѧземъ грады рядѧше
А самъ въ ночь
Вълкóмъ рыскáше изъ Киева
Доры́скаше дó куръ Тьмýторокáня
Великому Хърсóви вълкóмъ
Путь прерыскáше
Тому въ Полотьске позвониша
Заутренюю рано
У святыя Софеи въ колоколы
А онъ въ Киеве звонъ слыша
Скóчи отъ нихъ лютымъ звéремъ
Въ пълночи изъ Белаграда
Обéсися сине мъгле
Аще и веща душа въ друзе теле
Нъ часто беды страдáше
Тому вещий Бóянъ
Й пръвóе припевку
Смыслёный речé
Нú хытрý ни горазду
Ни птицу горазду
Судá Бóжиа не мúнути
О стонати Руской земли́
Помянýвше пéрвую гóдину
И пéрвыхъ князей

Святой Владимир

Того стáраго Владимира
Нéльзе бé пригвоздúти
Къ гóрамъ Киéвьскымъ
Се бо ныне сташа
Стязи Рюриковы

Ярослав Владимирович неоднократно получал шаткий княжеский «стол» Новгородской республики благодаря покровительству Суздальского князя Всеволода, сына Юрия Долгорукого.
Участвовал во враждебных действиях против Южной Руси.
Поскольку «насилие» от половцев вряд ли грозило новгородцам, речь идёт о Руси как целом.
Тогда налицо противопоставление действий Игоря и Ярослава в строках левого и правого столбцов

Века Трояна» открывают обе симметричные главы, подчеркивая параллельность их содержания – жизнеописания двух энергичных и влиятельных князей Олега и Всеслава, не принадлежащих ветви Мономашичей

► В П 1800: «воззни».
► В П 1800: «оттвори», как и «оттворяеши Киеву врата», вопреки «Затворивъ Дунаю ворóта»

Дальнодействие колокольного звона и упоминания Святой Софии тоже симметричны.

► П1800: «Киéвскаго». Это слово встречается три раза. Согласно Н. К. Гаврюшину, в Щукинском списке (**Щ**), как и в списке для Екатерины Второй есть «**ь**». Стих о Всеславе **в Щ** отсутствует вместе с третьим упоминанием этого слова. Как описано в [2], список **Щ**, похоже, составлен почти одновременно с протографом П1800 по общей предыдущей рукописи так, что из ее текста в **Щ** выброшены все непонятные слова, а в протограф П1800 записывалось все подряд. Будем доверять тексту **Щ. –1**

◄ П1800: «Даждь-божа». Ещё раз это слово встречается без «д». Здесь выбран именно второй вариант. **–1**

Всево́лод

Яръ туре Всево́лоде
Стои́ши на бо́рони
Прыщеши на вои стрелами
Гре́млеши о́ шело́мы
Мечи́ харалу́жными
Ка́мо туръ поскоча́ше
Своимъ златы́мъ
Шело́момъ посве́чивая
Та́мо лежатъ поганыя
Головы поло́вецкыя
Поскепа́ны сабля́ми калёными
Шело́мы Оварьские
Отъ тебе Яръ ту́ре Всево́лоде
Кая рана до́рога братие
Забывъ чти и живо́та
И града Чернигова
О́тня зла́та стола́
И своя милыя хо́ти
Кра́сныя Глебовны
Свычая и обычая

Поражение

Съ зара́ниа до вечера
Съ вечера до́ света
Летятъ стрелы калёныя
Гри́млютъ сабли о шеломы
Трещатъ копия́ харалу́жныя
Въ поле незна́еме
Среди зе́мли поло́вецкыи
Чёрна земля подъ копыты
Ко́стьми была посея́на
А кро́вию по́льяна
Туго́ю взыдо́ша
По Руской земли
Что́ ми шумить
Что́ ми звенить
Да́веча рано предъ зо́рями
И́горь полкы заворо́чаетъ
Жаль бо ему
Мила брата Всево́лода
Би́шася день би́шася дру́гый
Третьяго дня къ полудню
Падоша стязи Иго́ревы
Ту́ ся брата разлучиста
На брезе быстрой Кая́лы
Ту кроваваго ви́на недо́ста
Ту пи́ръ докончаша
Храбрыи русичи
Сваты́ попои́ша а сами
Поле́гоша за́ землю Рускую
Рускаго злата насы́паша
Ту́ Игорь князь выседе
Изъ се́дла злата́
А въ се́дло щи́ево
Ни́чить трава жало́щами
А древо съ тугою
Къ земли преклонилося

7. Последствия

Вести беды

О далече зайде соко́лъ
Птиць бья къ морю
А Иго́рева храбраго по́лку не́ креси́ти
За нимъ кли́кну Карна́
И Жля поскочи́ по Руской земли́
Сма́гу мы́чучи въ пламяне ро́зе
Жёны руския въспла́кашась а́ркучи
Уже́ намъ своихъ милыхъ ладъ
Ни мыслию смыслити
Ни думою сдумати
Ни о́чима съгля́дати
А злата и сре́бра

А друзи́и Давыдовы
Но ро́зно ся имъ хо́боты па́шутъ
Копиа поютъ

13. Ярославна

Весть на Дунай

На́ Дуна́е
Яро́славнынъ гласъ **ся** слышитъ
Зе́гзицео́ незнаема
Рано кыче́ть
Полечу ре́че
Зе́гзицео́ по Дуна́еви
Омочу бе́брянъ рукавъ
Въ Каяле реке
Утру князю кровавыя его раны
На жесто́цемъ его теле
Яро́славна рано плачетъ
Въ Путивле́ на забра́ле аркучи

Мольбы Ярославны

О ве́тре ветри́ло
Чему господи́не насильно вее́ши
Чему мычеши хино́вскыя стре́лкы
На свое́ю нетру́дною кры́лцю
На моея лады вои
Мало́ ли ти бя́шеть горе́
Подъ о́блакы ве́яти
Леле́ючи ко́рабли на́ Сине море
Чему́ господи́не моё весели́е
По ковылию разве́я
Яро́славна рано плачетъ
Путивлю городу
На забороле аркучи
О Дне́пре Словутицю
Ты про́билъ е́си
Каме́нные горы
Сквозе зе́млю поло́вецкую
Ты леле́ялъ е́си на се́бе
Святославли наса́ды
До по́лку Коб я́кова
Възлеле́й господи́не
Мою ладу къ мне
А быхъ не сла́ла къ нему
Слёзъ на́ море рано
Яро́славна рано плачетъ
Въ Путивле́ на забра́ле аркучи
Светлое и тре́светлое Сълнце
Всемъ тёпло и кра́сно е́си
Чему́ господи́не простре́
Горячую сво́ю лучю
На ладе вои
Въ поле безводне
Жаждею и́мъ луки съпряже́
Тугою имъ ту́ли затче

14. Освобождение

Знак Божий

Пры́сну море Полу́нощи
Идутъ смо́рцы мъглами
Иго́реви князю Бо́гъ путь кажетъ
Изъ зе́мли Поло́вецкой
На́ землю Рускую
Къ о́тню зла́ту столу

Побег

Погасоша вечёру зари́
Игорь спитъ Игорь бдитъ
Игорь мыслию по́ля мери́тъ
Отъ Великого Дону
До Малаго Донца
Ко́монь въ полу́ночи
Овлу́ръ свисну за ре́кою
Велитъ князю разумети
Князю Иго́рю не быть

►П1800: «Се**го** бо ныне» Смысл этого «го» в литературе по «Слову» нигде не объясняется. Видимо описка. **–2**

Игоревы полки окружены, а братья Рюрик и Давыд не могут договориться о выходе в поход.

Ярославнин голос слышит**ся**.

Преданный брат богатырь Всеволод и любимая жена Ярославна –
два самых близких Игорю человека.
Стихо о них расположены симметрично, и поэтические образы в них перекликаются.

Слева описывается
поражение и пленение Игоря,
а справа – знак его освобождения.

Ни мáло того потрепáти
И нáчаша кня́зи про малое
Сé великое мóлвити
А сами на себя крамóлу ковати
А поганыи съ всехъ странъ
Прихождáху съ победами
На́ землю Рускую

Обиды и напасти

Ужé бо братие
Невесёлая гóдина въстала
Уже пу́стыни силу прикрыла
Въстала Обида
Въ силахъ Дажьбóжа внука
Вступила девóю на землю Трояню
Въсплескала лебедиными кры́лы
На Синемъ море у Дону
Плещучи упу́ди жирня́ времена
Усобица кня́земъ на поганыя погыбе
Рекоста бо братъ брату
Сé моё а тó моё же
А́ въстонá бо братие Киевъ тугóю
А Черниговъ напáстьми
Тоска разлия́ся по Руской земли
Печаль жи́рна течé
Средь земли Руской
А кня́зи сами на себя крамóлу ковáху
А поганыи сáми победами
Нары́щуще на Рускую землю
Е́мляху дань по бéле отъ двора
Уны́ша бо градомъ забрáлы
А веселие пони́че

8. Вещий сон и его толкование

Мутен сон

А Святъславъ мутенъ сонъ
Ви́де въ Киéве на гóрахъ
Си́ ночь съ вечёра
Одевáхъте мя рéче
Чърною нáполомóю
На́ кроваты тисóве
Чърпахуть ми си́нее ви́но
Съ тру́домъ смешéно.
Сыпахуть ми́ тощими ту́лы
Поганыхъ толкóвинъ
Великый женчугь на лóно
И нéгуютъ мя
Ужé доскы безъ кнéса
Въ моёмъ теремé златовéрсемъ
Всю́ нощь съ вечёра
Бусовы враны възгрáяху
У Плесньска на болони
Бéша дебрьски сани
И несóша къ Синему морю

Речи бояр и дружины

И ркóша бояре князю
Уже кня́же тугá умъ полони́ла
Се бó два сокóла слетéста
Съ óтня стóла златá
Пои́скати грáда Тьму́тороканя
А любо испи́ти
Шелóмомъ Дону
Уже соколама крылца
Припешáли поганыхъ сабля́ми
А́ самаю опуташа
Въ пути́ны железны
Темно бо бе въ 3 день
Два солнца помéркоста
Оба багряная стóлпа погáсоста
И съ ни́ма молóдая месяца
Олегъ и Святъслáвъ
Тьмою ся́ поволóкоста

Кли́кну стукну земля
Въсшуме трава
Вéжи ся полóвецкие подви́заша
А Игорь князь поскочи́
Горнастáемъ къ трóстию
И белымъ гоголемъ на́ воду
Въврьжéся на борзъ кóмонь
И скочи́ съ него бóсымъ вълкóмъ
И потéче къ лугу Донцá
И полетé соколóмъ подъ мьглами
Избивая гуси и лебеди
Завтроку и обеду и ужине
Коли Игóрь соколóмъ полетé
Тогда Влуръ вълкóмъ потечé
Трусá собою студёную рóсу
Прéтъргостá бо своя́
Бóрзая кóмоня

Донец и Стугна

Донецъ рéче Княже Игóрю
Нé мало́ ти вели́чия
А Кончаку нелю́бия
А Руской зéмли весéлия
Игорь рéче о Дóнче
Нé мало ти́ величия
Лелéявшу князя́ на волнáхъ
Стлáвшу ему зелёну траву
На своихъ сребреныхъ брéзехъ
Одевáвшу его тёплыми мъглами
Подъ сéнию зéлену древу
Стрежáще е гоголемъ на́ воде
Чайцáми на стру́яхъ
Чьрня́дьми на вéтрехъ
Не тáко ли рéче рéка Стугна́
Ху́ду струю имея
Пóжръши чу́жи ручьи
И стругы ростре́ на кусту
Уношу князя Рости́слава
Затвори днé при тёмне березе
Плачется мати Рости́славля
По у́ноши князи Рости́славе
Уныша цветы жалобою
И древо съ тугóю
Къ земли преклонилося

Гзак и Кончак

А не сорокы встроскóташа
На слéду Игóреве ездитъ
Гзакъ съ Кончакомъ
Тогда враны не граяхуть
Галицы помолкъша
Сороки не троскоташа
По лóзию ползаша толко
Дятлове тéктомъ путь
Къ реке кажутъ
Соловии весёлыми песньми
Светъ поведаютъ
Молвитъ Гзакъ Кончакови
Аже соколъ къ гнéзду летитъ
Сокóлича ростреляеве
Своими злачёными стрелами
Рече Кончакъ ко Гзе
А́же соколъ къ гнезду летитъ
А ве сокóлца опутаеве
Краснóю девúцею
И рéче Гзакъ къ Кончакови
А́ще его опутаеве краснóю девúцею
Ни нáма будетъ сокóлца
Ни нáма крáсны девúце
То почнутъ наю птицы бити
Въ поле Полóвецкомъ

Русь!

Рекъ Боянъ и Ходына
Святъславля песнетворца

► П1800: «Въшуме»
► П1800: «вежи **ся** подвизаша**ся**», явный перебор «ся». **–2**

►В этом стихе, как и в П1800, ровно 4 мерных куплета, т. е. 476 букв. Однако слово песньми, конечно, должно иметь «н». Слово встроскóташа, очевидно, потеряло букву «с».

Чтобы восстановить объём текста оригинала, сделаны ещё два исправления. Разумеется, это повлекло просмотр всего текста в П1800, дабы не нарушить единообразия записи каждого слова.

Подтверждение именно такого написания в других источниках (см. в листе исправлений)

Тогда граяли вороны, а теперь поют соловьи.

◄ «Бéша дебрьски сани…». Принимаем запись этого места из книги [3]. Чтение Бéша как Веша позволяет прочитать это так: «Подымали дровни и несли их к Синему морю», имея в виду, что вороны несли сани для исполнения ритуала погребения павших на поле битвы.

Здесь слово «сокóлца», как и в П1800 написано без мягкого знака, четырьмя строками ниже в П1800 этот знак присутствует. Больше эта форма слова не встречается. Выбран ва-

И въ море погру́зиста На реке́ на Кая́ле Тьма светъ покрыла По Руской земли́ Простроша́ся поло́вцы Аки па́рдуже гне́здо И великое буйство Падо́ста хино́ви Уже снесе́ся хула́ на хвалу Уже тре́сну нужда на волю Уже́ вържéся Дивъ на землю Се бо го́тския красные девы Въспе́ша на бре́зе Синему морю Звона́ рускымъ златомъ Поютъ время Бусово Лелеють месть Шароканю А мы уже дру́жина Жадны веселия	Стараго времени Ярославля Ольго́ва кога́ня хоти́ Тя́жко ти́ головы́ кроме́ плечю Зло́ ти те́лу кроме́ головы́ Руской земли́ безъ Игоря Солнце свети́тся на не́бесе И́горь князь въ Руской земли́ Деви́цы поютъ на Дунаи Вьются голо́сы Чрезъ море до Ки́ева Игорь едетъ по Боричёву Къ святе́й Богородици Пи́рогощей Страны рады гра́ды весёлы Пе́вше песнь старымъ княземъ А пото́мъ молодымъ пети Слава Игорю Святъсла́вличу Буй туру Всево́лоду Вла́дими́ру Игоревичу Здравы кня́зи и дру́жина Поба́рая за́ христья́ны На́ поганыя по́лки Княземъ слава и дру́жине Аминь	риант без «ь». В летописны источниках того времени нередко этот знак опускается. Вполне возможно, что в таких случаях произношение слова остается неизменным, просто «л» произносится мягко как «ль». Последний стих состоит из 476 букв, что точно равно четырём мерным куплетам. Никаких правок букв этого стиха из П1800 не производилось. *Готские девицы пели на берегу Синего моря, а русские – на Дунае. Это не значит, что госких нет на Дунае, а русских – на Синем море.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Слово о полку Игореве : Древнерусский текст и переводы / сост. В. И. Стеллецкий; под ред. чл.-корр. АН СССР Ф. П. Филина. – Сов. Россия, 1981. – 280 с.

2. *Гаврюшин, Н. К.* Щукинская рукопись «Слова о полку Игореве» в кн. [4]. – С. 393–412.

3. *Гудзий, Н. К.* Хрестоматия по древней русской литературе / Н. К. Гудзий ; науч. ред. проф. Н. И. Прокофьев. 8-е изд. – М.: Просвещение, 1973. – 528 с.

4. Слово о полку Игореве и его время. Сборник статей под ред. Б. А. Рыбакова. – М.: Наука, 1985. – 415 с.

5. Слово о полку Игореве. Тексты / пер. О. В. Творогова. – М.: Искусство, 1987. – Вкладыш в издание [12].

6. *Брызгалин, Г. И.* Чудесной тайны ключ / Г. И. Брызгалин. – Волгоград : Изд-во Института качеств. – 1994. – 92 с.

7. *Брызгалин, Г. И.* Конфликт утраты авторства «Слова о полку Игореве». Теория конфликта и ее приложения / Г. И. Брызгалин // Мат-лы IV Всероссийской научно-технической конференции. Ч. I / сост. И. Я. Львович, Ю. С. Сербулов ; АНОО ВИВТ ; РосНОУ (ВФ). – Воронеж : Научная книга, 2006. – С. 32–37, 286–303.

8. *Брызгалин, Г. И.* Формальное обоснование порядка текста рукописной книги «Слово о полку Игореве» 13–15 вв. / Г. И. Брызгалин // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1(27) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычисдительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 1). – С. 23–33.

9. *Брызгалин, Г. И.* Постраничное распределение текста «Слова о полку Игореве» / Г. И. Брызгалин // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 8(46) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычисдительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 5). – С. 51–62.

10. *Булахов, М. Г.* «Слово о полку Игореве» в литературе, искусстве, науке. Краткий энциклопедический словарь / под ред. Л. А. Дмитриева. – Минск, Университетское, 1989.

11. *Писарев, Л. И.* Там на Каяле у Дона. В Кн. Встречи с историей. Очерки, статьи, публикации / сост С. Елисеев ; худож. В. Примаков. – М.: Молодая гвардия, 1990.

12. «Слово о полку Игореве» в гравюрах В. А. Фаворского. – М.: Искусство, 1987.

УДК 004.89

А. С. Дмитриев

АДАПТАЦИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-ТЕМПОРАЛЬНОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ В СИСТЕМАХ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Волгоградский государственный технический университет
dmitriealeksan@yandex.ru

В статье представлена комбинированная топологико-темпоральная логика, методики ее исчисления и применение этой логики для идентификации связи между событиями в тексте на естественном языке.

Ключевые слова: семантический анализ, пространственные отношения, темпоральные отношения, комбинированная логика, машинное обучение.

A. S. Dmitriev

ADAPTATION OF COMBINED SPACE-TEMPORAL LOGIC FOR IMPLEMENTATION IN SYSTEMS MACHINE LEARNING

Volgograd State Technical University

The paper presents a combined spatial-temporal logic, method of its calculation and application of this logic to identify the connection between the events in natural language text.

Keywords: semantic analysis, spatial relationships, temporal relationships, combined logic, machine learning.

1. Актуальность проблемы

Общеизвестно, что в последнее время существует большое количество попыток (и иногда довольно успешных) по созданию современных интеллектуальных систем семантического анализа текстов и речи на естественных языках. Существующие системы с разным успехом справляются с поставленными перед ними задачами, но их общий и главный недостаток состоит в том, что семантика текста строится в основном по конечным высказываниям и предложениям. При этом смысл всего текста не рассматривается. Такой подход чреват сильным искажением описанной информации в тексте, если, например, какой-либо факт расписан в нескольких последовательных или разбросанных по тексту предложениях [1].

Естественно, что для решения данной проблемы необходимо использовать методику построения сюжетных линий, или, по-другому, цепочки событий. Именно события в тексте играют в связке различных предложений ключевую роль [2]. Как правило, события описываются глаголами или отглагольными образованиями. Определив все события текста, используя метод анализа текста на основе коммуникативной грамматики, можно попытаться вы-строить между ними причинно-следственную связь, которая позволит достаточно точно описать семантику всего текста, а не отдельно взятых предложений.

При исследовании работ лингвистов Всеволодовой, Золотовой (и других), пришли к выводу, что наиболее эффективным и простым способом определения взаимосвязи между предложениями, наряду с выявлением субъекта событий, является использование пространственных и временных данных о происходящих событиях.

Для определения смысла конечных предложений используется неоднородная семантическая сеть, выявляющая события в рамках одного предложения. В данной семантической сети могут содержаться высказывания, описывающие пространственную и временную информацию. Но эта информация довольно слабо связана между собой, поэтому целесообразно использовать комбинированную логику темпоральных и пространственных отношений, для того, чтобы описываемые в предложениях события представляли собой максимально четкую модель в пространстве и времени [1].

Кроме того, использование комбинированной пространственно-временной (или, по-другому, топологико-темпоральной) логики снижает потребление вычислительных ресурсов. Использование каждой логики в отдельности, с дальнейшими попытками связать результат их работы с событиями, требует существенных временных затрат. Доказано, что такая модель рассуждений относится к классу задач ExpSpace [5]. Так или иначе, задача построения эффективной и достаточно полной топологико-темпоральной логики требует тщательного исследования, поскольку разные ее комбинации относятся к принципиально разным классам сложности.

2. Логика топологических пространств

За основу анализа пространственных отношений взята топологика. Логика топологических пространств в настоящий момент является одним из самых успешных подходов в описании пространственных отношений в искусственном интеллекте. Но до сих пор не было составлено эффективной модели взаимодействия пространственных и временных отношений, поскольку обычное сложение пространственных и временных логик не дает желаемого результата. Связано это в первую очередь с проблемами достижимости и сохранения условий динамических систем.

В работе используется пространственная логика, основанная на пропозициональной логике, в которой унарные предикаты обозначают пространственные объекты, а топологические отношения между ними представляются с помощью внутренних операторов и операторов замыкания, кванторами общности и существования в пространстве и обычными логическими операциями. Данная логика называется модальной логикой и рассматривается как логика топологических пространств. Обозначается как $S4_u$ [3].

Пространственные термы этой логики представляют собой выражения следующего вида:

$$\tau = p_i \mid \overline{\tau} \mid \tau_1 \cap \tau_2 \mid \tau_1 \cup \tau_2 \mid I\tau \mid C\tau, \qquad (1)$$

где p_i пространственные переменные; I и C – операторы включения и замыкания.

Топологическая модель представляет собой структуру следующего вида:

$$Mod = (P, p_0^{Mod}, p_1^{Mod}, ...), \qquad (2)$$

где $P = (U, I)$ – топологическое пространство, а $p_i^{Mod} \subseteq U$ для любого i, U – универсальное непустое множество пространства и I – оператор включения на U.

В работе для описания приведения к одной размерности описываемых пространственных объектов используется понятие регулярных замкнутых множеств (в дальнейшем «Регионы»).

Для описания регионов используется язык RCC-8. RCC-8 является фрагментом логики $S4_u$ и служит для повышения ее выразительности. В дальнейшем под RCC-8 будет подразумеваться логика $S4_u$, расширенная предикатами RCC-8. Синтаксис RCC-8 состоит из переменных, обозначающих регионы r, s, ... и восьми бинарных предикатов:

DC(r,s) – регионы r и s не связаны;

EC(r,s) – r и s внешне связаны;

EQ(r,s) – r и s равны;

и др.

Каждый из этих операторов может использоваться совместно с логическими операциями.

Аргументы RCC-8 предикаты – региональные переменные, интерпретируемые как регулярные замкнутые множества (регионы) топологических пространств. Расширить RCC-8 можно путем представления ее фрагментом логики $S4_u$:

$$DC(r,s) = (p_r \cap p_s = \varnothing) \quad (3)$$

$$EC(r,s) = \neg(p_r \cap p_s = \varnothing) \wedge (Ip_r \cap Ip_s = \varnothing) \quad (4)$$

и др.

3. Темпоральная логика LTL

Временная логика в работе представлена линейной темпоральной логикой LTL.

Темпоральная логика является подходом к рассуждению о времени с использованием темпоральных связок без явного указания количества времени. Самый популярный вариант данной логики – это LTL, которая успешно используется в тестировании и верификации программного обеспечения.

Выбор логики LTL обусловлен тем, что при достаточной выразительной емкости данная логика относится к приемлемому в отношении неклассических логик (к которым принадлежат темпоральные логики) классу сложности PSPACE. Для сравнения более выразительная логика ветвящегося времени BTL относится к практически невыполнимому классу задач 2ExpTime [5].

Размеченное течение времени для LTL является любой строгой линейной последовательностью (W,<), с временными точками $w \in W$ и отношением предшествования <. LTL-формулы построены из пропозициональных переменных p_0, p_1 используя логические операторы и темпоральный оператор *til* – «пока». Например, $x\ til\ y$ означает, что «*x* справедливо, пока имеет место быть *y*». Другие темпоральные связки *Rf* – когда-то в будущем; *Ff* – всегда в будущем; *Nf* – в следующий момент.

LTL-модель представляет собой структуру следующего вида:

$$Mod = (T, p_0^{Mod}, p_1^{Mod}, ...), \quad (5)$$

где $T = (W, <)$, а $p_i^{Mod} \subseteq U$ для любого *i*.

Логики $S4_u$ и LTL относятся к классу сложности вычислений PSPACE и доказано, что эти логики алгоритмически разрешимы [5]. Казалось бы, можно провести последовательно обработку скомбинированных высказываний $S4_u$ и LTL и остаться в рамках сложности PSPACE. Но, к сожалению, подобные рассуждения не принимают во внимание взаимодействие между топологическими и темпоральными операторами. Данные взаимодействия осложнены тем, что топологическое пространство в момент времени *n* может не иметь ничего общего с пространством в момент *n*+1, т. е. каждая точка пространства имеет свою историю.

4. Комбинированная топологико-темпоральная логика

Далее рассмотрим комбинирование топологической и темпоральной логики. Передвижение пространственных объектов во времени представляется в виде модели «снимок экрана», т. е. в каждый момент времени фиксируется текущее положение объекта. Топологико-темпоральная модель – это пара *Mod* = (*P*, *DT*), где *P* = (*U*, *I*) – топологическое пространство, а *DT* – это множество пространственных точек *p* в каждый момент времени $n \in N$.

Ниже приведен следующий список требований для топологико-темпоральной комбинации логик [3]:

• язык логики должен быть способным выразить изменения во времени значений истинности для простых пространственных суждений;

• язык логики должен быть в состоянии выразить изменения или развитие пространственных объектов за несколько фиксированных конечных промежутков времени;

• язык логики должен быть в состоянии выразить изменения или развитие пространственных объектов на всем протяжении времени.

При комбинировании всех трех подходов мы получаем логики, которые либо вообще неразрешимы, либо разрешимы за крайне длительное время. В ходе работы было выяснено, что для существенного снижения сложности работы алгоритма логического вывода на осно-

ве резолюции достаточно исключить из рассмотрения последний принцип.

В итоге мы получим логику, в которой будут исключены все темпоральные операторы, кроме *Nf* (т. е. исключая принцип изменчивости объектов на всем протяжении времени, мы исключаем операторы *Rf* и *Ff*). Полученная логика LTL*RCC-8 хоть и менее выразительна, чем удовлетворяющая описанным выше трем принципам логика LTL*$S4_u$, но при этом вывод из нее осуществляется гораздо быстрее – PSPACE против ExpSpace. Это легко проверить, проведя анализ алгоритма резолюции из двух видов логики. Можно сделать вывод, что приведенную выше модель можно внедрить в реальные системы обработки текстов и при этом разработанные для нее алгоритмы будут разрешимы за разумное время.

Для топологико-темпоральной логики LTL*RCC-8 вводятся следующие термы и формулы:

$$\rho = CIp \mid CI(\rho_1 U \rho_2)$$

$$\tau = \rho \mid \bar{\tau} \mid \tau_1 \cap \tau_2 \mid \tau_1 \cup \tau_2 \mid I\rho \mid Nf\,\tau$$

$$\varphi = Q(\rho_1, \rho_2) \mid \neg\varphi \mid \varphi_1 \wedge \varphi_2 \mid \varphi_1 \vee \varphi_2 \mid \varphi_1 U \varphi_2 \qquad (6)$$

где ρ – региональный терм; φ – формула комбинированной логики и Q – обозначает восемь предикатов RCC-8.

В качестве примера можно привести описание следующего предложения на естественном языке: «Через два месяца Россия станет полноправным членом ВТО». Данное предложение описывается на языке логики LTL*RCC-8 следующим образом:

$$EQ(Nf\ Nf\ WTO, WTO \cup Russia) \qquad (7)$$

5. Идентификация пространственно-временных отношений в тексте

Для описания пространственных и временных выражений представлена следующая модель:

$$R{:}TPF \to TPR(T,P)$$

$$R{:}TPF \to TPR(e_1, e_2), \qquad (8)$$

где R – фунционал соответствия; TPF – параметры временных и пространственных отношений; T= {*te*, *tr*, *ts*} (*te* – интервал события; *tr* – точка отсчета; *ts* – интервал речи); P= {*pe*, *pr*} (*pe* – место действия события; *pr* – место отсчета).

$TPR(T, P)$={*BEGIN&IN*, *END&ON*, *FUTURE&ALONG* и т. д.}, т. е. отношение между временем и местом события, а также местом отсчета и одним из двух отсчетов времени (времени отсчета и времени речи).

$$TPR(e_1, e_2) = \{AFTER\&TO, BEFORE\&ON, DURING\&IN\}.$$

Идентификация временных и пространственных отношений производится посредством методики машинного обучения. Для этого система на вход получает два типа корпуса текстов. Первый корпус – аннотированный синтаксически размеченный корпус; второй – неразмеченный, по которому вручную расставляются метки с обозначением временных и пространственных отношений. Для выстраивания взаимосвязи между пространственно-временными категориями и событиями в тексте используется механизм логико-марковских сетей (Markov-logic networks – MLNs), позволяющий оперировать в своих вершинах обычными логическими формулами, представляющими собой комбинированную пространственно-временную логику. В дальнейшей работе алгоритма производится разбиение сети на атомарные выражения, используемые в обыкновенной Марковской сети [4]. Марковская сеть выполняет задачу классификации по присваиванию тех или иных событий к определенной цепочке событий.

MLNs может ответить на запросы в произвольной форме «Какова вероятность того, что формула F_1 верна с учетом того, что формула F_2 верна?» Если F_1 и F_2 являются двумя формулами в логике первого порядка и C является конечным набором констант, включая любые константы, которые появятся в F_1 или F_2, и L является *MLNs*, тогда:

$$P(F_1 \mid F_2, L, C) = P(F_1 \mid F_2, M_{L,C}) = \frac{P(F_1 \wedge F_2 \mid M_{L,C})}{P(F_2 \mid M_{L,C})} = \frac{\sum_{x \in X_{F_1} \cap X_{F_2}} P(X = x \mid M_{L,C})}{\sum_{x \in X_{F_2}} P(X = x \mid M_{L,C})}, \qquad (9)$$

где X_{Fi} является множеством «миров» (интерпретаций), в которых выполняется формула F_i.

Подставляя в сеть утверждения, которые необходимо проверить (например, принадлежит ли событие к данной цепочке событий) мы, опираясь на обученную сеть, можем получить с некоторой степенью достоверности ответ на принадлежность события к определенной цепочке событий.

6. Краткие выводы

Описанная система может применяться в задачах семантического поиска, поскольку использование расширенных категорий событийности позволяет извлекать смысл не только из конкретных предложений, но также из связных текстов, в которых прослеживается четкая последовательность событий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кондрашина, Е. Ю.* Представление знаний о времени и пространстве в интеллектуальных системах / Е. Ю. Кондрашина, Л. В. Литвинцева, Д. А. Поспелов ; под ред. Д. А. Поспелова. – М.: Наука, 1989. – 328 с.

2. *Бердник, В. Л.* Семантический анализ высказываний идентификации сущности / В. Л. Бердник, А. В. Заболеева-Зотова // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 9(35) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 3). – С. 43–46.

3. *Дмитриев, А. С.* Извлечение пространственно-временных отношений из текста на естественном языке / А. С. Дмитриев // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте : сб. науч. тр. VI междунар. науч.-практ. конф. (Коломна, 16–19 мая 2011 г.). В 2 т. Т. 2 / Российская ассоциация искусственного интеллекта [и др.]. – М., 2011. – С. 883–889.

4. *Фамхынг, Д. К.* Применение нечеткой нейронной сети к обработке временной информации в тексте на русском языке / Д. К. Фамхынг, С. С. Захаров // AIS`08. CAD-2008. Интеллектуальные системы. Интеллектуальные САПР (пос. Дивноморское, 3–10 сент. 2008 г.) : тр. междунар. науч.-техн. конф. / ФГОУ ВПО «Юж. федерал. ун-т» [и др.]. – М., 2008. – Т. 3. – С. 16–22.

5. *Gabelaia, D.* Combining Spatial and Temporal Logics: Expressiveness Vs. Complexity / David Gabelaia, Roman Kontchakov, Agi Kurucz, Frank Wolter, Michael Zakharyaschev // Journal of artificial intelligence research. – 2005. – P. 167–243.

УДК 004.82

А. С. Дмитриев

ОБРАБОТКА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ И ТЕМПОРАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СЕМАНТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ТЕКСТОВ

Волгоградский государственный технический университет

dmitriealeksan@yandex.ru

В статье представлена методика интеллектуального анализа, в основе которой лежит обработка пространственной и темпоральной информации из текста на естественном языке.

Ключевые слова: семантический анализ, коммуникативная грамматика, пространственные отношения, темпоральные отношения.

A. S. Dmitriev

PROCESSING OF SPATIAL AND TEMPORAL DATA TO INCREASE AS THE SEMANTIC ANALYSIS OF THE TEXT

Volgograd State Technical University

The paper presents a methodology mining, which is based on processing of spatial and temporal information from natural language.

Keywords: semantic analysis, communicative grammar, spatial relationships, temporal relationships.

1. Актуальность проблемы

Задачи анализа текста на сегодняшний момент являются одними из самых динамично развивающихся и востребованных на международном рынке услуг в сфере обработки информации. Анализ текста используется повсеместно: поиск информации в Интернет, реферирование текстов, вопрос-ответные системы (суперкомпьютер Watson, поисковая система Wolfram Alpha) и т. д.

В связи с увеличением количества текстовой информации в окружающем нас мире все более актуальным становится проведение интеллектуального анализа текста или, по-другому, семантического анализа.

За последние годы был достигнут большой прогресс в семантическом анализе текстов: разработаны различные подходы и экспериментальные системы (Exactus, ДИАЛИНГ, SemEval, OpenNLP, UIMA и т. д.). Но их общим недостатком является то, что они анализируют структуру отдельных предложений, а не всего текста в целом. Из-за этого теряется последовательность изложения и логическая структура документа. Для решения этой проблемы необходимо идентифицировать взаимосвязи между предложениями, представляя текст в виде единой модели многомерного пространственно-временного универсума.

2. Описание пространственных и временных категорий в тексте

Определение пространственных отношений в тексте производится на основе так называемых *оппозиций*. На первом уровне разбиения всех существующих в русском языке именных локативных групп наиболее важным является отношение локализуемого предмета к локуму, которое основано на нахождении предмета в какой-либо момент времени в пределах локума. В том случае, если предмет в любой момент времени есть, был или будет в пределах локума, то можно говорить о семе сопространствен-ности: в поля, в поле, из поля, полем, через поле, по полю. Иначе, если локализуемый предмет не находится, или не будет находиться в пределах локума, то можно говорить об отношении несопространственности: около поля, у поля, в двух километрах от поля, к полю, мимо поля и т. д. [3].

Остальные уровни описания пространственных отношений в русском языке представлены на рис. 1.

Рис. 1. Описание отношения сопространственности в русском языке

В построении временного порядка используется множество грамматических категорий. К ним относятся видовременные формы глаголов, наречия времени, лексико-семантическая информация и представление о познаваемом мире.

Для идентификации временных категорий из текста на естественном языке используются различные грамматические категории (например видо-временные формы глаголов, наречия времени и т. д.). Большая часть событий выражается через глаголы, время и вид которых определяют временной порядок событий.

Таблица 1

Временные параметры для отдельного события

Временная форма	Прошлое, Настоящее, Будущее
Вид	Совершенный, Несовершенный
Аспектуальный класс	Состояние, Процесс, Моментальное событие, Развивающее событие
Способ действия	Начальный, Пердуративный, Финитивный, Кумулятивный
Модальность	Возможность, Вероятность, Обязанность
Полярность	Положительное, Отрицательное
Форма имени событий	Глагол (в личной форме и инфинитив), Краткое прилагательное, Отпредикатное имя, Причастие, Деепричастие

Идентификация временных отношений проводится по параметрам событий, представленных в табл. 1.

3. Коммуникативная грамматика русского языка

В настоящей работе для обработки текстов автором используется коммуникативная грамматика русского языка, разработанная Г. А. Золотовой [1], [2]. Основная идея данной грамматики состоит в том, что синтаксис и семантика тесно взаимосвязаны в рамках анализа смысла предложений.

Главная характерная особенность синтаксического анализа состоит в том, что для дальнейшего семантического анализа составляются все допустимые деревья синтаксических зависимостей рассматриваемого высказывания. В дальнейшем, на этапе семантического анализа, производится отбор наиболее подходящего по смыслу дерева зависимостей.

Основным термином коммуникативной грамматики является *синтаксема*. Она представляет собой слово или словосочетание, значение которого определяется в зависимости от категориального значения слова в предложении и морфологической формы, которые, в свою очередь, реализуются в определенной синтаксической позиции. Смысл предложения (высказывания)

определяется совокупностью значений входящих в него синтаксем и отношений между ними. Значительная часть синтаксем строится на описании категорий пространства и времени. Идентификация этих категорий позволит с высокой точностью определить значения синтаксем.

Для поиска значений синтаксем и отношений между ними используется методы машинного обучения, описанные в разд. 5. В основе их работы лежит поиск предикатных слов (глаголов и отглагольных образований) на основе семантического словаря, после чего производится поиск значений синтаксем путем сопоставления предикатного слова и составленных синтаксическим анализатором деревьям зависимости. Семантический словарь составляется экспертами-лингвистами.

В итоге для описания проанализированного текста используется неоднородная семантическая сеть с расширенным семейством отношений. Вершинами этой сети являются значения синтаксем, ребрами – отношения между синтаксемами.

Примеры значения синтаксем:

• субъект – основное лицо в предложении;

• темпоратив – некоторый компонент времени и других 85 значений.

Примеры отношений между синтаксемами:

• Des – дестинативное, один компонент означает назначение другого;

• Dir – директивное, и еще около 65.

4. Реализация семантического анализа предложений

Рассмотрим процесс проведения семантического анализа применительно к коммуникативной грамматике. На рис. 2 показан пример синтаксического анализа предложения «Каждый человек дышит воздухом», с указанием семантических интерпретаций. Синтаксический анализ осуществляется программой MaltParser, обученной проводить синтаксический разбор предложений на русском языке и усовершенствованной разработанным автором модулем квазилогического описания семантики.

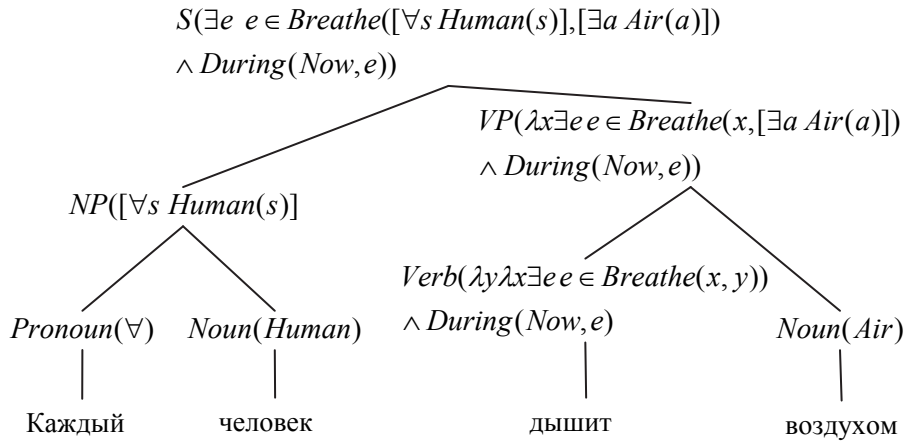


Рис. 2. Пример дерева синтаксического анализа предложения с семантическими интерпретациями

Квазилогическая форма представляет собой промежуточную форму, служащую посредником между синтаксисом и семантикой. Преимуществом этой формы является то, что она соответствует синтаксическому разбору предложения и при этом содержит в себе все возможные семантические интерпретации предложения (которые необязательно совпадают с синтаксисом). На рис. 2 введены следующие обозначения: *S* – предложение; *NP* – именное словосочетание; *VP* – глагольное словосочетание; *Pronoun* – местоимение; *Noun* – существительное; *Verb* – глагол. Местоимение обозначено квантором всеобщности в силу своего семантического смысла «каждый». Также на дереве обозначены λ-выражения, позволяющие динамически формировать новые функциональные символы. Видно, что в процессе анализа эти выражения заменяются необходимыми. Глаголы, в свою очередь, дополняются предикатами, описывающими время события *e*, в данном случае это *During*(*Now*,*e*).

В дальнейшем системой семантического анализа выстраиваются возможные интерпретации описанных квазилогических форм. Для описанной квазилогической формы на рис. 2 возможны следующие интерпретации, описанные на языке логики первого порядка:

$$[\forall s\ Human(s) \rightarrow \exists a\ Air(a)] \wedge \exists e(e \in Breathe(s,a,Now))$$
$$[\exists a\ Air(a) \wedge \forall s\ Human(s)] \rightarrow \exists e(e \in Breathe(s,a,Now)) \quad (1)$$

Первая интерпретация говорит о том, что каждый человек дышит воздухом, а вторая означает, что существует такой воздух, которым дышат все люди. Выбор нужной интерпретации производится системой устранения неоднозначности. Для устранения неоднозначности используется метод, основанный на аппарате вероятностной классификации логико-марковских сетей (MLN) [5]. Данная классификация производится на основе пространственной и временной информации, указанной в тексте на естественном языке.

Указанная система синтаксическо-семантического анализа также отвечает за идентификацию событий в тексте. В русском языке события можно выразить с помощью следующих форм: глагол, краткое прилагательное, отглагольное имя существительное, причастие и деепричастие. Данная информация получается из синтаксического блока, как это показано в примере (1) – событие $Breathe(s,a,Now)$.

Для определения значения синкасем и связей между ними используются две полносвязных нейронных сети. Нейронная сеть определения значения синтаксем имеет два скрытых слоя и получает в качестве параметров всю информацию о синтаксеме от синтаксического анализатора (часть речи, время, не/сопространственность, род, связь с событием и т. д.) и о связанном с ней событием. Всего на вход подается 53 параметра, сеть имеет 85 выходов, по одному на каждое возможное значение синтаксемы (рис. 3).

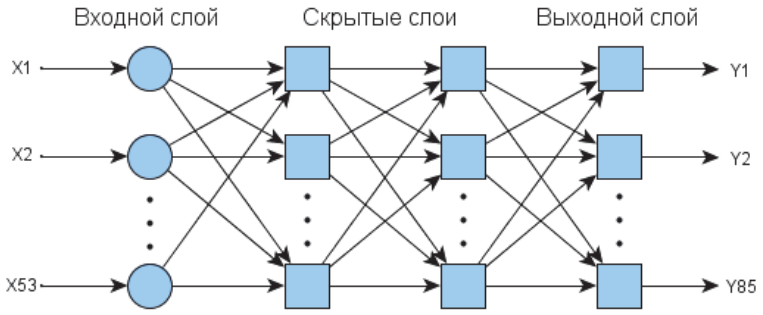


Рис. 3. Структура нейронной сети для определения значения синтаксем

Аналогично работает сеть для определения взаимодействия синтаксем между собой, где на вход поступает 55 параметров, описывающих две синтаксемы, а на выходе 65 значений, описывающих все взаимоотношения синтаксем.

Получив значения синтаксем и отношения между ними, можно обобщить полученные семантические интерпретации (1), разбив отношения между предикатами и термами по классам отношений синтаксем (как было описано выше). На основе этого обобщения строится неоднородная семантическая сеть, описывающая предложение.

Для установления между предложениями взаимосвязи используется пространственно-темпоральные отношения между предикатными словами и синтаксемами в предложениях. Структурно это представляет собой расширение неоднородной семантической сети.

Например: «Вася опаздывал в школу. Он срезал путь через дворы» (рис. 3).

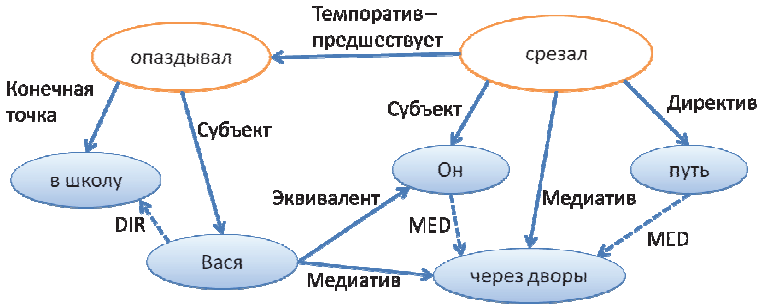


Рис. 4. Пример пространственно-темпоральной связки между семантическими моделями двух предложений

На рисунке сплошными линиями показаны значения синтаксем, а штриховыми – отношения между синтаксемами. Для установки семантической взаимосвязи между двумя предложениями используется категория событийности. В тексте повествование идет, как правило, последовательно или колеблется относительно определенной сюжетной линии. Соответственно в тексте прослеживается цепочка событий, попеременно сменяющих друг друга. Для выявления событийности используется изменение пространственных и временных данных, связанных с указанными событиями.

В отличие от построения семантики одного высказывания определение взаимосвязи событий между разными предложениями является более сложной задачей. Для определения взаимосвязи событий между предложениями используется механизм машинного обучения на основе логико-марковских сетей. Для составления событийной цепочки необходимо выявить темпоральные и пространственные характеристики из текста, которые извлекаются с помощью описанного выше метода на основе коммуникативной грамматики, и затем, оперируя разработанной в рамках данной работы пространственно-темпоральной логикой и методами классификации на основе логико-марковских сетей (MLN) [5], выявить принадлежность события к той или иной цепочке событий.

Описанная методика призвана повысить качество работы существующих семантических систем обработки текстов, в частности интеллектуального поиска, вопрос-ответных систем и др.

5. Оценка качества работы семантического анализа

Для оценки качества предложенных методов приняты общие критерии в задачах информационного поиска. Наиболее популярными критериями оценки качества являются точность (precision) и полнота (recall).

Точность (precision) – отношение числа правильных временных и пространственных отношений, найденных системой, к общему числу найденных временных и пространственных отношений.

Полнота (recall) – отношение числа найденных правильных временных и пространственных отношений к общему числу правильных временных и пространственных отношений в базе пространственных и временных данных.

$$\text{Precision} = \frac{|R \cap A|}{|A|} \quad \text{Recall} = \frac{|R \cap A|}{|R|} \qquad (2)$$

Таблица 2

Сравнение результата методов MLNs и SVM

Методы	Точность	Полнота	F-мера
SVM	0,63	0,63	0,63
MLN	0,69	0,74	0,73

В табл. 2 приведен пример сравнения по этим показателям разработанного метода MLN с методом опорных векторов SVM.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Осипов, Г. С.* Приобретение знаний интеллектуальными системами / Г. С.Осипов. – М.: Наука Физматлит, 1997. – 109 с.

2. *Золотова, Г. А.* Коммуникативные аспекты русского синтаксиса / Г. А. Золотова. – М.: КомКнига, 2010. – 368 с.

3. *Всеволодова, М. В.* Способы выражения пространственных отношений / М. В. Всеволодова, З. Г. Паршукова. – М.: Изд-во МГУ, 1968. – 172 с.

4. *Бердник, В. Л.* Задача идентификации сущности заданной слабоструктурированным текстом / В. Л. Бердник, А. В. Заболеева-Зотова // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 2(28) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 2). – С. 26–28.

5. *Дмитриев, А. С.* Извлечение пространственно-временных отношений из текста на естественном языке / А. С. Дмитриев // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте : сб. науч. тр. VI Междунар. науч.-практ. конф. (Коломна, 16–19 мая 2011 г.). В 2 т. Т. 2 / Российская ассоциация искусственного интеллекта [и др.]. – М., 2011. – С. 883–889.

УДК 004.89: 656.1/.5

А. В. Кизим, М. В. Денисов

ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ДОРОЖНЫХ РАБОТ И МОНИТОРИНГА ТЕХНИКИ

Волгоградский государственный технический университет

kizim@mail.ru, maxden33@gmail.com

В статье представлен анализ необходимости создания ипроектные решения по системе поддержки принятия решений (СППР) по проведению дорожных строительно-ремонтных работ и обслуживанию дорожной техники на основе данных систем спутниковой навигации. Описаны структура, основные подсистемы, механизмы поиска решений в системе СППР; использование информационно-логических моделей для решения данной задачи. Показаны этапы непрерывного процесса мониторинга дорожных работ, расхода ГСМ и состояния техники, и основные элементы методики диспетчерского управления. Представленная система позволяет на основе данных позиционирования и о состоянии техники принимать решения по распределению техники и проведении ее технического обслуживания и ремонта, а также накапливать знания.

Ключевые слова: система поддержки принятия решений, мониторинг, GPS, ГЛОНАСС, знания, дорожная техника, техническое обслуживание и ремонт, ТОиР, информационно-логические модели, методика диспетчерского управления.

A. V. Kizim, M. V. Denisov

DECISION SUPPORT FOR ROAD WORKS AUTHORITY AND MONITORING EQUIPMENT

Volgograd State Technical University

The paper presents an analysis of the need for and design of the solution for decision support system (DSS) for the road construction and repair and maintenance of the road the art on the basis of satellite navigation systems. Described structure of the, major subsystems, the mechanisms to find solutions to the DSS system, describes the use of information and logical models for the solution of this problem. The stages of a continuous process of monitoring road works, fuel consumption and the state of technology, and the basic elements of supervisory control techniques. This system allows on the basis of data on the position and state of the art to make decisions on the distribution of equipment and the conduct of its maintenance and repair, as well as gaining knowledge.

Keywords: decision support system, monitoring, GPS, GLONASS, knowledge, road equipment, maintenance and repairs, maintenance and repair, information and logical model, method dispatching.

Введение

В настоящее время в России ведется проект по реформированию дорожного хозяйства, одним из пунктов которого является совершенствование структуры управления дорожным хозяйством. Согласно приказу Минтранса РФ от 26 января 2012 г. № 20 «Об оснащении транспортных средств спутниковой навигацией» с 1 января 2013 г. транспортные средства, перевозящие пассажиров и опасные грузы должны быть оснащены оборудованием спутниковой навигации ГЛОНАСС. Данные, передаваемые ГЛОНАСС, можно использовать для дистанционного управления выполнением дорожных работ. Это дает, прежде всего, возможность контроля выполнения работ, а также накопления сведений о техническом состоянии каждой единицы техники, и на ее основе – планирования ее технического обслуживания и ремонта.

Особенность проведения строительных и дорожных работ заключается в распределении автодорожной техники по филиалам. Центральный отдел автодорожной организации отвечает за работоспособность и распределение техники по работам. Для более рационального распределения техники необходима система, которая на основе полной информации о расположении техники и проводимых работах осуществляет поддержку принятия решений о перераспределении техники, планировании работ, а также о ее своевременном техническом обслуживании и ремонте. В оперативно-диспетчерском отделе, на основании переданных данных с филиалов, составляется справка о состоянии автомобильных дорог и работе техники на дорогах. На данный момент передача осуществляется при помощи телефона. Для сбора сведений данным способом и принятия соответствующих решений оперативно-диспетчерский отдел затрачивает немало времени. Для сокращения затрат и автоматизации работы ему нужна система поддержки принятия решений по проведению дорожных строительно-ремонтных работ, а также техническому обслуживанию и ремонту (ТОиР) дорожной техники на основе передаваемых данных [6].

Таким образом, на основе вышеприведенной информации, а также [3, 4] создание проблемно-ориентированной системы управления, поддержки принятия решений и дистанционного

оперативного контроля выполнения дорожных работ, обеспечивающей предотвращение аварийных и внештатных ситуаций и осуществление оптимального распределения техники по дорожным работам является актуальной задачей.

Модель, алгоритмы

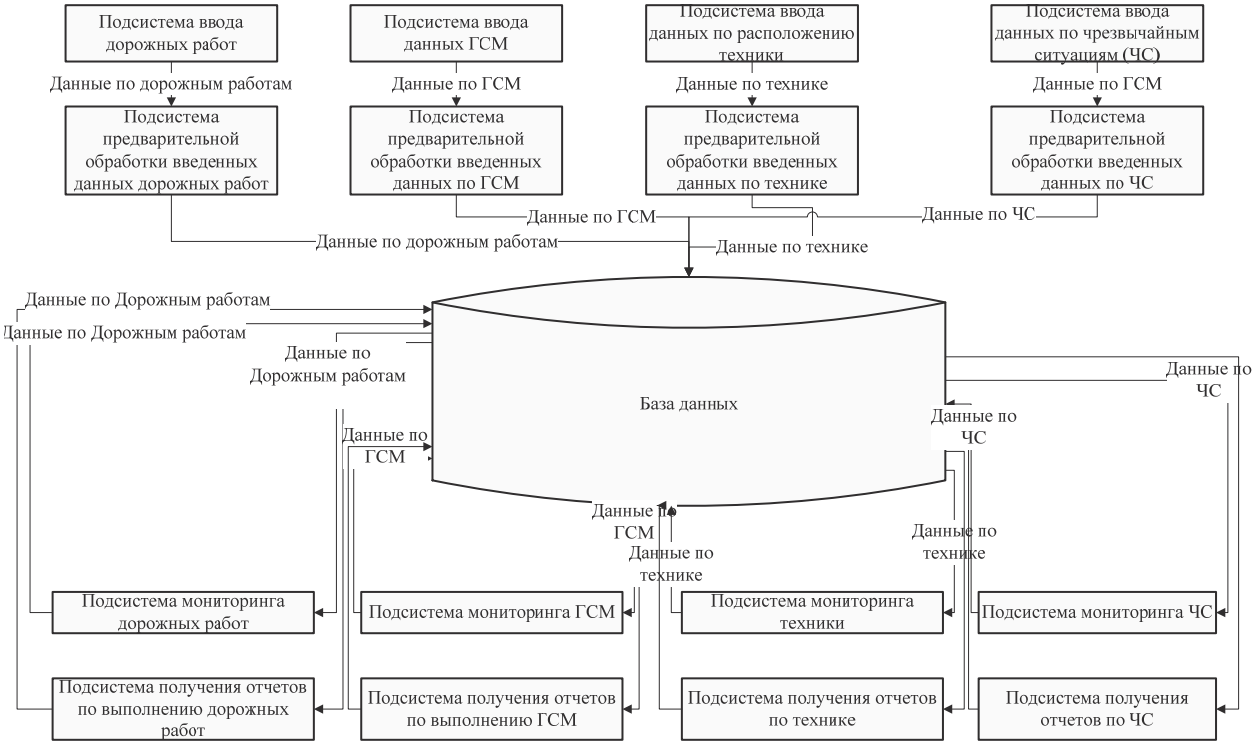
Результатом работы системы принятия решений является перечень мероприятий решения задач:

- развития, проектирования и модернизации дорожных сетей;
- оперативного диспетчерского управления дорожными работами;
- мониторинга состояния дорожных сетей;
- обеспечения профилактических и аварийных ремонтных работ;
- оперативного реагирования на аварии и внештатные ситуации;
- анализа деятельности предприятия подрядчика и качества его услуг.

С позиции теории системного анализа весь комплекс задач управления дорожными работами Znобразует многоуровневую структуру, состоящую из последовательности подсистем, объединенных информационными потоками. Тогда для формализованного описания методики управления и поддержки принятия решений согласно [1] можно использовать множество информационно-логических моделей (ИЛМ): M = (d1, K, di, K, dN, p1, K, pj,...,pS), где M – оператор ИЛМ; d1, K, dN – множество данных ИЛМ; p1, K, pS – множество правил и продукционных моделей (ПМ) поддержки принятия решений. Продукционные правила ПМ строятся по типу: если (if) … (условия выполняются), то (then) … (реализация следствия), и их можно записать как

$$p^k: \begin{Bmatrix} \text{if}\left(\left(d_1^{k'} A_1 z_1^{k'}\right) \Lambda_2 \dots \Lambda_{n-1}\left(d_n^{k'} A_n z_n^{k'}\right)\right) \\ \text{then}\left(d_{1m}^{k'} A_1 z_{1M}^{k'}\right) \end{Bmatrix}$$

где $A_1^r, A_i \in \{=, >, \geq, <, \leq\}, i = \overline{1,n}$, арифметический оператор; $\Lambda_i \in \{\wedge, \vee\}$– логический оператор; d_s^r, d_{1m}^r – входные и выходные данные модели $Z_k^r = \{z_k^r, \dots, z_1^r\}$ – множество значений входных данных; $d_s^{k'}; z_1^{k'} \in \left\{z_{11}^{k'}, \dots, z_{1M}^{k'}\right\}$ – значение для выходных данных $d_s^{k'}$; n – количество условий; k – индекс продукционного правила.



Обобщенная схема СППР дорожных сетей города

В связи со сложностью разработки ИЛМ и ПМ для поддержки принятия решений во всей структуре дорожных работ были предложена модель и методика поддержки принятия решений только для системы мониторинга дорожных работ,расхода ГСМ и состояния техники. Основными отличиями и преимуществами методики являются:

• использование данных с навигационного оборудования для диспетчерского управления объектами дорожных сетей;

• визуализация оперативных результатов полученной и обработанной информации и выработка рекомендаций;

• генерация необходимых действий в той или иной ситуации.

Для реализации методики поддержки принятия решений была предложена архитектура системы поддержки принятия решений (СППР) для решения задач дистанционного диспетчерского контроля объектов и процессов в системе дорожного хозяйства (см. рисунок) [2].

СППР включает следующие основные подсистемы:

• мониторинга дорожных работ;

• получения отчетов по выполнению дорожных работ;

• мониторинга данных ГСМ;

• получения отчетов ГСМ;

• мониторинга техники;

• получения отчетов по технике;

• мониторинга ЧС;

• получения отчетов по ЧС;

Непрерывный процесс мониторинга дорожных работ, техники, ГСМ и ЧС происходит следующим образом:

1) оператором филиала заполняет наряд на работы. У оператора каждого филиала имеется имя пользователя и пароль, которые предоставляют конкретному пользователю права на заполнение наряда. Каждому филиалу соответствуют свои дороги;

2) происходит получение данных со спутника о положении техники. Системой осуществляется получение данных о положении техники со спутника;

3) администратор осуществляет диспетчерское управление дорожными работами и техникой.Для контроля проделанных дорожных работ и техники необходимо обладать правами администратора. Администратору предоставляется отличный от пользовательского интерфейс.

Методика диспетчерского управления на основе [5] включает следующие этапы:

• сбор данных;

• передача данных на диспетчерский сервер;

• накопление данных в БД;

• многомерный анализ данных (DataMining);

• оповещение ЛПР и других лиц о внештатных и аварийных ситуациях

• в случае необходимости выработка управляющего воздействия с поддержкой системой принятия решений (с определением степени необходимости вмешательства в процесс).

Апробация и внедрение системы поддержки принятия решений

Система поддержки и принятия решений для управления дорожными работами и контролем техники в филиалах разрабатывается областного государственного унитарного предприятия «Волгоградавтодор».

В состав клиентских приложений входят пользовательская и административная часть. В связи с этим при разработке системы учтено требование на разделение интерфейсов на пользовательскую и административную части.

Выводы и результаты

По результатам анализа выделены проблемы оперативно-диспетчерского контроля и поддержки принятия решений при проведении дорожных работ. В соответствии с задачами определена структура системы поддержки принятия решений. Разработана архитектура системы поддержки принятия решений и диспетчерского мониторинга и управления дорожными работами и техникой по проведению дорожных строительно-ремонтных работ и обслуживанию дорожной техники на основе данных систем спутниковой навигации. Разработаны проектные решения по программно-аппаратным средствам дистанционного контроля для СППРОГУП «Волгоградавтодор» и прототип автоматизированной системы мониторинга дорожных работ и техники, запланированы испытания и экспериментальные исследования работы системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Камаев, В. А*. Применение нечетких нейросетевых моделей для идентификации состояния автомобильных дорог / В. А. Камаев, М. В. Щербаков, Д. А. Скоробогатченко // Вестник компьютерных и информационных технологий. Вып. 12. – М.: Машиностроение, 2010. – С. 36–41.

2. *Камаев, В. А*. Интеллектуальные системы автоматизации управления энергосбережением / В. А. Камаев, М. В. Щербаков, А. Бребельс // Открытое образование. – 2011. – № 2. – С. 227–231.

3. Программно-информационная поддержка технического обслуживания и ремонта оборудования с учетом интересов субъектов процесса / А. В. Кизим, Е. В. Чиков, В. Ю. Мельник, В. А. Камаев // Информатизация и связь. – 2011. – № 3. – С. 57–59.

4. *Кизим, А. В*. Исследование и разработка методики автоматизации ремонтных работ предприятия / А. В. Кизим, Н. А. Линев // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 2(40) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – (Серия «Акту-

альные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 4). – С. 43–45.

5. *Кизим, А. В.* Задачи прогнозирования и планирования для программно-информационной поддержки технического обслуживания и ремонта оборудования / А. В. Кизим, Е. В. Чиков, В. Ю. Мельник // Открытое образование. – 2011. – № 2(85). Ч. 2. – С. 224–227.

6. *Кизим, А. В.* Обоснование необходимости автоматизации работ по ремонту и техническому обслуживанию оборудования / А. В. Кизим // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 6(54) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в техн. системах» ; вып. 6). – С. 118–121.

УДК 004.413

С. А. Овчинников

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЕКТОМ ПО РАЗРАБОТКЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПРОЕКТНЫХ РИСКОВ

Волгоградский государственный технический университет

stepan@volgograd.ru

В статье рассматривается состояние вопроса оптимального управления проектом разработки ПО с целью повышения качества на основе анализа проектных рисков, изучаются основные подходы к решению, вводится содержательная и формальная постановка задачи.

Ключевые слова: case-технологии, методологии процесса разработки по, каскадная разработка, водопадная разработка, итеративная разработка, agile/scrum, оценка проектных рисков, выбор методологии.

S. A. Ovchinnikov

SOFTWARE DEVELOPMENT PROJECT MANAGEMENT FOR QUALITY IMPROVEMENT BASED ON PROJECT RISK ESTIMATION

Volgograd State Technical University

The article is devoted to making general review of optimal management of software development projects for quality improvement based on risks estimation.

Keywords: case, software development process, waterfall, agile, scrum, risk estimation, methodologies.

Введение

Ключевым процессом в современных IT-проектах (создания, поддержки, развития информационных систем) является разработка программного обеспечения (ПО).

С прикладной точки зрения значимость процесса разработки ПО постоянно нарастает. Это основная деятельность для 3 из 10 самых доходных мировых компаний [1], а среди 500 самых крупных компаний рейтинга Fortune 500 доля разработчиков ИТ-компаний растет в течение последние 15 лет [2].

Далее в статье будет рассматриваться Проект – разработка одной организацией уникального ПО по заказу другой организации. Будем называть участников Проекта Заказчиком и Разработчиком. Заказчик и Разработчик имеют независимое управление (не подчинены административно, не являются частью одной организации). Критерием успеха проекта является создание качественного ПО без превышения отведенных ресурсов.

В статье исследованы существующие подходы к решению этой проблемы, сформулированы актуальные задачи. Осуществлена формальная постановка задачи с применением моделей теории игр. Дана интерпретация компонентов предложенной модели.

Содержательное описание процесса управления проектом по разработке ПО

Заказчик формирует Заказ, включающий необходимые Требования, Сроки, Стоимость. Чтобы проект состоялся, Разработчик оценивает Заказ и решает, что он может его выполнить. Принимая решение о выполнимости, Разработчик делает некоторое предположение, которое может оправдаться или нет в зависимости от поведения сторон.

После начала проекта Заказчик и Разработчик, обладая свободой принятия решений, реализуют каждый свою стратегию. Проект управляется ими совместно (на практике это осуществляется путем формирования проектной команды из представителей обеих сторон).

Несмотря на общие декларируемые планируемые результаты проекта (качество, сроки, стоимость), Заказчик и Разработчик имеют противоположные интересы:

• заказчик хочет заплатить меньше; получить более функциональный и качественный продукт за меньшее время;

• разработчик хочет получить оплату полностью, выполнив как можно меньше работы.

Эти интересы вытекают из соображений экономической целесообразности деятельности сторон проекта.

Таким образом, имеется конфликт интересов участников при общем объекте управления. Такая постановка задачи характерна для теории игр [3, 4].

Дано: Заказ состоит из трех составляющих: требования, сроки, стоимость.

Исполнитель решает что может исполнить Заказ. Это оценка рискованная, вероятностная.

Проект – рискованное мероприятие, вероятность успеха которого определяется действиями двух независимых сторон.

Необходимо получить: Стратегии поведения Заказчика и Исполнителя, которые в ходе проекта путем взаимодействия приводят к достижению планируемого результата (Продукта).

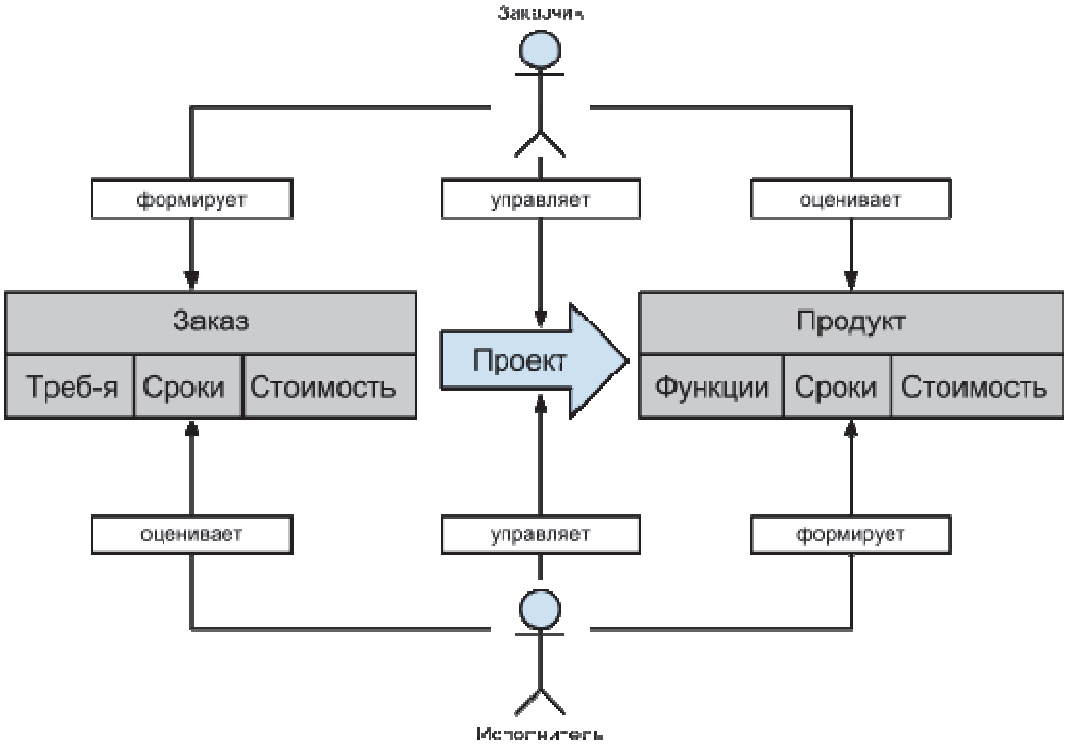


Схема взаимодействия Заказчика и Исполнителя в ходе работы над Проектом

Особенность в одновременном управлении объекта двумя субъектами отражена на рисунке.

Исследуем известные подходы к решению задачи.

Промышленные и отраслевые стандарты управления проектами по разработке ПО

Развитие разработки ПО в последние несколько десятилетий привело к современному состоянию программной инженерии, когда существует ряд документов, признанных как стандарты (стандарты «де-факто», шаблоны поведения или «лучшие практики») управления проектами разработки ПО.

Первоисточниками для таких стандартов являются практические исследования и опыт множества специалистов. В частности, можно отметить работы В. Ройса [5], Б. Боэма [6, 7], С. МакКоннелла [8, 9], М. Фаулера [10], А. Коуберна [11].

В аннотациях к стандартам [12, 13, 14] указано: это эмпирически проверенные, развивающиеся методические рекомендации, сфера применимости каждой не описана.

Рассмотрим наиболее значимые стандарты управления проектами:

• PMBoK [12]. Стандарт ProjectManagement-BaseofKnowledge не является специфическим для разработки ПО и освещает общие принципы организации проектной работы. В 2008 году была выпущена четвертая версия стандарта, имеющая ряд важных нововведений, в том числе касающихся управления проектами разработки ПО;

Для управления проектами по разработке ПО PMBoK полезен в первую очередь как первоисточник терминов и основных принципов организации работы. Конкретных рекомендаций и алгоритмов в стандарте нет;

• SWEBOK [13]. Стандарт SWEBOK, в отличие от PMBoK, является специфичным именно для разработки ПО. Стандарт вводит множество понятий, процессов, моделей, практик разработки ПО. В стандарте определено, что каждая проектная ситуация может требовать своего процесса разработки ПО и определяет основной цикл управления процессом разработки ПО, в рамках которого определяется конкретный процесс.

При этом стандарт оставляет свободу принятия решения проектной команде и аналитикам заказчика в определении стратегии и конкретных шагов управления проектом;

• группа «водопадных» стандартов и отечественные ГОСТы [14, 15]. Отечественные ГОСТы серии 19 [14] и 34 [15], построены на так называемом принципе «водопада» (термин определен в 1970 году WinstonRoyce [5]). Суть принципа состоит в том, что последовательность этапов регламентирована, каждый этап основывается на предыдущем. Возврат на предыдущие этапы в рамках стандарта невозможен.

В статье [5] 1970 года, которая ввела в обиход концепцию «водопада»; эта технология управления рассматривалась критически, и автор подводит читателя к необходимости итеративного управления проекта jv на основании уточнения требований. При этом «водопад» рекомандован для крупных проектов. Более подробно анализ идей Ройса, изложенных в статье 1970 года [5], см в [16].

• RUP [17, 18]. RUP является существенным движением вперед по сравнению с более ранними стандартами. RUP, основанный на итеративном подходе к разработке, декларирует приоритетом раннее выявление и устранение основных рисков. Проектные процедуры, описанные в RUP, являются типовыми для большинства средних и крупных проектов разработки ПО.

Декларируя основные принципы разработки и позволяя гибко перестраивать проект с учетом рисков, RUP, однако, не предлагает конкретных способов учета рисков и методик принятия решений;

• MSF [19]. MicrosoftSolutionsFramework (как и RUP) – это итеративная методология разработки. MSF специально разработан для крупных проектов с высоким уровнем критичности. В стандарте описаны основные роли участников проекта, артефакты и вехи. MSF позиционируется как базовая методология, требующая адаптации к конкретным условиям;

• CMMI. Модель CapabilityMaturityModel [20], разработанная в США институтом Software-EngineeringInstitute (SEI), позволяет оценить уровень развития текущей методологии управления программными проектами и направить их совершенствование. Модель является абстракцией еще более высокого уровня, нежели RUP и MSF.

Подводя итог обзору стандартов, можно сказать следующее:

• стандартов разработки и методологий много. Сравнение стандартов между собой и поиск лучшего вне анализа решаемой задачи бессмысленны [21];

• стандарты описывают широкое поле возможных вариантов поведения, любой из которых укладывается в тот или иной стандарт;

• выбор между стандартами в конкретном проекте является нетривиальной и недостаточно изученной задачей;

• при обилии стандартов ни в одном из них не проработан вопрос оценки влияния проектных рисков и принятия решения для повышения качества.

Методы анализа проектных рисков. Нечеткие оценки. Рассуждения по прецедентам

Известен тезис Тома Демарко [21], что «управление проектами – это управление рисками». Если представить управление проектом как задачу альтернативного выбора или цепочку таких задач, то для решения достаточно иметь оценку качества каждой альтернативы в каждой ситуации.

Получить такую оценку можно, используя знания и оценки экспертов, опыт принятых ранее решений и их фактических последствий. Чтобы качественно решить задачу таким способом, нужно иметь два компонента:

• базу знаний по проектным рискам (классификацию, методику исследования, способы оценки тяжести и прогнозирования последствий);

• математический аппарат или алгоритмическое обеспечение оценки альтернатив.

Общепринятой классификации рисков с методикой их оценки нет. Каждый автор приво-

дит свою классификацию и приемы оценки рисков [22, 23, 24, 25]. Применяются алгоритмы альтернативного выбора на основе взвешенных показателей. При этом веса показателей, методика усреднения исследованы недостаточно.

Стоит особо отметить две выдающиеся работы по этой теме: книга С. Архипенкова «Лекции по управлению программными проектами» [24] и диссертация доктора наук А. И. Таганова «Научные основы идентификации, анализа и мониторинга проектных рисков качества программных изделий в условиях нечеткости» [25]. Они задают прочный фундамент прикладному и теоретическому исследованию оптимального управления программными проектами.

Подход рассуждений по прецедентам и нечеткого анализа проектных рисков имеет серьезные п р о б л е м ы :

• отсутствие общепринятой классификации рисков: все авторы предлагают различные категоризации рисков, методы определения и шкалы измерения рисков;

• полнота и качество набора прецедентов: качество анализа и принятия решения напрямую зависит от накопленной базы прецедентов, а она, учитывая колоссальную размерность пространства задачи и малое число экспертно проработанных прецедентов, априори недостаточна;

• локальность оптимумов: даже при наличии многих положительных прецедентов мы ничего не знаем о том, существует ли лучшее решение, и даже метрика качества прецедента принципиально непроверяема;

• корректное обобщение мнений экспертов и обоснованный логический вывод по базе прецедентов затруднительны.

Вывод по обзору известных подходов к решению задачи

Таким образом, можно зафиксировать следующие основные в ы в о д ы :

• известные подходы применяют слабоформализованные практические рекомендации и методы рассуждения по прецедентам;

• принятие решение выбора стратегии управления проектом и конкретных шагов в рамках стратегии является экспертной задачей;

• задача выбора оптимальной стратегии управления проектом не сформулирована и не решена;

• исследование методов выбора и реализации оптимальной стратегии управления программными проектами является актуальной научной задачей.

Требования к модели

При выборе модели необходимо обеспечить выполнение следующих у с л о в и й :

• рассмотрение сторон, управляющих проектом и преследующих свои интересы;

• использование оценок альтернатив в лингвистических, числовых и нечетких шкалах;

• анализа как стратегии в целом, так и отдельных шагов в рамках стратегии;

• возможность изменять оценки после каждого шага.

Построение модели и постановка задачи выбора оптимальной стратегии управления проектом по разработке программного обеспечения

Всем перечисленным требованиям соответствуют модели теории игр, а именно модели биматричной игры (игры с ненулевой суммой) двух игроков.

Опишем задачу выбора оптимальной стратегии с применением модели биматричной игры. Игра может быть задана как

$$\Gamma = (X, Y, F, G),$$

где X, Y – наборы стратегий Заказчика и Разработчика соответственно, а F, G – их функции выигрыша.

Решением игры является пара стратегий (x_i, y_j).

Функции выигрыша могут быть заданы матрицами $A = (a_{ij})$ и $B = (b_{ij})$.

При этом в игре известными методами теории игр могут быть определены седловые точки игры (ситуации равновесия) (x_0, y_0), а также Парето-оптимальные решения [4, 5].

Для задачи выбора конкретного шага в рамках стратегии нужно использовать модель позиционной многошаговой игры; к поставленной задаче она приводится при переходе к стратегической форме игры [4, 5].

Интерпретация модели

Представляет интерес практический смысл компонентов модели (см. таблицу).

На модели могут быть поставлены и решены следующие з а д а ч и :

1) вычисление матриц A, B для задания функций выигрыша F, G и решения игры в стратегической форме. Вычисление матриц может быть основано на любой из описанных в обзоре методик, позволяющей свести экспертные оценки к функциям выигрыша;

Интерпретация компонентов модели

Компонент модели	Интерпретация, практический смысл
Функция выигрыша *F, G* в виде матрицы платежей$A = (a_{ij})$ и $B = (b_{ij})$	Вероятность успеха, оценка риска, полученная анализом прецедентов, расчетами, методом опроса экспертов. Если используются нечеткие оценки, то игра также будет нечеткой
Решение игры (x_0,y_0)	Использованная методология управления проектом
Седловая точка игры, ситуация равновесия	Методология управления проектом, в рамках которой каждый участник не может сделать результат лучше, действуя в одиночку. Локальный оптимум
Парето-оптимальное решение	Искомая оптимальная методология управления проектом, в рамках которой участники не могут сделать результат лучше, даже действуя согласованно. Глобальный оптимум

2) рассмотрение известных методологий ведения проектов (RUP, MSF) к стратегиям игры и оценка оптимальности методами теории игр. Формальный ответ на вопрос: является ли применяемая методология управления Парето-оптимальной или равновесной? Решение задачи выбора лучшей методологии для конкретного проекта;

3) разработка методов перехода от многоходовой позиционной игры к играм в стратегической форме (получение новых методологий на базе исследования отдельных шагов).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. CNN MONEY: FORTUNE 500 – URL [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://money.cnn.com/magazines/fortune/fortune500/2012/full_list/. Дата обращения : 01.12.2012.

2. Топ 100 крупнейших компаний мира – URL [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://orange-finance.ru/analitika/147-top-100-krupnejshikh-kompanij-mira-2012. Дата обращения : 01.12.2012.

3. *Петросян, Л. А.* Теория игр : учеб. пособие для унтов / Л. А. Петросян, Н. А. Зенкевич, Е. А. Семина. – М.: Высш. шк., Университет, 1998. – С. 304.

4. *Писарук, Н. Н.* Введение в теорию игр / Н. Н. Писарук. – Минск : БГУ, 2012. – 231 с.

5. *W. Royce*. Managing the Development of Large Software Systems, Proc. Westcon, IEEE CS Press, 1970.

6. *Barry Boehm*. Cocomo II model manual – URL: http://alarcos.inf-cr.uclm.es/doc/pgsi/doc/teo /8/cocomo2-modelman.pdf. Датаобращения : 01.12.2012.

7. *Barry W. Boehm*. A Spiral Model of Software Development and Enhancement, Computer, May 1988.

8. *Макконнелл, С.* Сколько стоит программный проект / С. Макконнелл. – Питер, 2007.

9. *Макконнелл, С.* Остаться в живых. Руководство для менеджера программных проектов. Библиотека программиста / С. Макконнелл. – СПб.: Питер, 2006. – 240 стр.

10. *Мартин Фаулер*. Проектирования больше нет. – URL: http://citforum.ru/SE/project/design_dead/. Дата обращения : 01.12.2012.

11. *АлистэрКоуберн*. Варианты использования, десять лет спустя. – URL: http://www.maxkir.com/sd/useCasesTenYearsLater_RUS.html. Дата обращения : 01.12.2012.

12. Руководство к своду знаний по управлению проектами (Руководство PMBoK). – 4-е изд. – 2008. – Project ManagementInstitute.

13. SWEBOK 3 Review – URL: http://computer.central-desktop.com/swebokv3review / Дата обращения : 01.12.2012.

14. ГОСТ 19.102–77. Стадии разработки программного обеспечения.

15. ГОСТ 34.601–90. Автоматизированные системы. Стадии создания.

16. Водопадная модель: сеанс абстракции с последующим разоблачением http://blogs.uml2.ru/post/Vodopadnaya-model-seans-abstrakcii-s-posleduyushchim-razoblacheniem – URL: http://blogs.uml2.ru/post/Vodopadnaya-model-seans-abstrakcii-s-posleduyushchim-razoblacheniem. Дата обращения : 01.12.2012.

17. *Крачтен, Ф.* Введениев Rational Unified Process / Ф. Крачтен. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2002. – 240 с.: ил.

18. *Якобсон, А.* Унифицированный процесс разработки программного обеспечения / А. Якобсон, Г. Буч, Дж. Рамбо. – Спб.: Питер, 2002. – 496 с.: ил.

19. MSF–URL:http://technet.microsoft.com/en-us/library/bb497060.aspx. Дата обращения : 01.12.2012.

20. CMM Capability Model – URL: http://citforum.ru/programming/digest/cmm.shtml. Дата обращения : 01.12.2012.

21. *АлистерКоуберн*. Каждому проекту своя методология – URL: http://citforum.ru/SE/project/meth_per_project/. Дата обращения : 01.12.2012.

22. *Демарко, Том*. Deadline. Роман об управлении проектами – URL: http://www.hrazvitie.ru/books/projects/deadline.doc. Дата обращения : 01.12.2012.

23. *Демарко, Том*. Вальсируя с Медведями. Управление рисками в проектах по разработке программного обеспечения / Том ДеМарко, Тимоти Листер. – М., Компания p.m.Office, 2005.

24. *Архипенков, Сергей.* Лекции по управлению программными проектами – URL: http://www.arkhipenkov.ru/resources/sw_project_management.pdf. Дата обращения : 01.12.2012.

25. *Таганов, А. И.* Научные основы идентификации, анализа и мониторинга проектных рисков качества программных изделий в условиях нечеткости : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / А. И. Таганов. – Рязань, 2011. – 39 с.

УДК 519.876.2

Н. П. Садовникова

ОЦЕНКА ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛАНОВ ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ

Волгоградский государственный технический университет

npsn1@ya.ru

Рассмотрены вопросы поддержки принятия решений в задачах стратегического планирования развития урбанизированных территорий. Определены основные положения методологии комплексного анализа эколого-экономической эффективности градостроительных проектов.

Ключевые слова: эколого-экономическая эффективность, стратегическое планирование, оценка воздействия на окружающую среду, экологическая безопасность, сценарный подход.

N. P. Sadovnikova

ENVIRONMENTAL AND COST-EFFECTIVENESS ANALYSIS OF URBAN DEVELOPMENT PROJECTS

Volgograd State Technical University

The questions of support decision-making in strategic planning and development of urban areas have been contemplated. Main provisions of the methodology of complex analysis of environmental and economic efficiency of urban projects have been defined.

Keywords: environmental and economic efficiency, strategic planning, environmental impact assessment, environmental safety, scenario approach.

Создание единого, научно-обоснованного подхода к принятию решений по обеспечению устойчивого развития города – необходимое условие для формирования эффективных стратегий управления. Можно говорить о кардинальной смене парадигм природопользования и ведения хозяйственной деятельности. Установка на «охрану природы» заменяется «эффективным взаимодействием природы и общества». С точки зрения управления градостроительной деятельностью это означает появление новых функций, формирующих механизмы реализации концепции биосферосовместимости на всех уровнях принятия решений, что, в свою очередь, приводит к появлению новых задач управления.

Деятельность по стратегическому управлению регламентируется целым набором документов, среди которых:

– «Стратегия (концепция) развития города»;

– «Инвестиционная карта города»;

– «Стратегический план»;

– «Генеральный план города»;

– «Схемы территориального развития»;

– «Программа социально-экономического развития города»;

– «Инвестиционная программа города» и др.

Создание этих документов связано с необходимостью решения целого ряда аналитических задач:

1) анализ эффективности использования территориальных и природных ресурсов;

2) анализ вариантов использования территорий;

3) анализ инвестиционной активности;

4) анализ динамики строительства и реконструкции жилья;

5) анализ эффективности функционирования транспортной, инженерной и социальной инфраструктуры;

6) анализ экологической обстановки.

В связи с тем, что анализируемые процессы относятся к разным сферам жизни города и получаемая в результате анализа информация поступает разным ведомствам, общая оценка эффективности тех или иных решений, как правило, не проводится. Поэтому необходимо создать механизмы для комплексного анализа планов и программ развития города, которые бы позволили учитывать социальные экологические и экономические факторы и формировать единые требования к процессу планирования.

В контексте исследуемой проблемы управление территориальным развитием города рассматривается как системная деятельность, направленная на решение задач распределения территориальных ресурсов и градостроительное регулирование, обеспечивающее устойчивое развитие города. Стратегический подход к управлению подразумевает приоритет долгосрочных целей и согласование задач управления состоянием и развитием. Решения принимаются на стратегическом уровне в процессе создания принципов управле-

ния и на оперативном в процессе выбора способов использования территории, распределения средств, изменения условий хозяйствования и пр.

Основные этапы процесса поддержки принятия решений при планировании развития городских территорий представлены на рис. 1.

Рис. 1. Стратегический уровень принятия решений в процессе управления развитием УЭС

Ключевым моментом этого процесса является оценка эффективности проектов, планов и программ. В мировой практике принятие решений и обоснование, как отдельных проектов, так и стратегических программ развития территорий обязательно связаны с доказательством оптимальности выбранного варианта. Причем согласование при этом целей экологического и экономического развития является обязательным условием.

Эколого-экономическая эффективность проекта – показатель, характеризующий соотношение общих экономических выгод и потерь от проекта, включая внешние экологические эффекты, и связанные с ними социальные и экономические последствия, затрагивающие интересы населения и будущих поколений в результате реализации данного проекта [1]. В итоге эколого-экономического анализа должен быть выявлен наиболее эффективный способ расходования средств в процессе реализации программы или проекта при условии сохранения определенных параметров состояния окружающей среды.

В зависимости от вида воздействия, характера намечаемой деятельности и негативных последствий выбирается состав факторов, определяющих уровень экологических затрат и выгод, учитываемых в расчетах. Как правило, исходные данные для подобных расчетов получают из соответствующих разделов проектной документации и отчетов, составленных по результатам начальных этапов оценки воздействия на окружающую среду (рис. 2). Важно по-

Рис. 2. Схема эколого-экономического анализа планов территориального развития

нять, что под оценкой воздействия в данном контексте понимается не только анализ воздействий (выбросов, сбросов, отходов, изымаемых ресурсов), но и информация о возможных изменениях в результате реализации намечаемой деятельности.

В результате эколого-экономического анализа необходимо определить величину воздействия на окружающую среду и соотношение затрат и выгод реализуемых проектов.

В процессе проведения экологического оценивания рассматриваются возможные сценарии реализации предложенных программ территориального развития и определяются условия, при которых экологическая нагрузка будет находиться в пределах заданных ограничений.

Для расчета эколого-экономической эффективности используются следующие показатели [1]: экологические и социальные выгоды (Be_t); экологические и социальные затраты (Ce_t); ставка дисконтирования (r); год оценки (t); период времени, учитываемый в анализе (T); капитализированная стоимость утраченного природного ресурса или стоимость его замещения (Vr).

Структуры затрат и выгод проекта представлены на рис. 3, 4.

Рис. 3. Структура экологических затрат

Следует отметить высокий уровень неточности при определении количественных характеристик затрат и выгод, которые, как правило, зависят от взаимодействия социальных экологических и экономических факторов, закономерность изменения которых трудно спрогнозировать на длительный период времени. В связи с этим для оценки отдельных показателей предлагается использовать процедуру экспертного анализа.

Определение чистой приведенной стоимости экологических затрат и выгод проекта проводится методом дисконтирования экологических затрат и экологических выгод, включаемых в анализ экономической эффективности проекта с учетом потери ресурсов с длительным сроком существования.

На рис. 5 представлен обобщенный алгоритм оценки эколого-экономической эффективности проектов развития территорий.

Оценка эколого-экономической эффективности выполняется на всех стадиях проектного цикла от разработки инвестиционного предложения и декларации о намерениях до разработки технико-экономического обоснования и осуществления проекта. При этом необходимым условием является сравнение разных вариантов реализации проекта, в том числе варианта отказа от деятельности.

Рис. 4. Структура экологических выгод

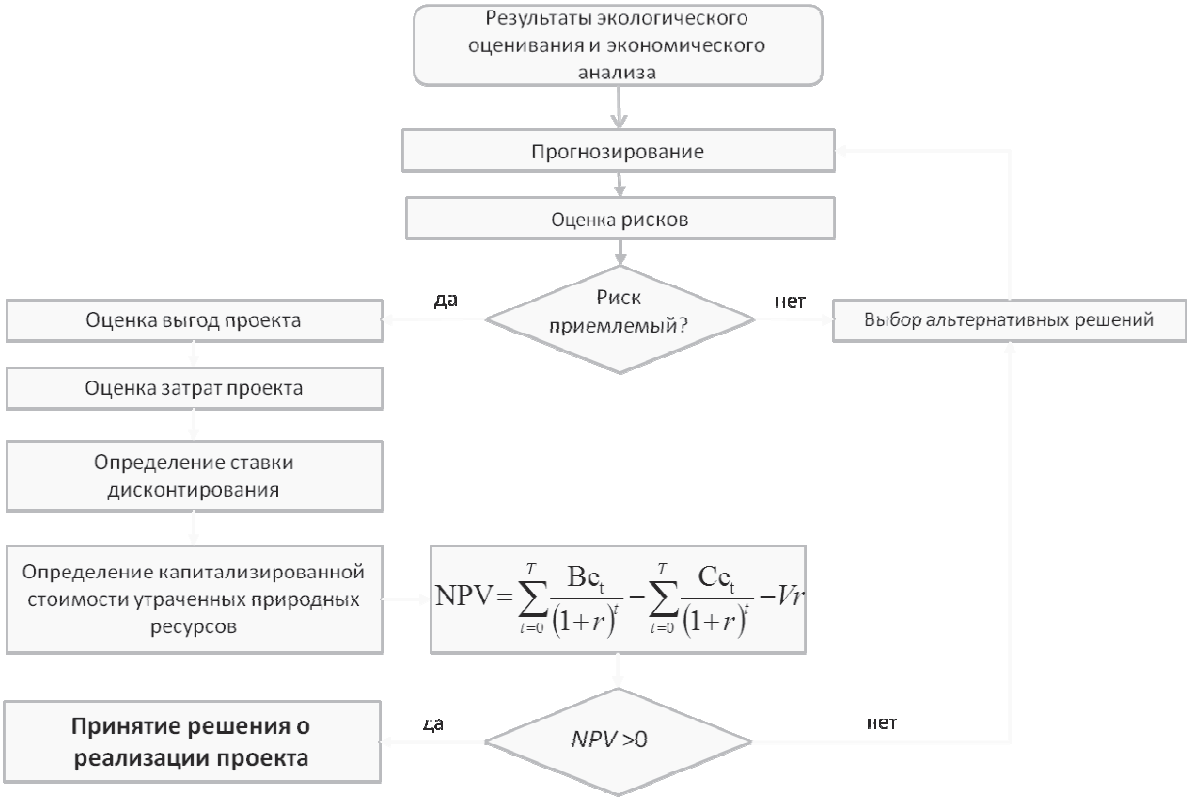


Рис. 5. Обобщенный алгоритм оценки эколого-экономической эффективности проектов развития территорий

Наибольшую сложность при реализации данного подхода представляет определение адекватных прогнозных оценок. Большие объемы разнородной информации, получаемые на этапах предварительного исследования, создают существенные трудности при сопоставлении между собой возможных вариантов осуществления хозяйственной деятельности, что не-

избежно приводит к необходимости применения специальных методов анализа и обработки.

В подобной ситуации фактически создаются условия, при которых необходимый уровень точности прогнозных оценок можно получить только с помощью моделей, обладающих адаптивными свойствами [2]. Такие модели на основе данных, полученных в ходе экологической экспертизы, способны учитывать эволюцию динамических характеристик анализируемого проекта.

Одним из эффективных подходов к исследованию поведения сложных слабоструктурированных систем является когнитивное моделирование.

Цель когнитивного моделирования − получение новых, уникальных знаний о возможном развитии системы в будущем. Эти знания позволяют существенно снизить неопределенность оценки будущих состояний моделируемой системы.

Этапы когнитивного анализа

1. Формирование понятийной модели в виде набора понятий и причинно-следственных связей между ними.

1.1. Определение зависимостей и тенденций в исследуемых процессах.

1.2. Определение ограничений, условий и требований.

1.3. Выделение факторов, по мнению экспертов характеризующих проблемную ситуацию:

– выделение базисных факторов;

– выделение в совокупности базисных факторов управляющих и целевых факторов;

– определение связей между факторами;

– определение направления влияний и взаимовлияний между факторами.

2. Построение когнитивной карты (графа) ситуации.

3. Практическое изучение ситуации с позиции заданной цели:

– прогноз развития ситуации без воздействия;

– прогноз развития ситуации с выбранным комплексом мероприятий (прямая задача).

Для получения различных сценариев развития ситуации может быть использован метод импульсных процессов [3], относящийся к категории динамических методов. Импульсный процесс позволяет определять состояние концептов в дискретные моменты времени, анализируя которые эксперт получает прогноз изменения состояния системы при реализации различных стратегий управления и изменениях внешней среды.

Пример реализации метода импульсных процессов для построения сценариев территориального развития г. Волгограда приведен в работе [4].

Для оценки рисков инвестиционных проектов градостроительной деятельности в условиях неопределенности, как правило, используются методы имитационного моделирования [5, 6]. Непосредственно в ходе имитационного эксперимента можно вводить дополнительные данные, конструировать новые информативные показатели, наблюдать графики изменения показателей и переменных и оценивать происходящие процессы.

Городская территория представляет собой ресурс, распоряжение которым, с одной стороны, дает возможность в случае эффективного его использования, получать прибыли и преференции городу как субъекту конкурентной среды; с другой стороны, городская территория – основа существования и функционирования городского сообщества. Для создания комфортной и безопасной городской среды необходимо находить согласованные решения для экологических и экономических задач. Обязательным условием является включение экологических затрат и выгод в денежные потоки, учитываемые при анализе проектов любого уровня.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Медведева, О. Е.* Методические рекомендации по осуществлению эколого-экономической оценки эффективности проектов намечаемой хозяйственной деятельности / О. Е. Медведева // АНО «Союзэкспертиза» ТПП РФ. – М. : АНО «Экологический юридическо-правовой центр», 2004. – 96 с.

2. *Садовникова, Н. П.* Применение когнитивного моделирования для анализа эколого-экономической эффективности градостроительных проектов [Электронный ресурс] / Н. П. Садовникова // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер. : Строительная информатика. – 2011. – Вып. 5 (14). – С. 1–4. – Режим доступа : www.vestnik.vgasu.ru.

3. *Робертс, Ф. С.* Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам : пер. с англ. / Ф. С. Робертс. – М.: Наука, 1986. – 496 с.

4. *Садовникова, Н. П.* Построение траекторий территориального развития на основе методов сценарного прогнозирования [Электронный ресурс] / Н. П. Садовникова, Д. С. Парыгин, Н. П. Жидкова // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер. : Строительная информатика. – 2012. – № 8(24). – Режим доступа : http://vestnik.vgasu.ru/?source=4&articleno=1114.

5. *Садовникова, Н. П.* Общие вопросы применения методологии имитационного моделирования для оценки эколого-экономической эффективности проектов градостроительной деятельности / Н. П. Садовникова, А. К. Ермощенко // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 9(82) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 11). – С. 94–97.

6. *Садовникова, Н. П.* Построение моделей развития города. Системно-динамический подход / Н. П. Садовникова, Д. С. Парыгин, Е. В. Манунина // Modern problems and ways of their solution in science, transport, production and education SWorld – 18–27 December 2012 : мат. науч.-практ. интернет-конф. – Одесса, 2012. – Вып. 4. – Т. 13. – С. 73–76.

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 541.64:547.759.32

Д. В. Девятых, О. М. Гергет, И. В. Михаленко

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ПЕРИНАТАЛЬНОГО ПОРАЖЕНИЯ НЕРВНОЙ СИСТЕМЫ

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

ddv.edu@gmail.com

Обсуждается проблема использования нейронных сетей для оценки и прогнозирования состояния здоровья биообъекта. Обоснована архитектура нейронной сети, приведены: этапы построения, обучения нейронной сети; результаты исследования.

Ключевые слова: искусственная нейронная сеть, система гемостаза.

D. V. Devjatykh, O. M. Gerget, I. V. Mikhalenko

ARTIFICIAL NEURAL NETWORK IMPLEMENTATION FOR NEWBORN NERVOUS SYSTEM PERINATAL DAMAGE DIAGNOSING

National Research Tomsk Polytechnic University

The article describes application of artificial neural networks designed for diagnosing of severe perinatal damage to the central nervous system in newborns with different gestational ages.

Keywords: artificial neural network, hemostatic system.

Введение

Особую роль в математическом моделировании биомедицинских систем играют динамические системы, в которых с течением времени происходят существенные изменения. *Динамической системой* называют систему, изменяющую под действием сил свое состояние. Совокупность всевозможных состояний системы образует пространство состояний. В нашем случае под *динамической системой* будем понимать состояние здоровья организма ребенка в раннем возрасте.

Одним из эффективных способов поддержания сложных динамических систем в требуемом состоянии является совершенствование и развитие алгоритмического диагностического контроля показателей их функционирования (системы гемостаза).

Большой вклад в разработку методов оценки состояния здоровья детей внесли специалисты, как в области медицины, так и в области математики. Анализ отечественной и зарубежной литературы показал, что исследования системы гемостаза проводятся более 50 лет [1–4]. Однако для новорожденных методики, используемые у взрослых и требующие больших заборов крови, неприемлемы.

Нарушения в системе гемостаза у новорожденных детей, особенно у недоношенных, рассматриваются как наиболее частые и грозные осложнения неонатального периода. Роды и ранний постнатальный период жизни представляют собой уникальное сочетание экстремальных воздействий, требующее непрерывной смены механизмов адаптации на разных уровнях саморегуляции. С этих позиций актуальным является поиск диагностических и прогностических критериев, отражающих сохранение и выраженность патологических изменений в системе гемостаза, с целью адекватного и своевременного терапевтического вмешательства в патологический процесс, когда лечение приходится на фазу обратимых нарушений.

На основании вышеизложенного появляется новая техническая задача, направленная на повышение точности и информативности прогнозирования риска развития перинатального поражения центральной нервной системы (ППЦНС)

у новорожденных детей, а также расширение области применения, в частности, для новорожденных с различным сроком гестации.

Для построения данной прогностической модели риска развития тяжелого ППЦНС у новорожденных детей различного гестационного возраста, было построено несколько нейронных сетей. Для каждого набора параметров использовались нейронные сети, отличающиеся друг от друга такими параметрами, как количество нейронов в выходном слое, активационная функция, метод обучения. Для создания нейронной сети использовался Neural Network ToolBox MatLab 2011b.

Количество нейронов в скрытом слое

В 1987–1991 гг. профессором Калифорнийского университета (США) Р. Хехт-Нильсеном теоремы Арнольда – Колмогорова были переработаны применительно к нейронным сетям. Было доказано, что для любого множества непротиворечивых между собой пар произвольной размерности (X_q, D_q), q = 1, ..., Q существует двухслойный персептрон с сигмоидальными активационными функциями и с конечным числом нейронов, который для каждого входного вектора X_q формирует соответствующий ему выходной вектор D_q. Таким образом, была доказана принципиальная возможность построения нейронной сети, выполняющей преобразование, заданное любым множеством различающихся между собой обучающих примеров, и установлено, что такой универсальной нейронной сетью является двухслойный персептрон, т. е. персептрон с одним скрытым слоем, причем активационные функции его нейронов должны быть сигмоидными.

Необходимое количество нейронов в скрытых слоях персептрона можно определить по формуле, являющейся следствием из теорем Арнольда – Колмогорова – Хехт-Нильсена [5]:

$$\frac{N_y Q}{1 + log_2(Q)} \leq N_w \leq N_y \left(\frac{Q}{N_x} + 1\right)(N_x + N_y + 1) + N_y, \quad (1)$$

где N_y – размерность выходного сигнала; Q – число элементов множества обучающих примеров; N_w – необходимое число синаптических связей; N_x – размерность входного сигнала. Оценив с помощью этой формулы необходимое число синаптических связей N_w, можно рассчитать необходимое число нейронов в скрытых слоях. Например, число нейронов скрытого слоя двухслойного персептрона будет равно:

$$N = \frac{N_w}{N_x + N_y}. \quad (2)$$

Данная формула позволяет определить лишь минимальное и максимальное количество нейронов, само число находится эмпирическим путем.

Формула (2) дает возможность вычислять количество нейронов в скрытом слое, если функция активация сигмоидальная. Если же передаточная функция отличается, то согласно [5–8], количество нейронов в скрытом слое определяется как

$$\frac{2N_x}{3} + N_y. \quad (3)$$

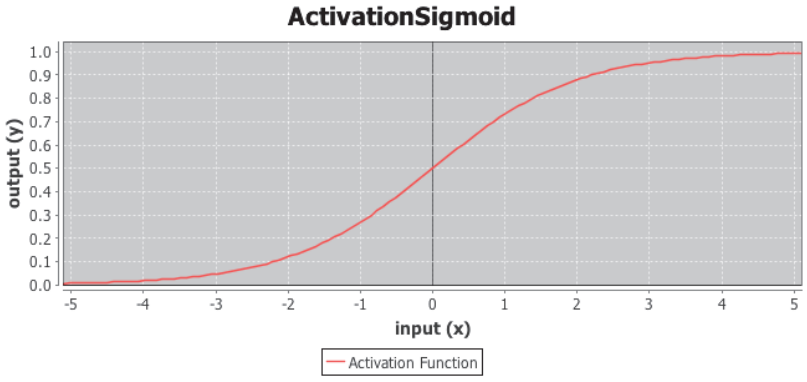
Активационная функция

В качестве активационной функции наиболее часто используются сигмоидальная активационная функция и функция гиперболического тангенса. Сигмоидальная функция задается выражением:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha x}}, \quad (4)$$

где α – параметр, определяющий наклон функции.

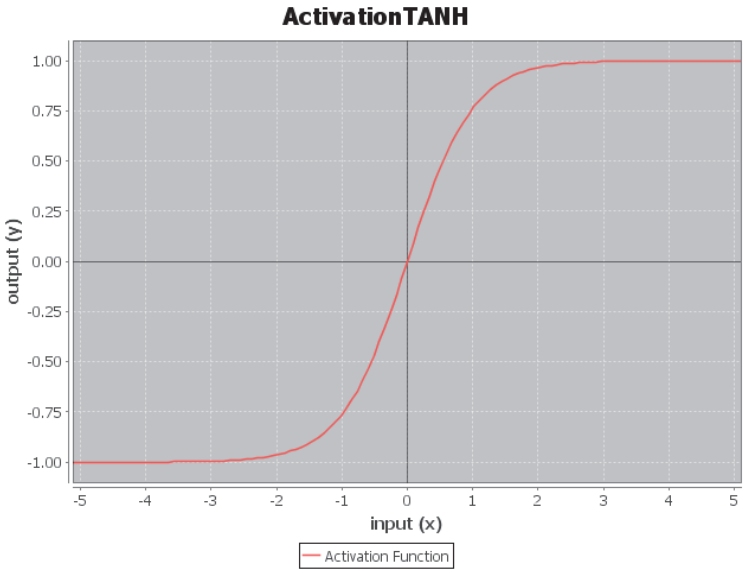
Варьируя параметр α, можно получить разные виды сигмоиды. Наиболее часто используется α = 1. В случае, когда параметр α равен бесконечно большому числу, функция вырождается в пороговую.



Как видно из рисунка, сигмоидальная функция может использоваться, только если ожидаемое выходное значение будет положительным.

Функция гиперболического тангенса:

$$f(x) = \frac{e^{2x} - 1}{e^{2x} + 1}. \qquad (5)$$



Обучение сети

В общем случае задача обучения нейронной сети (НС) сводится к нахождению некой функциональной зависимости $y = F(x)$, где x – входной, а y – выходной векторы. В общем случае такая задача, при ограниченном наборе входных данных, имеет бесконечное множество решений. Для ограничения пространства поиска при обучении ставится задача минимизации целевой функции ошибки НС, которая находится по методу наименьших квадратов:

$$E(w) = \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{p}(y_j - d_j)^2, \qquad (6)$$

где y_j – значение j-го выхода нейросети; d_j – целевое значение j-го выхода; p – число нейронов в выходном слое.

При обучении методом градиентного спуска значения весовых коэффициентов на каждой итерации изменяется по формуле

$$\Delta w_{i,j} = -\eta \frac{dE}{dw_{i,j}}, \qquad (7)$$

где $w_{i,j}$ – весовой коэффициент синаптической связи, соединяющей i-й нейрон слоя n-1 с j-м нейроном слоя n; η – коэффициент скорости обучения, $0 < \eta < 1$.

При обучении методом эластичного распространения весовые коэффициенты сети изменяются согласно формуле

$$\Delta w_{ij}^{(t)} = \begin{cases} -\Delta_{ij}^{(t)}, & \frac{dE}{dw_{i,j}}^{(t)} > 0 \\ +\Delta_{ij}^{(t)}, & \frac{dE}{dw_{i,j}}^{(t)} < 0 \end{cases} \qquad (8)$$

$$\Delta_{ij}^{(t)} = \begin{cases} \eta^{+}\Delta_{ij}^{(t-1)}, & \frac{dE}{dw_{i,j}}^{(t-1)} > 0 \\ \eta^{-}\Delta_{ij}^{(t-1)}, & \frac{dE}{dw_{i,j}}^{(t-1)} < 0 \end{cases} \qquad (9)$$

Согласно [6–8], метод эластичного распространения превосходит метод градиентного спуска по многим показателям, наиболее важными из которых являются меньшее количество итераций для обучения и устойчивость к попаданию в локальный минимум.

Точность распознавания

В качестве входных данных нейронной сети для прогнозирования развития перинатального поражения центральной нервной системы у новорожденных детей использованы нормализованные данные показателей гемостаза, которые представлены в виде матрицы размерностью 102x9, где строки – объекты исследования (детей); количество столбцов соответствует показателям гемостаза, которые использовались для описания состояния здоровья организма. Каждому объекту входного множества ставится в соответствие выходной вектор, который описывает состояние здоровья.

Общие черты у всех сетей: количество нейронов во входном слое – 9, в выходном – 2. Количество примеров – 102; обучающая выборка – 72; тестирующая выборка – 30.

Далее приводятся результаты обучения и тестирование конкретно для каждой нейронной сети.

Активационная функция	Нейронов в скрытом слое	Точность обучения, %	Точность тестирования, %
Сигмоид	3	91.6	83.5
Сигмоид	5	93	86,8
Сигмоид	10	94.4	90.1
Сигмоид	15	90,2	87.1
Сигмоид	25	100	66.6
Гипертангенс	8	95.8	93.4

В качестве активационных функций в нейронных сетях использована сигмоид- и гипертангенс-активационная функция, с параметром пологости a=1. Согласно формулам (1), (2) было определено, что количество нейронов в скрытом слое следует задать в диапазоне [3–26].

Для нейронной сети, использующей гипертангенс в качестве активационной функции, согласно формуле (3), в скрытый слой было добавлено 8 нейронов.

Ошибка, при которой пример считался распознанным верно – 0,1.

Как видно из приведенной выше таблицы, нейронная сеть с сигмоидальной активационной функцией показала лучшие результаты тестирования при количестве нейронов в скрытом слое, равном десяти. При увеличении их количества результаты работы с обучающим множеством улучшались, однако результаты тестирование ухудшались, происходило переобучение сети.

Нейронная сеть с гипертангенс-активационной функций показала лучшую точность. Чтобы проверить, не является ли это преимущество результатом «удачного» разделения выборки на обучающую и тестирующую или начальной инициализации весовых коэффициентов были созданы дополнительные экземпляры сетей и варианты разбиения выборки. Незначительное преимущество в точности, достигаемое при использовании гипертангенс-активационных функций сохранялось при работе с разными вариантами разбиения выборки на обучающую и тестирующую.

Заключение

Принятие решения на основе нейронных сетей апробировано на тестовых примерах при задании разных значений информативных признаков и при использовании разных активационных функций. Практическая апробация предложенных методов на реальных данных показала, что качество решения удовлетворяет требованиям практического врача. Данная модель позволяет, оценив опыт квалифицированных специалистов-экспертов, выдать рекомендации для проведения дополнительного обследования состояние здоровья ребенка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Баркаган, З. С.* Основы диагностики нарушений системы гемостаза / З. С. Баркаган, А. П. Момот. – М.: Ньюдиамед-АО, 1999. – 224 с.

2. *Барашнев, Ю. И.* Перинатальная неврология / Ю. И. Барашнев. – Москва: Триада-Х, 2001. – 640 с.

3. *Момот, А. П.* Способ контроля эффективности заместительной терапии ДВС-синдрома / А. П. Момот, А. Н. Мамаев, З. С. Баркаган // Клиническая лабораторная диагностика. – № 9. – 2002. – С. 27–28.

4. *Алексеева, Л. А.* ДВС-синдром / Л. А. Алексеева, А. А. Рагимов. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2010. – 120 с.

5. *Hecht-Nielsen, R.* 1987a. Counterpropagation networks. In Proceedings of the IEEE First International Conference on Neural Networks, eds. M. Caudill and C. Butler, vol. 2, pp. 19–32. San Diego, CA: SOS Printing.

6. Саймон Хайкин Нейронные сети: полный курс = Neural Networks: A Comprehensive Foundation. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2006. – С. 1104.

7. A. D. Anastasiadis, G. D. Magoulas und M. N. Vrahatis: New globally convergent training scheme based on the resilient propagation algorithm. Neurocomputing 64, 253–270, 2005.

8. Elisseeff, A., and Paugam-Moisy, H. (1997), «Size of multilayer networks for exact learning: analytic approach». Advances in Neural Information Processing Systems 9, Cambridge, MA: The MIT Press, pp. 162–168.

9. Norsalini Salim: Medical diagnosis using neural networks, Faculty of Information Technology, University Utara Malaysia, Sintok, Kedah, 2004.

10. *Гергет, О. М.* Решение актуальных медицинских задач математическими методами / О. М. Гергет, В. А. Кочегуров // LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, LAP, 2012, 1–145.

УДК 629.1.03

А. В. Леонард

ЦИКЛОВЫЙ ШАГАЮЩИЙ ДВИЖИТЕЛЬ С НАПРАВЛЯЮЩИМИ. СВОЙСТВА. УПРАВЛЕНИЕ. ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ*

Волгоградский государственный технический университет

Alex-Leonard@yandex.ru

Рассматриваются варианты конструкций шагающих движителей на базе циклового шагающего механизма с направляющей. Исследуются способы управления шагающей машиной при движении вдоль прямой линии. Анализируются пути совершенствования циклового шагающего движителя с направляющими.

Ключевые слова: цикловой движитель с направляющей, управление шагающей машиной, моделирование движения, уравнения Лагранжа.

A. V. Leonard

CYCLE WALKING PROPELLER WITH DIRECTINGS. PROPERTIES. CONTROL. WAYS OF UPGRADE

Volgograd State Technical University

Variants of constructions of walking propeller on base cyclic walking mechanism with directing has been considered. Control methods of walking machine moving along a straight line has been investigated. Ways of upgrade of cycle walking propeller with directing has been analyzed.

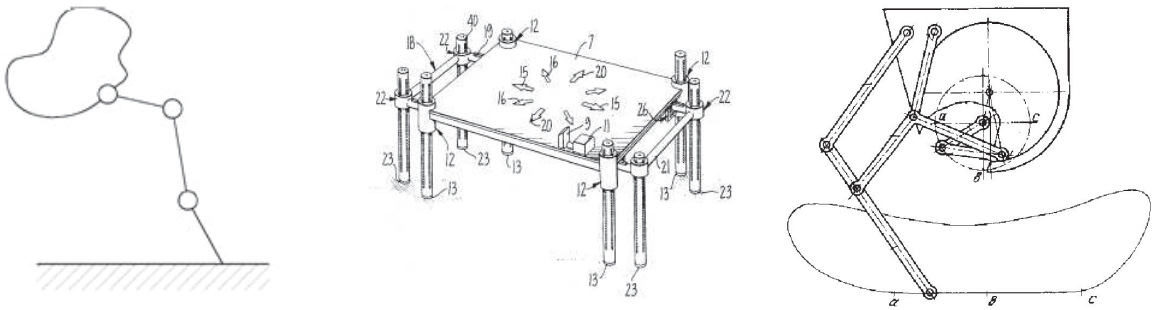
Keywords: cycle walking propeller with directing, control of walking machine, modeling of motion, equation of Lagrange.

Введение

Опыт по созданию транспортно-технологических комплексов с шагающим принципом перемещения показывает, что можно выделить следующие активно формирующиеся направления шагающей техники: экзоскелитоны, антропоморфные роботы, шагающие транспортно – технологические машины и др.

Существует несколько типов шагающих движителей, отличающихся друг от друга числом управляемых степеней подвижности: в виде разомкнутых кинематических цепей, ортогональные, цикловые и др. (рис. 1).

Для машины грунтовой проходимости типа «Восьминог» использование цикловых движителей предпочтительно. Управление цикловым движителем реализуется одним приводом, а энергозатраты на поддержание веса машины могут быть сведены к минимуму определенным законом движения корпуса [1–4].



а *б* *в*

Рис. 1. Виды шагающих движителей:
а – разомкнутая кинематическая цепь; *б* – ортогональный; *в* – цикловой

Особенности механизмов. Управление шагающей машиной при движении вдоль прямой линии

Отличительными особенностями циклового механизма Чебышева – Умнова, применяемого в шагающей машине «Восьминог», являются: отсутствие прямолинейной фазы у траектории стопы, неравномерность горизонтальной скорости движения машины и др.

В результате параметрического синтеза был получен цикловый шагающий механизм с направляющей (рис. 2) [4–6]. Механизм реализует прямолинейную опорную фазу стопы с минимальным количеством звеньев.

* Работа поддержана РФФИ (проект № 11-08-00955, 12-08-31375, 12-01-31398).

Рис. 2. Механизм Чебышева–Умнова / механизм с направляющей

В новом механизме также удалось улучшить значимые для управления шагающей машиной параметры (см. таблицу).

Сравнительный анализ механизмов

№	Критерий оценки	Механизм Чебышева – Умнова	Механизм с направляющей
1.	H/r	0,434	1,61
2.	B / r	0,75	2,16
3.	Δ / r	0,21	0
4.	$H_{г.} / r$	3,56	2
5.	M / m_1	7,94	5,57
$\omega = \text{const}\ (\omega = 1\ \text{рад/с})$			
6.	V_{max} / V_{min}	3,33	2,87

Здесь где r – радиус кривошипа; H – высота подъема стопы в процессе движения; B – клиренс шагающей машины; Δ – высота подъема центра масс корпуса робототехнического комплекса; $H_{г.}$ – вертикальный габаритный размер частей механизма, расположенных на корпусе механизма, в процессе его работы; m_1 – масса кривошипа; M – неуравновешенная масса подвижных частей механизма (без учета массы стопы и с одинаковой плотностью распределения массы по всем звеньям); ω – угловая скорость кривошипа; V_{max}, V_{min} – максимальная и минимальная горизонтальные скорости движения робототехнического комплекса за период работы механизма.

В синтезированном механизме фаза переноса стопы превосходит фазу опоры (по углу кривошипа) более чем в шесть раз. Попытаться достичь одинаковой продолжительности фазы опоры и фазы переноса по времени (отсутствия вертикальных перемещений корпуса машины) можно, как и в машине «Восьминог», сдваиванием механизмов (рис. 2) в один движитель, но при условии, что механизмы лишены кинематической связи между собой.

Решить поставленную задачу возможно установкой между полуосями кривошипов симметричного дифференциала (рис. 3) [7–9]. Продолжительность фазы опоры и фазы переноса (по углу) определяется специальным блокирующим дифференциал устройством.

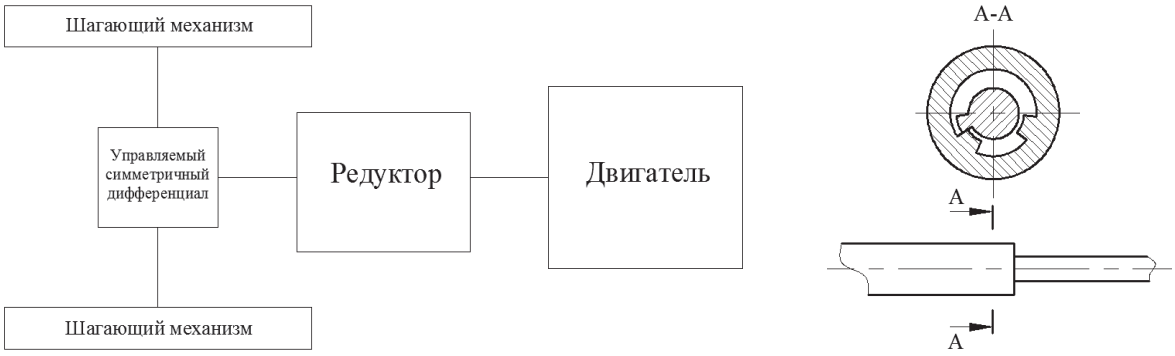


Рис. 3. Установка дифференциала / блокирующее устройство

Системы уравнений, описывающие динамику машины, принимают вид (поступательное – прямолинейное движение):

дифференциал блокирован

$$x-a-l\cdot n+F(\varphi_1)=0:\lambda,\ x_1-a-l\cdot n=0:\lambda_1,\ x_2-a-l\cdot n+F(\varphi_1)-F(\varphi_1-\Delta\varphi)=0:\lambda_2,$$
$$M\frac{d^2x}{dt^2}=-Q+\lambda,\ m\frac{d^2x_1}{dt^2}=\lambda_1=0,\ m\frac{d^2x_2}{dt^2}=\lambda_2; \qquad (1)$$

дифференциал разблокирован

$$x-a-l\cdot n+F(\varphi_2)=0:\lambda,\ x_1-a-l\cdot n+F(\varphi_2)-F(\varphi_1)=0:\lambda_1,\ x_2-a-l\cdot n=0:\lambda_2$$
$$M\frac{d^2x}{dt^2}=-Q+\lambda,\ m\frac{d^2x_1}{dt^2}=\lambda_1,\ m\frac{d^2x_2}{dt^2}=\lambda_2=0,\ 0=M_{кр.}-2\lambda_3,\ 0=-\frac{dF(\varphi_1)}{d\varphi_1}\lambda_1+\lambda_3, \qquad (2)$$
$$0=\frac{dF(\varphi_2)}{d\varphi_2}\lambda+\frac{dF(\varphi_2)}{d\varphi_2}\lambda_1+\lambda_3.$$

Условия перехода от одной группы уравнений к другой:

1) от (1) к (2) – $\varphi_1(\varphi_2)=\varphi_{K_2}+2\pi m,\ m=1,2,3,...$;

2) обратный переход – $|\varphi_1-\varphi_2|=\Delta\varphi$ *и* $\varphi_{K_1}+2\pi m\le\varphi_{оп}\le\varphi_{K_2}+2\pi m,\ m=1,\ 2,\ 3...$

Здесь M, m – масса корпуса машины и масса шагающего механизма; x, x_1, x_2 – абсолютные горизонтальные координаты корпуса машины массы M и опорных точек шагающих механизмов массы m; a, l, k, n – начальное положение опорной ноги (нога входит в опорную фазу при заблокированном дифференциале), длина шага, номера шагов; λ, λ_1, λ_2, λ_3 – неопределенные множители Лагранжа; φ, φ_1, φ_2 – обобщенная координата корпуса дифференциала и обобщенные координаты полуосей дифференциала; $\Delta\varphi$ – сдвиг фаз двух механизмов; φ_{K_1}, φ_{K_2} – углы, соответствующие точкам входа и выхода из опорной фазы; $\varphi_{оп}$ – угол, определяющий положение механизма, находящегося в опорной фазе; F – передаточная функция, определяющая голономные стационарные связи между двигателем и рассматриваемыми телами; $M_{кр}$, Q – крутящий момент, подводимый на корпус дифференциала, и сила сопротивления движению машины. Из численного моделирования движения машины следует: в процессе перемещения шагающей опоры продолжительность блокировки дифференциала (по времени) неодинакова (рис. 4). Введение дифференциала не устраняет удары, обусловленные разностью горизонтальных скоростей стоп механизмов на входе и выходе из опорной фазы.

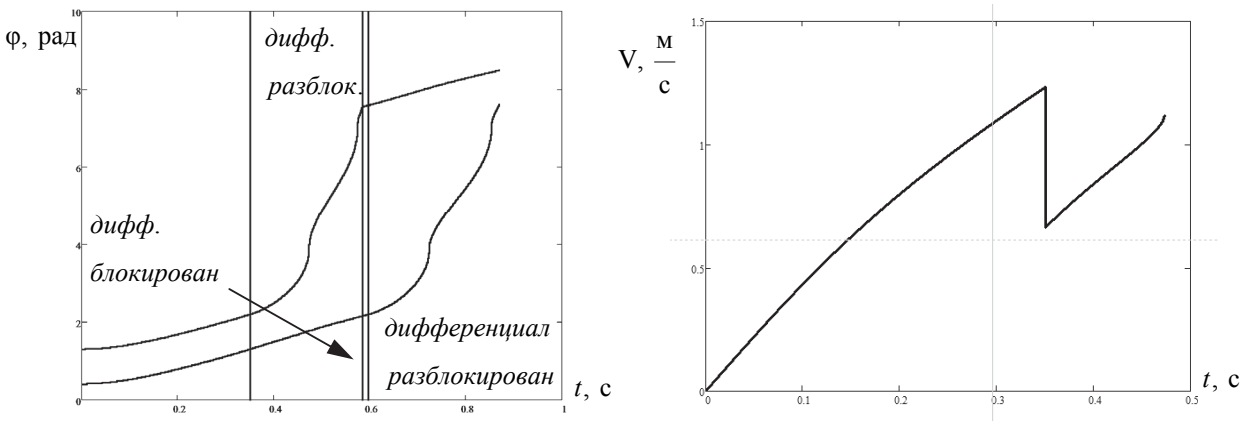


Рис. 4. Функционирование дифференциала / линейная скорость корпуса машины

Для гарантии отсутствия вертикальных колебаний корпуса и исключения неравномерности горизонтальной скорости машины необходима система управления.

С целью упрощения регулирования движителя предлагается согласованное управление механизмов (без дифференциала) двумя двигателями, установленными на полуосях кривошипов (рис. 5).

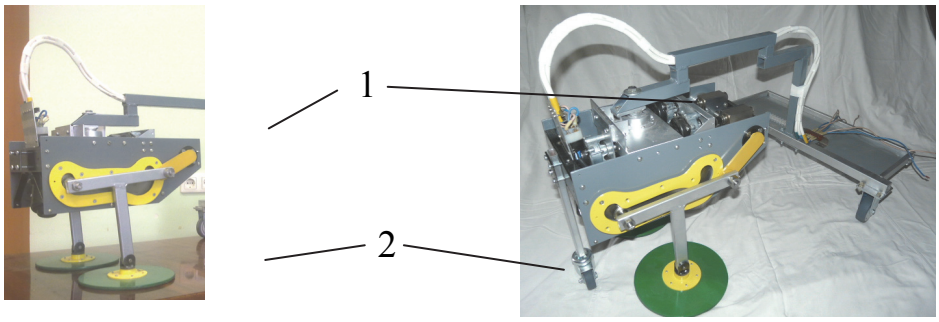


Рис. 5. Физическая модель шагающей машины с циклово-поворотным движителем:
1 – поддерживающая рама; *2* – шагающий движитель

Динамика курсового, поступательного вдоль горизонтальной оси, движения шагающей машины с циклово-поворотными движителями может быть описана системой уравнений:

$$(M+m)\ddot{x}_1 + m\ddot{x}_2 = -P + \lambda_1, m\ddot{x}_1 + m\ddot{x}_2 = $$

$$= \lambda_2, 0 = L_1 + \lambda_1 \frac{\partial \Pi_1}{\partial \alpha_1}, 0 = L_2 - \lambda_2 \frac{\partial \Pi_2}{\partial \alpha_2}. \quad (3)$$

Здесь x_1 – горизонтальная координата оси вращения кривошипа в абсолютной системе координат; x_2 – горизонтальная координата центра масс системы «шатун – стопа» относительно оси кривошипа, для переносимого механизма шагания; α_1 – угловая координата кривошипа для механизма, находящегося в опоре; α_2 – угловая координата кривошипа для механизма, находящегося в переносе; λ_j – неопределенные множители Лагранжа, $M = M_1 + 2m_1$; $m = m_2 + m_3$; M_1 – масса корпуса машины; m_1 – масса кривошипа; m_2 – масса шатуна; m_3 – масса стопы; P – сила сопротивления, приложенная к корпусу шагающей машины; L_1 – момент, развиваемый двигателем, обеспечивающим движение машины; L_2 – момент, развиваемый двигателем, обеспечивающим перенос механизма шагания; $\Pi_1(\alpha_1)$ – функции положения стопы относительно оси вращения кривошипа, $\Pi_2(\alpha_2)$ – функции положения центра масс системы «шатун – стопа» относительно оси вращения кривошипа. Программные законы, обеспечивающие отсутствие вертикальных перемещений корпуса, неравномерность горизонтальной скорости машины и минимизирующие инерционные нагрузки, представлены на рис. 6. Изменения скачком управляющих воздействий реализуемы с высокой степенью точности при современном уровне развития элементной базы цифровых систем управления.

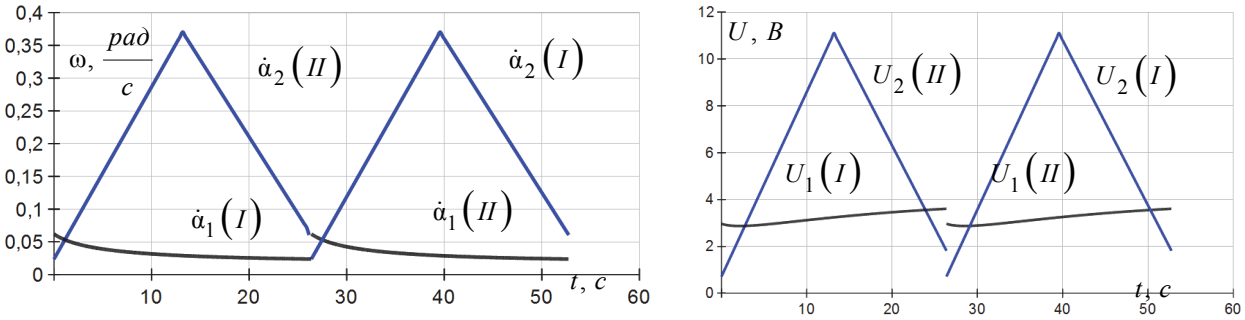
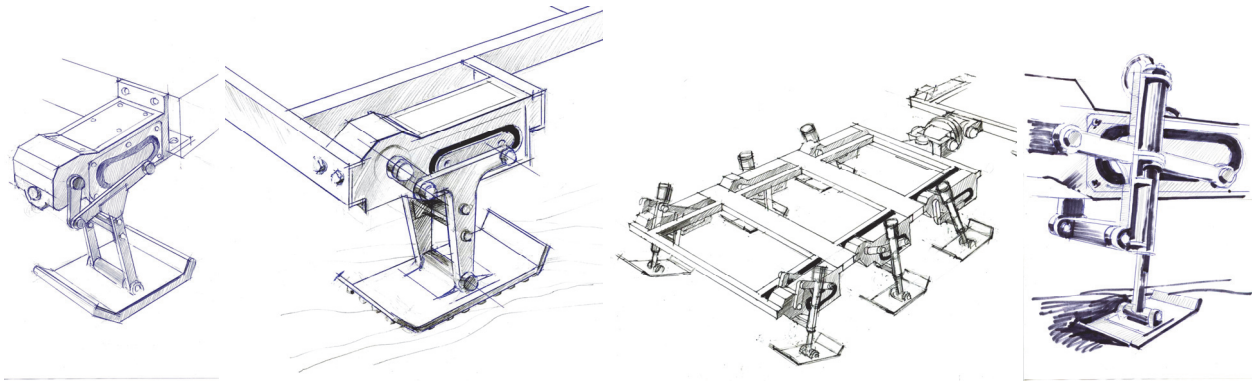


Рис. 6. Курсовое движение шагающей машины: $V_к = 0{,}007$ м; $M = 21$ кг; $m = 0{,}4$ кг; $\gamma_1 = 5{,}1$ $Н \cdot м/В$; $\gamma_2 = 153$ кг×м²/с – параметры двигателей постоянного тока; $P = 50$ Н; обозначение I, II – шагающие механизмы

Совершенствование

Для обеспечения большей жесткости конструкции (рис. 7, *а*) механизм может быть модифицирован путем дублирования звеньев и жестким соединением шатунов между собой. Установка электроцилиндра (рис. 7, *г*), шарнирно связанного со стопой, на дублированном шатуне позволит повысить адаптивные свойства движителя – проходимость шагающего транспортного средства.



а *б* *в* *г*

Рис. 7. Пути совершенствования шагающей машины:
а – увеличение жесткости; *б* – модульность; *в* – полиопорность; *г* – адаптивность

Унифицированность и модульность (рис. 7, *б*) шагающих движителей улучшает ремонтопригодность шагающей машины и дает возможность переконфигурировать расположение движителей под конкретную задачу. Применение многодвижительной схемы (рис. 7, *в*) с дублированными звеньями и электроцилиндрами на шагающем транспортно-технологическом средстве позволит преодолевать препятствия, сопоставимые с размерами машины.

Заключение

Таким образом, двухдвигательное управление шагающими механизмами цикловоповоротного движителя (рис. 5) позволяет полностью решить заду об устранении вертикальных перемещений корпуса и неравномерности горизонтальной скорости машины, при движении вдоль прямой линии. Эволюционный подход: «от простого к сложному», при создании и исследовании шагающей машины (движителя), как технической системы, дает возможность выявить значимые свойства и выбрать направление дальнейших исследований. На основе этого подхода – анализа путей совершенствования – выработана новая конструкция движителя. Конструкция представляет собой цикловоповоротный движитель с жестко закрепленными на шатунах электроцилиндрами (рис. 7, *г*).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Опыт разработки и испытаний шагающих опор дождевальной машины / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, В. В. Жога, А. В. Малолетов // Тракторы и сельхозмашины. – 2011. – № 9. – С. 27–31.

2. *Брискин, Е. С.* Об управлении движением шагающей машины с двигателем минимальной мощности / Е. С. Брискин, В. В. Жога, А. В. Малолетов // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2009. – № 6. – С. 21–30.

3. Концепция проектирования шагающих машин / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, В. В. Жога, А. В. Малолетов, Н. Г. Шаронов, Н. Е. Фролова // Наука – производству. – 2005. – № 1. – С. 33.

4. *Калинин, Я. В.* Оценка энергетической эффективности шагающих машин с цикловыми движителями / Я. В. Калинин // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 12 (60) / ВолгГТУ. – 2009. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 7). – С. 40–44.

5. *Брискин, Е. С.* Синтез циклового шагающего механизма с направляющей и критерии его оценки / Е. С. Брискин, А. В. Леонард, А. В. Малолетов // Теория Механизмов и Машин. – 2011. – № 1(17). – Т. 9. – С. 14–24.

6. Пат. 2422317 РФ, МПК B 62 D 57/032. Шагающая опора для многоопорных самоходных машин и для транспортных средств повышенной проходимости / А. В. Леонард, Е. С. Брискин. – 2011.

7. *Леонард, А. В.* Цикловый шагающий механизм с направляющей / А. В. Леонард // Известия высших учебных заведений. – М.: Машиностроение. – 2011. – № 10. – С. 18–22.

8. *Брискин, Е. С.* Дифференциальный привод цикловых шагающих движителей / Е. С. Брискин, А. В. Леонард // Прогресс транспортных средств и систем : мат-лы Междунар. науч.-практ. конф. – В 2 ч. Ч. 2 / Волгоград. гос. техн. ун-т. – С. 173–174.

9. *Брискин, Е. С.* Об управлении походкой шагающей машины «восьминог» / Е. С. Брискин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № S5. – С. 6–10.

10. О статически устойчивой походке шагающей машины с тремя сдвоенными ортогонально-поворотными движителями / Е. С. Брискин, А. В. Малолетов, А. М. Колесов, В. А. Серов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. – № 7. – С. 22–27.

УДК 629.1.03

А. В. Леонард, Е. С. Брискин

ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ ШАГАЮЩЕЙ МАШИНЫ С ПОВОРОТНЫМ ДВИЖИТЕЛЕМ, ОБРАЗОВАННЫМ СДВОЕННЫМИ МЕХАНИЗМАМИ ШАГАНИЯ*

Волгоградский государственный технический университет
Alex-Leonard@yandex.ru

Рассматривается математическая модель кинематики шагающей машины с поворотным движителем. Исследуется метод безударного движения шагающей машины. Проводится численное моделирование режимов движения машины.

Ключевые слова: шагающий циклово-поворотный движитель, шагающая машина, моделирование кинематики движения.

A. V. Leonard, E. S. Briskin

MOTIONS CHARACTERISTICS OF WALKING MACHINE WITH TURNING PROPELLER FORMED BY DUAL WALKING MECHANISMS

Volgograd State Technical University

Kinematics mathematical model of walking machine with rotating propeller has been considered. Method of non-impact movement of the walking machine has been investigated. Numerical simulation motions modes of machine has been carried.

Keywords: walking cycle-rotating propeller, walking machine, modeling kinematics.

Введение

Известны шагающие машины со сдвоенными механизмами шагания (рис. 1, 2) [1].

Отличительным свойством данных типов машин является наличие ударов в процессе их перемещения, обусловленных конструктивными особенностями шагающих движителей: один привод поворота – на пару сдвоенных механизмов шагания [2–5].

Для изучения кинематики шагающего движителя, образованного сдвоенными цикловыми механизмами с направляющей [6–9], рассматривается шагающая машина, состоящая из одного движителя, который соединен посредством привода поворота с поддерживающей рамой (рис. 2). Кинематическая схема машины представлена на рис. 3.

Рис. 1. Шагающая машина «Ортоног»

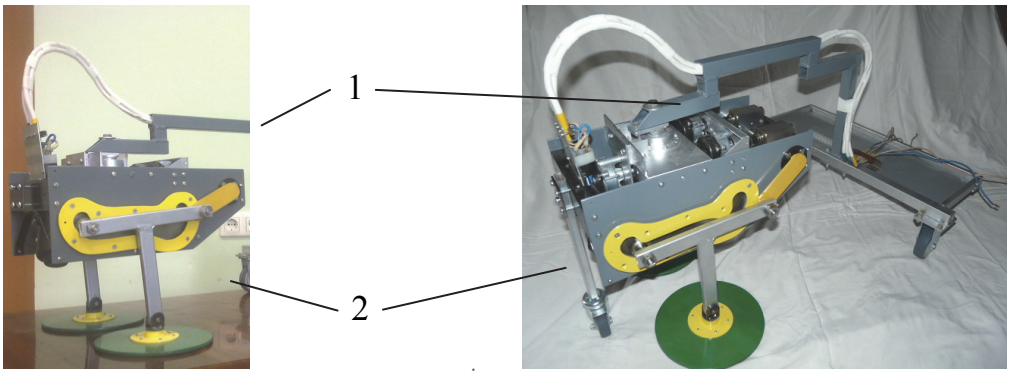


Рис. 2. Физическая модель шагающей машины с поворотно-цикловым движителем:
1 – поддерживающая рама; *2* – шагающий движитель

* Работа поддержана РФФИ (проект № 11-08-00955, 12-08-31375, 12-01-31398).

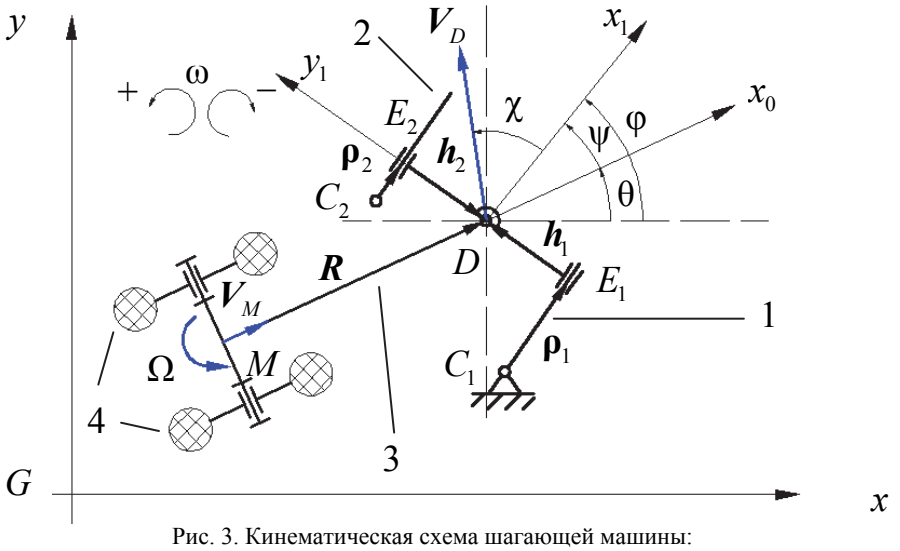


Рис. 3. Кинематическая схема шагающей машины:
1, 2 – шагающие механизмы; *3* – корпус; *4* – неуправляемые колеса

Постановка задачи

Определить управляемые законы (прямая задача) перемещения движителя $\dot{\psi}, \dot{\rho}$ для следующего способа задания движения корпуса шагающей машины (1):

$$\left\{V_M = V_M[t];\ \Omega = \Omega[t]\right. \qquad (1)$$

и выработать методы и подходы управления, минимизирующие ударные нагрузки приводов машины.

Моделирование

В соответствии с рис. 3:

$$\boldsymbol{V}_D = \boldsymbol{V}_M + \boldsymbol{\Omega} \times \boldsymbol{R}, \qquad (2)$$

где ψ – угол между осями x_0 и x_1; ρ – расстояние между точками $C_{1(2)}$ и $E_{1(2)}$; V_M – скорость точки M; Ω – угловая скорость корпуса шагающей машины; R – расстояние между точками M и D.

При осуществлении разложения (2) по базису абсолютной системы координат XYG (рис. 3), получаются следующие равенства, которые позволяют определить модуль скорости $\boldsymbol{V}_D$:

$$\left\{V_{Dx} = V_M \cos(\theta) - \Omega R \sin(\theta);\right.$$
$$V_{Dy} = V_M \sin(\theta) + \Omega R \cos(\theta), \qquad (3)$$

где θ – угол между осями x_0 и x.

Для механизмов *1*(*2*) во время нахождения одного из двух в опоре справедливо следующее векторное соотношение:

$$\boldsymbol{V}_D = \dot{\rho}\boldsymbol{e}_\rho + \dot{\boldsymbol{\varphi}} \times \boldsymbol{\rho} + \dot{\boldsymbol{\varphi}} \times \boldsymbol{h}, \qquad (4)$$

где $\boldsymbol{\varphi}$ – вектор абсолютной угловой скорости движителя относительно точки $C_{1(2)}$; $\boldsymbol{\rho}$ – вектор между точками $C_{1(2)}$ и $E_{1(2)}$; $\boldsymbol{h}$ – вектор между точками $E_{1(2)}$ и D; $\boldsymbol{e}_\rho$ – единичный вектор вектора $\boldsymbol{\rho}$.

Проецирование уравнений (4) на подвижные оси координат x_1, y_1, связанные с корпусом шагающего движителя, позволяет получить дифференциальные уравнения (5), описывающие кинематику шагающей машины, когда в опоре находится один из механизмов.

$$\begin{cases} \dot{\rho} = \sqrt{V_M^2 + \Omega^2 R^2}\cos\left(\vartheta - \psi - \int \Omega dt - \theta_0\right) \pm \Omega h \pm \dot{\psi} h; \\ \dot{\psi} = \dfrac{1}{\rho}\sqrt{V_M^2 + \Omega^2 R^2}\sin\left(\vartheta - \psi - \int \Omega dt - \theta_0\right) - \Omega, \end{cases} \qquad (5)$$

где ϑ – угол, задающий ориентацию вектора скорости $\boldsymbol{V}_D$ относительно оси x. Для определения вида функции $\vartheta = \vartheta[t]$ используется пара направляющих косинусов:

$$\cos(\vartheta) = \left[V_M \cos\left(\int \Omega dt + \theta_0\right) - \Omega R \sin\left(\int \Omega dt + \theta_0\right)\right] / \sqrt{V_M^2 + \Omega^2 R^2};$$
$$\cos(\pi/2 - \vartheta) = \left[V_M \sin\left(\int \Omega dt + \theta_0\right) + \Omega R \cos\left(\int \Omega dt + \theta_0\right)\right] / \sqrt{V_M^2 + \Omega^2 R^2}.$$

В зависимости от сочетания знаков направляющих косинусов функция ϑ может принимать четыре различные формы, отличающиеся знаком и константной частью. Переход от системы дифференциальных уравнений (5) со знаком «+» к дифференциальным уравнениям со знаком «–» и обратно осуществляется при выполнении логических условий: $\rho = \rho_{min}$ $\rho = \rho_{max}$. Начальное значение ρ на новом шаге машины определяется согласно условиям:

$$\cos(\chi) \geq 0 : \rho^0 = \rho_{min};\ \cos(\chi) < 0 : \rho^0 = \rho_{max},$$

где χ – угол между вектором $\boldsymbol{V}_D$ и осью x_1. Анализ вида уравнений (5) показывает, что в момент переступания величины $\dot{\psi}, \dot{\rho}$ изменяются скачком.

Результаты расчета

Для представленной совокупности уравнений (5) проведен расчет режима движения шагающей машины: $V_M = 0{,}05$ м/с; $\Omega = 0{,}02$ рад/с (рис. 4–6). Параметры машины: $h = 0{,}2$ м; $R = 1$ м; $\rho_{min} = 0{,}2$ м; $\rho_{max} = 0{,}6$ м.

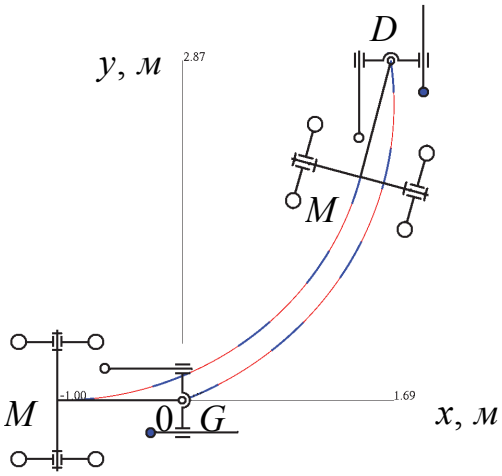


Рис. 4. Поворот шагающей машины

Чередование темных и светлых участков на графиках отражает попеременную работу шагающих механизмов *1* и *2* (см. рис. 3).

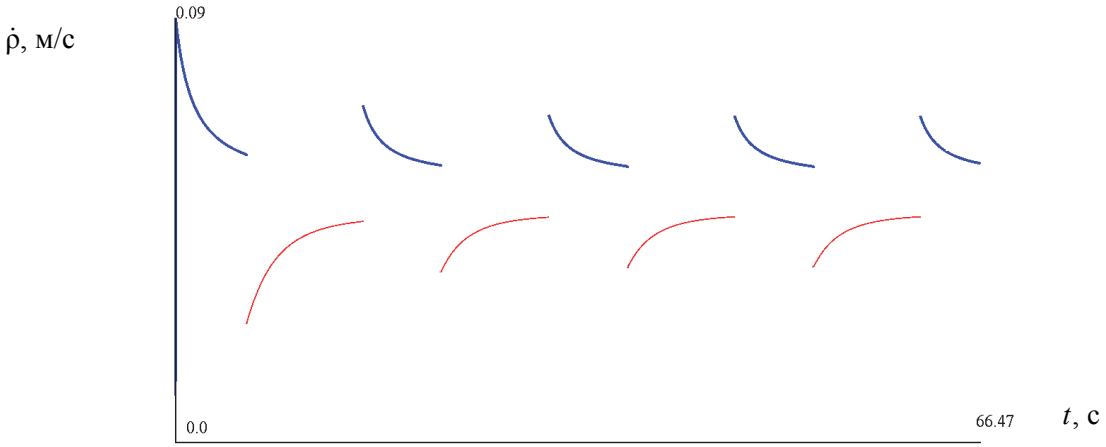


Рис. 5. График функции $\dot{\rho} = \dot{\rho}(t)$ для режима: $V_M = 0{,}05$ м/с; $\Omega = 0{,}02$ рад/с

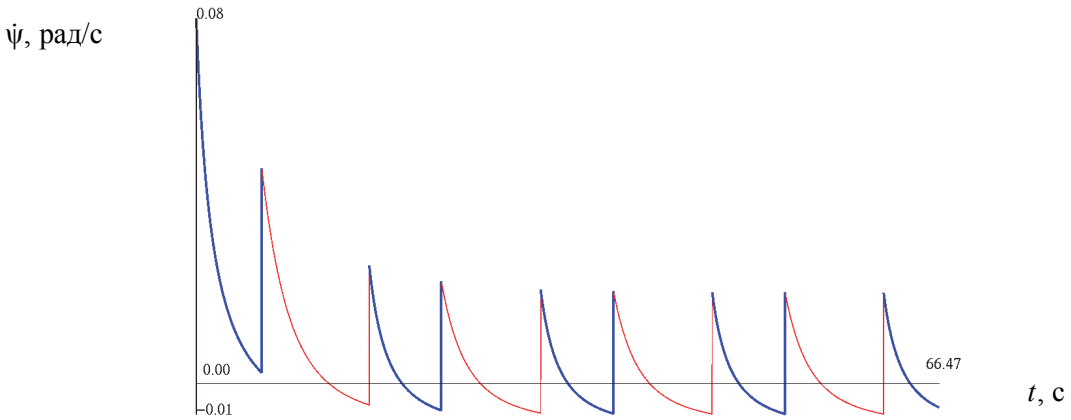


Рис. 6. График функции $\dot{\psi} = \dot{\psi}(t)$ для режима: $V_M = 0{,}05$ м/с; $\Omega = 0{,}02$ рад/с

Ограничения

В момент переступания необходимо выполнение системы равенств:

$$\begin{cases}\dot{\varphi}_1\rho_1 = \dot{\varphi}_2\rho_2, \\ \dot{\rho}_1 + \dot{\varphi}_1 h = \dot{\rho}_2 - \dot{\varphi}_2 h.\end{cases} \quad (7)$$

В противном случае возникают удары в приводах (рис. 5, 6). В момент переступания $\rho_1 \neq \rho_2$, следовательно, для соблюдения первого условия системы (7) необходимо и достаточно, что бы $\dot{\varphi}_2 = \dot{\varphi}_1\rho_2/\rho_2$ или $\dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi}_2 = 0$. На практике, при $\dot{\varphi}_1 \neq \dot{\varphi}_2$, это означает:

$$\ddot{\varphi} \to \infty \Rightarrow M \to \infty,$$

где M – момент привода поворота, что недостижимо. Попытка реализовать подобный режим работы поворотного привода приведет к возникновению в нем нагрузок ударного характера, значительных линейных и угловых ускорений корпуса шагающей машины и, как следствие, – к искажению задаваемых законов перемещения корпуса. Соответственно для безударного режима движения шагающей машины в момент переступания движитель должен совершать мгновенно поступательное движение:

$$\begin{cases}\dot{\rho}_1 = \dot{\rho}_2; \\ \dot{\varphi} = 0.\end{cases} \quad (8)$$

Обратная задача

Пусть между моментами смены опорных стоп движителя поворотный привод работает по закону, удовлетворяющему системе (8):

$$\dot{\varphi} = \begin{cases}\varepsilon t, 0 \le t \le \tau/2; \\ \omega\left(t = \tau/2\right) - \varepsilon\left(t - \tau/2\right), \tau/2 \le t \le \tau.\end{cases} \quad (9)$$

Данный вид закона изменения абсолютной угловой скорости – $\dot{\varphi}$ обеспечивает минимум энергозатрат, идущих на разгон – торможение движителя, обусловленный работой поворотного привода, где τ – время работы 1(2) механизма; ε – угловое ускорение привода поворота.

Решая обратную задачу $\boldsymbol{V}_M = \boldsymbol{V}_D - \boldsymbol{\Omega} \times \boldsymbol{R}$ (10) для режима движения шагающей машины:

$$\dot{\varphi} = \begin{cases}0{,}025t, 0 \le t \le \tau/2 \\ \omega\left(t = \tau/2\right) - 0{,}025\left(t - \tau/2\right), \tau/2 \le t \le \tau\end{cases} \text{ рад/с;}$$

$$\dot{\rho} = 0{,}05 \text{ м/с;}$$

$$\tau = \left(\rho_{max} - \rho_{min}\right)/\dot{\rho}, \text{ с,}$$

при тех же параметрах машины, получаются следующие характеристики приводов шагающей машины (рис. 7, 8):

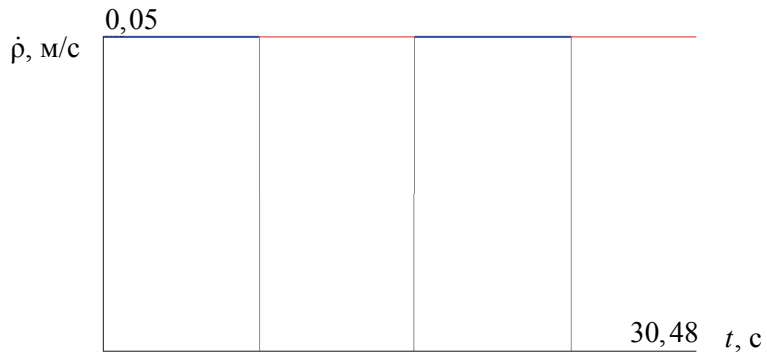


Рис. 7. График функции $\dot{\rho} = \dot{\rho}(t)$ для безударного режима движения

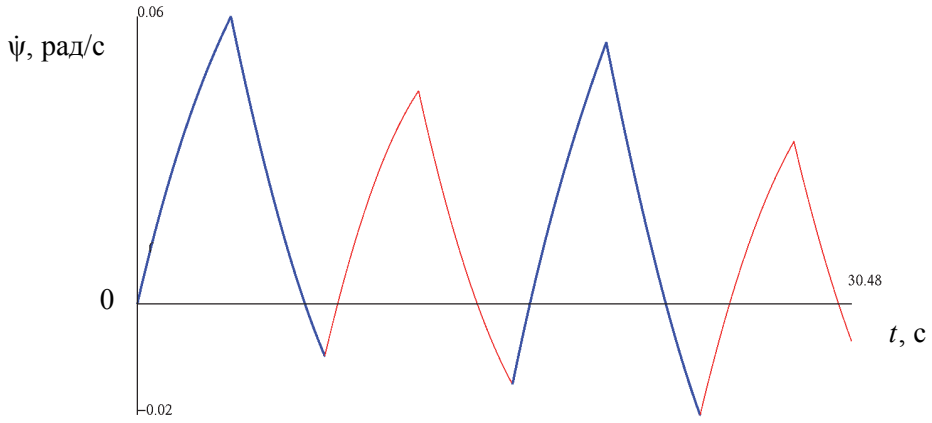


Рис. 8. График функции $\dot{\psi} = \dot{\psi}(t)$ для безударного режима движения

Траектории характерных точек шагающей машины представлены на рис. 9.

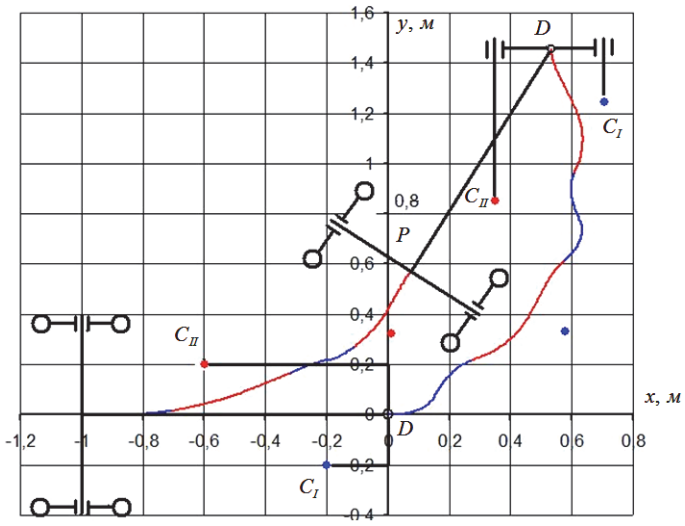


Рис. 9. Безударный поворот шагающей машины

Для безударного поворота линейная скорость точки M и угловая скорость корпуса (рис. 10, 11) изменяются с переменными по знаку ускорениями.

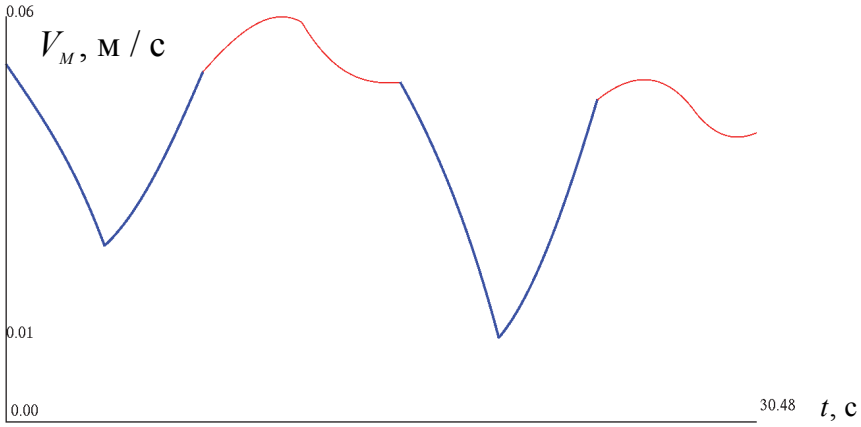


Рис. 10. График функции $V_M = V_M(t)$ для безударного режима движения

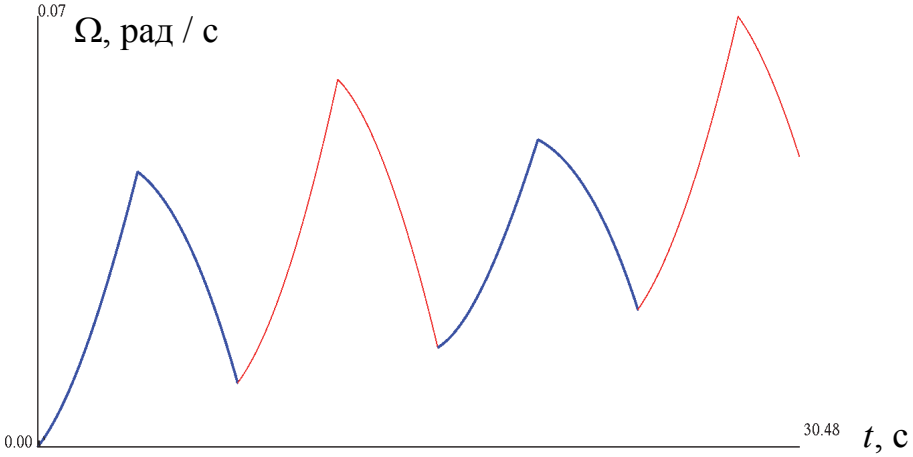


Рис. 11. График функции $\Omega = \Omega(t)$ для безударного режима движения

Заключение

Как было установлено выше, управление через задание движения характерной точки (1) приводит к противоречию условиям безударности (8). При реализации подхода (10) безударного режима движения шагающей машины (9) траектория характерной точки является формируемой (рис. 7). Соблюдение точности позиционирования машины и ее энергоэффективности потребует выработки иного управления. В частности, таким управлением может являться «дискретное»: чередование поворотов корпуса и прямолинейных перемещений характерной точки шагающей машины.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Опыт разработки и испытаний шагающих опор дождевальной машины / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, В. В. Жога, А. В. Малолетов // Тракторы и сельхозмашины. – 2011. – № 9. – С. 27–31.

2. *Брискин, Е. С.* Об управлении движением шагающей машины с двигателем минимальной мощности / Е. С. Брискин, В. В. Жога, А. В. Малолетов // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2009. – № 6. – С. 21–30.

3. Опыт разработки и испытаний шагающих опор дождевальной машины / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, В. В. Жога, А. В. Малолетов // Тракторы и сельхозмашины. – 2011. – № 9. – С. 27–31.

4. Пат. 2063354 РФ, МПК B 62 D 57/032. Шагающая опора для транспортных средств повышенной проходимости / Е. С. Брискин, А. Е. Русаковский, А. М. Арзамасков, В. В. Чернышев.

5. Пат. 223957 РФ, МПК B 62 D 57/032. Шагающая опора для транспортных средств повышенной проходимости / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, А. В. Тельдеков. – 2003.

6. *Брискин, Е. С.* Синтез циклового шагающего механизма с направляющей и критерии его оценки / Е. С. Брискин, А. В. Леонард, А. В. Малолетов // Теория Механизмов и Машин. – 2011. – № 1(17). – Т. 9. – С. 14–24.

7. Пат. 2422317 РФ, МПК B 62 D 57/032. Шагающая опора для многоопорных самоходных машин и для транспортных средств повышенной проходимости / А. В. Леонард, Е. С. Брискин. – 2011.

8. *Леонард, А. В.* Цикловый шагающий механизм с направляющей / А. В. Леонард // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2011. – № 10. – С. 18–22.

9. *Калинин, Я. В*. Оценка энергетической эффективности шагающих машин с цикловыми движителями / Я. В. Калинин // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 12(60) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 7). – С. 40–44.

УДК: 004.4'233

Н. О. Олифер, О. А. Сычёв

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ СТРУКТУР ДАННЫХ ОТЛАЖИВАЕМЫХ ПРОГРАММ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ ОБУЧЕНИИ РАБОТЕ С ДИНАМИЧЕСКИМИ СТРУКТУРАМИ ДАННЫХ НА ЯЗЫКЕ C++

Волгоградский государственный технический университет

onoliferon@gmail.com, oasychev@gmail.com

В статье описан визуализатор состояния программ на языке C++ и его применение в учебном процессе при изучении темы «Динамические структуры данных». Разработанная программа визуализирует структуру данных программы на языке C++, отлаживаемой в Microsoft Visual Studio. Структура данных представляется в виде графа, в котором переменные и области динамической памяти выступают узлами, а указатели и ссылки – дугами. Визуализатор использовался в учебном процессе кафедры ПОАС по дисциплине «Программирование» (направление «Программная инженерия», 2-й курс, 3-й учебный семестр).

Ключевые слова: программирование, отладка, визуализация, граф, состояние программы.

N. O. Olifer, O. A. Sychev

VISUALIZATION OF DEBUGGED PROGRAM INTERNAL DATA AND ITS APPLICATION TO TEACHING DYNAMIC DATA STRUCTURES IN C++ LANGUAGE

Volgograd State Technical University

The paper describes software for program internal data visualization and its application in teaching dynamic data structures. Developed program visualizes data structure of the program on C++ language using Microsoft Visual Studio Debugger. Data structure is visualized as a graph. In this graph variables and dynamically allocated memory areas are nodes, pointers and references are edges. The program was used by Software Engineering department of the Volgograd State Technical University in the «Programming» course (specialty «Software Engineering», second grade, third semester).

Keywords: programming, debugging, visualization, graph, program state.

При отладке программ нередко оказывает помощь отображение хода программы в более наглядной, визуальной форме.

Различные виды программных визуализаций используются на стадиях обучения программированию [1] и алгоритмизации [2]. Экс-

перименты [3] показывают, что инструменты визуализации увеличивают мотивацию студентов в процессе обучения, уменьшают количество бросающих обучение программированию. Визуализация может помочь студентам лучше понять написанную ими программу и облегчает поиск ошибок.

Существуют различные подходы к визуализации программ:

– программное управление визуальными исполнителями, выполняющими на экране заданные команды: системы КуМир (комплект учебных миров; наиболее известным исполнителем является робот, перемещающийся по лабиринту) [4]; Scratch, позволяющий управлять двумерными спрайтами [5]; Alice 3D, позволяющая управлять трехмерными графическими объектами [6] и многие другие;

– визуализация состояния (данных) программы – ddd [7], Jeliot [8] и другие – на каждом шаге выполнения программы наглядно показываются значения переменных программы и связи между ними (ссылки, указатели);

– игры, используемые в обучении программированию, также обычно предусматривают различные методы визуализации [9].

Одной из наиболее проблемных тем в курсах начального обучения программированию для студентов является изучение работы с динамическими структурами данных (связными списками, деревьями и т. д.) с использованием указателей (ссылок). При отладке программ, работающих с подобными структурами неудобно проверять корректность данных в памяти при помощи стандартного отладчика, так как для структур, связанных указателями, нужно каждый раз их разворачивать и искать нужную информацию в раскрывшемся многоуровневом дереве. На рис. 1 представлен просмотр односвязного списка из трех элементов в стандартном окне Microsoft Visual Studio (MSVS). В этом случае визуализация состояния программы может оказать значительную помощь в ее понимании и отладке.

Locals

Name	Value	Type
argc	1	int
argv	0x006d1378	wchar_t * *
list	{start=0x006d6d30 end=0x006d6dc0 size=3 }	LinkedList
start	0x006d6d30 {value=1 next=0x006d6d78 }	Node *
value	1	int
next	0x006d6d78 {value=2 next=0x006d6dc0 }	Node *
value	2	int
next	0x006d6dc0 {value=3 next=0x00000000 }	Node *
value	3	int
next	0x00000000 {value=??? next=??? }	Node *
value	CXX0030: Error: expression cannot be evaluated	
next	CXX0030: Error: expression cannot be evaluated	
end	0x006d6dc0 {value=3 next=0x00000000 }	Node *
value	3	int
next	0x00000000 {value=??? next=??? }	Node *
size	3	int

Рис. 1. Просмотр связного списка в окне MS Visual Studio

Наиболее наглядный способ – изображать структуру данных программы в виде графа, где дуги проведены от указателей к данным. Такой граф должен быть оптимально уложен, чтобы адекватно показывать типовые структуры данных, такие как связные списки и деревья.

На очном отделении ВолгГТУ при обучении программированию используется профессиональная среда программирования MS Visual Studio. Использование нескольких средств разработки на младших курсах нежелательно, так как это отвлекает студентов от изучения собственно программы на особенности среды разработки. Поэтому используемый визуализатор должен быть интегрирован со средой Visual Studio. Этого можно добиться либо путем взаимодействия с отладчиком MSVS для получения данных программы в процессе выполнения, либо самостоятельной интерпретацией программы. Поскольку разработка полноценного интерпретатора языка C++ очень сложна, то был выбран первый способ, несмотря на трудности с поиском информации о программном интерфейсе отладчика.

Подобные визуализаторы существуют для многих языков программирования (например, Jeliot [8] и jGRASP для Java), однако реализация их для языка C++ осложняется наличием в нем агрегации данных по значению, что делает возможным создание сложных типов данных путем агрегации объектов и массивов. Поскольку динамические структуры данных на языке C++ нередко агрегируют другие объекты произвольного типа, отображение вложенных элементов также является важным требованием к визуализатору.

Для языка C/C++ существует ряд визуализаторов: ddd, AnyviewC, HDPV, ни один из которых не поддерживает отладчик Microsoft Visual Studio. Визуализатор для операционной системы GNU/Linux – Data Display Debugger (ddd) [7] – обладает широким набором функций, поддерживает многократную агрегацию объектов, но имеет несколько серьезных недостатков. Дуги не проводятся к полям структур – исходящие дуги от указателей в структуре проводятся от прямоугольника всей структуры, а входящие вообще проводятся не к самому полю, а к специально создаваемым вершинам вне структуры, содержащим значение по указателю, что затрудняет интерпретацию изображения студентами. Также пользователь сам должен размещать переменные на изображении, что увеличивает количество рутинной работы пользователя при отладке.

В визуализаторе AnyviewC [10] уделяется большое внимание отображению типовых структур данных (деревья, связные списки), однако он не поддерживает многократную вложенность объектов по значению. Этот визуализатор использует собственную среду разработки (IDE) и имеет закрытый код, что не позволяет его использовать в рассматриваемом случае.

Визуализатор HDPV [11] также не поддерживает многократную агрегацию объектов по значению, не имеет какого-либо алгоритма проведения дуг и всегда проводит их прямыми линиями, что, учитывая используемый физический алгоритм укладки, часто приводит к сложно читаемому изображению, в котором линии часто пересекают объекты. HDPV также имеет закрытый код, что не позволяет его модифицировать.

Авторы работы не смогли ознакомиться с устройством и протестировать визуализаторы AnyviewC и HDPV. Были отправлены письма на электронную почту разработчиков этих программ, однако ответа не последовало.

Поскольку ни один из существующих аналогов не может быть использован напрямую, возникла необходимость в разработке нового визуализатора данных для языка C++, удовлетворяющего указанным выше требованиям.

```
struct type2
{
    int c;
    int a;
    int* arrp[5];
    int field;
    type2* pointers[3];
    int* pp;
};
struct type3
{
    int a;
    int b;
    int* p;
    type2 st;
};
```

```
void test()
{
    type3 structure;
    int* p1;
    int* p3;
    int*** p11;
    int*** p21;
    int*** p31;

    p1 = &structure.a;
    p3 = &structure.st.c;

    int* arr1[5];
    arr1[1] = &structure.a;

    p11 = new int**;
    p21 = p11;
    p31 = p11;
    *p11 = &p1;
    int** d = &arr1[2];
}
```

Рис. 2. Соответствие состояния программы и графа

Для отображения графа, представляющего структуру данных программы, с локальными переменными и областями памяти, на которые они прямо или косвенно ссылаются, необходимо решить задачу укладки графа с минимизацией пересечений. Такой граф может содержать вершины, многократно вложенные в другие вершины, и называется кластерным: т. е.

состоит из графа и рекурсивного разбиения его вершин на подмножества, называемые кластерами [12]. Пример графа, соответствующего состоянию программы со сложными внутренними данными, приведен на рис. 3, исходный код соответствующей программы – на рис. 2.

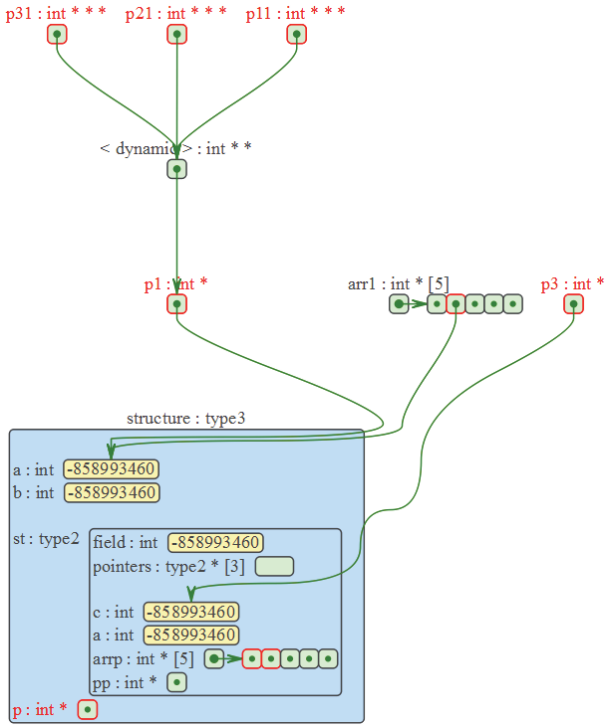


Рис. 3. Граф, построенный по состоянию программы

Получение информации о переменных и их значениях происходит через интерфейс отладчика (в настоящее время MS Visual Studio). Для этого реализован специальный поставщик данных, подключающийся к программе, отлаживаемой в MS Visual Studio, считывающий из нее все данные о состоянии, из которых можно сформировать граф. Информация об адресах и размерах динамически выделенных блоков памяти доступна через вызов специальной функции, производящей дамп памяти. Происходит связывание указателей и их значений: это делается по совокупности типа и адреса объектов. При этом такая особенность C/C++, как указатель типа void*, обрабатывается следующим образом: ищется наименее глубоко вложенный объект с адресом, совпадающим со значением указателя, и к нему проводится дуга от указателя. Другая особенность языка – шаблонные типы – не вызывает сложностей, так как все типы обрабатываются как простые строки.

Далее из данных формируется граф, и к нему применяется алгоритм поуровневой укладки. Укладка по уровням заключается в том, что каждой вершине присваивается число, указывающее уровень, на котором она располагается, так, чтобы все дуги следовали от меньшего номера к большему (рис. 4). При этом необходимо, чтобы дуги соединяли только вершины на соседних уровнях. В случае, когда дуга пересекает несколько уровней, на каждом создается специальная мнимая вершина, и исходная дуга разбивается на несколько, соединяющих эти мнимые вершины (такие вершины на рис. 4 показаны белыми квадратами). Далее вершины на уровнях сортируются для минимизации пересечений, после чего остается только соединить дугами вершины на соседних уровнях.

Алгоритм укладки модифицирован для кластерных графов с учетом различий отображения переменных разных типов. Графы выводятся в специальном окне, с возможностью сворачивания/разворачивания составных элементов (массивов, объектов), что позволяет компактно отображать сложную структуру данных.

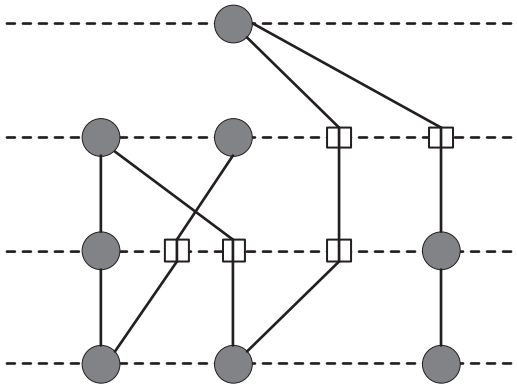


Рис. 4. Принцип поуровневой укладки графа

При укладке кластерного графа были решены следующие проблемы: сортировка вершин на уровнях укладки (с учетом того, что вершина может быть связана с вершинами на разных уровнях вложенности), а также проведение дуг в сложных вершинах, чтобы они не пересекали другие вложенные вершины и дуги.

Для сортировки вершин на уровне используется метод барицентров. Он подразумевает определение координат вершины на уровне как среднего арифметического координат инцидентных ей вершин с соседнего уровня. Однако эти вершины могут быть вложены в другие вершины и находиться в локальных координатах родителей – в данном случае применение исходного метода невозможно. Для этого вершины на всех уровнях (включая вложенные)

предварительно выстраиваются в одну линию в одной системе координат; затем к ним применяется метод барицентров, который выставляет всем вершинам координаты, в соответствии с которыми они сортируются на уровне. После этого вложенные вершины обратно укладываются в координаты родителей, но уже в новом, просчитанном, порядке.

При проведении дуг ко вложенным вершинам они не должны пересекать другие вершины. Для этого для любой вложенной вершины входящие дуги проводятся справа сверху, а исходящие – слева снизу. В этом случае неважно, насколько глубоко вложена вершина, достаточно только определить способ, как продлять дуги от вершин, находящихся внутри, например, структуры, и они будут корректно проводиться для структур на любом уровне вложенности (рис. 5).

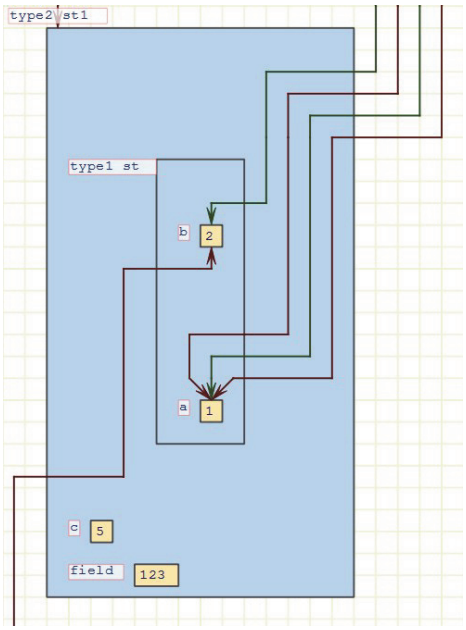
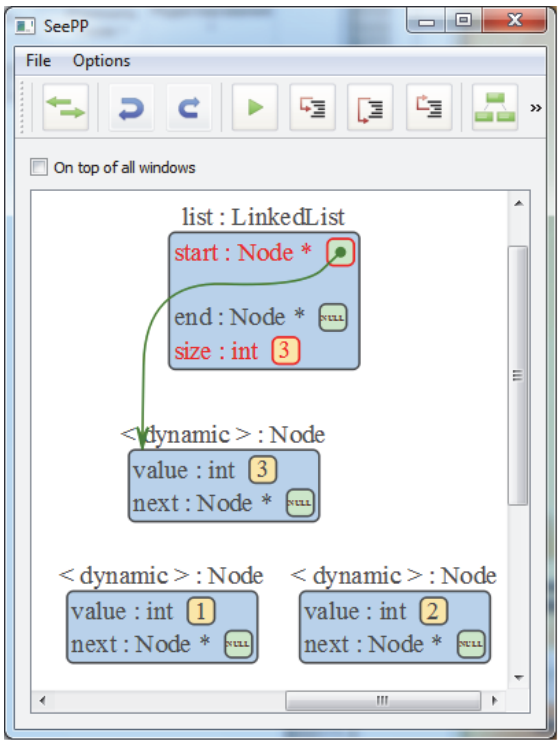


Рис. 5. Проведение дуг ко вложенным вершинам

```
class LinkedList {
private:
  Node* start;
  Node* end;
  int size;
public:
  LinkedList();
  ~LinkedList();
  void add(int value);
  void insert(int index, int value);
};
LinkedList::LinkedList() {
  start = NULL;
  end = NULL;
  size = 0;
}
void LinkedList::add(int value) {
  if(end != NULL) {
    end->setNext(new Node(value));
    end = end->getNext();
  }
  else {
    start = new Node(value);
  }
  size++;
}
int _tmain(int argc, _TCHAR* argv[]) {
  LinkedList list;
  list.add(1);
  list.add(2);
  list.add(3);
  return 0;
}
```

а



б

Рис. 6. Реализация односвязного списка:
а – реализация; *б* – изображение полученной структуры

Архитектура программы допускает различные возможности расширения. Существует абстрактный класс метода укладки графа и его наследник – для метода поуровневой укладки; возможно добавление новых методов укладки. Абстрактный класс поставщика данных позволяет добавлять разные способы получения информации о данных программы.

В настоящий момент реализован действующий прототип визуализатора, позволяющий пошагово выполнять программу, просматривать ее локальные переменные (поддерживаются простые типы, структуры с любой вложенностью, одномерные и двумерные массивы, а также динамически выделенные области памяти).

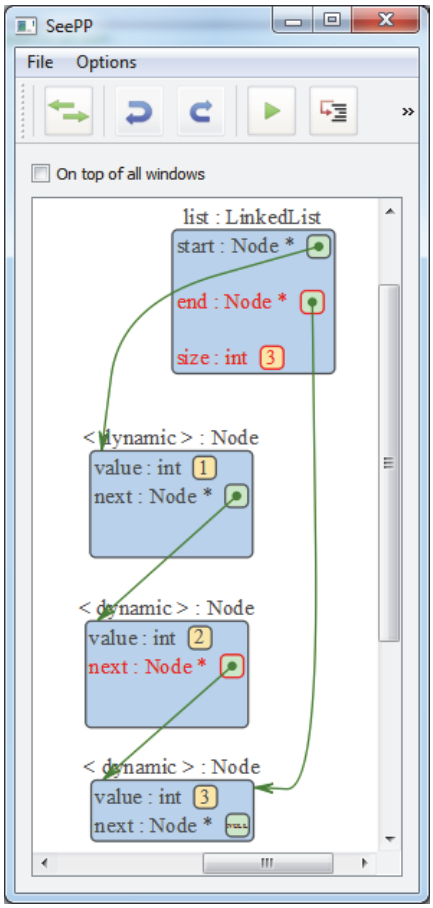
Разработанный визуализатор был внедрен в учебный процесс факультета электроники и вычислительной техники ВолгГТУ по дисциплине «Программирование» (специальность «Программная инженерия») на лабораторных работах по теме «Динамические структуры данных».

Рассмотрим пример использования визуализатора. Пусть написан простой односвязный список с функцией добавления нового элемента в конец (рис. 6, *а*). При этом реализация может содержать ошибки.

После добавления трех элементов визуализатор покажет структуру, изображенную на рис. 6, *б*.

Очевидно, что после трех добавлений элементов список сформировался неправильно, на первые два элемента вообще не осталось указателей – они стали утечкой памяти. Исправим ошибку в функции (рис. 7, *а*).

```
void LinkedList::add(int value) {
  if(end != NULL) {
    end->setNext(new Node(value));
    end = end->getNext();
  }
  else {
    start = new Node(value);
    end = start; // Добавленная строчка
  }
  size++;
}
```



а *б*

Рис. 7. Исправленный метод добавления элемента связный список:
а – исправленный фрагмент кода; *б* – изображение полученной структуры

Изображение новой структуры данных, показанной визуализатором, приведено на рис. 7, *б*.

По изображению видно, что все элементы добавились и связный список корректен.

Было проведено анкетирование студентов, использовавших программу; все опрошенные студенты отметили, что визуализатор был полезен при выполнении лабораторной работы.

87 % анкетируемых дали программе максимальную оценку (3 по шкале от –3 до 3); отрицательных оценок выставлено не было; средняя оценка: 2,875. Некоторые студенты высказывали мнение, что не смогли бы справиться с изучением динамических структур данных без помощи визуализатора. Были получены полезные пожелания и советы: более компактное отображение структур данных, интеграция с отладчиком gdb, улучшение пользовательского интерфейса.

При эксплуатации программы была выявлена необходимость модификации алгоритма укладки графа для более привычного отображения типовых структур данных, таких как деревья или связные списки. Также была поставлена на первый план необходимость более плавного отображения изменений графа в процессе выполнения программы.

У проекта много направлений улучшения и развития. Необходимо расширить поддержку сложных типов данных (таких как многомерные массивы – более двух измерений и статические поля классов). Также возможно взаимодействие с другими отладчиками. Планируется разработка различных плагинов для визуализации данных предметной области разрабатываемой программы для различных учебных задач. Помимо учебного внедрения, возможно дальнейшее применение визуализатора и в прикладном программировании. Для этого необходимо будет реализовать взаимодействие с другими средами программирования, обладающими ограниченными возможностями в представлении данных, и, возможно, другими языками.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Moreno, A*., Myller N., Sutinen E., Ben-Ari M., Visualizing programs with Jeliot 3 // Proceedings of the 8th International Working Conference on Advanced Visual Interfaces, 2004. – Pp. 373–376.

2. *Korhonen, A*., Malmi L., Saikkonen R., Matrix - concept animation and algorithm simulation system // ITiCSE ’01: Proceedings of the 6th Annual Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education(2001). – P. 180.

3. *Kehoe, C. M*., Stasko J. T. and Talor A., Rethinking the evaluation of algorithm animations as learning aids: an observational study // International Journal of Human Computer Studies 54(2001). – Pp. 265–284.

4. Новые возможности системы КуМир / А. Г. Кушниренко, А. Г. Леонов, М. А. Ройтберг, Т. Р. Джелядин, А. А. Ефремов, А. В. Карпов, Д. В. Хачко, В. В. Яковлев // Шестая конференция «Свободное программное обеспечение в высшей школе». – Переславль, 29–30 января 2011 г.

5. *Maloney J.,* Resnick M., Rusk N., Silverman B., Eastmond E. The Scratch Programming Language and Environment. // ACM Transactions on Computing Education (TOCE). – 2010. – Volume 10. – Article No. 16.

6. *Conway M.,* Audia S., Burnette T., Cosgrove D., Christiansen K. Alice: Lessons Learned from Building a 3D System for Novices // CHI '00 Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems. – 2000. – Pp. 486–493.

7. *Zeller A.,* Lutkehaus D. DDD - A Free Graphical Front-End for UNIX Debuggers. // ACM SIGPLAN Notices. – 1996. – Volume 31 – Pp. 22–27.

8. *Moreno A*., Joy M. S. Jeliot 3 in a Demanding Educational Setting // Electronic Notes in Theoretical Computer Science 178 (2007). – Pp. 51–59.

9. *Шабалина, О. А*. Обучение разработчиков программного обеспечения: применение компьютерных игр и процесса их разработки / О. А. Шабалина, А. В. Катаев, П. Н. Воробкалов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 11(71) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 9). – С. 117–124.

10. *Weimin Wu*, Yongfeng Cao, Baocai Chen, Qing Su, Kailun Li AnyviewC: A Visual Practice Platform for Data Structures Course // Computer Science and Information Engineering, 2009 WRI World Congress on. – 2009. – Volume 7. – Pp. 493–497.

11. Jaishankar Sundararaman, Godmar Back HDPV: interactive, faithful, in-vivo runtime state visualization for C/C++ and Java // SoftVis '08 Proceedings of the 4th ACM symposium on Software visualization. – 2008. – Pp. 47–56.

12. *Касьянов, В. Н*. Применение графов в программировании / В. Н. Касьянов // Поддержка супервычислений и интернет-ориентированные технологии. Серия «Конструирование и оптимизация программ». – 2001. – С. 139–168.

УДК 519.876.2:004.942:352.075.2:504.03

Д. С. Парыгин

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СТРАТЕГИЙ УПРАВЛЕНИЯ ГОРОДСКИМ РАЙОНОМ НА ОСНОВЕ СЦЕНАРНЫХ МОДЕЛЕЙ

Волгоградский государственный технический университет

dparygin@gmail.com

В статье рассмотрены вопросы прогнозирования развития внутригородской территории с применением технологии когнитивного анализа и сценарного моделирования. Предложен подход к выбору воздействий для поддержки принятия управленческих решений в развитии города.

Ключевые слова: сценарное прогнозирование, управление муниципальными образованиями, социально-экономическое развитие городов, когнитивное моделирование, поддержка принятия решений.

D. S. Parygin

ASSESSMENT THE EFFECTIVENESS MANAGEMENT STRATEGIES OF URBAN AREA BASED ON SCENARIO MODELS

Volgograd State Technical University

In article questions forecasting the development intra-urban territories with using the technology of cognitive analysis and scenario modeling. Propose an approach to the selection of impacts to support management-making in urban development.

Keywords: scenario forecasting, management municipalities, socio-economic urban development, cognitive modeling, decision support.

Введение

Городской район Волгограда является внутригородской территорией без статуса муниципального образования. В административно-управленческом плане район Волгограда – это территориальное структурное подразделение администрации Волгограда, осуществляющее свою деятельность как исполнительный орган местного самоуправления в пределах полномочий, предусмотренных Положением об администрациях районов Волгограда [1].

Основной целью деятельности администрации района Волгограда является повышение уровня благосостояния его жителей, осуществляемое посредством эффективного решения вопросов местного значения – непосредственного обеспечения жизнедеятельности населения района [1]. Практика формирования управленческих стратегий на данном этапе связана с использованием программно-целевого планирования (ПЦП).

В основе методов ПЦП лежит положение о необходимости четкого формулирования конечных целей, рассмотрения возможных вариантов взаимосвязанных и взаимозависимых действий для достижения этих целей. Для выбора конкретных действий и обоснования элементов плана необходим анализ прошлых этапов развития и возможно более точное прогнозирование будущих состояний. В связи с этим особую актуальность приобретает вопрос адекватного выбора конечных целей развития. Для определения достижимости целей, оценки требуемых ресурсов и способов их распределения, выбора наиболее эффективных комбинаций управляющих воздействий может быть использовано моделирование.

Особый исследовательский интерес в работе над моделью городского района (ГР) представляет двоякая ментальная сущность данного объекта. ГР характеризуется замкнутостью, как в восприятии населением, так и в фактическом территориально-управленческом обособлении. С другой стороны, происходящие в ГР процессы неразрывно связаны с развитием города в целом, и большая часть объектов районной среды находится под юрисдикцией властей различных уровней, от городских до федеральных.

1. Сценарное прогнозирование и когнитивный анализ

Усиление неопределенности политических, социальных и экономических событий является причиной роста популярности сценарного подхода для прогнозирования [2]. Учитывая неоднозначный характер и нелинейность траектории развития городских систем, в данном случае также оправданным является использование в процессе управления метода построения сценарных прогнозов [3].

Процесс построения сценария тесно связан с процессом прогнозирования и дает возможность оценить наиболее вероятный ход событий. Он предназначен для выделения ключевых

моментов в развитии исследуемого объекта и разработки на этой основе качественно различных вариантов его динамики, а также для всестороннего анализа и оценки каждого из полученных вариантов, изучения возможных последствий их реализации. Данные принципы являются базовыми при переходе от традиционной экстраполяционно-прогнозной логики анализа к сценарной.

Построение сценариев не ставит своей целью определение всех возможных альтернатив развития – в таком случае число вариантов становится необозримым. Выделяется несколько качественно разнородных траекторий, которые в концентрированном виде отражают весь спектр возможных направлений развития территории [2].

Процесс формирования сценариев предполагает использование результатов прогнозов, осуществляемых с помощью других методов. При разработке вариантов естественно ориентироваться на экспертные оценки. Однако для повышения качества прогнозов целесообразно их сочетание с формализованными методами. Одним из ведущих направлений исследования социально-экономических процессов в настоящее время является *имитационное моделирование*, которое дает возможность определять перспективное состояние и тенденции развития, оценивать последствия принимаемых решений.

В рассматриваемом случае для анализа, планирования и прогнозирования развития городского района применено *когнитивное моделирование* – один из классов имитационного моделирования. Анализ слабоформализованной системы выполняется на основе когнитивной структуризации происходящих процессов.

Знания о мире являются результатом работы мышления человека по переработке информации, поступающей извне. Знания упорядочиваются сознанием в когнитивные или познавательные структуры, которые могут быть помещены в память. Когнитивные структуры – это типовые схемы или модели представления знаний в уме человека, позволяющие достраивать прежде неизвестные области. Таким образом, когнитивный анализ представляет собой последовательную причинно-следственную структуризацию информации о процессах в исследуемой системе [3].

2. Структуризация информации об объекте исследования

Для определения факторов, оказывающих влияние на развитие слабоструктурированной системы, используются PEST- и SWOT-анализ (см. таблицу) – инструменты выявления совокупности факторов внешней и внутренней среды функционирования объекта соответственно [4]. Динамика внешних факторов при этом не зависит от состояния слабоструктурированной системы.

Структуризация информации о городском районе [1, 5, 6, 7], результаты моделирования

Фактор	Начальная тенденция		Фактор «Зарегистрированная преступность»
Результаты SWOT-анализа			
Сильные стороны городского района			
Развитие культуры и организация досуга	0,32	Умеренно растет	– 0,093
Развитие физкультуры и спорта	0,01	Слабо растет	– 0,082
Проведение мероприятий с участием ТОС	0,39	Умеренно растет	– 0,087
Количество действующих комитетов ТОС	0,07	Слабо растет	– 0,244
Количество действующих ТСЖ	0,08	Слабо растет	– 0,162
Количество субъектов хоз деятельности	– 0,05	Слабо падает	–
Деятельность администрации*	0,13	Слабо растет	–
Площадь территории озеленения	0,00	Не изменяется	–
Благоустроенность территории	0,00	Не изменяется	– 0,173
*Под деятельностью администрации понимается интегральный индикатор, отражающий деятельность районной администрации и ее эффективность в сфере культуры, спорта, развития социума, работ с ТОС и ТСЖ, благоустройства			
Слабые стороны городского района			
Расходные обязательства администрации	– 0,06	Слабо падает	–
Развитость автодорожной инфраструктуры	– 0,10	Слабо падает	–
Численность населения	– 0,01	Слабо падает	–

Окончание таблицы

Фактор	Начальная тенденция		Фактор «Зарегистрированная преступность»
Результаты SWOT-анализа			
Недостаточность дошкольных учреждений	– 0,10	Слабо падает	–
Социальное развитие**	0,09	Слабо растет	–
**Социальное развитие района является интегральным индикатором показателей, характеризующих социальную сферу, в числе которых демография, образование, здравоохранение, преступность			
Возможности развития городского района			
Реализация целевой программы развития	– 0,02	Слабо падает	–
Доходы от деятельности МУ	0,33	Умеренно растет	–
Дополнительное финансирование	0,20	Слабо растет	– 0,096
Оптимизация торгово-сервисной сети	0,73	Сильно растет	–
Развитие инфраструктуры туризма и рекреации	0,00	Не изменяется	– 0,083
Промышленное производство	0,00	Не изменяется	– 0,075
Капремонт муниципального жилого фонда	– 0,85	Сильно падает	– 0,096
Заявки на вывоз отходов	– 0,32	Умеренно падает	–
Ликвидация свалок	– 0,56	Существенно падает	–
Деятельность дружинников (ДНД)	0,13	Слабо растет	– 0,175
Угрозы развития городского района			
Экологическая опасность	– 0,10	Слабо падает	– 0,086
Транзитный автотранспортный поток	0,10	Слабо растет	– 0,130
Социальная напряженность***	– 0,10	Слабо падает	– 0,126
Зарегистрированные преступления	– 0,08	Слабо падает	–
***Социальная напряженность отражает состояние общества и в целом его реакцию на проблемы и угрозы нормальной жизнедеятельности в районе			
Результаты PEST-анализа			
Факторы, характеризующие политическую сферу			
Деятельность администрации города	0,10	Слабо растет	–
Деятельность администрации региона	– 0,10	Слабо падает	–
Деятельность депутатского корпуса района	0,00	Не изменяется	–
Законодательство РФ и региона	0,00	Не изменяется	–
Нормативные правовые акты города	0,00	Не изменяется	–
Факторы, характеризующие экономическую сферу			
Объем доходной части бюджета города	– 0,02	Слабо падает	–
Объем инвестиций в основной капитал****	– 0,14	Слабо падает	–
Общая площадь введенного жилья****	0,55	Существенно растет	–
****Объем инвестиций в основной капитал и общая площадь введенного жилья рассматриваются в рамках района в отношении к показателям прошлого периода			
Факторы, характеризующие социальную сферу			
Уровень жизни*****	0,00	Не изменяется	–
*****Здесь рассматривается как общий контекст развития ситуации в городе			
Факторы, характеризующие технологическую сферу			
Развитие ИТ и МФЦ	0,10	Слабо растет	–
Эколого-ориентированные и энергосберегающие технологии (ЭО и ЭСТ)	0,10	Слабо растет	–

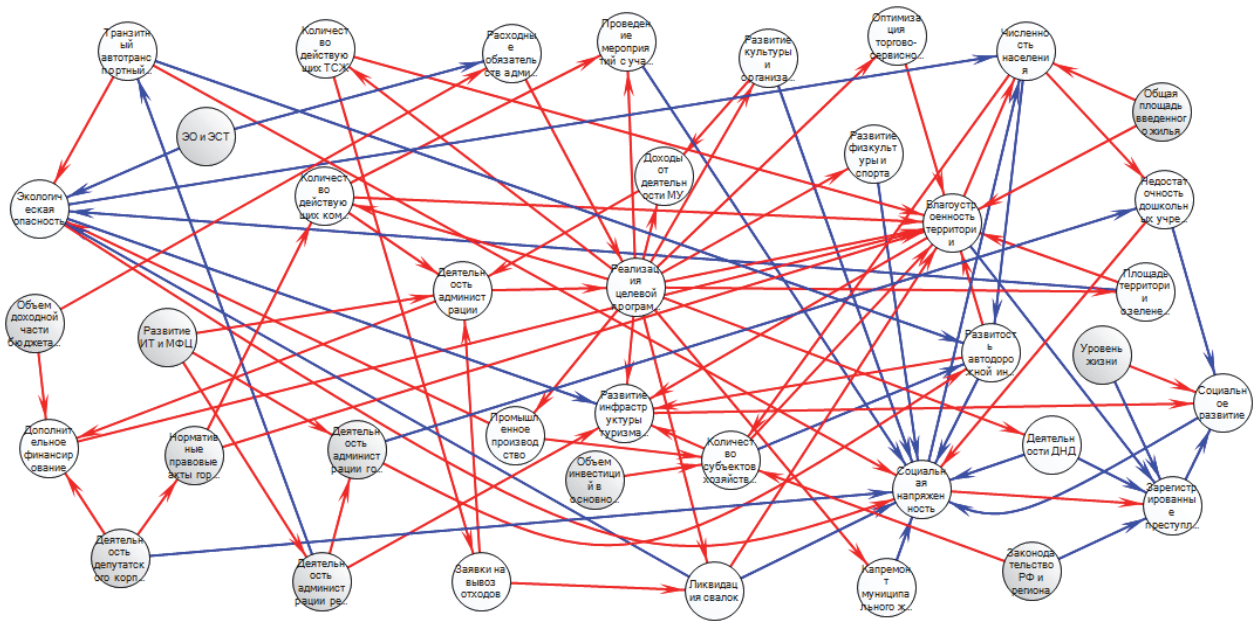


Рис. 1. Когнитивная карта объекта «Городской район»

Выявленные взаимосвязи факторов можно представить в виде когнитивной карты (рис. 1), которая является моделью исследуемой системы в виде взвешенного ориентированного графа [3].

Для моделирования динамики развития системы необходимо перейти от модели в виде графа к временным уравнениям, отразив в этих уравнениях заданные структурные свойства [8].

3. Выбор управления и моделирование сценариев развития

Проверка адекватности построенной модели проводилась на основе ретроспективных данных в условиях новой российской государственности по выбранным показателям 1993–1994 годов. Результаты моделирования саморазвития ситуации отразили картину развития района и те значения факторов, которые они приобрели к середине 2000-х годов [6]. Такой анализ является одной из необходимых составляющих использования результатов исследований для целей поддержки принятия управленческих решений. Далее изменяемыми параметрами в процессе моделирования будут только начальные тенденции факторов и управляющие воздействия, при сохранении установленных взаимовлияний и набора факторов.

Для прогнозирования развития района на перспективный период были использованы данные, относящиеся к 2010–2011 годам и характеризующие ситуацию на всех уровнях управления территорией. В целом ситуацию можно определить, как стабильную по большинству параметров. Эта стабильность наблюдается даже в негативных факторах, характеризующих неразрешенные проблемы в районе и городе (см. таблицу).

При всей монотонности сегодняшнего развития, в будущем у города открывается широкая перспектива, предоставляемая предстоящими матчами Чемпионата мира по футболу 2018 года (ЧМ2018). Но для такой сложной и связанной системы, как город, чтобы получить прогресс в какой-то конкретной сфере (например, туризм и сервис), зачастую не имеет смысла прямо влиять на нее, а стоит обратиться к первопричинам.

Ресурсный потенциал, которым располагает районная администрация, регламентируется определенными на уровне города расходными обязательствами. При этом следует учитывать возможность изыскания дополнительного финансирования и существенную ограниченность полномочий [1]. Цель управления напрямую связана с повышением качества жизни населения, и потому при выборе сценариев развития важно определить все возможные факторы, влияющие на этот показатель.

Одним из элементов нормального развития общества является низкий уровень преступности. Необходимо найти управляющие воздействия, оказывающие наибольшее влияние на сокращение числа преступлений, исходя из инструментов, имеющихся в распоряжении районных властей.

Для этого на модели начальных условий (см. таблицу) поочередно, будем задавать [9] величину каждого из управляющих факторов на уровне существенно усиливающего (0,5), при прочих равных условиях, и фиксировать реакцию системы на такое управление (см. таблицу). Символ «–» означает, что исследование не проводилось.

В рассматриваемых условиях развития городского района, наибольшее влияние на уровень регистрируемой преступности оказывают следующие факторы (см. таблицу): «Количество действующих комитетов ТОС», «Благоустроенность территории» и «Деятельность ДНД». Для проверки промежуточных выводов, развитие района моделируется [9] при задании управления («управление 2») по трем выявленным факторам на уровне умеренно усиливающего (0,3), при сохранении остальных управлений на прежнем уровне (рис. 2, 3).

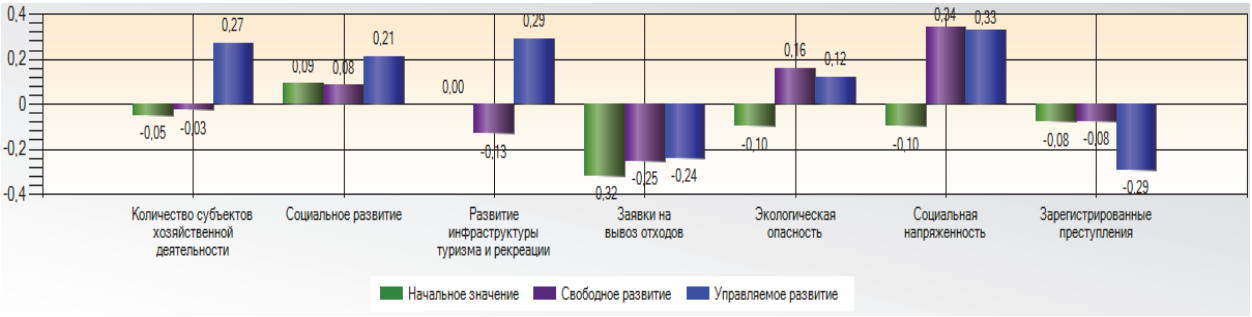


Рис. 2. Значения тенденций факторов в начале и конце моделирования по сценарию «Оптимизация управления на уровне района» с управлением 2

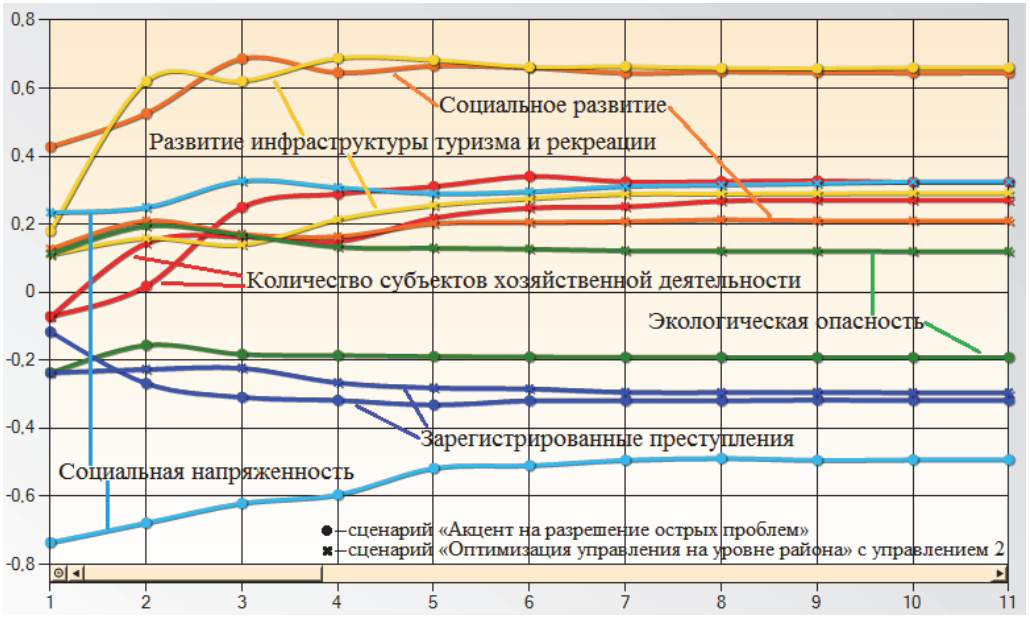


Рис. 3. Динамика факторов модели при управляемом развитии ситуации

Выводы

Без активных управленческих воздействий на всех уровнях власти тенденции значимых факторов остаются примерно на том же уровне (рис. 2). В таких условиях трудно ожидать серьезного прогресса в сфере развития местной туристической отрасли. Позитивные тенденции развития туристской инфраструктуры, которая потребуется к ЧМ2018, можно получить за счет опосредованного воздействия (рис. 2, 3).

Сравнение двух сценариев развития (рис. 3) показывает, что эффект от решения «популярных» и легко формулируемых в обществе проблем вполне сравним с результатами целенаправленных управленческих воздействий при решении комплекса повседневных вопросов обеспечения жизнедеятельности города на местах. Примененное управление за счет ресурсов и в рамках полномочий администрации района позволяет достигнуть заметного сокращения уров-

ня преступности, одновременно повышая показатели общественного развития и экономическую активность населения. Тем не менее, низкие результаты фактора социальной напряженности свидетельствуют о необходимости реализации ключевых на данном этапе потребностей населения (дороги, жилищные условия, детские сады). При этом важно отметить, что совместная работа всех уровней власти, общественного самоуправления, граждан и хозяйствующих субъектов способна дать больший эффект в кратчайшие сроки с меньшими затратами ресурсов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Об утверждении Положений об администрациях районов Волгограда : решение Волгоградской городской Думы от 24.12.2010 № 40/1252 [Электронный ресурс] / Волгоградская городская Дума. – 2010. – Режим доступа : http://www.volgsovet.ru/Act/Decisions/Default.aspx

2. *Андреева, Е. В.* Прогнозирование социально-экономического развития в системе управления регионом / Е. В. Андреева // Труды Псковского политехнического института / ПсковГУ. – Псков : Изд-во ППИ, 2006. – № 10.2. – С. 173–175.

3. *Садовникова, Н. П.* Выбор стратегий территориального развития на основе когнитивного анализа и сценарного моделирования [Электронный ресурс] / Н. П. Садовникова, Н. П. Жидкова // Интернет-вестник ВолгГАСУ : Серия «Строительная информатика». – 2012. – № 7(21). – Режим доступа : http://vestnik.vgasu.ru/?source=4&articleno=915

4. *Камаев, В. А.* Анализ социально-экономического развития муниципальных образований на примере волгоградской области с использованием моделей Data Mining / В. А. Камаев, М. В. Щербаков, А. С. Аль-Катабери // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 6(66) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 8). – С. 103–106.

5. Аналитическая записка «Мониторинг социально-экономического развития районов Волгограда и комплексная оценка эффективности деятельности территориальных структурных подразделений администрации Волгограда по итогам 2011 года» [Электронный ресурс] / Официальный ИСП Волгограда. – 2012. – Режим доступа : http://www.volgadmin.ru/ru/MPCity/StrategyPlanning/MarksAll.aspx

6. Город Волгоград в цифрах 2011 : стат. обзор. / Волгоградстат. – Волгоград, 2012. – 205 с.

7. Итоги социально-экономического развития Волгограда за I полугодие 2012 года [Электронный ресурс] / ОИСП Волгограда. – 2012. – Режим доступа : http://volgadmin.ru/ru/MPCity/Economics2012-06.aspx

8. *Максимов, В. А.* Когнитивные технологии – от незнания к пониманию / В. А. Максимов // Когнитивный анализ и управление развитием ситуации : материалы 1-й Международной конференции. – М.: ИПУ РАН, 2001. – Т. 1. – С. 4–41.

9. *Заболотский, М. А.* Аналитическая программная система «Стратег» – инструмент целеполагания и анализа сложных систем и ситуаций / М. А. Заболотский, А. В. Тихонин, И. А. Полякова // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 2(40) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 4). – С. 65–68.

УДК 519.272 : 378.1

Н. Н. Пугина, Ю. М. Брумштейн

МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ МЕЖВУЗОВСКОЙ КОНКУРЕНЦИИ ЗА АБИТУРИЕНТОВ В АСТРАХАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Астраханский государственный университет
brum2003@mail.ru, astra1851@mail.ru

В статье рассмотрены причины и направления конкуренции за абитуриентов между вузами, способы повышения их привлекательности, особенности конкурентных процессов в Астраханской области. Показано, что Астраханские вузы конкурируют не только друг с другом, но и с вузами Москвы, Волгограда и пр. Для Астраханской области проанализирована структура учреждений высшего профессионального образования, предлагаемых ими специальностей вузовского обучения, их соответствие потребностям социально-экономического развития региона. Описаны использованные способы получения данных по вузам. Представлены некоторые методы и результаты оценок по ним для уровней конкуренции внутри региона между образовательными учреждениями.

Ключевые слова: вузы, специальности обучения, абитуриенты, конкуренция, причины, направления, методы оценки, данные для расчетов, результаты расчетов, Астраханская область, Волгоград.

N. N. Pugina, Ju. M. Brumshteyn

METHODS AND RESULTS OF INTERUNIVERSITY COMPETITION ASSESSMENTS FOR ENTRANTS IN ASTRAKHAN REGION

Astrakhan State University

In article are considered the reasons and directions of competition between universities for entrants, ways for increasing their appeal, features of competitive processes in Astrakhan region. It is shown, that Astrakhan universities compete not only with each other, but also with universities of Moscow, Volgograd and so forth. For Astrakhan region is analyzed the structure of higher education establishments, specialties of universities training, offered by them; their compliance to requirements of regional social and economic development. The ways, used for data acquisition about universities are described. Some methods and estimation results are presented for competition levels in region between educational establishments.

Keywords: universities, training specialties, entrants, competition, reasons, directions, assessment methods, data for calculations, calculation results, Astrakhan region, Volgograd.

В сфере высшего профессионального образования (ВПО) большинства регионов России конкуренция между учреждениями ВПО (УВПО) за контингенты обучающихся продолжает расти. Это делает актуальными задачи управления конкурентоспособностью УВПО, что требует объективных оценок уровней конкуренции. Однако эти вопросы в существующей литературе отражены неполно и недостаточно конкретно. Поэтому целью данной статьи был не только теоретический анализ направлений конкуренции УВПО, но и получение конкретных числовых оценок.

Конкуренция за абитуриентов в Астраханской области

Астраханская область (АО) имеет численность зарегистрированного населения ≈ 1 млн человек при количестве обучающихся в УВПО $\approx$ 41 600 человек [4]. Аналогично другим регионам УВПО сосредоточены в основном в областном центре (г. Астрахань) [1]. В условиях набора абитуриентов на основе ЕГЭ и доступности информации в Интернете межвузовская конкуренция за контингенты обучающихся носит не внутрирегиональный, а общероссийский характер. Отметим следующие факторы:

1) наиболее сильные выпускники школ Астрахани и АО имеют реальные возможности поступления на учебу в Москву и другие крупные университетские центры, которые предлагают лучшие условия бюджетного обучения и материального обеспечения чем Астраханские УВПО. Это касается более широкого выбора специальностей; высокого стипендиального обеспечения; комфорта проживания в общежитиях, условий для занятий спортом, доступа к получению грантов. Ведущие вузы России ведут в АО активную работу по привлечению на обучение в них наиболее сильных выпускников, в том числе путем проведения предметных олимпиад в Астрахани. При этом у руководства и преподавателей средних школ города и области есть «моральная» заинтересованность в поступлении выпускников в наиболее престижные вузы России;

2) для абитуриентов из северных районов АО (особенно Черноярского, Ахтубинского, ЗАТО «Знаменск») Волгоград может быть предпочтительным местом обучения в силу близости к местам их постоянного проживания;

3) в Астрахани кроме местных вузов работают филиалы и представительства иногородних вузов, которые «оттягивают» на себя определенное количество абитуриентов. Из-за более низкого уровня требований в таких УВПО нередко снижается и уровень требований в региональных бюджетных вузах [1];

4) недостаток абитуриентов астраханские вузы в ряде случаев вынуждены возмещать за счет выпускников с низкими баллами ЕГЭ, в том числе из сельских школ области;

5) в бюджетных вузах Астрахани обучаются студенты из зарубежных стран, в том числе прикаспийских – Казахстана, Азербайджана, Туркмении, Ирана (в Туркмении дипломы российских негосударственных вузов считаются «недействительными»). Есть также определенное количество студентов из Калмыкии и некоторых других областей России;

6) в силу относительно низких уровней доходов населения области, выезд из АО абитуриентов для обучения в Европу и США редок [1, 2].

В данной статье при оценках конкурентной ситуации в АО учитывались только УВПО, работающие внутри области, так как именно на них приходится основная часть выпускников школ в регионе. Анализ конкуренции за выпускников школ АО с высокими баллами ЕГЭ (по результатам их поступления в вузы) требует привлечения труднодоступных данных по итогам набора, в том числе во внерегиональных УВПО.

Основными средствами привлечения абитуриентов в астраханских вузах можно считать: формирование востребованных наборов специальностей, особенно уникальных для региона; обеспечение возможностей получения в период очного обучения дополнительного (второго) высшего образования; распределение бюджетных мест по специальностям, обеспечивающее набор полноценных учебных групп; улучшение среды обучения (учебные корпуса и аудитории, библиотеки и пр.) и отдыха (общежития, спортивные сооружения, студенческие клубы и пр.); сохранение стоимостей коммерческого обучения на конкурентоспособном уровне [1] и др. При этом руководству астраханских вузов приходится учитывать: ограниченные возможности финансирования реализуемых проектов; учебную специализацию преподавательского корпуса вузов, которая не может быть быстро изменена; материальную базу, включая расположение учебных корпусов и их площади; возможные действия (решения) других УВПО – особенно внутри региона. Поэтому принятие решений по управлению структурой специаль-

ностей в вузах/стоимостях оплаты носит «многокомпонентный» характер и должно опираться на всесторонний учет конкурентной ситуации, ее прогнозы на будущее. Методическое и информационное обеспечение таких решений сейчас оставляет желать лучшего. В более ранней работе [2] нами были рассмотрены теоретические подходы к таким оценкам. Поэтому в данной статье основной акцент был сделан на практическом применении описанных в [2] и некоторых иных методов.

Характеристика использованного фактического материала

Состав УВПО Астрахани определялся по таким источникам: сборники статистической отчетности; организации, представленные весной 2012 г. в Астрахани на выставке «Образование – инвестиции в успех»; информационно-рекламные материалы УВПО в печатных средствах массовой информации; материалы в Интернете; справочники образовательных организаций типа «Куда пойти учиться». Наиболее полную и актуальную информацию нам удалось найти в астраханском выпуске «Дубль-Гис». Затем состав специальностей УВПО уточнялся по сайтам (страничкам сайтов) организаций в Интернете. В ряде случаев пришлось использовать телефонный опрос УВПО. В данной статье мы не использовали сведения о стоимости коммерческого обучения, долях выделяемых на специальности бюджетных мест, проходных баллах по ЕГЭ в различных УВПО и пр. (эта информация во многом недоступна). Также из-за труднодоступности данных мы не смогли сравнить количества выпускников школ АО, поступивших в УВПО в пределах области и вне ее. Особый интерес представляли бы такие сведения по «высокобалльникам ЕГЭ», которые часто не возвращаются в регион после окончания обучения. Утечка их из АО отрицательно влияет на динамику ее интеллектуальных ресурсов, возможности инновационного развития, информационную безопасность [3].

Всего по Астрахани нами было выявлено 27 УВПО.

Таблица 1

Перечень УВПО в г. Астрахани на 01.02.2013 г.

Полное название	Количество специальностей
1. Астраханский государственный университет (АГУ)*	72
2. Астраханский государственный технический университет (АГТУ)*	60
3. Астраханский инженерно-строительный институт**	25
4. Астраханская государственная медицинская академия*	6
5. Астраханская государственная консерватория*	11
6. Астраханский филиал Российской академии народного хозяйства и государственной службы*	3
7. Волжская государственная академия водного транспорта*	7
8. Морская государственная академия имени адмирала Ф. Ф. Ушакова*	23
9. Астраханский филиал Московского государственного университета экономики, статистики и информатики (АФ МГУЭСИ)*	6
10. Астраханский филиал Российского государственного гуманитарного университета *	6
11. Астраханский филиал Саратовской государственной юридической академии*	5
12. Астраханский филиал Университета Российской академии образования	11
13. Астраханский филиал Института экономики и финансов	7
14. Астраханский филиал Международного института экономики и права	6
15. Астраханский филиал Международного юридического института	7
16. Астраханский филиал Современной гуманитарной академии	13
17. Южно-Российский гуманитарный институт	11
18. Астраханский филиал Института социальных и гуманитарных знаний	7
19. Астраханский филиал Московского государственного университета путей сообщения*	10
20. Астраханский филиал Московского института комплексной безопасности	5
21. Астраханский филиал Саратовского государственного аграрного университета им. Н. И. Вавилова*	4

Окончание табл. 1

Полное название	Количество специальностей
22. Астраханский филиал Московского социально-экономического института	5
23. Астраханский филиал Московского финансово-промышленного университета «СИНЕРГИЯ»	4
24. Астраханское представительство Национального института им. Екатерины Великой	6
25. Астраханское представительство Института моды, дизайна и технологий	3
26. Астраханское представительство Московского государственного индустриального университета	4
27. Астраханское представительство Самарского государственного технического университета	10

Примечание: * – государственное УВПО; ** – муниципальное; остальные – коммерческие.

Все региональные вузы имеют бюджетное финансирование: четыре УВПО – государственное и одно – муниципальное – 1 (однако в бюджетных вузах доля коммерческих студентов – порядка 50 %). В Астраханских филиалах бюджетных УВПО осуществляется в основном коммерческое обучение. Для сравнения – в Волгограде (его население ≈ 1,02 млн. чел. и ≈2,58 млн. в целом по области) работает 39 УВПО. Общее количество неповторяющихся специальностей во всех УВПО Астрахани составило 177 (они в основном совпадают со специальностями Волгоградских УВПО). Отметим: АГУ имеет филиалы в гг. Ахтубинск и ЗАТО Знаменск, а также представительства в других районах области; АГТУ имеет Дмитровский филиал ФГБОУ ВПО «АГТУ», расположенный в Астрахани. Представительства в районах АО есть у некоторых УВПО, включая АФ МГУЭСИ.

Мы разбили специальности на такие группы/направления: физико-техническое (12 специальностей); математическое и информационных технологий (14); экономическое, управленческое, юридическое (37); филологическое (6); педагогическое, социальное, психологическое (16); биологическое, геолого-географичес-кое, химическое и нефтегазовое (35); аграрное (8); градостроительное, архитектуры и дизайна (15); механико-технологическое и транспорт – водный, наземный, воздушный (17); медицинское (6); культуры и искусства (11). В целом можно считать, что набор специальностей в существующих УВПО адекватен потребностям социально-экономического развития региона – с учетом «профессиональной мобильности» выпускников. Однако количество предложений по экономическим, юридическим и некоторым иным специальностям следует считать избыточным. Уровень присутствия отдельных УВПО на региональном рынке ВПО (табл. 2) оценивался на основе количеств предлагавшихся в них специальностей обучения по формуле

$$\left\{Q_i = (100\%)\cdot c_i / N\right\}_{i=1\ldots I}, \qquad (1)$$

где ***I*** – количество УВПО в регионе; ***N*** – количество всех неповторяющихся специальностей, предлагаемых вузами региона.

Таблица 2

Оценки уровней присутствия УВПО на региональном рынке услуг ВПО по количеству специальностей, %

(*i*) № УВПО	Q_i	(*i*) № УВПО	Q_i	(*i*) № УВПО	Q_i	(*i*) № УВПО	Q_i	(*i*) № УВПО	Q_i
1	40,7	**7**	3,9	**13**	3,9	**19**	5,6	**25**	1,7
2	34	**8**	13,0	**14**	3,3	**20**	2,8	**26**	2,2
3	14,1	**9**	3,3	**15**	3,9	**21**	2,2	**27**	5,6
4	3,3	**10**	3,3	**16**	6,8	**22**	2,8		
5	6,2	**11**	2,8	**17**	6,2	**23**	2,2		
6	1,7	**12**	6,2	**18**	3,9	**24**	3,3		

Наиболее высокие «уровни присутствия» в регионе у двух вузов – АГУ и АГТУ. Сделать аналогичные оценки на основе количеств студентов в УВПО региона трудно, так как этих данных нет ни в печатных источниках, ни на сайтах большинства вузов. Доли в вузах уникальных для региона специальностей (табл. 3) определялись по формуле

$$\left\{\psi_i = U_i / K_i\right\}_{i=1\ldots I}, \qquad (2)$$

где U_i, K_i – количества специальностей в *i*-м вузе (уникальных и всех).

Таблица 3

Доли уникальных специальностей в отдельных УВПО, %

(*i*) № УВПО	ψ_i	(*i*) № УВПО	ψ_i	(*i*) № УВПО	ψ_i	(*i*) № УВПО	ψ_i	(*i*) № УВПО	ψ_i
1	68	**7**	0	**13**	0	**19**	30	**25**	0
2	25	**8**	8,7	**14**	0	**20**	0	**26**	0
3	48	**9**	0	**15**	14,3	**21**	25	**27**	70
4	100	**10**	0	**16**	14,3	**22**	0		
5	100	**11**	40	**17**	9,1	**23**	0		
6	0	**12**	0	**18**	14,3	**24**	0		

Таким образом, примерно в половине УВПО вообще нет уникальных специальностей, и лишь в четырех – их доли превышают 65 %. Отсутствие уникальных специальностей в ряде УВПО вызывает сомнения в целесообразности их деятельности с позиций интересов региона. Значительно более высокая ψ_i для АГУ по сравнению с АГТУ не может быть объяснена только большим количеством специальностей (72 по сравнению с 60).

Для оценки напряженностей межвузовской конкуренции были использованы индексы симметричной и несимметричной конкуренции [6], рассчитывавшиеся соответственно по формулам

$$\left\{\Omega_{i,j} = 100\% \cdot P_{i,j} \Big/ \left(\left(c_i + c_j\right)/2\right)\right\}_{i=1\ldots I} \qquad (3)$$

$$\left\{W_{i,j} = (100\%) \cdot P_{i,j} / c_i\right\}_{i=1\ldots I}, \qquad (4)$$

где c_i, c_j – общие количества специальностей, предлагавшихся ***i***-м и ***j***-м УВПО; $P_{i,j}$ – количество совпадающих специальностей для этой пары вузов ($0 \le \Omega_{i.j} \le 100$).

Таблица 4

Индексы симметричной конкуренции (ИСК) для УВПО региона (фрагмент матрицы 27 * 27) – нумерация столбцов и строк по табл. 1

	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**
2	37,8	–									
3	14,4	21,2	–								
4	0	0	0	–							
5	0	0	0	0	–						
6	8	6,3	7,1	0	0	–					
7	5,1	17,9	6,2	0	0	0	–				
8	25,3	36,1	16,7	0	0	23,1	0	–			
9	10,3	15,1	13,0	0	0	44,4	15,4	27,6	–		
10	9,8	15,1	6,4	0	0	44,4	15,4	27,6	33,3	–	
11	7,8	9,2	6,7	0	0	25	0	14,3	18,2	0	–
12	24,1	19,7	11,1	0	0	0	0	35,3	23,5	23,5	12,5

Среднее значение по нижнему треугольнику полной (27*27) матрицы ИСК равно «11,1».

Видно, что даже бюджетные вузы значительно конкурируют друг с другом, причем обеспечение их конкурентоспособности (в том числе за счет информационно-рекламной деятельности) осуществляется во многом за бюджетные средства. Такая конкуренция делает весьма проблематичной и создание региональных «порталов знаний» [5], хотя в инженерном и социально-экономическом отношениях эта идея вполне рациональна.

Далее нами была рассчитана матрица индексов несимметричной конкуренции (ИНК) размером 27*27 и на основе нее определены (табл. 5) средние значения по каждой строке (***S_i***), оценивающие ситуацию для каждого УВПО «в целом».

Таблица 5

Оценки для S_i по ИНК для отдельных УВПО

(*i*) № УВПО	S_i	(*i*) № УВПО	S_i	(*i*) № УВПО	S_i	(*i*) № УВПО	S_i	(*i*) № УВПО	S_i
1	56,8	**7**	11,4	**13**	24,6	**19**	9,6	**25**	7,2
2	59,7	**8**	53,4	**14**	32,2	**20**	15,7	**26**	10,9
3	21,1	**9**	28,1	**15**	23,6	**21**	7,9	**27**	3,1
4	0	**10**	20,7	**16**	35,3	**22**	16,3		
5	0	**11**	12,2	**17**	30,7	**23**	15,4		
6	14,5	**12**	30,4	**18**	24,7	**24**	25,5		

Эти результаты наглядно показывают, что АГУ и АГТУ испытывают значительную конкуренцию по специальностям обучения, в том числе за счет наличия аналогичных специальностей в филиалах других УВПО.

Индексы напряженности конкуренции (r_j) по отдельным специальностям определялись по формуле

$$\left\{r_j = V_j - 1\right\}_{j=1\ldots J}, \qquad (5)$$

где V_j – количество УВПО, осуществляющих набор по ***j***-й специальности; ***J*** – общее количество специальностей. Затем подсчитывались количества специальностей (КС) по всем УВПО региона, соответственно значениям r_j

Таблица 6

Соответствие «*r*» – «КС в регионе с таким *r*»

r	КС	***R***	КС	***r***	КС	***r***	КС	***r***	КС	***r***	КС	***R***	КС
0	116	**1**	33	**2**	13	**3**	5	**4**	2	**5**	1		
8	1	**9**	1	**11**	1	**12**	1	**13**	1	**14**	1	**17**	1

Наибольшие значения «***r***» имеют специальности: юриспруденция (13); бухгалтерский учет, анализ и аудит (14); менеджмент/ менеджмент организации (17). В то же время 116 специальностей (в том числе технические и физико-математические) предлагаются лишь в одном УВПО региона.

Интегральные оценки напряженностей конкуренции по всей совокупности специальностей для ***i***-го УВПО рассчитывались по формуле

$$\left\{\Theta_i = (100\%)\cdot\left(\sum_{j=1}^{m_i} R_{i,j}\right)\Big/ m_i\right\}_{i=1\ldots I}, \qquad (6)$$

где m_i – количество специальностей для ***i***-го УВПО; $R_{i,j}$.– значения «***r***» из $\left\{r_j\right\}_{j=1\ldots m_i}$, соответствующих набору специальностей ***i***-го УВПО.

Таблица 7

Значения Θ_i для УВПО в Астрахани

(*i*) № УВПО	Θ_i	(*i*) № УВПО	Θ_i	(*i*) № УВПО	Θ_i	(*i*) № УВПО	Θ_i	(*i*) № УВПО	Θ_i
1	1,9	**7**	4,1	**13**	7,6	**19**	1,9	**25**	7
2	2,3	**8**	4,9	**14**	11,5	**20**	8,2	**26**	9,8
3	2,1	**9**	9,3	**15**	8,6	**21**	6,2	**27**	1,1
4	0	**10**	7,7	**16**	6,2	**22**	9		
5	0	**11**	5,4	**17**	6,45	**23**	13		
6	21	**12**	6,45	**18**	9,14	**24**	11,17		

Эта таблица еще раз подтверждает, что наибольшую конкуренцию испытывают внутрирегиональные филиалы иногородних УВПО, которые предлагают набор из экономических и юридических специальностей.

Итак, сделаем в ы в о д ы . 1. Бюджетные вузы Астрахани испытывают конкуренцию за контингент обучающихся не только со стороны

внутрирегиональных филиалов иногородних УВПО, но и непосредственно с вузами Волгограда, Москвы и пр. 2. Представленные в статье методы достаточно хорошо обеспечены данными для расчетов. 3. Они позволяют адекватно оценивать «положение» УВПО на внутрирегиональном рынке услуг ВПО исходя из предлагаемых вузами наборов специальностей обучения. 4. Более «глубокий» анализ требует привлечения труднодоступных данных по отдельным специальностям, касающихся: проходных баллов по ЕГЭ; долей бюджетных мест; стоимости коммерческого обучения и пр. 5. Для систематизации данных по специальностям и автоматизации их анализа целесообразно создание специализированной информационной системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Брумштейн, Ю. М.* Анализ конкурентной среды регионального вуза / Ю.М. Брумштейн, Н. Н. Пугина // Проблемы экономики. – 2006. – № 4. – С. 197–198.

2. *Брумштейн, Ю. М*. Методы оценки межвузовской конкуренции за контингент обучающихся на региональном рынке услуг высшего профессионального образования / Ю. М. Брумштейн, Н. Н. Пугина, Н. Ф. Мангаладзе, Е. В. Смирнова // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 8(46) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – (Серия «Актуальные проблемы вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 5). – С. 86–89.

3. Анализ факторов информационной безопасности региона и влияния на нее вузов / Ю. М. Брумштейн, Т. Т. Салхенов, С. В. Чернов, А. А. Боркова // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 12(60) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 7). – С. 99–100.

4. Образование в Астраханской области : стат. сб. – Астрахань : Астраханьстат. – 2012 – 59 с.

5. *Санжапов, Б. Х.* Портал знаний: модель развития информационного образовательного пространства региона / Б. Х. Санжапов, Н. В. Буханцев, А. Н. Буханцев // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 12(60) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 7. – С. 112–115.

УДК 004.89

А. Ю. Ужва, А. М. Дворянкин, И. Г. Жукова

АЛГОРИТМ АДАПТИВНОГО ПОИСКА ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ КОЛЛЕКЦИЙ НА ОСНОВЕ РАССУЖДЕНИЙ ПО ПРЕЦЕДЕНТАМ И ОНТОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ

Волгоградский государственный технический университет

alexey@uzhva.ru, zhukova@vstu.ru

Рассматривается алгоритм адаптивного поиска образовательных коллекций на основе онтологической модели представления знаний с учетом персональных характеристик и предпочтений обучаемого. Описаны функции оценки близости для оценки прецедентов, а также компонент прецедентов.

Ключевые слова: онтологическая модель представления знаний, рассуждения по прецедентам, образовательные ресурсы, адаптивный поиск.

A. Y. Uzhva, A. M. Dvoryankin, I. G. Zhukova, M. B. Kultsova

CASE-BASED REASONING ALGORITHM FOR ADAPTIVE SEARCH OF EDUCATIONAL RESOURCES USING ONTOLOGY DOMAIN MODEL

Volgogorad State Technical University

The case-based adaptive search algorithm of educational resources on ontology-based domain model considered. The described algorithm supports adaptive search with respect to student personal characteristics and knowledge field. Similarity functions described for assessment similarity of cases and components of cases.

Keywords: adaptive search, ontology, case-based reasoning, educational resources.

Введение

Развитие электронных форм образовательных ресурсов, а также рост их количества, делает актуальной задачу поиска ресурсов в соответствии с целями обучения и характеристиками обучаемого. Показано, что электронное образование способно повысить эффективность обучения, снизив при этом стоимость образовательного процесса [3].

Среди известных методов решения данной задачи наиболее перспективными являются онтологические модели представления знаний, а также алгоритм рассуждений по прецедентам. Для интеграции данных моделей и алгоритмов разработана модель прецедента, позволяющая эффективно использовать знания онтологической модели в цикле рассуждений по прецедентам.

Рассуждения по прецедентам позволяют учесть опыт предыдущих решений, увеличить количество используемых при адаптации параметров, повысить скорость работы системы, а онтологическая модель – обеспечить соответствие создаваемой коллекции требованиям учебного процесса, задействовать не только числовые параметры, но и знания о предметной области, учебном курсе, образовательном ресурсе.

Для реализации данного подхода должен быть разработан алгоритм адаптивного поиска на основе рассуждений по прецедентам.

Постановка задачи разработки алгоритма адаптивного поиска

Основной задачей процесса рассуждений по прецедентам является выбор прецедента, наиболее близкого к заданному запросу. Входными данными для нее являются запрос q и множество прецедентов *Cases* разработанной онтологической модели предметной области; выходными данными – подмножество прецедентов $Cases(q) \subset Cases$, выбранных на основании некоторого критерия *PS*. Критерий *PS* представляет вещественную оценку R степени соответствия прецедентов *Cases* запросам Q:

$$PS: Q \times Cases \to R. \quad (1)$$

Большим значениям *Cases* соответствует большая степень соответствия прецедента запросу. Таким образом, в множество выбранных прецедентов включаются прецеденты с максимальными значениями *PS*:

$$\forall case, case \in Cases, rCase \in Cases\ (q) \to \forall\ rCase,$$
$$PS(q, rCase) > PS(q, case), case \notin Cases(q). \quad (2)$$

Основным параметром для формулировки задачи выбора прецедентов является мощность n множества $Cases(q)$. Качественно различными случаями являются $n=1$ (выбор одного наиболее соответствующего запросу прецедента) и $n>1$ (выбор нескольких прецедентов). Второй случай ведет к задачам множественной адаптации и генерации решения на основе нескольких прецедентов, наиболее близких запросу. В данной работе эта задача сформулирована как задача выбора одного прецедента ($n=1$), наиболее соответствующего запросу q. Таким образом, множество $Cases(q)$ редуцировано до одного выбранного прецедента *rCase*, имеющего с максимальное значение *PS* для запроса q.

В формальном представлении предлагаемой модели прецеденту *Case* и запросу q соответствуют связные фрагменты онтологии $O[Case]$ и $O[q]$. Следовательно, критерий *PS* может быть представлен процедурой *S*, определяющей меру сходства связанных фрагментов онтологии *ONT*:

$$S: O \times O \to R. \quad (3)$$

Тогда условием выбора прецедента является:

$$\forall case, case \in Cases, rCase \equiv Cases\ (q) \to \forall\ case,$$
$$S(ont[q], ont[rCase]) > S(ont[q], ont[case]),$$
$$case \notin Cases\ (q). \quad (4)$$

Таким образом, для предлагаемой модели необходимо решить задачу разработки алгоритма выбора прецедентов, реализующего процедуру оценки *S*.

Функция оценки близости прецедентов

Согласно разработанной онтологической модели прецедента, запрос q состоит из описания образовательной задачи *Task* и описания характеристик обучаемого *UserDescr*.

Таким образом, функция сравнения прецедентов *PS* может быть декомпозирована и приведена к виду:

$$PS(Q, CaseIndex) = k_1 * PSt(Q_{Task}, CaseIndex_{Task}) + k_2 * PSd(Q_{UserDescr}, CaseIndex_{UserDescr}), \quad (5)$$

где Q – описание запроса; *CaseIndex* – описание индекса сравниваемого с запросом прецедента; k_1 – нормировочный коэффициент, определяющий важность критерия *PSt*; k_2 – нормировочный коэффициент, определяющий важность критерия *PSd*; *PSt* – мера близости образовательных задач, содержащихся в описаниях сравниваемого запроса и индекса прецедента решения; *PSd* – мера близости свойств пользователя, содержащихся в описаниях сравниваемого запроса и индекса прецедента решения.

Образовательная задача представляет собой набор теоретических и практических навыков, которые должен получить пользователь в результате изучения генерируемой образовательной коллекции. Наиболее схожими будут те образовательные задачи, у которых все целевые навыки совпадают.

Оценка близости образовательных задач

Образовательные задачи представляют собой неупорядоченное множество:

$$Task = \{KnoweledgeItem_1, \ldots, KnoweledgeItem_n\}.$$

Если множества искомых навыков в сравниваемых задачах не равны, то для вычисления меры близости необходимо учесть как пересе-

чение множества целей, так и разность в целях сравниваемых образовательных задач. Таким образом, если $T_1 = \{I_1, I_2\}$, $T_2 = \{I_1, I_2, I_3\}$, $T_3 = \{I_1, I_2, I_3\}$, $T_3 = \{I_1, I_2, I_4\}$, то должны выполняться неравенства:

$$PSt(T_1,T_2) < PSt(T_1,T_3), \quad (6)$$

$$PSt(T_1,T_2) < PSt(T_1,T_4), \quad (7)$$

а также:

$PSt(T_1,T_3) < PSt(T_1,T_4)$, если рабочая программа отводит больше времени на получение навыка I_4, чем на получение навыка I_3, либо

$PSt(T_1,T_3) > PSt(T_1,T_4)$, если рабочая программа отводит больше времени на получение навыка I_3, чем на получение навыка I_4.

Таким образом, должна быть определена функция важности KnoweledgeWeight, характеризующая количество часов, отводимое на изучение материала KnoweledgeItem:

$$KW: KnoweledgeItem \rightarrow KnoweledgeWeight, \quad (8)$$

где $KnoweledgeWeight \in [0; \infty]$.

Тогда мера сходства образовательных задач PSt_+ может быть определена как:

$$PSt_+(Tq,Tc) = \frac{\sum_{i=0}^{|C\tilde{n}|} KW(C\tilde{n}_i)}{\sum_{j=0}^{|Tq|} KW(Tq_j)}, \quad (9)$$

где Tq – описание задачи-запроса; Tc – описание задачи-прецедента; $Cc = Tq \cap Tc$ – пересечение образовательных навыков задачи-запроса и задачи-прецедента.

Выражение $\sum_{i=0}^{|C\tilde{n}|} KW(C\tilde{n}_i)$, стоящее в числителе дроби, показывает сумму весов всех навыков, которые имеются в описаниях как новой, так и содержащийся в базе данных задач. Выражение в знаменателе $\sum_{j=0}^{|Tq|} KW(Tq_j)$ показывает сумму навыков, которые присутствуют в описании задачи.

Оценка близости поля знаний и предпочтений пользователя

Так как персональные характеристики UserDescr представляют собой кортеж описаний предпочтений обучаемого UserPreferences и его поля знаний UserKnoweledge, то имеет смысл ввести дополнительные меры близости для каждого элемента этого кортежа.

Таким образом, функция меры близости персональных характеристик обучаемого *PSd* принимает вид:

$$PSd(Q_{UserDescr}, CaseIndex_{UserDescr}) = k_{2,1} \cdot PSdd(Q_{UserPreferences}, CaseIndex_{UserPreferences}) + k_{2,2} \cdot PSdk(Q_{UserKnoweledge}, CaseIndex_{UserKnoweledge}), \quad (10)$$

где *PSdd* – мера близости персональных предпочтений обучаемых; *PSdk* – мера близости полей знаний обучаемых.

Так как обе функции PSdd и PSdk являются мерами близости, то на их значения накладываются ограничения:

$$PSdd: UserPreferences \times UserPreferences \rightarrow [0..1].$$

$$PSdk: UserKnoweledge \times UserKnoweledge \rightarrow [0..1].$$

Каждый элемент массива персональных предпочтений UserPreferences характеризуется важностью данного предпочтения PreferenceImportance.

Это позволяет нам охарактеризовать меру близости PSdd следующим образом:

$$PSdd(Q,C) = \sum_{i=0}^{n} k_{2,1,i} \cdot PSdd_i(Q_i, C_i), \quad (11)$$

где n – количество рассматриваемых персональных характеристик; Q_i – i-я персональная характеристика прецедента-запроса; C_i – i-я персональная характеристика сохраненного прецедента; $PSdd_i$ – мера близости i-й персональной характеристики обучаемого; $k_{2,1,i}$ – коэффициент важности i-й персональной характеристики пользователя.

На каждую из функцй $PSdd_i$ накладываются ограничения:

$$PSdd_i: PreferenceItem \times PreferenceItem \rightarrow [0..1].$$

Так как поле знаний обучаемого представляется аналогично описанию образовательной задачи, то целесообразно применить разработанную меру близости PSt для определения функции PSdk. При этом следует учесть, что не все знания, входящие в состав поля знаний обучаемого существенны при решении конкретной задачи.

Так, например, если требуется изучить концепт предметной области C_1, входными данными для которого является множество $R=\{C_2,C_3\}$, и при этом поля знаний двух обучаемых F_1 и F_2 выглядят следующим образом:

$$F_1 = \{C_2, C_3, C_4\}; \quad (12)$$

$$F_2 = \{C_3, C_4, C_5\}, \quad (13)$$

то при простом сравнении $PSt(F_1,F_2)$ не будет учтен тот факт, что фактически знания концеп-

тов C_4 и C_5 не является необходимым требованием для изучения C_1, что может привести к неверным выводам.

Для устранения описанного недостатка целесообразно разделить множества F на подмножества $F \cap R$ и $F \Delta R$ и провести их сравнение отдельно:

$$PSdk(F_1, F_2, R_1, R_2) = 0.8 \cdot PSt(F_1 \cap R_1, F_2 \cap R_2) + 0.2 \cdot PSt(F_1 \Delta R_1, F_2 \Delta R_2), \quad (14)$$

где F_1, F_2 – наборы концептов полей знаний обучаемых; R_1, R_2 – наборы концептов образовательных задач.

Нормировочные коэффициенты

Коэффициенты k_1 и k_2 должны быть заданы на интервале [0..1]. При этом должно быть обеспечено равенство:

$$k_1 + k_2 = 1. \quad (15)$$

Частный случай этого правила – когда один из коэффициентов k_1 или k_2 равен 0. Как следует из равенства выше, другой коэффициент при этом равен единице.

Если $k_1 = 0$, то имеет место равенство:

$PS(Q,Index) = PSd(Q_{UserDescr}, Index_{UserDescr})$, но в таком случае, сравнение прецедентов не будет учитывать разницу в образовательных задачах различных пользователей, что противоречит требованиям к системе.

Если $k_2 = 0$, то имеет место равенство: $PS(Q,Index) = PSt(Q_{Task}, Index_{Task})$, но в данном случае не будет учтена разница в знаниях студентов, что лишит систему адаптивности. В таком случае система не сможет полностью использовать преимущества адаптивного обучения, что существенно снизит качество принимаемых решений.

Таким образом, на коэффициенты k_1 и k_2 должны быть наложены дополнительные ограничения:

$$k_1 \neq 0; \quad (16)$$

$$k_2 \neq 0. \quad (17)$$

Выбор конкретных значений коэффициентов должен быть осуществлен экспериментальным путем.

Выводы

Таким образом, разработанные алгоритмы обеспечивают поддержку адаптивного поиска образовательных коллекций с учетом персональных характеристик и предпочтений обучаемого на основе онтологической модели представления знаний. Данные алгоритмы апробированы на основе онтологических моделей первой части курса «Алгоритмические языки программирования» и вводной части курса «Интеллектуальные системы».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ужва, А. Ю.* Онтологическая модель предметной области, обеспечивающая поддержку рассуждений по прецедентам для поиска образовательных ресурсов / А. Ю. Ужва, И. Г. Жукова, М. Б. Кульцова // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 11(71) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 9). – С. 110–113.

2. Интеграция онтологических моделей представления знаний и рассуждений по прецедентам для генерации персонифицированных образовательных коллекций / А. М. Дворянкин, А. Ю. Ужва, И. Г. Жукова, М. Б. Кульцова // Инновационные технологии в обучении и производстве: сб. науч. тр. Всерос. конф. – Камышин, 2009. – С. 59.

3. *Aamodt, A.* Case-Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches / A. Aamodt, E. Plaza // Communications. – 1994. – № 7. – С. 39–59.

4. *Zhou, L.* Ontology learning: state of the art and open issues // Information Technology and Management. – 2007. – Т. 8, № 3. – С. 241–252.

УДК 621.644: 658.512

И. В. Фирсов, Ю. Л. Чигиринский

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЛАНОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Волгоградский государственный технический университет
Firs0v@mail.ru, Julio-Tchigirinsky@yandex.ru

Рассмотрена возможность применения алгебраических структур и алгоритмов дискретной математики для формализованного решения задач технологического проектирования. Обоснована возможность моделирования процесса формирования качества и точности поверхности изделия в ходе механической обработки с помощью сетевых структур. Сходство логических структур вероятностных таблиц точности и матрицы смежности ориентированного графа позволило применить «алгоритм Дейкстры» для построения планов механической обработки.

Ключевые слова: план механической обработки, качество и точность обработки, дискретная математика, матрица смежности, сеть, алгоритм Дейкстры, вероятностные таблицы точности.

I .V. Firsov, Ju. L. Tchigirinsky

ALGORITHMS AND DATABASES FOR DESIGNING THE TECHNOLOGICAL ROUTE OF TREATMENT

Volgograd State Technical University

The opportunity of use of the algebraic structures and algorithms of discrete mathematics for the formal solution for the tasks of technological design. The opportunity of modeling the process of forming the quality and accuracy of the surface of the parts of machinery in the course of mechanical processing with the help of network structures. The similarity of logical structures of probability tables accuracy and adjacency matrix a directed graph allowed to apply «Dijkstra's algorithm» for designing the technological route of treatment.

Keywords: technological route of treatment, quality and accuracy of mechanical treatment, discrete mathematics, adjacency matrix, network, Dijkstra's algorithm, probability tables accuracy.

Возможность эффективного применения систем автоматизированного проектирования определяется, в первую очередь, уровнем формализации инженерных задач. Известно, что большинство задач технологического проектирования, особенно решаемых на начальных стадиях подготовки машиностроительного производства, относятся к так называемым неформализованным. Именно этим можно объяснить низкую эффективность использования технологических [1, 2, 3] САПР.

В настоящем исследовании мы рассматриваем одну из таких задач – построение планов обработки элементарных поверхностей изделий заданного качества. Здесь под *качеством изделия* подразумевается комплекс показателей, определяемый, как правило, точностью размеров (например, ширина поля допуска или номер квалитета точности *IT*); точностью взаимного расположения поверхностей; параметрами состояния поверхностного слоя (глубина слоя с измененными физико-механическими характеристиками, уровень напряжений в поверхностном слое, высотные и шаговые параметры микропрофиля поверхности). В нашем исследовании рассматриваются показатели качества, наиболее часто задаваемые на рабочих чертежах изделий машиностроения: номер квалитета точности выполняемых размеров *IT* и величина среднего арифметического отклонения профиля *Ra*. Основными факторами, определяющими низкий уровень формализации данной задачи, являются:

1) неоднородность и малая надежность [4, 5] справочной информации для четкого определения возможностей каждого метода обработки;

2) отсутствие алгоритмов поиска оптимальных маршрутов обработки с учетом требуемых параметров качества и критериев оптимизации.

Для решения первой проблемы были проведены исследования [5, 6], показавшие отсутствие структурированной информации, необходимой для проектирования технологического маршрута обработки. Авторами предложена методика [7], основанная на представлении технологического процесса в виде структурно-временной таблицы, что позволяет рассматривать процесс формирования требуемого качества изделия в виде транспортной сети (рис. 1).

Таким образом, информацию о возможностях каждого из методов обработки можно представить в виде матрицы смежности (табл. 1) которая описывает сеть (рис. 1), наглядно представляющую возможные варианты плана механической обработки поверхности требуемого качества. В качестве весовых параметров дуг сети мы предлагаем использовать, в зависимости от этапа решения задачи, следующие значения: величины изменения, в результате обработки, технологических показателей качества; величины материальных или энергетических затрат на осуществление обработки; величины

вероятности получения, в результате обработки, требуемых показателей качества.

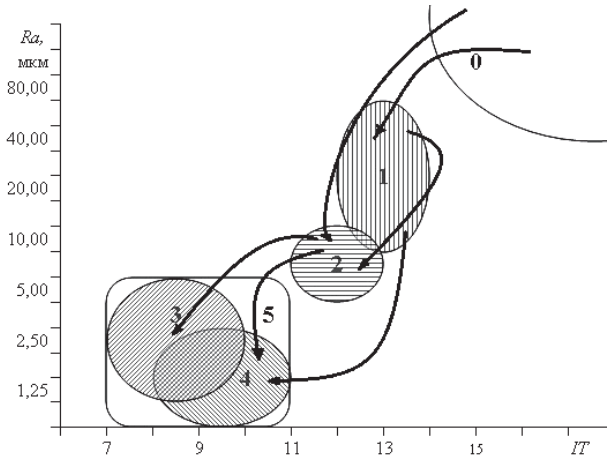


Рис. 1. Формальная схема последовательности обработки: «Облака» – области значений, рассматриваемых в работе показателей качества, достижимые в результате обработки технологическими методами: 0 – заготовка; 1 – точение черновое; 2 – точение получистовое (однократное); 3 – точение чистовое; 4 – шлифование получистовое; 5 – готовая поверхность. Стрелки – реализуемые в производстве технологические переходы

Таблица 1

Матрица смежности графа обработки

Номер метода	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
0	0	1	1	0	0	0
1	0	0	1	0	1	0
2	0	0	0	1	1	0
3	0	0	0	0	0	1
4	0	0	0	0	0	1
5	0	0	0	0	0	0

Таблица 2

«Весовая» матрица смежности графа обработки

Номер метода	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
0	0	0,93	0,89	0	0	0
1	0	0	0,99	0	0,85	0
2	0	0	0	0,99	0,87	0
3	0	0	0	0	0	0,96
4	0	0	0	0	0	1
5	0	0	0	0	0	0

В приведенном примере веса дуг сети определяются как вероятность получения необходимого результата обработки на каждом из технологических переходов. Домножив матрицу смежности на веса дуг, соединяющих узлы сети, можно получить «весовую» матрицу смежности (табл. 2), которая представляет собой «горизонтальный срез» вероятностной таблицы точности [8] – трехмерной информационной структуры, предназначенной для хранения не только справочных данных о технологических возможностях методов обработки – традиционных таблиц точности, – но и численных величин, характеризующих изменение точности и качества [7, 8] обработанной поверхности в ходе технологического процесса.

Для реализации вероятностных таблиц точности в качестве информационного обеспечения системы проектирования планов обработки разработана реляционная база данных. База данных включает следующие группы таблиц: технологические возможности методов обработки; данные, необходимые для выполнения оптимизационных расчетов; собственно вероятностные таблицы точности и результирующие таблицы. База данных построена в соответствии с правилами проектирования информационных систем и приведена к нормальным формам, что обеспечивает отсутствие избыточности информации.

В качестве основы при построении алгоритма генерации оптимального маршрута обработки выбран «алгоритм Дейкстры» [9], позволяющий производить поиск кратчайшего пути в ориентированном графе посредством нахождения расстояния от заданной вершины к вершинам, связанным с ней. Таким образом, при последовательном выполнении переходов из каждого узла сети во все смежные, определяется минимальный путь между двумя любыми заданными узлами.

Модификация «алгоритма Дейкстры» (рис. 2) для решения задачи проектирования технологического маршрута заключается в изменении условия, определяющего направление каждого следующего шага, поскольку требуется найти наиболее длинный технологический маршрут. Это связано с тем что, при использовании в качестве весов дуг графа значения вероятностей получения требуемых результатов обработки, необходимо получить маршрут обработки, обеспечивающий максимальную вероятность достижения заданного качества.

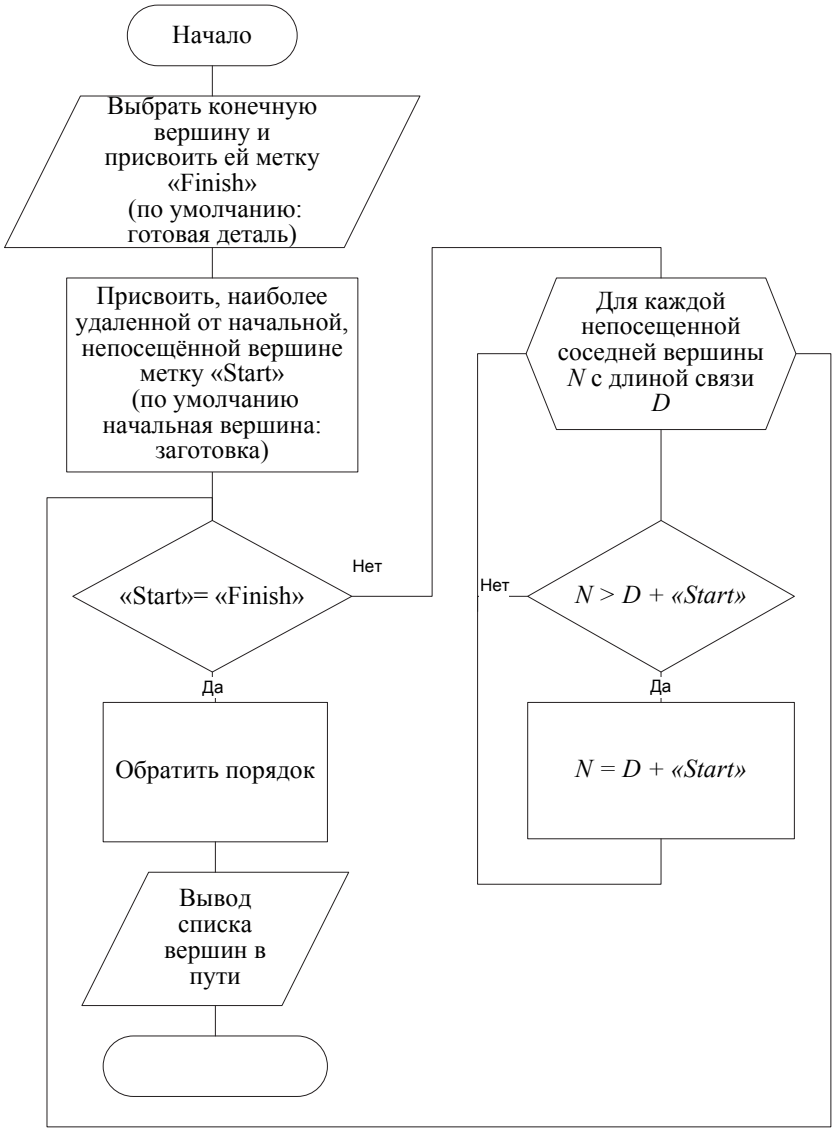


Рис. 2. Блок-схема «модифицированного» алгоритма «Дейкстры»

Выполнение алгоритма можно иллюстрировать на примере «весовой» матрицы смежности (рис. 3, 4). Использование данного алгоритма позволяет сократить время на получение требуемого результата за счет исключения функции перебора найденных маршрутов.

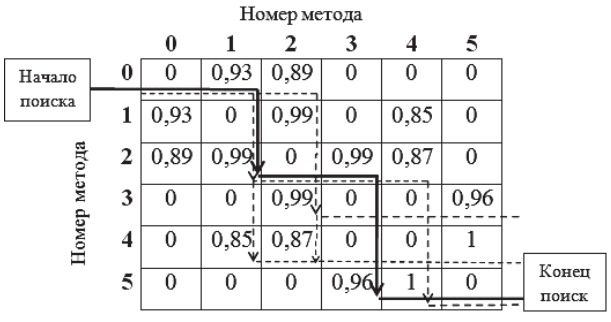


Рис. 3. Представление алгоритма «Дейкстры» на «весовой» матрице смежности

0-1-2-3-5
0-1-2-4-5
0-1-4-5
0-2-3-5
0-2-4-5

Рис. 4. Список путей в ориентированном графе обработки

Решение поставленных задач сделало возможным создание информационного модуля поддержки инженерных решений. Авторами была разработана программа поиска маршрутов обработки (рис. 5).

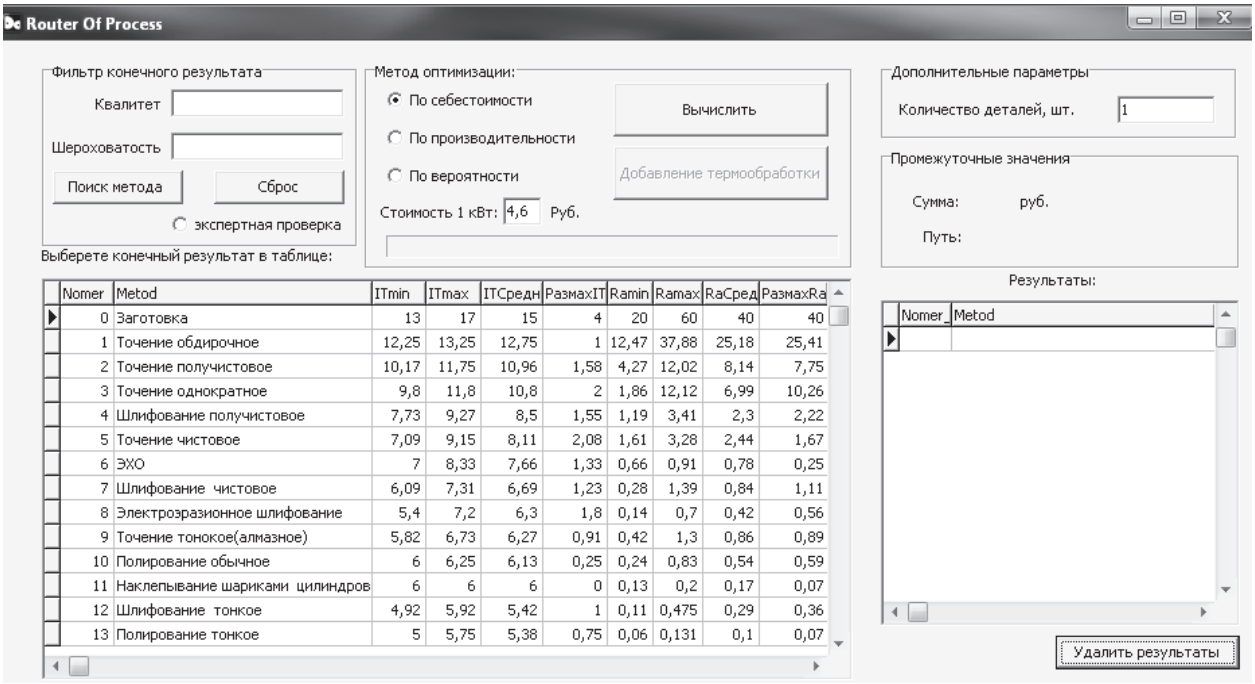
Информационная подсистема программного модуля, на данном этапе исследований, реализует вероятностные таблицы точности обработки наружных цилиндрических поверхностей.

В качестве весовых значений дуг графа в разработанном модуле реализованы следующие:

1) стоимость обработки на заданной операции, руб.;

2) время обработки на заданной операции, мин.;

3) вероятность получения заданного результата, %.



Nomer	Metod	ITmin	ITmax	ITСредн	РазмахIT	Ramin	Ramax	RaСред	РазмахRa
0	Заготовка	13	17	15	4	20	60	40	40
1	Точение обдирочное	12,25	13,25	12,75	1	12,47	37,88	25,18	25,41
2	Точение получистовое	10,17	11,75	10,96	1,58	4,27	12,02	8,14	7,75
3	Точение однократное	9,8	11,8	10,8	2	1,86	12,12	6,99	10,26
4	Шлифование получистовое	7,73	9,27	8,5	1,55	1,19	3,41	2,3	2,22
5	Точение чистовое	7,09	9,15	8,11	2,08	1,61	3,28	2,44	1,67
6	ЭХО	7	8,33	7,66	1,33	0,66	0,91	0,78	0,25
7	Шлифование чистовое	6,09	7,31	6,69	1,23	0,28	1,39	0,84	1,11
8	Электроразионное шлифование	5,4	7,2	6,3	1,8	0,14	0,7	0,42	0,56
9	Точение тонокое(алмазное)	5,82	6,73	6,27	0,91	0,42	1,3	0,86	0,89
10	Полирование обычное	6	6,25	6,13	0,25	0,24	0,83	0,54	0,59
11	Наклепывание шариками цилиндров	6	6	6	0	0,13	0,2	0,17	0,07
12	Шлифование тонкое	4,92	5,92	5,42	1	0,11	0,475	0,29	0,36
13	Полирование тонкое	5	5,75	5,38	0,75	0,06	0,131	0,1	0,07

Рис. 5. Рабочее окно программы поиска маршрута обработки

Данные параметры используются в качестве критериев оптимизации, Для поиска маршрута обработки с учетом критериев оптимизации по показателям себестоимости продукции и производительности производства используется обычный алгоритм «Дейкстры», так как наиболее оптимальным является маршрут, обладающий минимальными затратами и минимальным временем на обработку. При поиске маршрута обработки с максимальной вероятностью получения поверхности заданного качества используется «модифицированный» алгоритм «Дейкстры».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Чигиринский, Ю. Л.* Анализ задач технологической подготовки производства и выбор математических методов и средств их решения / Ю. Л. Чигиринский, Н. В. Чигиринская // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 9 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2004. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении» ; вып. 1). – С. 62–64.

2. *Чигиринский, Ю. Л.* Методы дискретной математики в технологическом проектировании / Ю. Л. Чигиринский, Н. Д. Гожева, Е. Г. Радченко // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 4 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении» ; вып. 3). – С. 112–114.

3. *Чигиринский, Ю. Л.* Возможность автоматизированного построения маршрутного технологического процесса / Ю. Л. Чигиринский // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 12 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении» ; вып. 6). – С. 65–68.

4. *Чигиринский, Ю. Л.* Методика статистического оценивания надежности процесса / Ю. Л. Чигиринский, Н. В. Чигиринская // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 8 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении» ; вып. 5). – С. 53–56.

5. *Чигиринский, Ю. Л.* Надежность справочных данных, применяемых в технологическом проектировании / Ю. Л. Чигиринский // Изв. ОрелГТУ. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – 2009. – № 2–2/274 (март–апрель). – С. 103–108.

6. *Чигиринский*, Ю. Л. Методика повышения надежности справочных данных / Ю. Л. Чигиринский // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 13 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении» ; вып. 7). – С. 55–61.

7. *Чигиринский, Ю. Л.* Формализация построения последовательности обработки наружных цилиндрических поверхностей / Ю. Л. Чигиринский, И. В. Фирсов, Ю. Н. Орлова // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 13(100) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении» ; вып. 8). – С. 92–97.

8. Прогрессивные машиностроительные технологии : монография / А. Н. Афонин [и др.]. – М.: Спектр, 2012. – Т. I. – 333 с.

9. *Левитин, А. В.* Алгоритмы: введение в разработку и анализ / А. В. Левитин. – М.: Вильямс, 2006. – 576 с.

УДК 338.2 ; 519.24

Н. В. Чигиринская

СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАТРАТ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТРУБОПРОВОДОВ

Волгоградский государственный технический университет

nvtchi@yandex.ru

Рассмотрена эффективная методика расчета затрат на инвестиционный проект по прокладке газопровода. Представлено сравнение результатов расчетов для случаев линейной и нелинейной экстраполяции. Показано, что отбор факторов для построения модели только по величине коэффициента парной корреляции дает некорректные результаты моделирования. Обосновано положение о том, что для получения корректных результатов прогнозирования затрат необходим тщательный анализ данных, используемых в качестве исходных в принятых в инвестиционном проектировании расчетных методиках.

Ключевые слова: инвестиционный проект, затратный подход, моделирование затрат, факторы регрессионных моделей, адекватность моделей.

N. V. Chigirinskaya

STATISTICAL MODELING OF COSTS FOR DESIGN OF PIPELINES

Volgograd State Technical University

Considered an effective method of calculation of cost of the investment project on laying the gas pipeline. A comparison of the calculation results for the cases of linear and non-linear extrapolation. It is shown that the selection of factors to build the model, only the largest coefficient the bivariate correlation gives incorrect results of the simulation. Grounded on the fact that in order to get correct results of forecasting the costs requires a thorough analysis of the data used as a source in the investment design of settlement methods.

Keywords: investment project, cost approach, modeling of cost factors regression models, the adequacy of the models.

Сущность, порядок расчета и особенности применения в оценочной практике показателей экономической эффективности инвестиционных проектов необходимо постоянно изучать. Это обусловлено, с одной стороны, тем, что инвестиционный проект выступает либо как самостоятельный объект оценки, либо как один из элементов собственности [1], выделяемых в затратном подходе наряду с машинами и оборудованием, интеллектуальной собственностью и т. д.

С другой стороны, если целью оценки является купля-продажа собственности, то потенциальный собственник предполагает инвестировать средства, совпадающие с итоговой величиной стоимости, определенной по совокупности трех подходов: доходного, сравнительного и затратного. Следовательно, процесс дисконтирования, осуществленный в доходном подходе, нуждается к корректировке.

Привлекательность инвестиционного проекта может быть оценена по большому числу факторов и критериев: ситуации на рынке инвестиций, состоянию финансового рынка, профессиональным интересам и навыкам инвестора, финансовой состоятельности проекта, геополитическому фактору и т. д. Однако на практике существуют универсальные методы инвестиционной привлекательности проектов, которые дают формальный ответ: выгодно или невыгодно вкладывать деньги в данный проект; какой проект предпочесть при выборе из нескольких вариантов.

Инвестирование с точки зрения владельца капитала означает отказ от сиюминутных выгод ради получения дохода в будущем. Проблема оценки инвестиционной привлекательности состоит в анализе предполагаемых вложений в проект и потока доходов от его использования. Аналитик должен оценить, насколько предполагаемые результаты отвечают требованиям инвестора по уровню доходности и сроку окупаемости.

Для принятия решения по инвестиционному проекту необходимо располагать информацией о характере полного возмещения затрат, а также о соответствии уровня дополнительного получаемого дохода, степени риска неопределенности достижения конечного результата [3, 5]. Таким образом, необходимо знание как минимум трех составляющих – полные затраты, предполагаемый доход и дисконтная ставка проекта. Обратимся к получению исходных показателей затрат.

С этой целью нами были смоделированы возможные затраты на инвестиционный проект

по прокладке газопровода. В качестве основных факторов при построении регрессионных моделей были приняты [6] следующие: диаметр трубопровода (Φ_1) и суммарные длины всех участков трубопровода, проходящих по суше (Φ_2), и всех водных (Φ_3) преград; в качестве целевой функции (R) – величина затрат на проектирование.

Корректный регрессионный анализ возможен только при соблюдении нескольких обязательных условий [2, 7, 8, 9], первым из которых обычно называют условие взаимной независимости факторов [4], которое проверяется, например, по величине коэффициента парной корреляции. Расчет (табл. 1) коэффициентов парной корреляции для каждого из выбранных факторов и целевой функции ($r_{\Phi_i R}$) показывает достаточно высокую (> 0,45) вероятность существования искомой зависимости.

В то же время малые значения вероятностей для перекрестных коэффициентов корреляции ($r_{\Phi_1\Phi_2}$, $r_{\Phi_1\Phi_3}$, $r_{\Phi_2\Phi_3}$) позволяют сделать вывод о взаимной независимости факторов и, следовательно, о возможности построения адекватной регрессионной модели, показывающей зависимость функции от выбранных факторов.

Однако для того чтобы анализ модели, с точки зрения количественной оценки влияния каждого из факторов на целевую функцию, был корректным, необходимо обеспечить «безразмерность» всех числовых величин, используемых при построении модели и единство масштабной шкалы.

Таблица 1

Парная и перекрестная корреляция факторов

	Φ_2	**Φ_3**	**Функция**
Φ_1	0,0007	0,1975	0,4605
Φ_2		0,1694	0,7305
Φ_3			0,4866

Таблица 2

Общие условия расчета

Значение в интервале варьирования	Факторы реальные			Интервал варьирования целевой функции, тыс. руб
	Φ_1, мм	Φ_2, км	Φ_3, м	
Минимальное	90,00	3,60	0,00	4,65
Максимальное	660,00	220,00	5500,00	182,10
Среднее	375,00	111,80	2750,00	93,37

Для перехода от реальных (табл. 2) значений к единой масштабной шкале и безразмерным величинам выполняется нормирование факторов и целевой функции в соответствии с правилами [7, 8], приведенными в табл. 3.

Таблица 3

Правила нормирования моделей

Спецификация и общий вид модели:		Нормирующее соотношение		Нормированный интервал
исходной	нормированной	факторы	функция	
Линейная, $R = b_0 + \sum_{i=1}^{n} b_i \cdot \Phi_i$	Линейная $Y = a_0 + \sum_{i=1}^{n} a_i \cdot X_i$	$X_i = 2 \cdot \frac{\Phi_i - \Phi_i^{\min}}{\Phi_i^{\max} - \Phi_i^{\min}} - 1$	$Y = 2 \cdot \frac{R - R^{\min}}{R^{\max} - R^{\min}} - 1$	
Показательная, $R = b_0 \cdot \prod_{i=1}^{n} b_i^{\Phi_i}$			$Y = 2 \cdot \frac{\ln\left(R / R^{\min}\right)}{\ln\left(R^{\max} / R^{\min}\right)} - 1$	
СТепенная, $R = b_0 \cdot \prod_{i=1}^{n} \Phi_i^{b_i}$		$X_i = 2 \cdot \frac{\ln\left(\Phi_i / \Phi_i^{\min}\right)}{\ln\left(\Phi_i^{\max} / \Phi_i^{\min}\right)} - 1$		

В результате нормирования общий вид исходных (табл. 3) функций сводится к обычному линейному виду, что существенно упрощает расчет и проверку значимости коэффициентов регрессии. Величины статистически значимых коэффициентов регрессии для наиболее часто рассматриваемых спецификаций (табл. 3, первый столбец) математических моделей – линейной, показательной (экспоненциальной) и степенной – приведены в табл. 4.

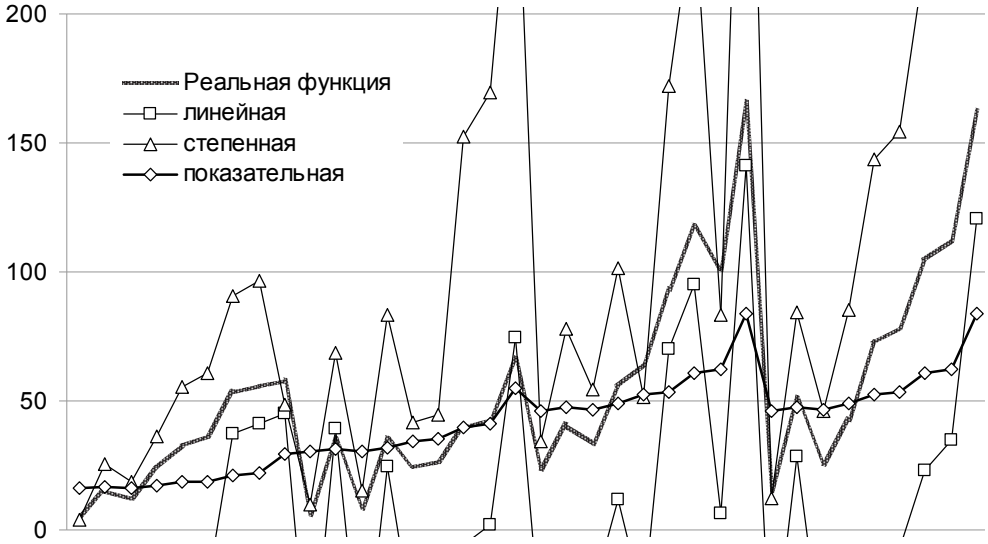
Таблица 4

Сравнение нормированных моделей

Спецификация модели	Адекватность модели	Средняя погрешность модели	Значимость факторов			
			X_0	X_1	X_2	X_3
Линейная	85 %	240 %	-0,45	0,13	0,76	0,59
Показательная	80 %	61 %	0,17	0,33	0,18	0,00
Степенная	95 %	94 %	0,17	0,29	0,70	0,31

Примечание : значимость каждого фактора оценивается величиной и знаком соответствующего коэффициента регрессии.

Уровень адекватности модели определяется по величине статистического критерия Фишера [4, 7, 8, 9], как вероятность того, что гипотеза о существенности отличия стандартной ошибки модели от стандартного отклонения совокупности значений целевой функции является достоверной. Статистическая значимость факторов оценивается по критерию Стьюдента при уровне адекватности модели.



Сравнение регрессионных моделей

Анализ результатов моделирования (табл. 4) и визуальное сравнение графиков различных моделей позволяет сделать следующие выводы:

1) наиболее точный прогноз показывает экспоненциальная модель, однако средняя погрешность прогнозирования (61 %) недопустимо велика для практического использования полученной зависимости;

2) отбор факторов для построения модели только по величине коэффициента парной корреляции дает некорректные результаты моделирования. В частности, анализ построенной модели показывает, что наиболее значимым фактором является фактор Φ_1, для которого коэффициент парной корреляции имеет минимальное значение. Наиболее значимый, по предварительной оценке ($r_{\Phi_2 R} = 0,7305$), фактор Φ_2 в показательной модели является вообще несущественным. Значимость третьего фактора сравнима с совокупным влиянием неучтенных погрешностей модели;

3) для получения корректных результатов прогнозирования затрат необходим более тщательный анализ данных, используемых в качестве исходных в принятых [6] расчетных методиках.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Дроботов, А. С.* Оценка качества инновационных проектов на основе имитационного моделирования / А. С. Дроботов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 11(71) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 9). – С. 68–71.

2. *Дыков, М. А.* Ранжирование результатов поисковых запросов в интернет-магазине на основании предпочтений покупателей / М. А. Дыков, П. Н. Воробкалов // Известия

ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 11(71) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 9). – С. 71–73.

3. *Камаев, В. А.* Анализ социально-экономического развития муниципальных образований на примере Волгоградской области с использованием моделей DATA MINING / В. А. Камаев, М. В. Щербаков, А. С. Аль-Катабери // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 6(66) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 8). – С. 103–106.

4. *Крохалев, А. В.* Использование факторного анализа для изучения структуры остаточных знаний по курсу технология материалов / А. В. Крохалев, Д. Е. Декатов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 9(35) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 3). – С. 87–88.

5. *Свинцов, В. Я.* Моделирование структуры инвестиций в воспроизводство жилищного фонда / В. Я. Свинцов, П. Н. Садчиков // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 2(40) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 1). – С. 80–83.

6. Справочник базовых цен на проектные работы для строительства [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://files.stroyinf.ru.

7. *Чигиринская, Н. В.* Математическое моделирование в экономике: учеб. пособие / Н. В. Чигиринская; ВолгГТУ. – Волгоград, 2006. – 68 с.

8. *Чигиринская, Н. В.* Экономическое прогнозирование изменения курса доллара в РФ (эконометрический подход) / Н. В. Чигиринская // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 7(94) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Актуальные проблемы реформирования российской экономики (теория, практика, перспектива)» ; вып. 13). – С. 190–195.

9. *Щербаков, М. В.* Методика выбора значимых параметров для краткосрочного прогнозирования энергопотребления / М. В. Щербаков, Н. Л. Щербакова, А. Бребельс // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 11(71) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 9). – С. 68–71.

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

УДК 004.434

Д. А. Еркин, А. А. Алимов, О. А. Шабалина

ПРИМЕНЕНИЕ ДЕКЛАРАТИВНОГО ОПИСАНИЯ ГРАФИЧЕСКОГО ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО ИНТЕРФЕЙСА ПРИ РАЗРАБОТКЕ ИГРОВЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

Волгоградский государственный технический университет

hate.cska@gmail.com, velorth@yandex.ru, o.a.shabalina@gmail.com

В данной статье рассматривается применение декларативного подхода к созданию графического пользовательского интерфейса игровой направленности. Описаны язык разметки и алгоритм реализации графического пользовательского интерфейса, которые могут быть применены при разработке компьютерных игр.

Ключевые слова: графический пользовательский интерфейс, компьютерная игра, декларативный подход, язык разметки.

D. A. Yerkin, A. A. Alimov, O. A. Shabalina

USING DECLARATIVE GRAPHICAL USER INTERFACE IN GAME APPLICATIONS DEVELOPMENT

Volgograd State Technical University

In this paper the use of declarative approach for designing of game-oriented graphical user interface is considered. The markup language and the graphical user interface realization algorithm which can be used in computer games development are described.

Keywords: graphical user interface, computer game, declarative approach, markup language.

Введение

Разработка компьютерных игр представляет собой сложный процесс, требующий привлечения высококвалифицированных специалистов. Для создания качественного игрового приложения усилий одних только программистов недостаточно. Это обусловлено тем, что к компьютерным играм применяются следующие критерии качества: увлекательность игровой составляющей, привлекательность игрового мира, сюжета и стиля игры, высокий уровень визуального и звукового оформления, удобство взаимодействия с игроком [1]. Поэтому к разработке игрового приложения часто привлекаются профессиональные дизайнеры.

Большая часть критериев, определяющих качество компьютерной игры, непосредственно относится к графическому пользовательскому интерфейсу (Graphical User Interface, GUI). Именно его созданием в первую очередь занимаются дизайнеры, привлекаемые к процессу разработки игры.

Способы реализации игрового GUI

В настоящее время практически единственным подходом к реализации GUI компьютерной игры является его описание непосредственно в коде на императивном языке программирования. Однако это приводит к смешиванию программных слоев, реализующих бизнес-логику приложения и его пользовательский интерфейс [2], что делает программный код громоздким и трудночитаемым и усложняет дальнейшее развитие компьютерной игры. Еще одним существенным недостатком такого подхода является невозможность реализации GUI непосредственно профессиональным дизайнером без привлечения программиста, так как для этого требуются навыки работы с языком программирования высокого уровня. Из-за этого процесс создания GUI может существенно затянуться по времени.

Данные проблемы можно устранить с помощью применения декларативного описания GUI. В отличие от императивного декларатив-

ный подход подразумевает описание непосредственно GUI, а не последовательности действий, в результате выполнения которых происходит реализация GUI [2]. Это позволяет изолировать описание GUI от программного кода бизнес-логики приложения, что дает возможность поручить создание GUI отдельному разработчику (или группе разработчиков).

При декларативном подходе GUI описывается не на языке программирования высокого уровня, а на языке разметки [2]. Описание GUI на таких языках сводится к объявлению элементов GUI и присваиванию нужных значений их определенным свойствам. Языки разметки обладают лаконичным синтаксисом, и для работы с ними не требуются навыки программирования.

Проблемы применения декларативного описания GUI к разработке игр

В настоящее время декларативный подход к созданию GUI весьма широко используется при создании настольных приложений, веб-приложений и сайтов. Но для разработки компьютерных игр современные технологии декларативного описания GUI практически не применимы, так как в большинстве из них языки разметки являются лишь маскировкой языков программирования высокого уровня (например, язык MXML, используемый в технологии Adobe Flex [3]). При создании GUI с применением данных технологий, происходит предварительное преобразование кода на языке разметки в эквивалентный код на высокоуровневом языке с последующей реализацией GUI. В компьютерных играх, которые потребляют большое количество ресурсов программного и аппаратного обеспечения, целесообразно генерировать GUI не при запуске, а только в определенные моменты (например, когда его присутствие необходимо в соответствии с сюжетом игры). Поэтому реализация GUI должна происходить непосредственно из описания на языке разметки без преобразования кода и последующей компиляции, так как проведение данных действий в процессе работы приложения существенно увеличит время его выполнения.

Еще одним фактором, препятствующим применению современных технологий декларативного описания GUI при разработке компьютерных игр, является использование в них в качестве языков разметки расширений языка XML, предназначенного для хранения сложно структурированной информации. Из-за того, что в данном языке используется иерархическая модель представления данных [4], описание GUI может быть достаточно громоздким (особенно при описании элементов GUI нестандартного внешнего вида), что также требует дополнительных временных затрат при реализации GUI на основе описания.

Данные препятствия устраняются путем создания языка, ориентированного на описание GUI, а также алгоритма реализации GUI на основе его описания на языке разметки без преобразования в код на языке высокого уровня, который может быть выполнен в любой момент работы игрового приложения.

Разработка предметно-ориентированного языка разметки игрового GUI

Для минимизации количества кода язык разметки должен иметь упрощенный синтаксис и реляционную модель представления данных. Структура описания элемента GUI в форме Бэкуса – Наура имеет следующий вид:

<Описание> ::= <Тип> <Имя> ["(" <Свойства> ")"] [<Родительский элемент>] "."

<Тип> ::= <Буква> [{<Буква>}] [{<Цифра>}] [{<Буква>}]

<Буква> ::= "A" | "B" | "C" | ... | "Z" | "a" | "b"| "c" | ... | "z"

<Цифра> ::= "0" | "1" | "2" | "3" | "4" | "5" | "6" | "7" | "8" | "9"

<Имя> ::= <Буква> [{<Буква>}] [{<Цифра>}] [{<Буква>}]

<Свойства> ::= <Имя свойства> "=" <Значение> | <Свойства> "," <Имя свойства> "=" <Значение>

<Имя свойства> ::= <Буква> [{<Буква>}] [{<Цифра>}] [{<Буква>}] | <Имя свойства> "."<Буква> [{<Буква>}] [{<Цифра>}] [{<Буква>}]

<Значение> ::= [{<Символ>}] | <Привязка>

<Символ> ::= <Буква> | <Цифра> | "." | "," | "?" | "+" | "-" | ... | '\"' | "\\" | " "

<Привязка> ::= "{" <Имя> "." <Имя свойства> ["," <Режим>] "}"

<Режим> ::= "TargetMode" | "SourceMode" |"UnitedMode"

<Родительский элемент> ::= "on" <Имя>

Блок «Тип» представляет собой название класса элемента GUI из используемой библиотеки. В блоке «Имя» находится имя элемента, присваиваемое разработчиком. Названия классов и имена переменных состоят из букв английского алфавита и цифр (первым символом обязательно должна быть буква).

В блоке «Свойства», заключенном в круглые скобки, через запятую происходит перечисление значений свойств (в случае отсутствия данного блока свойствам элемента присваиваются значения по умолчанию). Значения задаются последовательностью символов, что позволяет присваивать значения свойствам любого типа. Также возможна привязка свойств к данным путем задания в фигурных скобках имени источника данных и имени его свойства, к значению которого происходит привязка. Привязка может быть осуществлена в трех режимах: по умолчанию – от свойства источника к целевому свойству («TargetMode»), от целевого свойства к свойству источника («SourceMode») и в двухстороннем режиме («UnitedMode»).

В блоке «Родительский элемент» описывается принадлежность данного элемента GUI к одному из ранее описанных с помощью ключевого слова *on* (данный блок отсутствует в описании базового элемента, создаваемого GUI). Заканчивается описание элемента точкой.

Таким образом, описание GUI, представляющего собой форму белого цвета шириной 300 и высотой 150, содержащую поле для ввода текста, расположенное вверху формы, и пятиугольную кнопку с координатами вершин (50; 70), (70; 50), (90; 50), (90; 90), (70, 90) и текстом, дублирующим введенный в текстовое поле, на данном языке разметки выглядит следующим образом:

Form form1 (Width="300", Height="150", Background="#FFFFFF").
TextBox textBox1 (VerticalPosition="Top") on form1.
Button button1 (Template.Path="(50; 70), (70; 50), (90; 50), (90; 90), (70, 90)" Text="{textBox1.Text, TargetMode}") on form1.

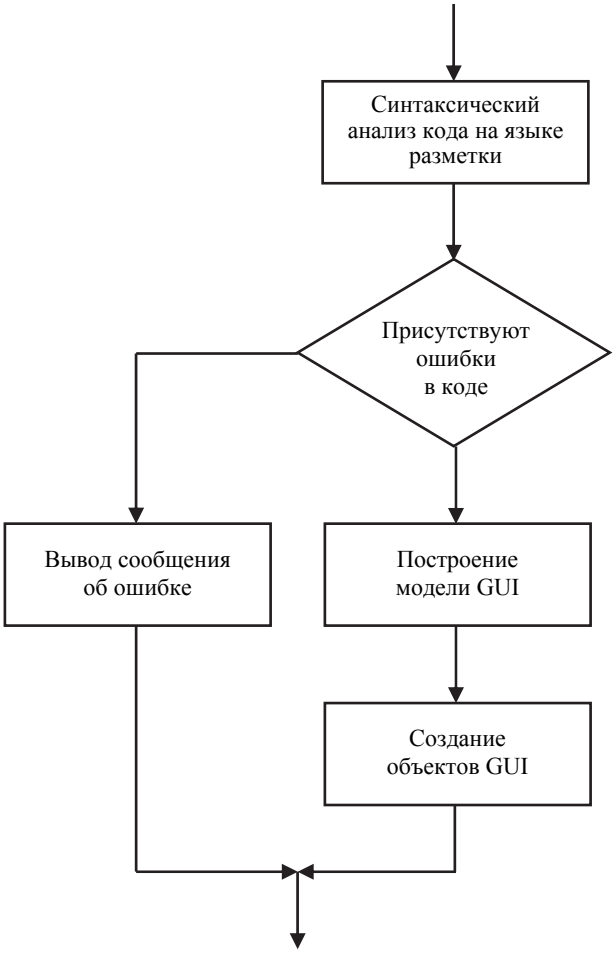
Отказ от синтаксиса XML и иерархической модели представления данных в пользу реляционной позволяет сократить количество кода, избавиться от перегрузки описания тэгами и сделать его более удобным для дизайнеров.

Алгоритм генерации GUI на основе описания на языке разметки

Алгоритм генерации GUI на основе его описания на языке разметки представляет собой последовательность действий, изображенную на рисунке.

На этапе «Синтаксический анализ кода на языке разметки» происходит проверка правильности синтаксиса кода и разбор описания GUI по отдельным элементам [2]. Наличие ошибок приведет к аварийному завершению работы алгоритма и выводу сообщений об ошибках. При отсутствии ошибок на этапе «Построение модели GUI» происходит отображение элементов GUI и отношений между ними в память. Объекты элементов GUI будут сгенерированы на этапе «Создание объектов GUI» на основе созданной модели [2].

Для генерации объектов наиболее пригодно использование механизма рефлексии [5]. Данный механизм позволяет создать объект нужного типа, точное имя которого становится известным только во время выполнения программы, и соответствующим образом его использо-



Алгоритм генерации GUI на основе кода на языке разметки

вать. В результате GUI может генерироваться в любой момент выполнения приложения без промежуточного преобразования описания на языке разметки в соответствующий код на высокоуровневом языке. Данный метод применим к объектам любого типа и любого набора свойств и поэтому не привязан к конкретной библиотеке элементов GUI. Также применение механизма рефлексии позволяет осуществить привязку данных непосредственно к свойствам элементов GUI для непосредственного и быстрого отображения состояния переменных, что является важным для компьютерных игр (например, для отображения прогресса, здоровья, скорости и т. д.).

Выводы

Применение декларативного описания графического пользовательского интерфейса при разработке игровых приложений не только возможно, но и предоставляет разработчикам некоторые преимущества перед традиционным подходом. Однако декларативный подход требует использование языка разметки, ориентированного на данную предметную область, и соответствующего алгоритм реализации GUI. Описанные в данной статье язык разметки и алгоритм успешно применялись при создании компьютерных игр в среде разработки игровых тренажеров, созданной на кафедре САПР и ПК Волгоградского государственного технического университета.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Шабалина, О. А.* Разработка обучающих игр: интеграция игровой и обучающей компоненты / О. А. Шабалина, П. Н. Воробкалов, А. В. Катаев // Открытое образование. – 2011. – № 2. – С. 290–294.

2. Creating a declarative XML UI language [Электронный ресурс]. – 2009. – Режим доступа : http://www.ibm.com/developerworks/web/library/x-decxmlui/index.html

3. About MXML [Электронный ресурс]. – [2013]. – Режим доступа : http://livedocs.adobe.com/flex/3/html/help.html?content=mxmlcomponents_2.html

4. *Кузнецов, М. А.* Машинное представление иерархических структур на основе XML и DOM / М. А. Кузнецов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1(60) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 1). – С. 97–100.

5. *Еркин, Д. А.* Разработка системы декларативного описания GUI в игровых приложениях / Д. А. Еркин // Тезисы докладов конференции-конкурса научных, конструкторских и технологических работ студентов Волгоградского государственного технического университета / ВолгГТУ ; редкол. : В. И. Лысак (отв. ред.) [и др.]. – Волгоград :, 2012. – С. 134–135.

УДК.68.5.01:658.512.2.011

Е. Е. Зинченко

ИНВАРИАНТНЫЙ АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ПАРЕТО-РАССЛОЕНИЙ ДЛЯ СТРУКТУРИРОВАНИЯ АЛЬТЕРНАТИВ В САПР

Национальный Исследовательский Университет «МЭИ», г. Москва

yunie19@mail.ru

В работе рассматривается инвариантный алгоритм Парето-расслоения для структурирования вариантов при решении задач в САПР. В формализованном и графическом виде детально приведены этапы формирования слоев, на примерах показана возможность применения алгоритма, указаны его достоинства и недостатки.

Ключевые слова: структурирование, Парето-оптимальные варианты, расслоение, ассоциативные матрицы.

E. E. Zinchenko

INVARIANT ALGORITHM FORMING PARETO STRATIFICATION for STRUCTURING ALTERNATIVES in CAD

National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow

In this paper we consider the invariant algorithm of Pareto stratification for structuring alternatives to solve problems in CAD. The stages of layers' formation are detailed in a formalized and graphic form, the examples demonstrate the possibility of applying the algorithm, and also we have noted its advantages and disadvantages.

Keywords: structuring, Pareto optimal alternatives, stratification, associative matrix.

Структурирование данных в САПР является важнейшей задачей управления информационными ресурсами. Данные всегда должны быть упорядочены в соответствии с целями решаемых задач, так как это позволяет обеспечить эффективность алгоритмов и создаваемых программ. Структурирование обычно связывают с разбиением неупорядоченных исходных

множеств на совокупность подмножеств, обладающих следующими свойствами: *пересечение подмножеств является пустым множеством, а их объединение дает в точности исходное множество.* При этом порядок на множестве должен обеспечивать максимальную эффективность решения задач, для которых проводится структурирование.

Множества альтернатив Ω можно структурировать различными *методами*. Условно они подразделяются на *критериальные* и *некритериальные. Первые* – основаны на сопоставлении альтернатив по некоторой совокупности показателей качества, отражающей цели процедуры, причем сравнение может проводиться как по метрическим, так и неметрическим критериям. *Вторые* – основаны на способности человека сравнивать альтернативы эвристически, как бы «в целом», без введения в процесс сравнения четкой логики и концептуализации.

В данной работе описывается инструментальная система декомпозиции исходного множества Ω по π-критерию, основанная на представлении Ω в виде линейного списка кортежей π_s-слоев.

Предлагаемый алгоритм инвариантен по отношению к ряду практических задач и объектов. Его использование предполагает, что все исходное множество альтернатив Ω априорно разбивается на линейно упорядоченные $\Omega_{\pi s}$-слои, которые представляют собой настроенную на *целевые устремления ЛПР*, эффективную структуру представления данных для решения задач многокритериального выбора альтернатив. Причем цели процедуры задаются через принятую ЛПР совокупность показателей качества $\{\text{ПК}_l\}$, $l = \{1, M\}$.

Использование такого алгоритма позволяет решать целый ряд практических задач САПР и ремонта, к числу которых можно отнести:

– планирование очередей на ремонт однородных типов оборудования;

– создание автоматизированных структурированных справочников по компонентам в САПР;

– выбор альтернатив в САПР в тех случаях, когда требуется адаптивный подход.

Введение π-расслоений, при решении задач выбора из электронных справочников и в задачах выбора оптимальных вариантов имеет то преимущество, что процедура выбора начинается с проверки на допустимость потенциально эффективных альтернатив из первого π-слоя. Если допустимых вариантов в $\Omega_{\pi 1}$-решениях нет, то выбор проводится на следующем слое $\Omega_{\pi 2}$ упорядоченного множества Ω; если их нет там, то переходят к третьему слою и т. д. Соответственно, к первому слою относятся все $\Omega_{\pi 1}$-оптимальные (концевые, недоминируемые) альтернативы:

$$\Omega_{\pi 1} = \max \Omega / R_{\pi}, \qquad (1)$$

найденные из условия (2)

$$R_{\pi}: \{k_l(\omega_i) \le k_l(\omega_j), i \ne j; \{\omega_i, \omega_j\} \subseteq \Omega; \forall i, j = \{1, N\}; \forall l = \{1, M\}\}, \qquad (2)$$

в котором хотя бы для одного l такое неравенство является строгим. Следующие слои: $\Omega_{\pi 2}$, $\Omega_{\pi 3}$, $\Omega_{\pi 4}$, …, $\Omega_{\pi s}$ определяются по формуле

$$\Omega_{\pi s} = \pi(\Omega \setminus \bigcup_{\xi=1}^{s-1} \Omega_{\pi \xi}). \qquad (3)$$

Результатом этой процедуры являются строго упорядоченные линейные последовательности кортежей альтернатив, представляющие собой послойную структуру, задающую π-приоритеты между π_s-слоями по принятым показателям качества $\{\text{ПК}_i\}$.

Целью данной работы *является разработка инвариантного алгоритма получения π-расслоения альтернатив в задачах структурирования вариантов.*

На первом этапе его создания необходимо выбрать рациональную модель представления данных об исходном множестве, от которой зависит эффективность достижения результата. Для машинной обработки удобным является описание данных в виде набора ассоциативных матриц $\{\text{AM}_v\}$, полученных из реляционной модели. Одна из них (AM_v) приведена в табл. 1. В таком представлении каждый элемент AM_v q_{nr} определяет наличие или отсутствие текущего значения r-го признака у n-го объекта для всех характеристик $\{p_j\}$, $j = \{1, J\}$. Размер AM_v (табл. 1) – ($N \times M$), где N – число вариантов; M – число значений характеристик с упорядоченными по возрастанию численными значениями характеристик.

Таблица 1

AM_v для описания исходных данных

ω_i	V_1	V_2	…	$V_{(M-1)}$	V_M
ω_1	q_{11}	q_{12}	…	$q_{1(M-1)}$	q_{1M}
ω_2	q_{21}	q_{22}	…	$q_{2(M-1)}$	q_{2M}
ω_3	q_{31}	q_{32}	…	$q_{3(M-1)}$	q_{3M}
…	…	…	…	…	…
ω_N	q_{N1}	q_{N2}	…	$q_{N(M-1)}$	q_{NM}

$$q_{nr} = \begin{cases} 1, \text{ если } p_{jr}(\omega_n) = V_{nj}; \\ 0, \text{ если } p_{jr}(\omega_n) \neq V_{nj}, \end{cases} \quad (4)$$

$\boldsymbol{q_{ij}}$ – вектор-столбец.

Рассмотрим в качестве исходного множества шесть однородных вариантов (табл. 2) $|\Omega| = 6$. Для него приведена графическая интерпретация (рис. 1) распределения альтернатив в пространстве двух ПК $\{k_1, k_2\}$, где $k_1 = P_1$; $k_2 = P_2$.

Таблица 2

Реляционная модель данных

ω_i	P_1	P_2	P_3
ω_1	170	2190	20
ω_2	156	3250	20
ω_3	183	2190	16
ω_4	192	3330	16
ω_5	180	3570	20
ω_6	250	4090	20

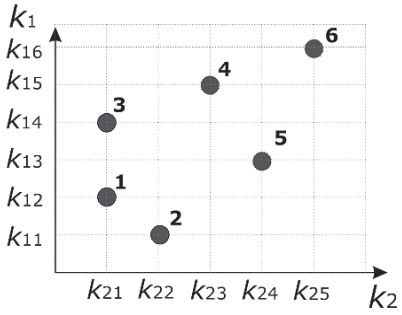


Рис. 1. Распределение альтернатив ω_i, $I = \{1, 6\}$

Ассоциативные матрицы, полученные из табл. 2, для принятых двух ПК $\{k_1, k_2\}$ могут быть представлены табл. 3 и 4.

Таблица 3

Ассоциативная модель данных для k_1

ω_i	$\boldsymbol{k_1}$					
	V_{11}	V_{12}	V_{13}	V_{14}	V_{15}	V_{16}
$\boldsymbol{\omega_1}$	0	**1**	0	0	0	0
$\boldsymbol{\omega_2}$	**1**	0	0	0	0	0
$\boldsymbol{\omega_3}$	0	0	0	**1**	0	0
$\boldsymbol{\omega_4}$	0	0	0	0	**1**	0
$\boldsymbol{\omega_5}$	0	0	**1**	0	0	0
$\boldsymbol{\omega_6}$	0	0	0	0	0	**1**

Таблица 4

Ассоциативная модель данных для k_2

ω_i	$\boldsymbol{k_2}$				
	V_{21}	V_{22}	V_{23}	V_{24}	V_{25}
$\boldsymbol{\omega_1}$	**1**	0	0	0	0
$\boldsymbol{\omega_2}$	0	**1**	0	0	0
$\boldsymbol{\omega_3}$	**1**	0	0	0	0
$\boldsymbol{\omega_4}$	0	0	**1**	0	0
$\boldsymbol{\omega_5}$	0	0	**0**	**1**	0
$\boldsymbol{\omega_6}$	0	0	0	0	**1**

На *втором этапе* реализуется пошаговый «просмотр» всех значений k_1, k_2, начиная с минимальных значений с целью поиска левой нижней границы множества Ω, которая и представляет собой первый π-слой. Запишем процедуру в виде формализованного алгоритма.

Ш а г 1: Поиск первого слоя для минимизации показателей качества

В первом цикле производится последовательный просмотр точек k_2, для которых $k_1 = \min k_1$ до получения непустого решения.

Поиск Парето оптимальных вариантов будет проводиться в общем виде так:

$$i.\, j^{\circ}.\ \boldsymbol{q}_{\text{рез}\,i,j} = \boldsymbol{q}_{2i} \wedge \boldsymbol{q}_{1j} / \boldsymbol{q}_{\text{рез}i,j} = \varnothing,$$

$$\text{то к } i.\,(j+1)^{\circ}, \quad (5)$$

иначе в память и к $(i+1).\, j^{\circ}$, для $j = \{1, (N-1)\}$.

В частности, для представленных в табл. 3 и 4 данных алгоритм примет вид:

1.1°. $\boldsymbol{q}_{\text{рез}1.1} = \boldsymbol{q}_{21} \wedge \boldsymbol{q}_{11} / \boldsymbol{q}_{\text{рез}1.1} = \varnothing$, то к 1.2°;

1.2°. $\boldsymbol{q}_{\text{рез}1.2} = \boldsymbol{q}_{21} \wedge \boldsymbol{q}_{12} / \boldsymbol{q}_{\text{рез}1.2} \neq \varnothing$, то $\omega_{\pi 1,1}$ в память и к $1.2.1^{\circ}$;

Дальнейший просмотр пространства выше значения $(k_{12} - 1)$ во всех последующих шагах не имеет смысла, так как эти значения заведомо хуже, найденного в п. 1.2°.

$1.2.1^{\circ}$. Обнулить полученный вариант в АМ.

2.1°. $\boldsymbol{q}_{\text{рез}2.1} = \boldsymbol{q}_{22} \wedge \boldsymbol{q}_{12} / \boldsymbol{q}_{\text{рез}2.1} \neq \varnothing$, то $\omega_{\pi 1,2}$ в память;

$2.1.1^{\circ}$. Обнулить полученный вариант в АМ.

Таким образом, оба варианта из первого Парето-слоя $\{\omega_{\pi 1,1}, \omega_{\pi 1,2}\}$ занесены в память и затем обнулены для возможности осуществления дальнейшего расслоения на множестве $\Omega \backslash \{\omega_{\pi 1,1}, \omega_{\pi 1,2}\}$.

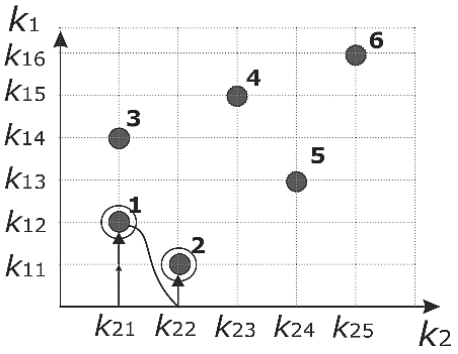


Рис. 2. Поиск первого π-слоя

Ш а г 2: Поиск второго слоя

В конце первого шага π_1-слой был обнулен, поэтому поиск π_2-слоя будет производиться из уменьшенного множества вариантов аналогично поиску первого слоя.

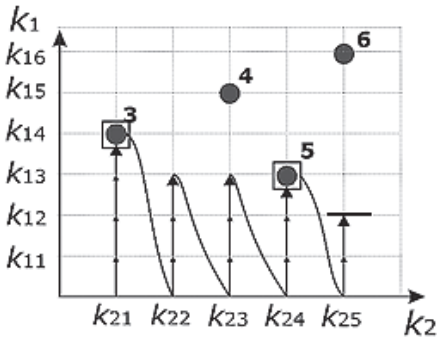


Рис. 3. Поиск π_2-слоя

1.1°. $\boldsymbol{q}_{\text{рез1.1}} = \boldsymbol{q}_{21} \wedge \boldsymbol{q}_{11} / \boldsymbol{q}_{\text{рез1.1}} = \varnothing$, то к 1.2°;

1.2°. $\boldsymbol{q}_{\text{рез1.2}} = \boldsymbol{q}_{21} \wedge \boldsymbol{q}_{12} / \boldsymbol{q}_{\text{рез1.2}} = \varnothing$, то к 1.3°;

1.3°. $\boldsymbol{q}_{\text{рез1.3}} = \boldsymbol{q}_{21} \wedge \boldsymbol{q}_{13} / \boldsymbol{q}_{\text{рез1.3}} = \varnothing$, то к 1.4°;

1.4°. $\boldsymbol{q}_{\text{рез1.4}} = \boldsymbol{q}_{21} \wedge \boldsymbol{q}_{14} / \boldsymbol{q}_{\text{рез1.4}} \neq \varnothing$, то $\omega_{\pi 2,3}$ в память и к 1.4.1°;

1.4.1°. Обнулить полученный вариант и к 2.1°;

Альтернативы со значением $k_1 \geq k_{14}$ при $k_2 \geq k_{22}$ будут хуже первого полученного варианта, поэтому при дальнейшем «просмотре» выше «линии» k_{12} (включая это значение) варианты не рассматриваются.

2.1°. $\boldsymbol{q}_{\text{рез2.1}} = \boldsymbol{q}_{22} \wedge \boldsymbol{q}_{11} / \boldsymbol{q}_{\text{рез2.1}} = \varnothing$, то к 2.2°;

Поиск проводится до тех пор, пока на

4.3°. $\boldsymbol{q}_{\text{рез4.3}} = \boldsymbol{q}_{24} \wedge \boldsymbol{q}_{13} / \boldsymbol{q}_{\text{рез4.3}} \neq \varnothing$, тогда $\omega_{\pi 2,5}$ в память и к 4.3.1°;

4.3.1°. Обнулить полученный вариант и к 5.1° до просмотра всех оставшихся столбцов матрицы.

5.1°. $\boldsymbol{q}_{\text{рез5.1}} = \boldsymbol{q}_{25} \wedge \boldsymbol{q}_{11} / \boldsymbol{q}_{\text{рез5.1}} = \varnothing$, то к 5.2°;

5.2°. $\boldsymbol{q}_{\text{рез5.2}} = \boldsymbol{q}_{25} \wedge \boldsymbol{q}_{12} / \boldsymbol{q}_{\text{рез5.2}} = \varnothing$, то в конец.

Второй слой включает в себя два π-оптимальных варианта $\{\omega_{\pi 2,3}, \omega_{\pi 2,5}\}$, которые запоминаются и затем обнуляются. Далее поиск проводится на оставшемся множестве $\Omega'' = \Omega \backslash \{\omega_{\pi 1,1}, \omega_{\pi 1,2}\} \backslash \{\omega_{\pi 2,3}, \omega_{\pi 2,5}\}$.

Ш а г 3: Поиск третьего π-слоя

1.1°. $\boldsymbol{q}_{\text{рез1.1}} = \boldsymbol{q}_{21} \wedge \boldsymbol{q}_{11} / \boldsymbol{q}_{\text{рез1.1}} = \varnothing$, то к 1.2°;

……

Поиск проводится до тех пор, пока не будет выявлен вариант, удовлетворяющий условию Парето.

3.5°. $\boldsymbol{q}_{\text{рез3.5}} = \boldsymbol{q}_{23} \wedge \boldsymbol{q}_{15} / \boldsymbol{q}_{\text{рез3.5}} \neq \varnothing$, тогда $\omega_{\pi 3,4}$ в память и к 3.5.1°;

3.5.1°. Обнулить полученный вариант $\omega_{\pi 3,4}$ и к 4.1°;

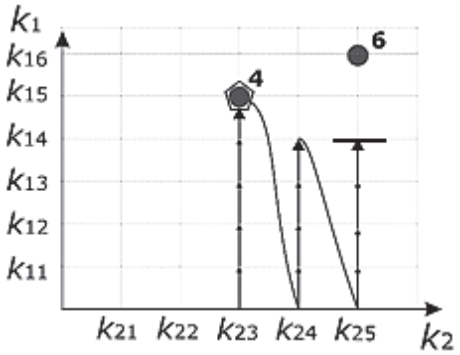


Рис. 4. Поиск π_3-слоя

Дальнейший поиск при значениях $k_1 \leq k_{14}$ π-оптимальных вариантов не выявил.

Третий слой включает в себя один π-оптимальный вариант $\omega_{\pi 3,4}$.

Ш а г 4: Поиск четвертого слоя

Проводится на оставшемся множестве $\Omega''' = \Omega \backslash \{\omega_{\pi 1,1}, \omega_{\pi 1,2}\} \backslash \{\omega_{\pi 2,3}, \omega_{\pi 2,5}\} \backslash \omega_{\pi 3,4}$.

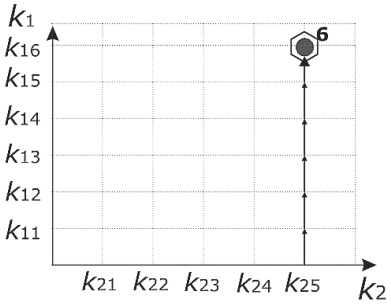


Рис. 5. Поиск π_4-слоя

1.1°. $\boldsymbol{q}_{\text{рез1.1}} = \boldsymbol{q}_{21} \wedge \boldsymbol{q}_{11} / \boldsymbol{q}_{\text{рез1.1}} = \varnothing$, то к 1.2°;

……

Поиск проводится до тех пор, пока не будет выявлен вариант, удовлетворяющий условию Парето на оставшемся множестве.

5.6^{o}. $\boldsymbol{q}_{\text{рез}5.6} = \boldsymbol{q}_{25} \wedge \boldsymbol{q}_{16} / \boldsymbol{q}_{\text{рез}5.6} \neq \varnothing$, тогда $\omega_{\pi 4,6}$ в память и, конец, так как были просмотрены все значения в исходной матрице.

Поиск элементов каждого π_s-слоя предполагает последовательную конъюнкцию столбцов АМ ПК$_i$ строго слева направо (для минимизации) до получения непустых решений. После определения π_s-слоя, он запоминается с присвоением имени очередного найденного слоя, а соответствующие ему «единичные» значения характеристик вариантов «обнуляются» для продолжения работы алгоритма на усеченном множестве. При этом, в АМ «1», отвечающие за оптимальный вариант, заменяются на «0» («1» ← «0»). Тогда при повторном поиске следующего оптимального π_{s+1}-слоя, найденный ранее π_s-слой идентифицироваться не будет. Процедура продолжается до «просмотра» всех столбцов матриц ПК$_i$ и выявления π_s-слоев, число которых соответствует максимальной цепи в графе частичного порядка на множестве Ω.

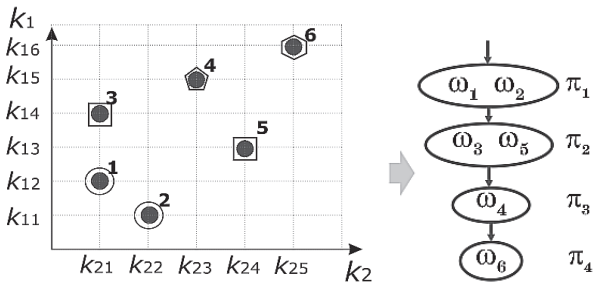


Рис. 6. Распределение альтернатив ω_i и их паретовское расслоение

Таким образом, путем анализа всех значений матрицы и проверки их на оптимальность по π-критерию можно определить и выделить Ω_π-слои.

П р и м е р . Рассмотрим реализацию данного алгоритма на примере выбора транзистора для схемы выходного каскада с максимальной граничной частотой P_4 и максимальной мощностью, рассеиваемой на коллекторе P_3. Причем по условию задачи требуется найти не просто наиболее эффективный вариант для данной проектной задачи, а необходимо установить приоритеты на множестве предложений $|\Omega| = 7$.

Таблица 5

Реляционная модель, описывающая исходное множество транзисторов

	Вариант	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14
Характеристика		Материал	Структура	Pкmax[мВт]	fгр[МГц]	Rпер-окр[С/мВт]	tокр[С]	UкэRmax[В]	Iкmax[мА]	Iкбо[мкА]	Uкэ[В]	Iэ[мА]	h21э[-]	Ск[пФ]	тк[мкс]
V1	2Т360А	Si	p-n-p	10	300	7	-60..+85	10	10	5	5	1	60..180	4	300
V2	КТ343А	Si	p-n-p	150	300	0,5	-40..+85	12	30	5	5	5	20..200	2,5	75
V3	КТ361А	Si	p-n-p	150	250	0,67	-60..+100	12	50	5	5	5	20..250	2,5	40
V4	КТ209А	Si	p-n-p	200	5	0,45	-45..+100	12	50	5	1	10	20..75	8	400
V5	КТ326А	Si	p-n-p	200	400	0,6	-60..+125	12	50	5	1	10	80..200	8	500
V6	2Т326А	Si	p-n-p	250	400	0,6	-60..+125	50	200	500	3	10	20..60	80	600
V7	КТ312А	Si	n-p-n	225	80	0,4	-60..+70	12	50	5	3	15	15..80	2,5	50

Эти приоритеты формируются в соответствии со структурированием Ω по π-слоям.

По условию задачи исходные данные представлены в табл. 5.

Формализуем задачу выбора. В качестве ПК выберем требуемые по ТЗ характеристики P_3 и P_4. Пусть: $k_1 = P_3$ – мощность ($P_{k\max}$); $k_2 = P_4$ – граничная частота ($f_{\text{гр}}$), которые необходимо *максимизировать*. В табл. 6 и 7 представлены АМ для выбранных ПК.

Найдем вначале первый Парето-оптимальный слой (рис. 7), с помощью программы, разработанной в соответствии с приведенным выше алгоритмом.

Таблица 6

Ассоциативная модель данных для k_1

ω_i	k_1				
	10	150	200	225	250
ω_1	**1**	0	0	0	0
ω_2	0	**1**	0	0	0
ω_3	0	**1**	0	0	0
ω_4	0	0	**1**	0	0
ω_5	0	0	**1**	0	0
ω_6	0	0	0	0	**1**
ω_7	0	0	0	**1**	0

Таблица 7

Ассоциативная модель данных для k_2

ω_i	k_2				
	5	80	250	300	400
ω_1	0	0	0	**1**	0
ω_2	0	0	0	**1**	0
ω_3	0	0	**1**	0	0
ω_4	**1**	0	0	0	0
ω_5	0	0	0	0	**1**
ω_6	0	0	0	0	**1**
ω_7	0	**1**	0	0	0

В π_1-оптимальный слой будет входить одна альтернатива $\Omega_{\pi 1} = \{\omega_6\}$, соответствующая транзистору с максимальными значениями мощности и граничной частоты.

Для продолжения определения расслоения исходного множества и поиска альтернатив найденному транзистору необходимо обнулить первый слой и использовать рассмотренный алгоритм на множестве $\Omega' = \Omega \setminus \Omega_{\pi 1}$ (рис. 8).

В результате получаем новый π_2-слой, в который будут входить уже две альтернативы $\Omega_{\pi 2} = \{\omega_5, \omega_7\}$. Таким образом, если *по условиям допустимости* использовать в проекте найден-

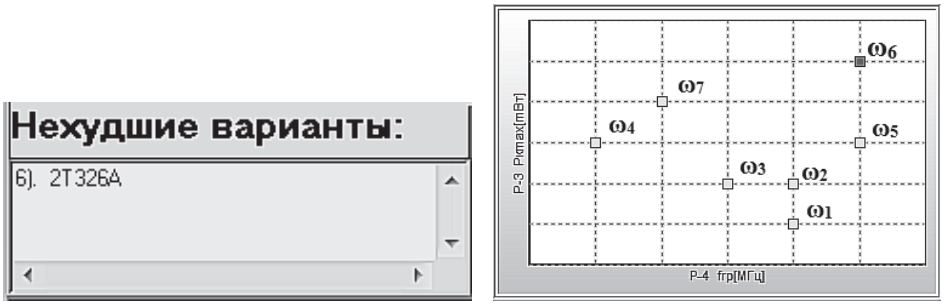


Рис. 7. Определение π_1-слоя: $\Omega_{\pi 1} = \{\omega_6\}$

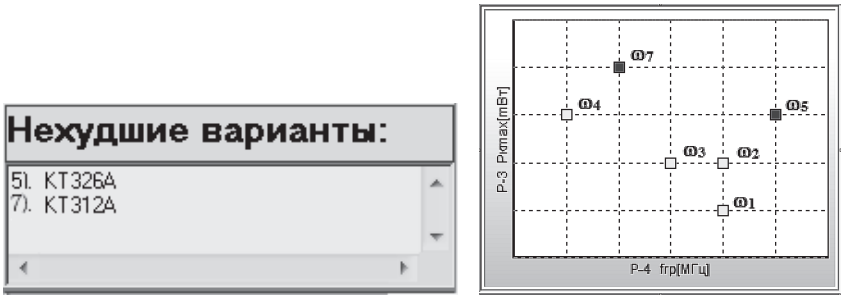
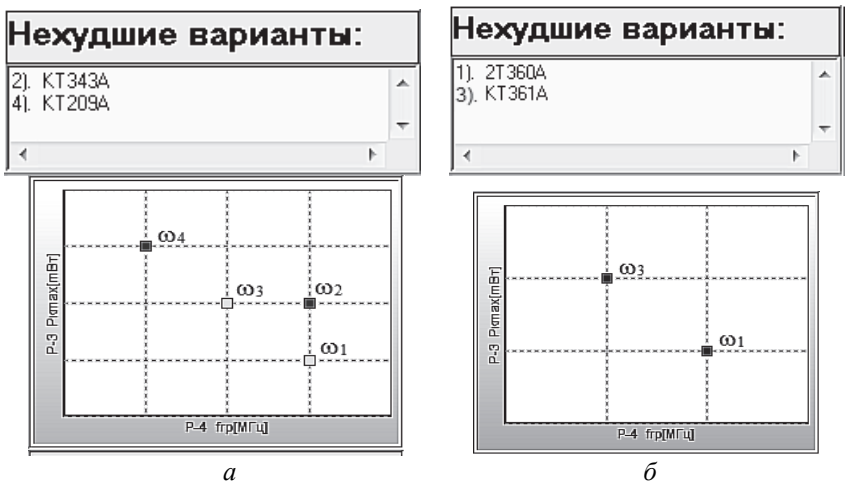


Рис. 8. Определение π_2-слоя: $\Omega_{\pi 2}=\{\omega_5, \omega_7\}$



а *б*

Рис. 9. Определение:
а – π_3-слоя: $\Omega_{\pi 3} = \{\omega_2, \omega_4\}$; *б* – π_4-слоя: $\Omega_{\pi 4} = \{\omega_1, \omega_3\}$

ный ранее транзистор нельзя, то необходимо перейти ко второму слою и выбирать из $\Omega_{\pi 2}$.

На рис. 9 представлены еще два слоя, найденные с помощью разработанной программы на основе созданного алгоритма расслоений. Для π_3-слоя: $\Omega_{\pi 3} = \{\omega_2, \omega_4\}$ (рис. 9, *а*) и π_4-слоя: $\Omega_{\pi 4} = \{\omega_1, \omega_3\}$ (рис. 9, *б*).

Рис. 10. Итоговое паретовское расслоение для данной задачи

Отметим *преимущества* послойного представления Ω:

• высокая эффективность поиска допустимых вариантов (без комбинаторики) в линейно упорядоченном разбиении исходного множества вариантов по слоям;

• быстрый поиск оптимальных альтернатив, которые являются допустимыми элементами в слоях, эффективных для принятых ПК.

Недостатком послойного представления является то, что сформированная структура не дает возможности установить нетранзитивный частичный порядок, дуги, в графе которого указывали бы на «альтернативы-заместители».

К недостатку предложенного алгоритма (при сохранении размерности матрицы) можно отнести и то, что после «обнуления» π_{si}-слоя при определении следующего необходимо «просмотреть» все предыдущие столбцы АМ, в которых содержался «обнуленный» слой.

Заключение

В работе предложен алгоритм инвариантного Парето-расслоения, основанный на использовании упорядоченных ассоциативных матриц, сформированных из реляционной модели данных. Алгоритм может найти применение в целом ряде инженерных задач в САПР, где требуется целевое упорядочивание однородных альтернатив. При этом необходимо четко понимать, что существуют ограничения на применение такого метода структурирования:

1) при очень близком распределении альтернатив в первых паретовских слоях и наличии стохастизма в показателях качества возникает проблема устойчивости π-оптимальных решений, которая требует при априорном структурировании данных преобразования неустойчивых задач в близкие к ним устойчивые;

2) структурирование альтернатив по слоям эффективно только при малом ($M \leq 3$) числе ПК, так как при увеличении M резко падает число максимальных цепей, покрывающих граф частичного порядка на множестве возможных вариантов, следовательно, большее число альтернатив попадает в первый паретовский слой, уменьшая эффективность априорного структурирования;

3) включенные в первый паретовский слой крайние точки могут быть менее эффективны при практическом решении конкретной задачи выбора при проектировании, чем точки, лежащие «в середине» слоя. Этот недостаток решается путем априорного структурирования не по слоям, а в соответствии с диаграммой Хассе (ДХ), задающей частичный порядок на все множество альтернатив. Дуги в таком графе указывают на «альтернативы-заместители». Если при наложении ограничений варианты, соответствующие концевым вершинам в структуре, выбраны не будут, то рассматриваются варианты, «привязанные» к этим дугам.

Разработанный алгоритм реализован в программе «Выбор 13», которая используется в НИР и учебном процессе на кафедре РПУ НИУ «МЭИ».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кандырин, Ю. В.* Методы и модели многокритериального выбора вариантов в САПР : учеб. пособие для вузов / Ю. В. Кандырин. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 172 с.

2. *Кандырин, Ю. В.* Методика автоматизированного многокритериального выбора припоев / Ю. В. Кандырин, Е. Е. Зинченко // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 4(91) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 13). – С. 49–54.

3. *Кандырин, Ю. В.* Автоматизированный многокритериальный выбор припоев для пайки DIP-компонентов на печатных платах в РЭС / Ю. В. Кандырин, Е. Е. Зинченко // Радиотехнические тетради. – М.: Радиотехника. – 2011. – № 47. – С. 64–70.

УДК 621.65:681.5

А. И. Исмагулова

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ В СИСТЕМАХ НЕФТЕДОБЫЧИ НА ОСНОВЕ ШТАНГОВЫХ ГЛУБИННО-НАСОСНЫХ УСТАНОВОК

Атырауский институт нефти и газа, Республика Казахстан
umd_aingl@mail.ru

В работе предлагается структурная схема автоматизированной станции управления системой электроприводов в штанговых глубинно-насосных установках с целью поддержания заданного уровня жидкости в них. Приведена функциональная схема и описана процедура работы автоматического регулирования динамического уровня жидкости; приведена блок-схема автоматического регулятора уровня.

Ключевые слова: штанговые глубинно-насосные установки, электроприводы в системах нефтедобычи, автоматизированные станции управления, автоматическое регулирование динамического уровня жидкости.

A. I. Ismagulova

THE BLOCK DIAGRAM OF AUTOMATION OF MANAGEMENT OF ELECTRIC DRIVES IN OIL PRODUCTION SYSTEMS ON THE BASIS OF SHTANGOVS OF DEEP AND PUMP INSTALLATIONS

Atyrau institute of oil and gas, The Republic of Kazakhstan

In work the block diagram of the automated station of management by system of electric drives in shtangovy deep and pump installations for the purpose of maintenance of the set level of liquid in them is offered. Are provided a function chart and procedure of work of automatic control of dynamic level of liquid is described, the block diagram of an automatic regulator of level is provided.

Keywords: shtangovy deep and pump installations, electric drives in the oil production systems, the automated stations of management, automatic control of dynamic level of liquid.

Введение

Особенности географического расположения и удаленность нефтепромысловых районов России предъявляет высокие требования надежности оборудования нефтедобычи.

Среди основного оборудования, применяемого в нефтепромыслах, значительное место занимают насосные агрегаты поршневого или плунжерного типа, турбоагрегаты центробежного типа и буровые установки (БУ). К агрегатам *первого типа* относятся штанговые глубинно-насосные установки (ШГНУ), буровые насосы (БН), насосы пластового давления, ко *вторым* – установки: электроцентробежные насосы и аппараты воздушного охлаждения газа. Буровые установки содержат в своем составе, кроме буровых насосов, спускоподъемный аппарат и механизм вращения колонны бурильных труб (в последних моделях БУ, так называемый верхний привод).

ШНГУ эксплуатируются в более чем половине всего фонда скважин России, в качестве приводного механизма для которых используются различные типы станков-качалок. Поэтому ШГНУ являются одними из наиболее важных компонентов современных систем нефтедобычи в России. Состояние глубинно-насосных установок определяет степень готовности нефтепромысла, его работоспособность, производительность и надежность, особенно в условиях интенсивной эксплуатации и связанного с этим износа оборудования. Нестабильность работы ШГНУ и, тем более, их отказ могут привести к самым серьезным последствиям для нефтепромысла. Поэтому обеспечение эффективности и надежности работы ШГНУ является одной из важнейших задач создания благоприятных условий для устойчивого, надежного и экономичного функционирования нефтепромысла, сводя до минимума возможные издержки и потери от различных рисков.

Оценка технического уровня электроприводов, применяемых в нефтедобыче, показывает, что до настоящего времени перечисленные выше агрегаты в большинстве случаев оснащаются нерегулируемым электроприводом, выполненным на базе асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, что существенно ограничивает возможности оптимизации технологического процесса. При использовании нерегулируемого привода трудно согласовать производительность насоса ШГНУ с притоком нефти, что приводит к увеличению числа отказов внутрискважинного оборудова-

ния. Поэтому для большинства скважин технология откачки нефти требует автоматического регулирования производительности установки. Наиболее эффективным способом автоматического регулирования производительности ШГНУ является применение регулируемого электропривода. Электропривод буровых установок многодвигательный и в настоящее время выполняется регулируемым на основе электродвигателей постоянного тока. Безусловно, данное решение позволяет удовлетворить самые сложные требования по реализации разнообразных технологических режимов работы буровой установки, однако в значительной степени усложняет эксплуатацию агрегата из-за наличия в системе привода коллекторной машины с присущими ей недостатками.

Из вышесказанного следует актуальность задачи повышения эффективности управления ШНГУ. Основное назначение системы управления – обеспечить такое реагирование на любые отклонения характеристик внешней среды и параметров системы от номинальных или желаемых их значений, при котором система попрежнему оказывается способной выполнять возложенные на нее задачи. Основной задачей, решаемой в работе, является повышение эффективности управления и оптимизации электроприводов в системах нефтедобычи, использующих в процессе бурения ШНГУ. Указанная задача применительно к глубинно-насосным установкам других типов ранее рассматривалась в [1, 2].

1. Структура системы автоматического управления ШНГУ

Предлагаемая в работе структурная схема автоматизированной станции управления ШГНУ, разработанная на базе электропривода системы ТПН-АД с учетом динамических нагрузок в механических звеньях, приведена на рис. 1. Опишем более детально устройство и принцип работы станции.

Станция снабжена микропроцессорной системой управления (МПСУ), содержащей в своем составе специализированный контроллер с Flash-ПЗУ, реализующий функции системы управления электроприводом (СУЭП) и технологического регулятора (ТР). Контроллер, построенный по однопроцессорной структуре, выполнен на базе однокристальной микро-ЭВМ семейства ATMEL LV52. В систему, кроме того, входят датчики фазного тока $I_ф$, напряжений сети $U_с$ и двигателя $U_д$ (ДТ, ДН1 и ДН2), а также датчики положения S балансира (ДП) и усилия F в штоке (ДУ). В качестве датчика положения может быть применен фотоэлектрический (импульсный или кодовый) или индукционный (сельсин, вращающийся трансформатор) датчик.

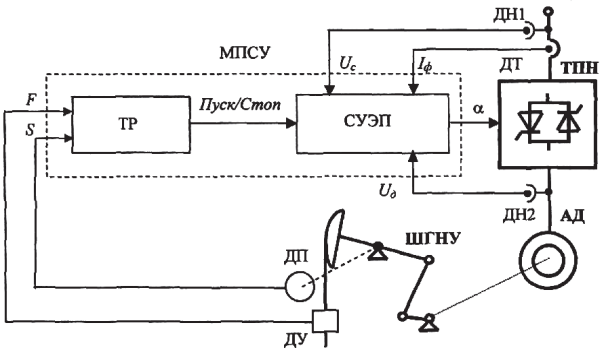


Рис. 1. Структурная схема автоматизированной станции управления ШГНУ

Блок СУЭП осуществляет формирование управляющих импульсов тиристоров в соответствии с заданием, поступающим на его вход от технологического регулятора. В этом блоке реализуются функции системы импульсно-фазового управления, задатчика интенсивности, регулятора скорости (при наличии датчика скорости), блока линеаризации и логического дискриминатора режимов, определяющих режим работы ТПН и угол открытия вентилей преобразователя. Кроме того, в блоке реализуются защиты от неправильного чередования фаз сетевого напряжения и исчезновения фазы, время-токовая защита двигателя, максимально-токовая защита преобразователя. В случаях работы без датчика скорости система управления обеспечивает функционирование тиристорного пускателя в вариантах отсечки по току, программно-временного формирователя напряжения питания двигателя при пуске и торможении или с обратной связью по сигналу от наблюдателя скорости, обеспечивая регламентированный запуск двигателя.

Блок ТР обеспечивает автоматическую работу электропривода в старт-стопном режиме с периодическим включением на расчетное (или заданное) время работы $T_р$, и отключением на расчетное (или заданное) время паузы T_0 с чередованием позиций останова в ВМТ или НМТ и проведением замеров соответствующих усилий в штоке, осуществляя автоматическое управление средней производительностью насоса. В этом блоке реализуется защита и автоматиче-

ская диагностика характерных неисправностей в работе ШГНУ, а именно: предупреждение перегрузки штанг; обнаружение обрыва штанг, обрыва шатунов, обрыва ремней, нарушения балансировки. Кроме того, блоком выполняются функции рестарта и автоматического повторного включения (АПВ), хранение истории событий, включая учет моточасов и запись динамограмм, а также поддерживается связь с системой верхнего уровня по стандартному последовательному каналу. Основными режимами работы системы автоматического управления являются:

• режим стабилизации заданного (произвольного) значения динамического уровня, определяемого на основе одного из описанных выше алгоритмов контроля значений усилий в штоке вблизи верхней и нижней мертвых точек хода полированного штока;

• режим, реализующий алгоритм стабилизации граничного динамического уровня, соответствующего началу незаполнения насоса.

Система автоматического регулирования динамического уровня построена на основе измерителя уровня с непрерывной оценкой параметров динамограмм [3].

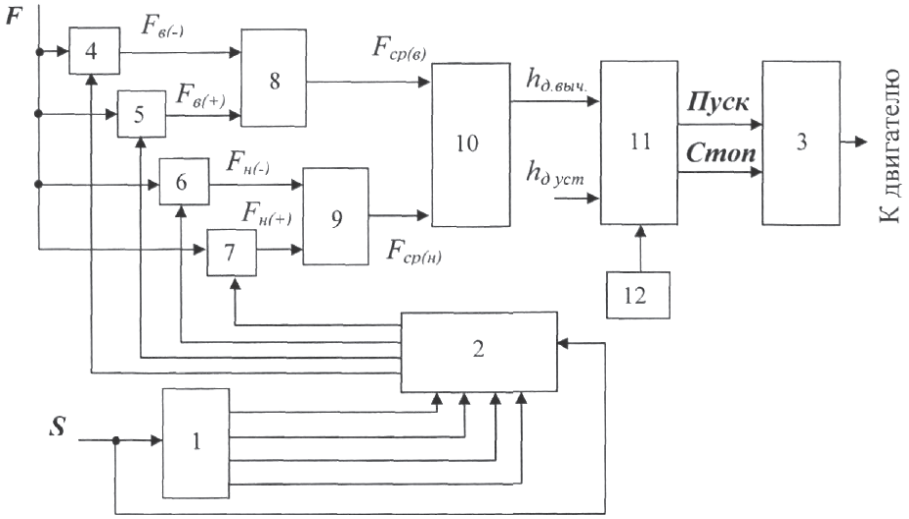


Рис. 2. Блок-схема алгоритма автоматического регулирования динамического уровня

Блок-схема раскрывает алгоритм функционирования программно-аппаратного комплекса микропроцессорной системы управления, который содержит блок слежения за положением штока *1*, блок управления фиксаторами усилий *2*, блок управления приводом 3, блоки фиксации усилий *4*, *5, 6, 7*, блоки расчета средних усилий *8* и *9*, блок расчета динамического уровня жидкости *10*, автоматический регулятор уровня *11*, таймер *12*.

Способ реализуется следующим образом. При работе глубинно-насосной установки нефтяной скважины в режиме качания блоком слежения *1* осуществляют определение крайнего верхнего и крайнего нижнего положений полированного штока по сигналу *S* от датчика положения (не показан). В моменты прохождения штоком указанных точек в блоке *1* происходит запоминание позиций соответственно $S_{в(-)}$ и $S_{Н(-)}$, а в моменты смены направления движения штока сразу после прохождения крайних точек – запоминание позиций $S_{в(+)}$ и $S_{н(+)}$. Далее в блоке управления фиксаторами усилий *2* текущее положение штока *S* сравнивается с позицией $S_{в(-)}$ и в момент их равенства подается сигнал управления на фиксатор *4*. В блоке *4* по этому сигналу происходит запоминание усилия в крайней верхней точке $F_{в(-)}$. Аналогично по достижении соответствующих позиций происходит запоминание усилий $F_{в(+)}$, $F_{Н(-)}$, $F_{н(+)}$ в фиксаторах *5, 6* и *7* соответственно.

Из блоков *4* и *5* значения усилий $F_{в(-)}$ и $F_{в(+)}$ подаются в блок расчета среднего усилия *8*, а из блоков *6* и *7* значения усилий $F_{Н(-)}$ и $F_{н(+)}$ – в блок расчета среднего усилия *9*. В данных блоках выполняется расчет средних усилий для верхней и нижней мертвых точек хода штока: $F_{ср(е)}$ и $F_{ср(н)}$ соответственно. На основе полученных значений $F_{ср(е)}$ и $F_{ср(н)}$ в блоке 10 выполняется расчет динамического уровня жидкости в скважине $h_{д.выч}$. Поэтому для реализации алгоритма необходимо иметь расчетное значение для $h_{д.выч}$.

Расчетное значение $h_{д.выч}$ поступает в автоматический регулятор *11*, где происходит его

сравнение с заданным динамическим уровнем $h_{д.уст.}$, который устанавливается таким, чтобы при его достижении исключалась возможность незаполнения насоса при его нормальной работе.

Автоматический регулятор уровня *11* работает по принципу широтно-импульсной модуляции. По разности установки заданного и расчетного значений динамического уровня регулятор определяет относительную продолжительность работы привода в цикле периодической откачки жидкости из скважины. Команда на пуск двигателя формируется регулятором по сигналу от таймера *12*, задающего цикл периодической откачки жидкости. По истечении расчетного времени работы регулятор *11* выдает сигнал на остановку в блок управления приводом *3*. Окончание паузы определяется временем цикла, по завершении которого таймер выдает в регулятор *11* сигнал на очередной запуск двигателя и начало отсчета следующего рабочего интервала.

Определение расчетного значения динамического уровня жидкости в стволе скважины выполняется, как уже отмечалось, на каждом цикле качания, что позволяет снизить влияние вычислительного запаздывания на качество работы автоматического регулятора уровня *11*. Собственно регулятор уровня выполняется по традиционной П- или ПИ-структуре.

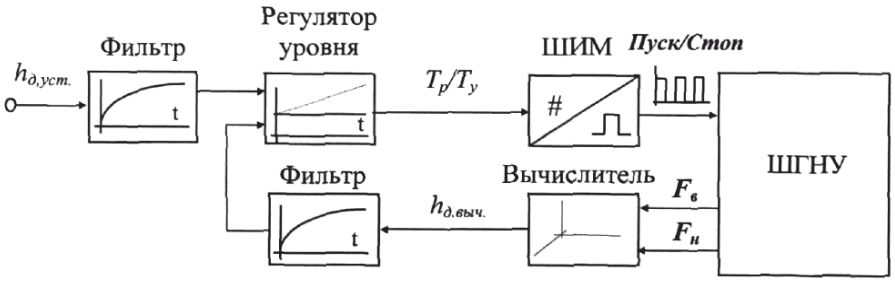


Рис. 3. Функциональная схема системы автоматического регулирования динамического уровня

В условиях, когда эксплуатация ШГНУ по состоянию оборудования и характеристикам скважины невозможна без проявлений частичного незаполнения насоса, или целесообразна работа с частичным незаполнением, необходима более универсальная система управления, допускающая такую возможность. В [4] предлагается способ оптимального управления штанговой глубинно-насосной установкой нефтяной скважины, предусматривающий предварительное обследование скважины с нахождением параметров, соответствующих максимальной производительности скважины, заключающийся в реализации алгоритма вывода ее на динамический уровень с признаком незаполнения насоса и автоматическое регулирование найденного оптимального уровня за счет периодического отключения установки с регулируемой длительностью паузы.

Основным недостатком данного способа является отсутствие постоянного упреждающего контроля и регулирования степени незаполнения насоса (только оперативное выявление признака незаполнения насоса), что при выбранном способе задания динамического уровня может привести к неэффективной работе установки. Кроме того, необходимость периодического проведения цикла тестирования скважины приводит к потерям времени и снижению общей производительности установки.

Указанных недостатков лишен модифицированный способ оптимального управления штанговой глубинно-насосной установкой нефтяной скважины [5, 6], включающий контроль изменений усилий в точке подвеса колонны насосных штанг и положения полированного штока, выявление признака незаполнения насоса и определение динамического уровня жидкости в стволе скважины по разности значений усилий в крайнем верхнем и крайнем нижнем положениях хода штока, поддержание заданного динамического уровня жидкости за счет периодического отключения установки с автоматически регулируемой длительностью паузы, в котором дополнительно после выявления признака незаполнения насоса вводят уставку на степень незаполнения C_{max} осуществляют контроль степени незаполнения С и при наличии отклонения текущего незаполнения от уставки корректируют значение заданного динамического уровня в соответствии с допустимым незаполнением.

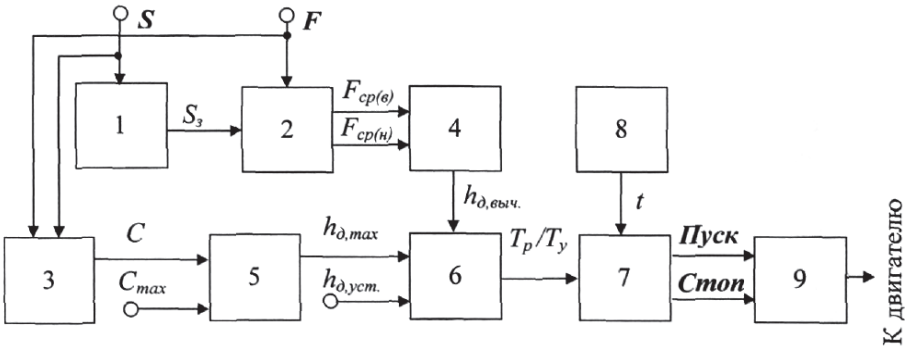


Рис. 4. Блок-схема алгоритма автоматического регулирования степени незаполнения насоса

Схема раскрывает алгоритм функционирования программно-аппаратных средств управляющего устройства, который содержит блок слежения за положением штока *1*, блок слежения за усилием в штоке *2*, блок расчета степени незаполнения насоса *3*, блок расчета динамического уровня *4*, регулятор степени незаполнения *5*, регулятор динамического уровня *6*, блок формирования цикла периодической откачки жидкости *7*, таймер *8* и блок управления двигателем *9*.

Способ реализуется следующим образом. При работе глубинно-насосной установки нефтяной скважины в режиме качания блок слежения *1* осуществляет определение крайнего верхнего и крайнего нижнего положений полированного штока по сигналу *S* от датчика положения (не показан). В моменты прохождения штоком указанных точек в блоке *1* формируется сигнал S_3 на запоминание в блоке *2* усилия *F*, измеряемого датчиком усилия (не оказан), в соответствии с описанным ранее методом контроля усилий в штоке в крайних положениях. Блок *2* формирует значения средних усилий в штоке в верхнем и нижнем положениях: $F_{ср(в)}$ и $F_{ср(Н)}$ передаваемых в блок расчета динамического уровня жидкости в скважине *4*, алгоритм функционирования которого определяется выражением (5.8). Выходом блока *4* является текущий расчетный динамический уровень $h_{д.выч}$. Сигналы от датчиков положения *S* и усилия *F* поступают также в блок расчета степени незаполнения насоса *3*. В данном блоке на основе анализа текущих положений и усилий на цикле качания формируется сигнал, характеризующий степень незаполнения насоса С, поступающий в регулятор незаполнения *5*. В регуляторе незаполнения сигнал С сравнивается с максимально допустимой степенью незаполнения насоса C_{max} и рассчитывается соответствующий максимально допустимый для обеспечения заданного незаполнения уровень жидкости $h_{д.max}$. Сигнал допустимого максимального уровня $h_{д.max}$ поступает на регулятор уровня *6*, где сравнивается с заданным уровнем $h_{д.уст}$ и вычисленным $h_{д.выч}$. В случае, если максимально допустимый уровень больше заданного, регулирование ведется по заданному уровню $h_{д.уст}$, иначе – по максимально допустимому $h_{д.max}$. Выходом регулятора уровня является сигнал T_p/T_y, определяющий относительную продолжительность времени откачки жидкости на заданном периоде, который поступает в блок формирования цикла откачки *7*. В блоке *7* по сигналу T_p/T_y и сигналу от таймера *8*, задающего продолжительность цикла управления T_y, формируются команды на пуск и останов двигателя, поступающие в блок управления двигателем *9*.

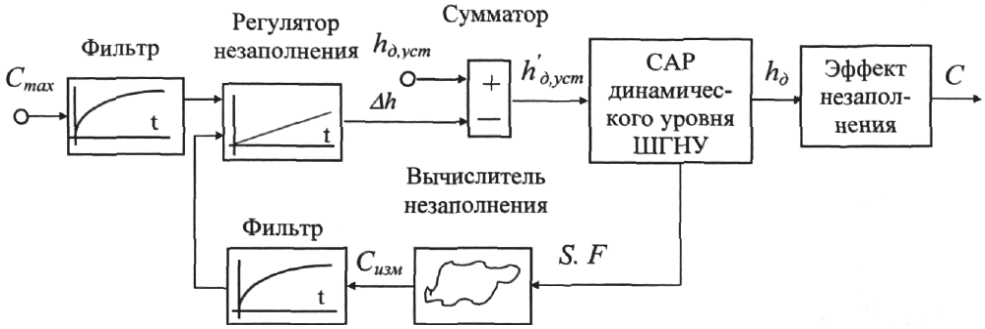


Рис. 5. Функциональная схема системы автоматического регулирования степени незаполнения

Определение расчетного незаполнения насоса и динамического уровня жидкости в стволе скважины проводят на каждом цикле качания, что позволяет снизить влияние вычислительного запаздывания на качество работы автоматического регулятора незаполнения *5* и автоматического регулятора уровня *6*. Регулятор незаполнения в этом случае принимается типа П-регулятора.

Особенностью функциональной схемы является присутствие в ней *двух* контуров регулирования, образующих систему автоматического регулирования динамического уровня подчиненного типа с внешним контуром регулирования незаполнения. Наличие сумматора на выходе регулятора незаполнения позволяет раздельно вводить задание на динамический уровень $h_{d.уст}$ и степень незаполнения C_{max}. При значении установки на динамический уровень $h_{д.уст}$, не вызывающей работы насоса с незаполнением C, превосходящим максимально допустимое C_{max}, внешний контур находится в разомкнутом состоянии и на выходе интегратора устанавливается нулевой сигнал. При обнаружении незаполнения, превосходящего заданное $C_{\max}$, интегратор выставляет смещение задания динамического уровня Δh и выводит скважину из опасного режима на скорректированный динамический уровень.

Преимущество предлагаемого способа состоит в осуществлении работы установки с динамическим уровнем, обеспечивающим оптимальную производительность скважины, при одновременном повышении надежности работы оборудования за счет постоянного упреждающего контроля и регулирования степени незаполнения насоса.

Заключение

Практическая реализация приведенных в работе схем и алгоритмов регулирования привода требует проведения достаточно затратных экспериментов, что в настоящее время сопряжено с большими трудностями. Однако внедрение предлагаемых схем позволит повысить эффективность работы ШГНУ за счет оптимизации технологического процесса откачки нефти, уменьшить число отказов внутрискважинного оборудования и тем самым повысить производительность нефтескважины. Открытыми остались вопросы получения расчетных значений для ряда используемых параметров: динамического уровня жидкости в скважине $h_{д.выч}$, степень незаполнения C_{max}, динамического уровня степени незаполнения $h_{d.уст}$, что является предметом дальнейших исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Шаньгин, Е. С.* Повышение эффективности управления штанговой глубинной насосной установкой на основе измерительно-вычислительного комплекса / Е. С. Шаньгин, С. В. Зубков // Вестник УГАТУ. Сер. «Автоматизация и управление технологическими процессами и производством». Т. 13 (2009), № 2(35). – С. 74–77.

2. *Алиев, З. З.* Повышение эффективности эксплуатации глубоких скважин штанговыми установками (на примере Ватьеганского месторождения) : дис. … канд. техн. наук / З. З. Алиев. – Уфа, Гос. унитар. предпр. «Институт проблем транспорта энергоресурсов», 2010. – 118 с.

3. *Зюзев, А. М.* Оптимизация уравновешивания штанговых глубинно-насосных установок по критерию энергопотребления / А. М. Зюзев // Проблемы и достижения в промышленной энергетике : Материалы 3-й научно-практической конференции. – Екатеринбург, 2003. – С. 87.

4. *Зюзев, А. М.* Способ управления глубинно-насосной установкой нефтяной скважины / А. М. Зюзев, А. В. Костылев, В. П. Муковозов // Заявка № 2003125811 на выдачу патента РФ на изобретение. – М.: РОСПАТЕНТ. 21.08.2003 г.

5. Способ оптимального управления штанговой глубинно-насосной установкой нефтяной скважины / А. М. Зюзев [и др.] // Заявка № 2003125832 на выдачу патента РФ на изобретение. – М.: РОСПАТЕНТ. 21.08.2003 г.

6. *Кандырин, Ю. В.* Математические модели структурирования альтернатив для решения задач выбора в САПР / Ю. В. Кандырин, Л. Т. Сазонова, Г. Л. Шкурина // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 3(76) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 10). – С. 111–115.

УДК.685.01.:658.512.2.011.56

Ю. В. Кандырин, М. Е. Кононов

АЛГОРИТМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВЫБОРА АНАЛОГОВ ПО ПРОТОТИПАМ В ЧАСТИЧНЫХ ПОРЯДКАХ

Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»

ywk@mail.ru, felxasus@gmail.com

В работе рассмотрены метод и алгоритмы автоматического выбора аналогов по прототипам посредством перехода от транзитивного графа частичного порядка к диаграмме Хассе через удаление всех транзитивных дуг, при этом на аналоги для заданного прототипа указывают ближайшие к заданному прототипу нетранзитивные дуги.

Ключевые слова: аналоги, прототипы, многокритериальный выбор аналогов, граф частичного порядка, фактор-множество.

Y. V. Kandyrin, M. E. Kononov

ALGORITHM OF THE AUTOMIZED CHOICE ANALOGUES ON THE PROTOTYPES IN THE PARTIAL ORDERS

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

This work presents the method and algorithms of the automated choice of analogues on the prototypes by means of transition from the transitive graph of the partial order to the chart of Hasse by deleting all transitive arcs, thus, the nearest arcs to the given prototype shows the analogues of the given prototype.

Keywords: analogues, prototypes, multicriteria choice selection analogs, graph of the partial order, the factor set of clones.

Выбор аналогов по прототипу – это целый класс задач поиска наиболее близких вариантов из совокупности функционально-однородных альтернатив. Такие задачи возникают при ремонте технических объектов, с заменой вышедшей из строя детали близким аналогом, или, когда потребитель ищет необходимое ему функциональное изделие, желая просмотреть несколько наиболее приемлемых близких вариантов. К этому же классу задач можно отнести и выбор вариантов аналогов при концептуальном проектировании новых изделий на этапе формирования обликов, а также ряд других. Отсюда, задача автоматизации выбора аналогов по прототипу является *актуальной и значимой.*

Формализованная постановка задачи выбора аналога по прототипу предполагает наличие правила, позволяющего сравнивать варианты из однородных множеств между собой. В простейшем случае такое правило традиционно может быть задано скалярной функцией выбора $C_{k,}$ где аргументами выступают показатели качества $\{k_m\}$: $C_k(k_1,...,k_m)$ на множестве альтернатив. Распространенное на практике решение для аналога определяется скалярной функцией $C_k(k_{1a},...,k_{ma}) = f_a$, которая отражает близость значений f_a к $f_п$ в том или ином смысле, например, по наименьшему квадрату отклонений. Чем ближе их значения (в идеале совпадают), тем ближе альтернатива к прототипу и тем выше качество замены одного варианта другим. Однако в практических задачах построение самой такой функции часто вызывает серьезные затруднения. Связано это с отсутствием информации о единых правилах сравнения характеристик с разной размерностью или заданием меры приоритета показателей качества.

Во многих ситуациях удобно рассматривать совокупность показателей качества $\{ПК_i\}$ в векторной постановке. Традиционное понятие оптимальности скалярной меры близости при этом заменяется понятием «оптимальность по Парето», а сама задача выбора аналога сводится к задаче замены прототипа *по совокупности показателей качества.* Ее основная особенность состоит в том, что решением здесь может быть, как правило, не единственный вариант-аналог, а целое множество оптимальных по Парето, или эффективных (нехудших) альтернатив.

При решении задачи выбора аналога по прототипу могут быть использованы последовательно несколько критериев с нарастающей силой, либо применяться адаптивные условные критерии, приоритет показателей качества которых устанавливается ЛПР по мере появления дополнительной информации. Заметим, что наличие нескольких ПК задает на множестве альтернатив частичное упорядочение.

Прежде чем переходить к формальному описанию предлагаемого подхода, введем понятие «*прототипа*», под которым будем понимать «исходный элемент», который может быть

заменен вариантами с близкими значениями характеристик – «аналогами». Таким образом, общая постановка задачи определяется как осуществление *выбора оптимального (в том или ином смысле) аналога по прототипу*. При этом выбор осуществляется из некоторого множества вариантов, в то время как сам прототип является *уникальным вариантом*. В общем случае, поставленная задача является разновидностью задачи выбора [1]. Однако в то время как традиционная задача выбора вариантов обычно формально представляется как *двойка* $<C, \Omega>$, где C – принцип оптимальности; Ω – исходное множество альтернатив; формализованная постановка задачи выбора аналога может быть представлена *тройкой* $<C, \Omega, \omega_{п}(\alpha_{п})>$, где C – принцип оптимальности; Ω – исходное множество вариантов; $\omega_{п}(\alpha_{п})$ – прототип, задаваемый значениями его характеристик ($\alpha_{п}$). При этом из всех допустимых вариантов оптимальным (наилучшим) аналогом считается тот вариант $\omega_{опт}$, который обладает наименьшими (в заранее установленном смысле) отличиями совокупности показателей качества $\{ПК_i\}_{а}$ от совокупности $\{ПК_i\}_{пр}$ прототипа, при одновременном выполнении требований по допустимости. Следовательно, для выбора оптимального аналога должен быть предварительно сформулирован (обоснован) критерий предпочтения (критерий оптимальности), то есть правило C_k, на основании которого одно значение показателей качества $\{ПК_i\}_{а}$ из совокупности следует считать лучшим (или худшим) по сравнению с другим его значением, при условии, что все рассматриваемые варианты допустимы.

Таким образом, задача многокритериального выбора аналога по заданному прототипу сводится к тому, чтобы среди множества $\Omega_{д}$ *допустимых по техническому заданию вариантов выбрать* $\omega_{а}(\alpha_{а})$ *аналог, удовлетворяющий принятому принципу оптимальности,* который может формулироваться по-разному и, в конечном итоге, отражает степень информированности и понимания ЛПР задачи выбора аналога.

В работе в качестве математической модели решения задачи предлагается следующая последовательность формализованных описаний и преобразований исходного множества Ω вариантов для выбора прототипа.

На первом шаге из исходного множества вариантов формируется реляционная модель представления Ω в виде отношения $REL(k_1, k_2\ldots)$, в строках которого стоят варианты $\{\omega_i\} = \Omega$, а по столбцам – значения каждого из показателей качества (ПК) для ω_i (табл. 1).

Таблица 1

Исходное множество транзисторов $\Omega_{д}$, $REL(k_1, k_2\ldots)$

Альтернативы	Характеристики альтернатив $\{P_j\}$ и их значения			
	$P_1 = P_{k\max}$, мВт	$P_2 = f_{гр}$, МГц	$P_3 = I_{k\max}$, мА	$P_4 = C_{к}$, пФ
ω_1 = 2N1300	150	25	100	12
ω_2 = ГТ310А	20	160	10	4
ω_3 = ГТ310Б	20	160	10	4
ω_4 = ГТ313А	100	350	30	2,5
ω_5 = 1Т313А	100	300	50	2,5
ω_6 = ГТ308А	150	90	50	8
ω_7 = ГТ308В	150	120	50	8
ω_8 = ГТ321А	160	60	200	80
ω_9 = ГТ320А	200	80	150	7

На втором шаге осуществляется переход от реляционной модели к совокупности ассоциативных матриц (АМ) мощности $|ПК|$ с упорядочиванием значений ПК внутри матриц (либо по возрастанию, либо по убыванию).

На третьем шаге формируются фактор-множества $\{\Phi^{T}(\Omega/k_1), \ldots, \Phi^{T}(\Omega/k_M)\}$ в ассоциативных структурах для каждого из $ПК_i$, описывающие линейные порядки через окрестности $\{\boldsymbol{O}_i(\boldsymbol{\omega_i})\}$ вариантов [1].

На четвертом шаге можно сформировать транзитивный частичный порядок необходимой размерности для любых сочетаний $ПК_{ij}$ посредством конъюнкции матриц. При этом «1»-цы в АМ отображают дуги – связи между вариантами в транзитивном графе частичного порядка $G^{T}(\Omega, U^{T})$. Рассмотрим пример построения такой АМ для результирующего фактор множества $\Phi^{T}(\Omega/\{k_1,\ldots, k_M\})$, $|\Omega| = 6$. Элементы G_{ij} матрицы $j = \{1, 6\}$, $i = \{1, 6\}$ формируются пересечением соответствующих элементов B^{t}_{ij}, $t = \{1, M\}$ фактор-множеств более низкого порядка, непосредственно построенных по значениям каждого из показателей качества k_l в соответствии с выражением $G_{ij} = B^{1}_{ij} \cap B^{2}_{ij} \cap \ldots \cap B^{M}_{ij}$, $i, j = \{1, 6\}$, где

$$B_{i,j} = \begin{cases} 0,\ \omega_j \succ \omega_i,\ \omega_{i,j} \in L(\Omega \mid k_l),\ i \neq j,\ l = \{1, M\}, \\ 0,\ i = j, \\ 1,\ \omega_j \prec \omega_i,\ \omega_{i,j} \in L(\Omega \mid k_l),\ i \neq j,\ l = \{1, M\}. \end{cases}$$

По существу, такая ассоциативная матрица $A^{T}_{рез,1,\ldots,M}$ описывает направленный граф бинарных отношений $G^{T}_{\pi}(\Omega/\{k_1,\ldots,k_M\}U^{T}_{ij})$ с транзитивными дугами.

Таблица 2

Ассоциативная матрица $A^T_{рез,1,...,M}$ фактор-множества $\Phi^T(\Omega/\{k_1,\ldots,k_M\})$

Окрестности $O_i(\omega_i)$ / Альтернативы ω_i	$O_1(\omega_1)$	$O_2(\omega_2)$	$O_3(\omega_3)$	$O_4(\omega_4)$	$O_5(\omega_5)$	$O_6(\omega_6)$
ω_1	0	G_{12}	G_{13}	G_{14}	G_{15}	G_{16}
ω_2	G_{21}	0	G_{23}	G_{24}	G_{25}	G_{26}
ω_3	G_{31}	G_{32}	0	G_{34}	G_{35}	G_{36}
ω_4	G_{41}	G_{42}	G_{43}	0	G_{45}	G_{46}
ω_5	G_{51}	G_{52}	G_{53}	G_{54}	0	G_{56}
ω_6	G_{61}	G_{62}	G_{63}	G_{64}	G_{65}	0

На пятом шаге необходимо очистить АМ от всех транзитивных дуг, формируя, тем самым граф частичного порядка или Диаграмму Хасс, так как транзитивные дуги смешивают картину *последовательного* доминирования вариантов.

Шестой шаг состоит из нескольких подэтапов. Их финальная цель – выделить дуги в графе частичного порядка, которые *входят* и *выходят* из варианта-прототипа. Именно они и связаны с искомыми аналогами. Графическая интерпретация алгоритма решения задачи представлена на рис. 1.

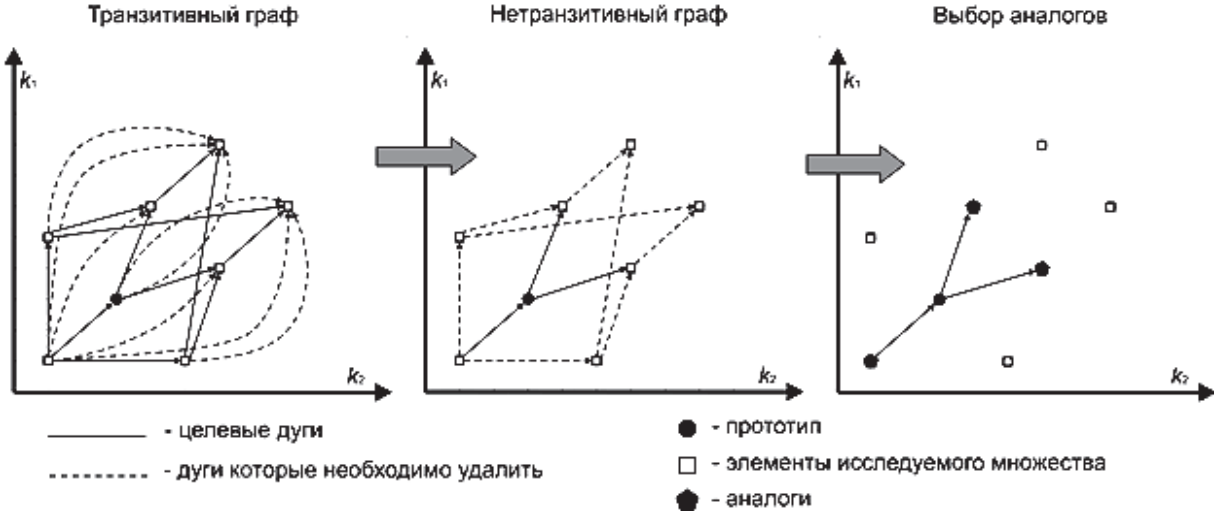


Рис. 1. Последовательность преобразования исходного графа для поиска аналогов

Окончательная проверка вариантов-претендентов на допустимость дает возможность установить, какие варианты могут быть аналогами для данного прототипа.

Учитывая изложенные предпосылки, задача работы может быть сформулирована следующим образом. *Разработать алгоритм автоматического формирования нетранзитивного графа частичного порядка из транзитивного графа частичного порядка с целью определения локальных ближайших дуг, входящих и выходящих из любой вершины, которая может являться прототипом на заданном однородном множестве.*

Пусть на *четвертом этапе* [1] из табл. 1 было сформировано транзитивное фактор-множество для ПК: $k_1 = P_1\uparrow$ и $k_2 = P_2\uparrow$ в виде АМ: $A^T_{12} = A^T_1 \bigcap_\pi A^T_2$.

Соответствующий АМ транзитивный граф частичного порядка приведен на рис. 2.

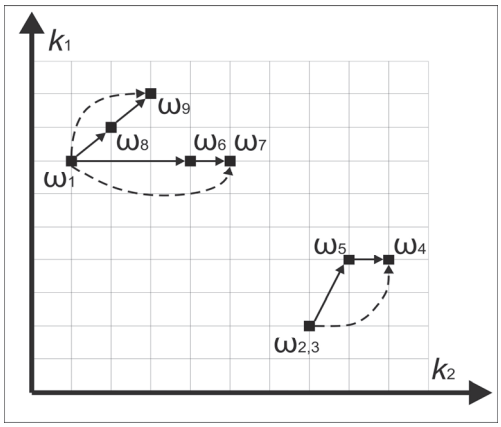


Рис. 2. Транзитивный граф $G^T(\Omega, U^T)$

Для установления закономерности идентификации транзитивных дуг в связанных «тройках» вершин, выделим их тоном (табл. 4) и приведем соответствующие им частные графы, включающие как неранзитивные, так и транзитивные дуги.

Заметим, что выделенные элементы образуют в таблице некоторый прямоугольный треугольник с транзитивно замыкающей дугой в вершине прямого угла (рис. 3 и 4), помеченной «темным» и «решеткой». Выделенные в АМ области с «1» позволяют интерпретировать матричное представление в соответствующие фрагменты графа (рис. 3 и 4).

Таблица 3

Транзитивное фактор-множество $G^T(\Omega,U^T)$ для $A_{12}^T = A_1^T \bigcap_\pi A_2^T$

	$O_1(\omega_1)$	$O_2(\omega_2)$	$O_3(\omega_3)$	$O_4(\omega_4)$	$O_5(\omega_5)$	$O_6(\omega_6)$	$O_7(\omega_7)$	$O_8(\omega_8)$	$O_9(\omega_9)$
ω_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ω_2	0	0	**1**	0	0	0	0	0	0
ω_3	0	**1**	0	0	0	0	0	0	0
ω_4	0	**1**	**1**	0	**1**	0	0	0	0
ω_5	0	**1**	**1**	0	0	0	0	0	0
ω_6	**1**	0	0	0	0	0	0	0	0
ω_7	**1**	0	0	0	0	**1**	0	0	0
ω_8	**1**	0	0	0	0	0	0	0	0
ω_9	**1**	0	0	0	0	0	0	**1**	0

Таблица 4

	$O_1(\omega_1)$	$O_2(\omega_2)$	$O_3(\omega_3)$	$O_4(\omega_4)$	$O_5(\omega_5)$	$O_6(\omega_6)$	$O_7(\omega_7)$	$O_8(\omega_8)$	$O_9(\omega_9)$
ω_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ω_2	0	0	1	0	0	0	0	0	0
ω_3	0	1	0	0	0	0	0	0	0
ω_4	0	1	1	0	1	0	0	0	0
ω_5	0	1	1	0	0	0	0	0	0
ω_6	1	0	0	0	0	0	0	0	0
ω_7	1	0	0	0	0	1	0	0	0
ω_8	1	0	0	0	0	0	0	0	0
ω_9	1	0	0	0	0	0	0	1	0

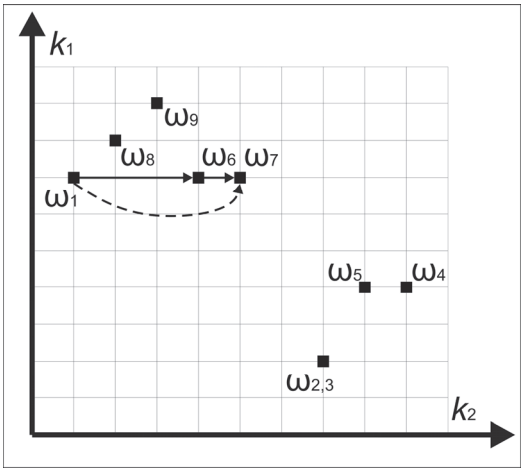


Рис. 3. Транзитивный граф для $\omega_1, \omega_6, \omega_7$

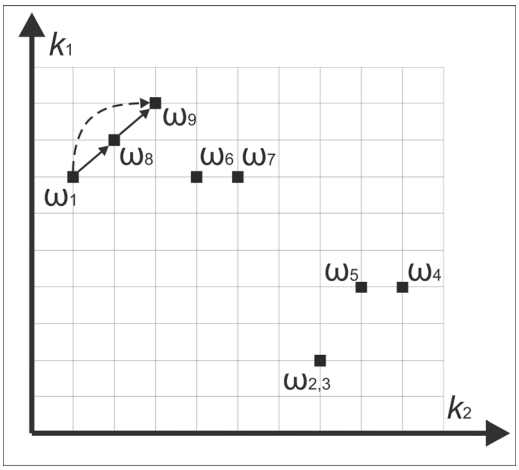


Рис. 4. Транзитивный граф для $\omega_1, \omega_8, \omega_9$

Таблица 5

Ассоциативная матрица $A_{12}^T = A_1^T \bigcap_x A_2^T$.

	$O_1(\omega_1)$	$O_2(\omega_2)$	$O_3(\omega_3)$
ω_1	a_{11}	a_{12}	a_{13}
ω_2	a_{21}	a_{22}	a_{23}
ω_3	a_{31}	a_{32}	a_{33}

Элементы $a_{21} = a_{31} = a_{32} = 1$, ***остальные - «0»***

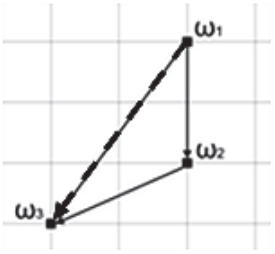


Рис. 5. Транзитивный граф, соответствующий табл. 5

Рассмотрим замеченную тенденцию более рафинировано, что поможет сформировать формальное правило на указание транзитивных дуг в ассоциативной матрице.

Опираясь на выявленные тенденции, сформируем три правила: одно – для понимания расположения указателей дуг в ассоциативной матрице, другое – для создания алгоритма поиска транзитивно замыкающих дуг, третье – о последовательности анализа строк.

Первое правило легко формулируется из свойств табл. 5.

Правило 1

Если элемент $a_{n1,m1} = 1$ *и элемент* $a_{n2,m2} = 1$, *причем* $n1 \neq n2$ *и* $m1 \neq m2$, *и если элемент, имеющий индексы у элемента* $a_{n1,m2}$, *тоже равен* «1», *то он указывает на транзитивно замыкающую дугу.*

Второе правило для ситуации, «*зеркальной*» по отношению к ***Правилу 1,*** которое позволяет проверить дугу на транзитивность.

Правило 2

Если элемент $a_{n1,m1} = 1$, *и найдутся элементы* $a_{n2,m2} = 1$, *а также элемент* $a_{m2,m1} = 1$, *то элемент* $a_{n1,m1} = 1$ *указывает на транзитивно замыкающую дугу.*

Существует одно очень важное уточнение, которое сложно заметить при простом анализе матрицы. Продемонстрируем его на примере табл. 6 и рис. 6.

Таблица 6

Ассоциативная матрица $A_{12}^T = A_1^T \bigcap_x A_2^T$.

	$O_1(\omega_1)$	$O_2(\omega_2)$	$O_3(\omega_3)$	$O_4(\omega_4)$
ω_1	$a_{11} = 0$	$a_{12} = 1$	$a_{13} = 1$	$a_{14} = 1$
ω_2	$a_{21} = 0$	$a_{22} = 0$	$a_{23} = 1$	$a_{24} = 1$
ω_3	$a_{31} = 0$	$a_{32} = 0$	$a_{33} = 0$	$a_{34} = 1$
ω_4	$a_{41} = 0$	$a_{42} = 0$	$a_{43} = 0$	$a_{44} = 0$

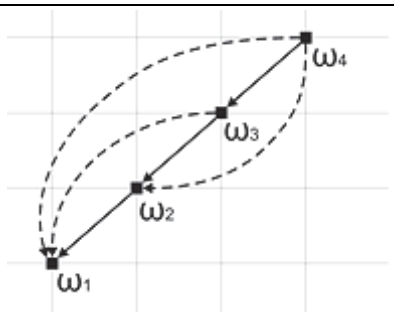


Рис. 6. Граф с «внешними» и «внутренними» транзитивными дугами

В табл. 6 разными оттенками обозначены все транзитивно замыкающие дуги. Необходимо удалить дугу, замыкающую самые дальние вершины графа, помеченную наиболее темным тоном. Проблема заключается в том, что отдельные дуги, которые она замыкает, сами являются транзитивно замыкающими. Отсюда, необходимо удалить вначале «внешние» дуги, иначе может возникнуть ситуация, когда указатель на дугу будет удален раньше ее самой. Так, например, произойдет, если удалить дугу 3–1 (элемент a_{13}) или дугу 4–2 (элемент a_{24}). Анализируя матрицу, можно установить, что «внешние» дуги располагаются в строках с б*о*льшим количеством элементов.

Правило 3. *Поиск элементов, идентифицирующих транзитивно замыкающие дуги, необходимо начинать со строки, имеющей наибольшую сумму элементов (т. е. содержащую наибольшее количество «1»-х элементов).*

Установленные правила позволяют перейти к формальной записи алгоритма.

Для начала, введем следующие формальные обозначения: *n* – строка; Σ *n* = *N*; *m* – столбец;

$\Sigma\, m = M$; $a_{n,m}$ – элемент ассоциативной матрицы размерности $N \times M$.

Описание алгоритма исключения транзитивных дуг

На этапе 1°, следуя *Правилу 3*, в матрице ищется строка с максимальным количеством ненулевых элементов (дуг). Мощность множества единичных элементов в искомой строке – $\left|\omega_{\text{рез},n_{\max}}\right|$. Выявив строку с максимальным количеством единиц, можно приступать к ее анализу. Анализ заключается в проверке каждого из «1»-х элементов найденной строки по *Правилу 2*. Проверка производится в несколько этапов, условно их можно обозначить так: «поиск проверочного элемента», «поиск опорного элемента» и «проверка контрольного элемента».

На *втором этапе* 2° алгоритм выполняет поиск «*проверочного элемента*»; если он найден, то анализ продолжается, иначе – происходит переход к следующему элементу, если такой присутствует (п. 2.1°).

$$2^\circ\ a_{n_{\max},m} = \begin{cases} 0, \text{ то к } 2.1^\circ, \ \forall m = \{1, M\}; \\ 1, \text{ то к } 3^\circ, \ m \text{ в память}. \end{cases} \quad 2.1^\circ\ (m+1), \text{если} \begin{cases} m \le M, \text{то к } 2^\circ; \\ m > M, \text{то выход}. \end{cases}$$

На *третьем этапе* 3° осуществляет поиск «*опорного элемента*». Необходимо отметить, что здесь вводится новый счетный элемент *k*, а также происходит проверка на совпадение элемента, найденного на этапе 2° и 3° в п. 3.1°. В остальном действия на этапе 3°, аналогичны этапу 2°.

$$3^\circ\ a_{n_{\max},k} = \begin{cases} 0, \text{ то к } 3.2^\circ; \\ 1, \text{ то к } 3.1^\circ. \end{cases}$$

$$3.1^\circ \text{ если} \begin{cases} k = m, \text{ то к } 3.2^\circ, \ \forall k = \{1, M\}; \\ k \ne m, \text{ то к } 4^\circ, \ k \text{ в память}. \end{cases} \quad 3.2^\circ\ (k+1), \text{если} \begin{cases} k \le M, \text{то к } 3^\circ; \\ k > M, \text{то выход}. \end{cases}$$

На *четвертом этапе* 4° реализуется проверка «*контрольного элемента*» посредством применения *Правила 2*. Таким образом, если условие выполнено, то транзитивная дуга удаляется, иначе – поиск продолжается.

$$4^\circ\ a_{k,m} = \begin{cases} 0, \text{ то к } 2.1^\circ, \ k = 1; \\ 1, \text{ то } a_{n,m} = 0, \text{ к } 2.1^\circ, \ k = 1. \end{cases}$$

Когда все элементы строки проверены, происходит переход к следующей по мощности количества «1» строке и алгоритм повторяется до окончания анализа всей матрицы. Конечным результатом процесса поиска будет построение нетранзитивной ассоциативной матрицы A_{12}, из которой удалены все элементы, указывающие на транзитивно замыкающие дуги. Графическую интерпретацию алгоритма можно представить в виде блок схемы, отраженной на рис. 7.

ПРИМЕР. Рассмотрим в качестве примера работу алгоритма выбора аналога, реализующего переход от транзитивного к нетранзитивному графу частичного порядка. Пусть исходным множеством Ω является набор транзисторов, представленный в табл. 1. и ее ассоциативном представлении для $G^T_{\pi}(\Omega/\{k_1, k_2\})$ (табл. 7).

Исходное состояние: количество исследуемых строк $N = 9$; счетчик $i = 1$;

1. Найдем номер строки, содержащей наибольшее количество единиц: $n = 4$ (табл. 7).

2. Далее необходимо перейти к подробному анализу выбранной строки в табл. 7.

3. Ищем первую единицу в строке $n = 4$ (табл. 7). Исследуемая строка здесь выделена светлым, а элемент, содержащий первую единицу – более темным тоном. Этот элемент указывает на возможную транзитивно замыкающую дугу ($a_{42} = 1$), поэтому необходимо это проверить. Переходим к следующему этапу алгоритма.

4. Так как элемент $a_{42} = 1$, то необходимо проверить элемент $a_{4,k} = 1$? Проверяем элементы по порядку. Первым элементом, который полностью удовлетворяет условиям при $k = 3$, является $a_{4,3} = 1$. В табл. 7 этот элемент выделен наклонной штриховкой.

5. На следующем этапе поиска транзитивной дуги следует проверить, существует ли третья дуга в «тройке»? Для этого необходимо рассчитать координаты третьего элемента по *Правилу 2*. В общем случае, в формализмах разработанного алгоритма, согласно *Правилу 2,* третий элемент – это элемент $a_{k,m}$, для которого

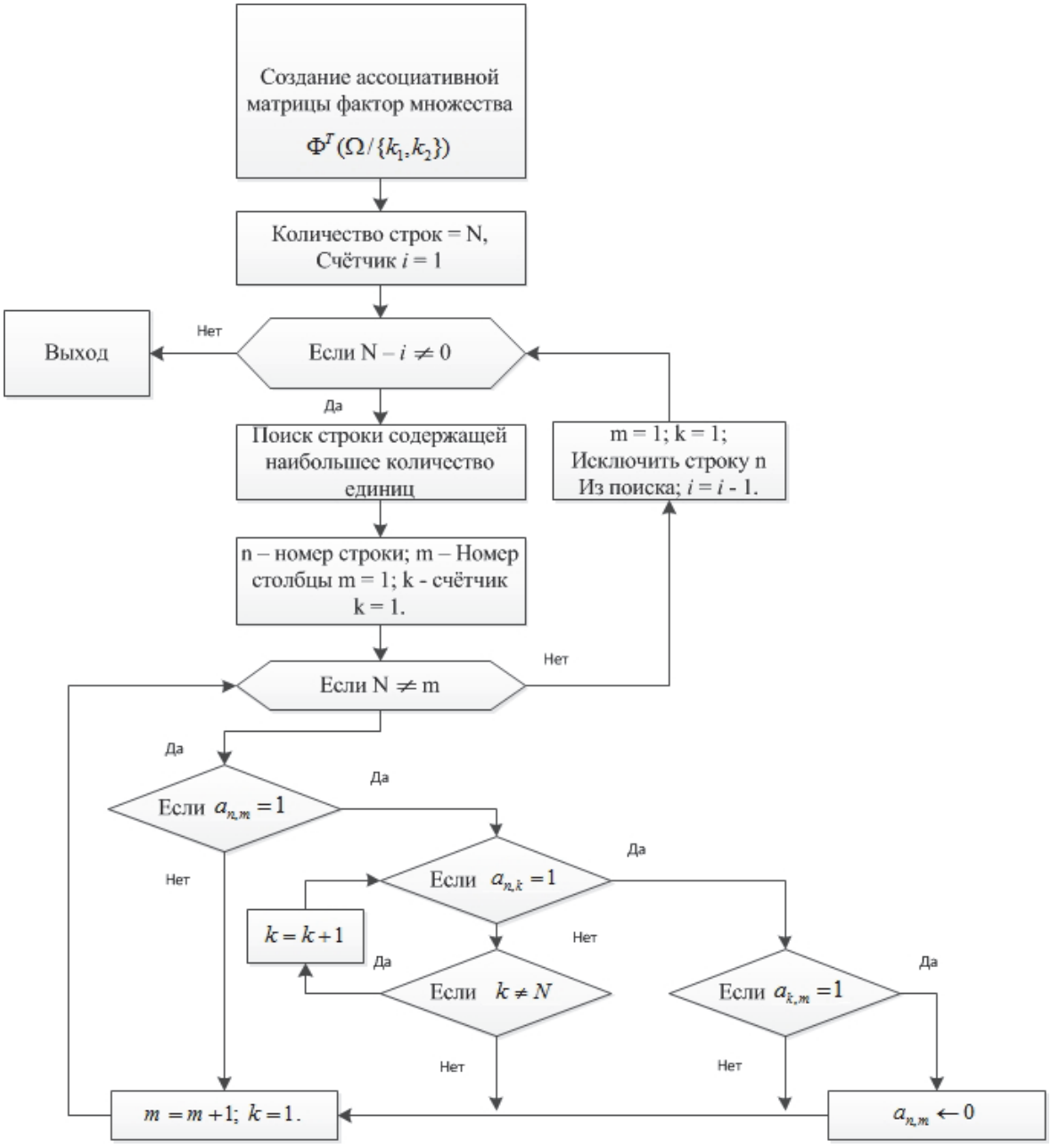


Рис. 7. Блок-схема алгоритма поиска транзитивных дуг

Таблица 7

Ассоциативная матрица $A_{12}^T = A_1^T \bigcap_x A_2^T$.

	$O_1(\omega_1)$	$O_2(\omega_2)$	$O_3(\omega_3)$	$O_4(\omega_4)$	$O_5(\omega_5)$	$O_6(\omega_6)$	$O_7(\omega_7)$	$O_8(\omega_8)$	$O_9(\omega_9)$
ω_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ω_2	0	0	1	0	0	0	0	0	0
ω_3	0	1	0	0	0	0	0	0	0
ω_4	0	1	1	0	1	0	0	0	0
ω_5	0	1	1	0	0	0	0	0	0
ω_6	1	0	0	0	0	0	0	0	0
ω_7	1	0	0	0	0	1	0	0	0
ω_8	1	0	0	0	0	0	0	0	0
ω_9	1	0	0	0	0	0	0	1	0

m = 2 и k = 3. Проверим найденный элемент $a_{3,2}$= 1→?. В табл. 7 он помечен вертикальной штриховкой; дуга, которая проверяется на транзитивность – темным тоном, а первая из найденных дуг – наклонной штриховкой. Таким образом, в процессе проверки элементов, в соответствии с разработанным алгоритмом, выделена искомая «тройка» связанных дуг, причем, согласно *Правилам 1, 2, 3* элемент $a_{4,2}$ указывает на транзитивно замыкающую дугу, которая может быть удалена из графа.

6. Обнулим элемент $a_{4,2} \leftarrow 0$, тем самым удаляя указатель на транзитивно замыкающую дугу и, как следствие, саму дугу. Повторим описанные выше этапы алгоритма (1–6) для строки 5 и остальных строк в порядке убывания мощности наличия в строке «1», устраняя тем самым все транзитивные элементы. При этом исходная табл. 7 трансформируется в табл. 8. Результатом выполнения алгоритма является установленный нетранзитивный частичный порядок, представляющий собой диаграмму Хассе.

Таблица 8

Результирующая ассоциативная матрица A_{12} для диаграммы Хассе

	$O_1(\omega_1)$	$O_2(\omega_2)$	$O_3(\omega_3)$	$O_4(\omega_4)$	$O_5(\omega_5)$	$O_6(\omega_6)$	$O_7(\omega_7)$	$O_8(\omega_8)$	$O_9(\omega_9)$
ω_1	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*
ω_2	*0*	*0*	**1**	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*
ω_3	*0*	**1**	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*
ω_4	*0*	*0*	*0*	*0*	**1**	*0*	*0*	*0*	*0*
ω_5	*0*	**1**	**1**	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*
ω_6	**1**	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*
ω_7	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	**1**	*0*	*0*	*0*
ω_8	**1**	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*
ω_9	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	**1**	*0*

Результирующий граф частичного порядка показан на рис. 8. Такое представление структурированного множества наглядно отражает отношение вариантов, приведенных в неупорядоченной таблице компонентов (табл. 1), и позволяет быстро анализировать его по заданным показателям качества для заданных прототипов. Проверить входящие и исходящие из прототипа дуги на предполагаемые аналоги остается только на допустимость.

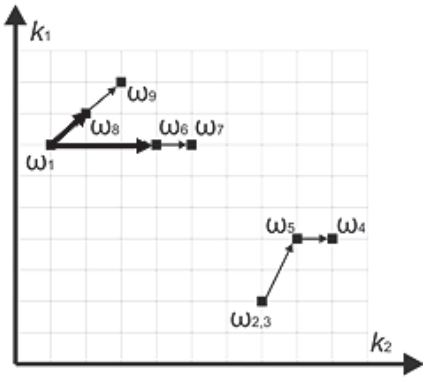


Рис. 8. Диаграмма Хассе

Так, если прототипом является импортный транзистор ω_1 = 2N1300 (табл. 1), то, судя по диаграмме Хассе в критериальном пространстве π $\{k_1, k_2\}$ его аналогами (при условии допустимости) будут варианты ω_8, ω_6. Разработанный алгоритм используется в учебном процессе на кафедре РПУ НИУ «МЭИ» и ряде предприятий.

Заключение

В работе предложен простой и надежный алгоритм *выбора аналогов для заданного прототипа*, позволяющий решать поставленную задачу с помощью неметрических безусловных критериев посредством перехода от транзитивного графа частичного порядка к диаграмме Хассе через удаление всех транзитивных дуг; при этом на аналоги для заданного прототипа указывают ближайшие к заданному прототипу нетранзитивные дуги.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кандырин, Ю. В.* Методы и модели многокритериального выбора вариантов в САПР : учеб. пособие для вузов / Ю. В. Кандырин. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 172 с.

2. *Кандырин, Ю. В*. Алгоритмы установления приоритетов объектов по техническим показателям в целях назначения оптимальной очередности их ремонтов / Ю. В. Кандырин, А. М. Кошелев // Вестник информационных и компьютерных технологий. – М.: Машиностроение, 2006. – № 7. – С. 18–26.

3. *Кандырин, Ю. В*. Принципы построения информационных систем для автоматизированного многокритериального выбора / Ю. В. Кандырин // Радиотехника. – М., 1999. – № 5. – С. 32–37.

4. *Горбатов, В. А.* Теория частично упорядоченных систем / В. А. Горбатов. – М.: Сов. радио, 1976. – 336 с.

УДК 62-272.5:681.5.512.2.011.056

Ю. В. Кандырин, А. Д. Чивилев

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ВЫБОР НЕХУДШИХ ВАРИАНТОВ ПЕРЕДАЧИ «ВИНТ-ГАЙКА» В ПРИВОДАХ ЗЕРКАЛЬНЫХ АНТЕНН

Национальный исследовательский университет «МЭИ» г. Москва

ywk@mail.ru, 4ibis-88@mail.ru

Рассматриваются способы решения задачи выбора оптимального варианта передачи винт-гайка скольжения, применительно к полноповоротным зеркальным параболическим антеннам. Приведен алгоритм выбора, необходимый для последующего создания САПР механических приводов АУ РЭС.

Ключевые слова: многокритериальный выбор, механический привод, винт-гайка, антенна, САПР, критерий Парето, частичный порядок.

Y. V. Kandyrin, A. D. Chivilyov

AUTOMATED SELECTION NOT THE WORST OPTIONTRANSFER «SCREW-NUT» IN THE DRIVE THE DISH

National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow

The methods of solving the problem of optimal variant transmission screw nut slip, with respect to full-circle mirrored parabolic antennas. The algorithm choices necessary for the subsequent creation of CAD mechanical drives AU RECs.

Keywords: multi-criteria selection, mechanical drive, screw-nut, antenna, CAD, the Pareto criterion, the partial order.

Введение

Основной задачей механических узлов антенных устройств (АУ) является перемещение зеркальной системы (ЗС) антенны в требуемом направлении. Развитие техники заставляет в настоящее время предъявлять высокие требования к точности наведения ЗС. Задачей конструктора является обеспечение требуемой точности и скорости наведения АУ с помощью механической передачи.

Одним из наиболее часто встречающихся вариантов решения задачи перемещения ЗС АУ по угломестной оси (УМ) является применение передачи винт-гайка скольжения. Ее популярность обусловлена простотой конструкции, большой несущей способностью при малых габаритных размерах, высокой точностью перемещения, а при однозаходной резьбе такие передачи обеспечивают самоторможение [3].

Габаритные размеры передачи винт-гайка скольжения стандартизированы, выбор материала передачи и ее габариты определяются по проектировочному расчету. Из-за трудоемкости расчета и ограниченных сроков выполнения задания зачастую выбираются неоптимальные варианты исполнения передачи. В качестве фактора, определяющего оптимальность выбора, выступает личный опыт лица, принимающего решение (ЛПР).

Данная работа посвящена оптимизации построения системы механического привода, относящегося к типу винт-гайка скольжения. В целом оптимизация может быть осуществлена на основе многовариантного синтеза с последующим выбором оптимального варианта структурно-параметрического построения, при котором обеспечивается наибольшая эффективность системы в принятом смысле. Под *эффективностью* обычно понимается степень соответствия системы своему назначению. Отметим, что понятие эффективности – субъективное понятие, отражающее представление проектировщика (заказчика) о качестве системы [2].

В предлагаемой работе рассматриваются задачи по созданию алгоритма, позволяющего в процессе разработки механической передачи «винт-гайка»:

– производить расчет исходных данных по условиям, приведенным в техническом задании (ТЗ);

– формировать область вариантов исполнения передачи винт-гайка скольжения;

– накладывать ограничения шаг за шагом на полученную область;

– *формировать область допустимых решений;*

– *производить выбор* π*-оптимальных решений.*

Такая логика решения позволяет выбрать оптимальные варианты, отвечающие требованиям ТЗ, и существенно сократить время проектирования.

Для создания алгоритма расчета и выбора оптимального механизма винт-гайка скольжения необходимо проанализировать внешние характеристики, оказывающие влияние на данный тип механической передачи и соответственно выделить основные. Набор внешних характеристик символически можно подразделить на условия, ограничения и показатели качества: {У}, {О} и {ПК}, что необходимо для поиска оптимального решения в конкретно поставленной задаче.

Основные характеристики передачи винт-гайка скольжения

На рис. 1 показана схема работы винтовой пары. Винтовую пару необходимо установить на подвеску УМ через качающееся соединение, так как траектория движения винта не прямая. Для осуществления перемещения зеркала, его необходимо соединить с винтовой парой.

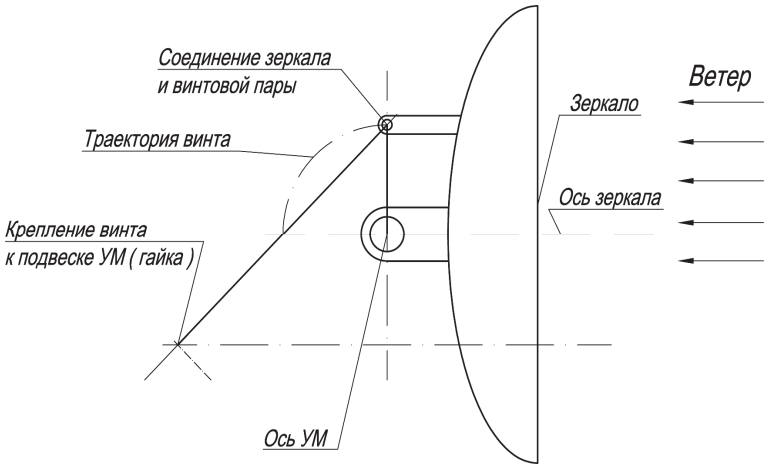


Рис. 1. Схема работы винтовой пары

Отметим важное обстоятельство. В передачах винт-гайка скольжения используется трапецеидальная резьба. В ГОСТ 24737–81 для трапецеидальной резьбы стандартизованы профиль резьбы и ее основные характеристики. Всего в стандарте представлено более 200 вариантов исполнения трапецеидальной резьбы; рассматривая варианты исполнения гайки (разъемная, цельная, сдвоенная), получим уже больше 600 вариантов исполнения передачи. Также необходим выбор материала винта и гайки, так как характеристики материалов оказывают существенное влияние на характеристики передачи. Таким образом, число вариантов становится достаточно большим, чтобы провести их полное сравнение без применения средств автоматизации вычислений. Создание эффективного алгоритма расчета требует анализа взаимосвязей, существующих между элементами исследуемого механизма. Рассмотрим эти связи подробнее.

Предварительно характеристики передачи винт-гайка скольжения определяют из соотношения:

$$d_2 = \sqrt{\frac{2P_{\text{пр}\,max}}{\pi\gamma|q|}}, \qquad (1)$$

где γ – коэффициент высоты гайки, который назначает ЛПР; $|q|$ – коэффициент, учитывающий трение стали (материал винта) по бронзе (материал гайки); $P_{\text{пр max}}$ – максимальная нагрузка, действующая вдоль оси привода.

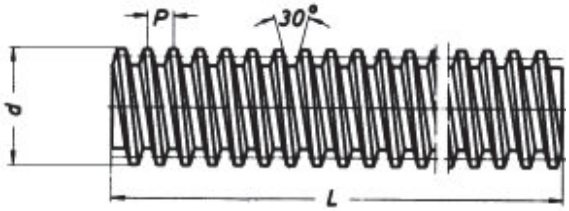


Рис. 2. Трапецеидальная резьба

Трапецеидальная резьба характеризуется: наружным $d(D)$, внутренним $d_1(D_1)$ и средним d_2 (D_2) диаметрами (d относится к винту, D – к гайке); $H_г$ – высотой гайки; шагом резьбы p; рабочей высотой профиля h'; углом профиля α; числом заходов z; ходом резьбы $p_z = p\ z$ (как

было сказано ранее, используется однозаходная резьба, следовательно $p_z = p$); углом подъема резьбы ψ.

Следовательно, для определения допустимых габаритов винтовой передачи необходимо определить нагрузку, действующую вдоль оси винта, при различном угле поворота ЗС относительно оси УМ и выявить ее максимальное значение.

Нагрузку $P_{\text{пр}}$, действующую вдоль оси привода, определим из выражения

$$P_{\text{пр}} = \frac{M_{\Sigma}}{L_{\text{пр}}}, \qquad (2)$$

где $L_{\text{пр}}$ – рабочая длина винта [мм]; M_{Σ} – суммарный момент, действующий на винтовую пару.

Значения $L_{\text{пр}}$ и M_{Σ} изменятся при изменении угла поворота ЗС. Для определения рабочей длины винта выполняют прочерчивание схемы поворота зеркала в диапазоне от 0 до 90° с шагом в 15°. Данный метод не подходит для решения задачи автоматизации расчета привода винт-гайка скольжения. Поэтому для решения поставленной задачи была разработана методика расчета, представленная ниже.

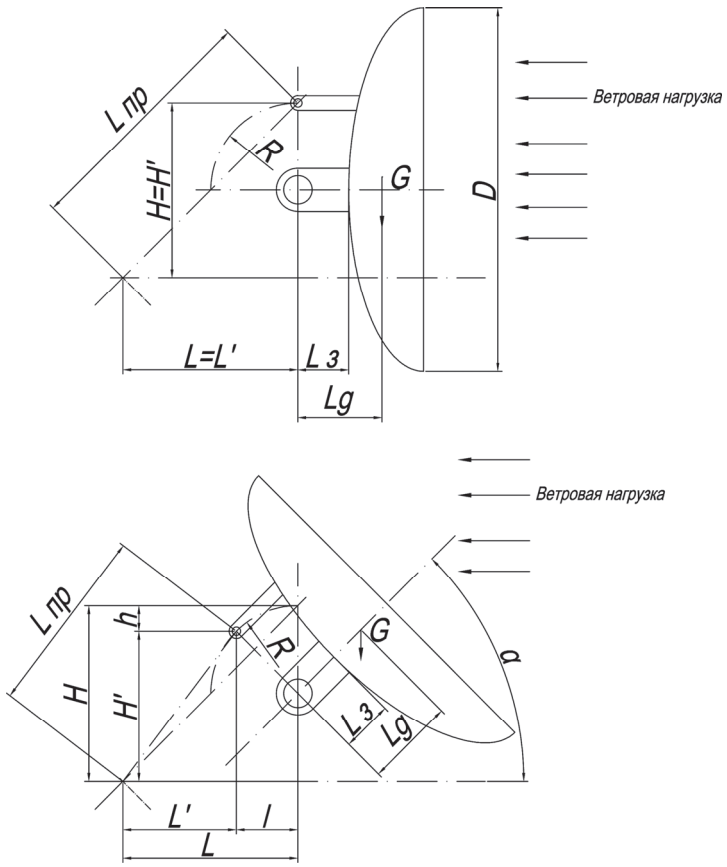


Рис. 3. Углы поворота зеркала

На рис. 3 показаны основные параметры, необходимые для расчета нагрузки на винтовой привод.

Параметры, назначаемые ЛПР: H – расстояние от точки крепления винта к зеркалу до точки установки привода на подвеску УМ, при нахождении зеркала в положении ГОРИЗОНТ (α=0°) [мм]; L – расстояние от оси поворота до точки установки привода на подвеску УМ, при нахождении зеркала в положении ГОРИЗОНТ (α=0°) [мм]; H' – расстояние от точки крепления винта к зеркалу до точки установки привода на подвеску УМ, при повороте зеркала [мм]; L' – расстояние от оси поворота до точки установки привода на подвеску УМ, при повороте зеркала [мм]; $L_З$ – расстояние от оси поворота до зеркала [мм]; R – расстояние от оси поворота до точки крепления винта к зеркалу [мм]; L_G – расстояние от оси поворота до центра тяжести зеркала [мм].

Возможна вариация вышеперечисленных параметров, если конечный результат не удовлетворяет требованиям ТЗ (например, угловая скорость поворота зеркала при полученной рабочей длине винта будет ниже требуемой по ТЗ).

Данные, указанные в ТЗ:

D – диаметр зеркала [мм];

G – вес зеркала [Н];

α – угол поворота зеркала [°] (в ТЗ указывается диапазон значений угла поворота).

Определение рабочей длины винта

Рабочую длину винта $L_{пр}$ определим из следующих соображений (см. рис. 3):

$$L_{пр} = \sqrt{L'^2 + H'^2}, \quad (3)$$

$$L' = L - l, \quad (4)$$

$$H' = H - h. \quad (5)$$

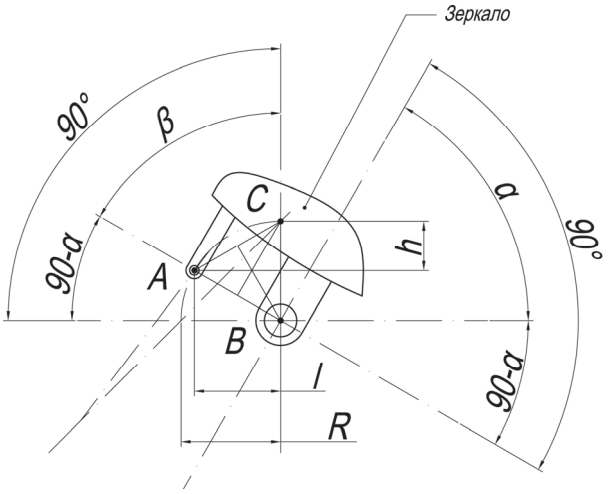


Рис. 4. Изменение рабочей длины винта

Для определения значений *l* и *h* рассмотрим увеличенное изображение, показывающее изменение рабочей длины винта (рис. 4).

Определим значение угла β – угла между осью УМ и перпендикуляром к оси зеркала. По данным рис. 4 можно утверждать, что

$$B = 90 - (90 - \alpha) = \alpha.$$

$$\beta = \alpha \quad (6)$$

Далее рассмотрим Δ *ABC*, являющийся равнобедренным. *AB*=*BC*=*R*.

Следовательно, можно утверждать, что

$$AC = 2R\sin\alpha. \quad (7)$$

Определим значение *l*:

$$l = R\sin\alpha. \quad (8)$$

Определим значение *h*:

$$h = \sqrt{AC^2 - l^2}, \quad (9)$$

$$h = \sqrt{3}R\sin\alpha. \quad (10)$$

Подставив (8) и (10) в (3), получим:

$$L_{пр} = \sqrt{(L - R\sin\alpha)^2 + (H - \sqrt{3}R\sin\alpha)^2}. \quad (11)$$

Определение суммарного момента

Суммарный момент, действующий на винтовую пару

$$M_{\Sigma} = M_{вет} + M_{вес}. \quad (12)$$

Вес зеркала создает крутящий момент $M_{вес}$ (рис. 3):

$$M_{вес} = G \cdot L_G \cos\alpha. \quad (13)$$

Крутящий момент, создаваемый ветровой нагрузкой $M_{вет}$ (рис. 3):

$$M_{вет} = w_m \cdot S \cdot \sin\alpha \cdot L_3 \cdot \cos\alpha, \quad (14)$$

где *S* – площадь зеркала; определяется по формуле

$$S = \frac{\pi D^2}{4}; \quad (15)$$

w_m – нормативное значение средней составляющей ветровой нагрузки на высоте *z* над поверхностью земли (см. СНиП 2.01.07–85 «Нагрузки и воздействия»).

$$w_m = w_0 kc. \quad (16)$$

Здесь w_0 – нормативное значение ветрового давления; *k* – коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте; *c* – аэродинамический коэффициент.

Подставив выражения (15) и (16) в (14), получим:

$$M_{вет} = w_0 kc \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \sin\alpha \cdot L_3 \cdot \cos\alpha. \quad (16)$$

Подставив (16) и (13) в (12), получим:

$$M_{\Sigma} = w_0 kc \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \sin\alpha \cdot L_3 \cdot \cos\alpha + G \cdot L_G \cos\alpha. \quad (17)$$

Определение максимальной осевой нагрузки

Окончательно формула определения осевой нагрузки на привод, в зависимости от угла поворота, выглядит следующим образом:

$$P_{пр} = \frac{w_0 kc \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \sin\alpha \cdot L_3 \cdot \cos\alpha + G \cdot L_G \cos\alpha}{\sqrt{(L - R\sin\alpha)^2 + (H - \sqrt{3}R\sin\alpha)^2}} \quad (18)$$

Далее необходимо вычислить значения Рпрmax путем сравнения значений Рпр при различных углах поворота. Для этого следует задать диапазон значений угла поворота, а также шаг (максимальное значение шага 15°).

Формирование области допустимых решений

На первом этапе по формуле (1) вычисляется совокупность значений d_2, необходимых для

формирования области возможных решений поставленной задачи. На множество вариантов исполнения винтовой передачи накладывается ограничение

$$d_2 \geq \sqrt{\frac{2P_{\text{пр}\,max}}{\pi\gamma|q|}}. \quad (19)$$

Определенные ограничения накладываются на варианты, исходя из свойств материала винта. Перечислим требования в формализованном виде [3], которым должны соответствовать допустимые варианты. Износостойкость резьбы:

$$|q| \geq \frac{2P_{\text{пр}}}{\pi\gamma d_2^2}. \quad (20)$$

Прочность витков гайки на срез

$$0{,}2\sigma_T \geq \frac{P_{\text{пр}}}{0{,}65\pi\gamma D\, d_2}, \quad (21)$$

σ_T – предел текучести материала [МПа].

Запас прочности винта

$$\frac{\frac{\pi d_1^2\sigma_{-1}}{4P_{\text{пр}}}\frac{0{,}2d_1^3\tau_{-1}}{0{,}5P_{\text{пр}}d_2 tg(arctg(pz/\pi d_2)+arctg(0{,}2\cos(\alpha/2)))}}{\sqrt{(\frac{\pi d_1^2\sigma_{-1}}{4P_{\text{пр}}})^2+(\frac{0{,}2d_1^3\tau_{-1}}{0{,}5P_{\text{пр}}d_2 tg(arctg(pz/\pi d_2)+arctg(0{,}2\cos(\alpha/2)))})^2}} \geq 1{,}5; \quad (22)$$

$\tau_к$; σ_{-1}; τ_{-1} – пределы выносливости при симметричном цикле.

Далее необходимо определить значение осевой критической силы $P_{\text{пр кр}}$ [Н]:

$$P_{\text{пр кр}} = \pi^2 E\left(\frac{\pi d_1^4}{64}\right)(0{,}4+\frac{0{,}6d}{d_1})/(L_{\text{пр}})^2; \quad (23)$$

E – модуль упругости материала винта [МПа].

Проверка на продольную устойчивость:

$$P_{\text{пр кр}} \geq 3P_{\text{пр}}. \quad (24)$$

По результатам проведенного исследования составим сводную таблицу внешних характеристик системы «винт-гайка». В таблице выделены характеристики, являющиеся показателями качества для рассматриваемой системы.

Таблица 1

Внешние характеристики передачи винт-гайка скольжения

ωi	d	d_1	D_1	$D_2=d_2$	γ	$\|q\|$	σ_T	$\tau_к$	σ_{-1}	τ_{-1}	$C_{\text{отн}}$	$P_{\text{прkр}}$

$C_{\text{отн}}$ – относительная стоимость материала винта (за «1» принята стоимость материала «Сталь 40»). В табл. 2 представлен пример области допустимых решений при выборе передачи винт-гайка скольжения для заданных ограничений.

Таблица 2

Варианты исполнения передачи винт-гайка скольжения

ω_i	d	$P_{\text{прkр}}$	$C_{\text{отн}}$
ω_1	30	54149	1,3
ω_2	32	72068	1
ω_3	36	50234	1
ω_4	38	125032	1
ω_5	38	106688	1
ω_6	38	67285	1
ω_7	30	54149	1,5

Поиск нехудших решений по критерию Парето

Для автоматизации решения задач построения критериально структурированных множеств необходимо использовать такие модели данных для хранения фактор-множеств, которые позволяли бы осуществлять логические операции, основанные на булевой алгебре, для того, чтобы алгоритмизировать процессы решения. Таким образом, методы решения задач должны быть тесно увязаны с моделями хранимых данных об альтернативах. От подобных моделей данных также требуется компактность хранения информации и оптимальные пути доступа к ней. Этим требованиям наиболее полно удовлетворяют ассоциативные структуры, модифицированные версии которых и предлагается использовать при решении задач, поставленных в диссертации. Эти структуры содержат минимально возможное количество информации, достаточное, однако, для сохранения всей информации о приоритетах между вариантами [2].

Фактор-множество произвольной размерности можно получить путем пересечения фактор-множеств окрестностей альтернатив более низкой размерности [2]:

$$\Phi(\Omega/\{k_1,\ldots,k_M\}) = \Phi(\Omega/k_1) \cap \Phi(\Omega/k_2) \cap \ldots \cap \Phi(\Omega/k_M).$$

В табл. 3 сведены фактор-множества низших размерностей и результирующее фактор-множество в трехмерном пространстве показателей качества для π-критерия.

Таблица 3

Представление результирующего фактор-множества $\Phi_\Omega/\{k_1, k_2, k_3\}$)

ω_i	Φ_Ω/ d_2	$\Phi_\Omega/ P_{\text{пркр}}$	$\Phi_\Omega/ C_{\text{отн}}$	$\Phi_\Omega/\{ d_2, P_{\text{пркр}}, C_{\text{отн}} \})$
ω_1	ω_7	$\omega_2, \omega_4, \omega_5, \omega_6, \omega_7$	$\omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5, \omega_6$	∅
ω_2	ω_1, ω_7	ω_4, ω_5	$\omega_3, \omega_4, \omega_5, \omega_6$	∅
ω_3	$\omega_1, \omega_2, \omega_7$	$\omega_1, \omega_2, \omega_4, \omega_5, \omega_6, \omega_7$	$\omega_2, \omega_4, \omega_5, \omega_6$	**ω_2**
ω_4	$\omega_1,\omega_2, \omega_3, \omega_5, \omega_6, \omega_7$	∅	$\omega_2, \omega_3, \omega_5, \omega_6$	∅
ω_5	$\omega_1,\omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_6, \omega_7$	$\omega_4,$	$\omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_6$	**ω_4**
ω_6	$\omega_1,\omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5, \omega_7$	$\omega_2, \omega_4, \omega_5$	$\omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5$	**$\omega_2, \omega_4, \omega_5$**
ω_7	ω_1	$\omega_1, \omega_2, \omega_4, \omega_5, \omega_6,$	$\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5, \omega_6$	**ω_1**

Итак, нехудшими при π-постановке π(Ω/{d_2, $P_{\text{пркр}}$, $C_{\text{отн}}$ }) являются альтернативы: {ω_1, ω_2, ω_4}. Аналогичный результат получается при определении промежуточных фактор-множеств для двоек ПК {$C_{\text{отн}}$, d_2}, {$C_{\text{отн}}$, $P_{\text{пркр}}$}, {d_2, $P_{\text{пркр}}$}, соответственно, Φ(Ω/π{$C_{\text{отн}}$, d_2}), Φ(Ω/π{$C_{\text{отн}}$, $P_{\text{пркр}}$}), Φ(Ω/π{d_2, $P_{\text{пркр}}$}). Данные множества, как и результат их пересечения $\Phi_\Omega/\{d_2, P_{\text{пркр}}, C_{\text{отн}}\}$), показаны в табл. 4.

Таблица 4

Представление результирующего фактор-множества $\Phi_\Omega/\pi\{ d_2, P_{\text{пркр}}, C_{\text{отн}}\}$)

ω_i	$\Phi_\Omega/\pi\{ C_{\text{отн}}, d_2\})$	$\Phi_\Omega/\pi\{ C_{\text{отн}}, P_{\text{пркр}} \})$	$\Phi_\Omega/\pi\{ d_2, P_{\text{пркр}} \})$	$\Phi_\Omega/\pi\{ d_2, P_{\text{пркр}}, C_{\text{отн}} \})$
ω_1	∅	**$\omega_2, \omega_4, \omega_5, \omega_6$**	**ω_7**	∅
ω_2	∅	**ω_4, ω_5**	∅	∅
ω_3	**ω_2**	**$\omega_2, \omega_4, \omega_5, \omega_6$**	**$\omega_1, \omega_2, \omega_7$**	**ω_2**
ω_4	**$\omega_2, \omega_3, \omega_5, \omega_6$**	∅	∅	∅
ω_5	**$\omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_6$**	**ω_4**	**ω_4**	**ω_4**
ω_6	**$\omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5$**	**$\omega_2, \omega_4, \omega_5$**	**$\omega_2, \omega_4, \omega_5$**	**$\omega_2, \omega_4, \omega_5$**
ω_7	**ω_1**	**$\omega_1, \omega_2, \omega_4, \omega_5, \omega_6,$**	**$\omega_1,$**	**$\omega_1,$**

Исходя из вышеуказанных рассуждений и результатов анализа табл. 4, можно говорить о том, что фактор-множества, полученные для π-критерия, обладают свойствами свободной перестановки пересекаемых элементов и транзитивности. Нехудшими для π-постановки π(Ω/{ d_2, $P_{\text{пркр}}$, $C_{\text{отн}}$ }) и в случае пересечения фактор-множеств для двоек показателей качества являются те же альтернативы {ω_1, ω_2, ω_4}.

Алгоритм поиска нехудших вариантов из множества всех возможных решений представлен на рис. 5.

Техническое задание включает исходные данные, необходимые для расчета: характеристики зеркала, требуемое климатическое исполнение привода, диапазоны углов поворота, требуемую скорость перемещения зеркала и др. На основании ТЗ ЛПР назначает предварительные габариты передачи. Проводится расчет рабочей длины винта и суммарного крутящего момента, действующего на привод. В случае, если результаты расчета не удовлетворяют требованиям ТЗ по допустимости, то ЛПР заново назначает габариты передачи.

После определения длины рабочего хода и суммарного момента становится возможным определение осевой нагрузки $P_{\text{пр0}}$, действующей на привод, при нахождении антенны в положении ГОРИЗОНТ. Далее указывается диапазон перемещения зеркала и шаг, с которым будут браться значения угла поворота для определения максимально действующей на привод нагрузки. После ее определения формируется область решений, удовлетворяющих огра-

ничению (19). Затем поочередно на полученную область накладываются ограничения (20), (21), (22) и (24), с помощью которых формируется область допустимых решений. Сформированные варианты сравниваются по показателям качества, с целью выявления нехудших вариантов. Из нехудших альтернатив ЛПР эвристически выбирает рациональный вариант по ТЗ, либо путем сравнения по другим более сильным критериям проводится дальнейшее усечение Ω_{π}.

Рис. 5. Алгоритм поиска нехудших вариантов из множества всех возможных решений

Выводы

В работе предложен метод автоматизации проектирования и выбора нехудших вариантов исполнения передачи винт-гайка скольжения, применительно к приводу зеркальной антенны. Дальнейшее развитие предложенного алгоритма расчета предполагает применение статистических методов оценки ошибок и использование методов многокритериального выбора по последовательно применяемым критериям. Сравнительный анализ систем управления антенн с различными методами исполнения передачи винт-гайка позволяет провести многокритериальную оценку для совокупности сгенерированных структур передач и найти наиболее рациональный вариант для конкретных проектных задач в заданных условиях эксплуатации. Таким образом, предлагаемая методика решает одну из задач создания инструментальных средств САПР механических приводов АУ РЭС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Диняева, Н. С.* Конструирование механизмов антенн: учеб. пособие / Н. С. Диняева. – М.: Изд-во МАИ, 2002. – 340 с.

2. *Кандырин, Ю. В.* Методы и модели многокритериального выбора вариантов в САПР. Учебное пособие для вузов / Ю. В. Кандырин. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 172 с.

3. *Жуков, К. П.* Проектирование деталей и узлов машин / К. П. Жуков, Ю. Е. Гуревич. – М.: Изд-во Станкин, 2004. – 671 с.

4. *Камаев, В. А.* Применение структурирования функции качества для изменения технических характеристик продукции на основе требований потребителей / В. А. Камаев, Ю. Ю. Андрейчиков // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч.

ст. № 1(27) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 1). – С. 59–64.

5. *Орлов, П. И.* Основы конструирования : Справочно-методическое пособие / П. И. Орлов. В 2-х кн. Кн. 1. – М.: Машиностроение, 1988. – 560 с. Кн. 2. – М.: Машиностроение, 1988. – 544 с.

6. *Кандырин, Ю. В.* Методика автоматизированного многокритериального выбора механического привода зеркальных антенн / Ю. В. Кандырин, А. Д. Чивилев // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 10(97) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 14). – С. 84–91.

УДК 05.13.12

Д. М. Коробкин, К. С. Чекашкина, С. А. Фоменков

МЕТОДИКА ИЗВЛЕЧЕНИЯ ОПИСАНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ

Волгоградский государственный технический университет

dkorobkin80@mail.ru

Данная статья посвящена проблеме извлечения структурированных физических знаний из электронных источников. Предложенная в статье методика извлечения описания физических эффектов основана на аннотировании документа с последующим семантическим анализом выделенного фрагмента. Аннотация документа формируется с помощью метода контекстно-зависимого аннотирования, и по результатам семантического анализа выделяется описание физического эффекта.

Ключевые слова: извлечение описаний физических эффектов, семантический анализ, контекстно-зависимое аннотирование.

D. M. Korobkin, K. S. Chekashkina, S. A. Fomenkov

EXTRACTION METHOD OF DESCRIPTIONS OF PHYSICAL EFFECTS

Volgograd State Technical University

This article is dedicated to the extraction of descriptions of physical effects from electronic sources. The proposed extraction method in the article describing the physical effects based on the annotation of the document followed by a semantic analysis of the selection. Abstract document is generated using the method of context-dependent annotation. And according to the description of semantic analysis is allocated physical effect.

Keywords: the extraction of descriptions of physical effects, semantic analysis, context-sensitive annotation.

На сегодняшний день извлечение структурированной физической информации из электронных источников является актуальной задачей, так как физические эффекты (ФЭ) [1] необходимы для создания новых технических систем. Соответственно необходимо обеспечить эффективное обновление и пополнение базы данных физических эффектов за счет расширения уже существующих и добавления новых описаний ФЭ. Поскольку на данный момент многие открытия в области физики, совершенные иностранными учеными, не переведены на русский язык, и английский язык является языком международным, возникает необходимость в извлечении описаний физических эффектов из англоязычных электронных первоисточников. Существуют различные методы и системы [2, 3] для решения данной проблемы, которые в той или иной степени, однако недостаточно эффективно, обеспечивают ее решение. Для реализации эффективного извлечения описаний физических эффектов была разработана следующая методика.

На первом этапе, на основе составленной ранее базы данных физических эффектов, в тексте по определенным предикатам (например, таким как depend, cause и т. д.) ищутся предложения, которые могут содержать описание физического эффекта.

Затем по запросу формируется аннотация документа. В качестве запроса будет выступать ранее найденное предложение. Для того чтобы сформировать аннотацию, необходимо применить метод контекстно-зависимого аннотирования [4]. В основе метода лежит отбор фрагментов текста, максимально удовлетворяющих запросу.

Входными параметрами для метода аннотирования являются:

1) запрос Q – множество лексем запроса q_i;

2) документ D – множество лексем документа d_i;

3) аннотация A – множество лексем аннотации a_i.

Таким образом, получается, что необходимо сформировать множество A, удовлетворяющее

введенным ограничениям и отражающее содержание документа D относительно запроса Q.

В данном случае вводится ограничение на длину аннотации. Так как средняя длина описаний физических эффектов в базе данных (поле «Сущность») составляет 150 символов, то и длина аннотации будет ограничена 150 символами:

$$\sum_{A} length(a_i) \le 150, \qquad (1)$$

где $length(a_i)$ – длина лексемы или разделителя аннотации.

Множество лексем документа разбивается на фрагменты F. Для этого используются следующие с п о с о б ы :

1) метод скользящего окна с длиной, заданной в количестве предложений. $F_i=\{P_k\}$, где P – множество предложений документа D; $k=i,i+1,..i+L-1,L$ – заданная длина скользящего окна. То есть каждое предложение является фрагментом, за исключением случаев, когда предложение не укладывается в ограничения (1). Подмножества F не пересекаются;

2) метод скользящего окна с длиной, заданной в количестве слов. $F_i=\{d_k\}$, где $k=i,i+1,..i+L-1$, где L – заданная длина скользящего окна. Данный метод применяется в том случае, если предложение не укладывается в ограничение (1). Подмножества F в этом случае пересекаются.

Для ранжирования документов были сформулированы следующие м е т р и к и :

1) мера вхождения запроса во фрагмент:

$$IFQ_i = \sum_{Q,q_j} ICLF\left(q_j, IF\left(q_j, D\right)\right), \qquad (2)$$

где $ICLF$ – обратная условная частота леммы; q_j – лемма j-го слова запроса Q; IF – внутренняя частота леммы; D – множество предложений документа.

2) мера вхождения фрагмента в запрос:

$$IQF_i = \sum_{F,f_{i,j}} ICLF\left(f_{i,j}, IF\left(f_{i,j}, D\right)\right), \qquad (3)$$

где $ICLF$ – обратная условная частота леммы; $f_{i,j}$ – лемма j-го слова фрагмента F_i; IF – внутренняя частота леммы; D – множество предложений документа; F – множество фрагментов.

Затем каждый из выделенных фрагментов оценивается по формулам:

$$FM1_i = \frac{1}{IFQ_i} + \frac{k_1}{IQF_i},$$
$$FM2_i = \frac{1}{IFQ_i} + k_2 IQF_i, \qquad (4)$$

где k_1, k_2 – коэффициенты, которые применяются для того, чтобы нормализовать значение соответствующего слагаемого в тех случаях, когда необходимо уменьшить его влияние на конечный результат.

Согласно вычисленным оценкам производится ранжирование множества фрагментов по возрастанию критериев FM_1 и FM_2, в результате чего получается множество RF_1 и RF_2. Из полученного списка путем последовательного выбора формируется аннотация до тех пор, пока выполняется ограничение (1), исключая повторное включение фрагментов текста:

$$A = \left\{RF_k \middle| \sum_{k=1}^{k} length(RF_k) \le 150\right\}. \qquad (5)$$

in the case of self-inductance, in electric circuit the magnetic field created b				
y a changing current itself induces a voltage in the same circuit				
in	–	O	O	B-AM-ADV
the	–	O	O	I-AM-ADV
case	–	O	O	I-AM-ADV
of	–	O	O	I-AM-ADV
self-	–	O	O	I-AM-ADV
inductance	–	O	O	E-AM-ADV
,	–	O	O	O
in	–	B-AM-LOC	O	B-AM-LOC
electric	–	I-AM-LOC	O	I-AM-LOC
circuit	–	E-AM-LOC	O	E-AM-LOC
the	–	B-A1	O	B-A0
magnetic	–	I-A1	O	I-A0
field	–	E-A1	O	I-A0
created	created	S-V	O	I-A0
by	–	B-A0	O	I-A0
a	–	I-A0	O	I-A0
changing	changing	I-A0	S-V	I-A0
current	–	I-A0	S-A0	I-A0
itself	–	E-A0	S-A1	E-A0
induces	induces	O	O	S-V
a	–	O	O	B-A1
voltage	–	O	O	I-A1
in	–	O	O	I-A1
the	–	O	O	I-A1
same	–	O	O	I-A1
circuit	–	O	O	E-A1

Рис. 1. Семантическое предикатно-аргументное дерево

После того как аннотация документа была сформирована, по шаблонам-предикатам определяются предложения, содержащие описание физического эффекта. Так, по предикатам «*create*» и «*induce*» найдено предложение: «*in the case of self-inductance, in electric circuit the magnetic field created by a changing current itself induces a voltage in the same circuit*». В результате семантического анализа [5, 6] найденного предложения получаем семантическое дерево с указанием ролей аргументов, как показано на рис. 1.

Затем извлекаем описание физического эффекта, выделяя вход, выход и объект. Понятия «вход», «выход» и «объект» определены и описаны в [1]. Составлено описание двух ФЭ:

ФЭ № 1. Вход «*Current*», Выход: «*Magnetic field*», Объект: «*Electric circuit*».

ФЭ № 2. Вход «*Magnetic field*», Выход: «*Voltage*», Объект: «*Electric circuit*»

Все извлеченные из аннотации описания физических эффектов формируются в единое описание (рис. 2), которое выдается пользователю.

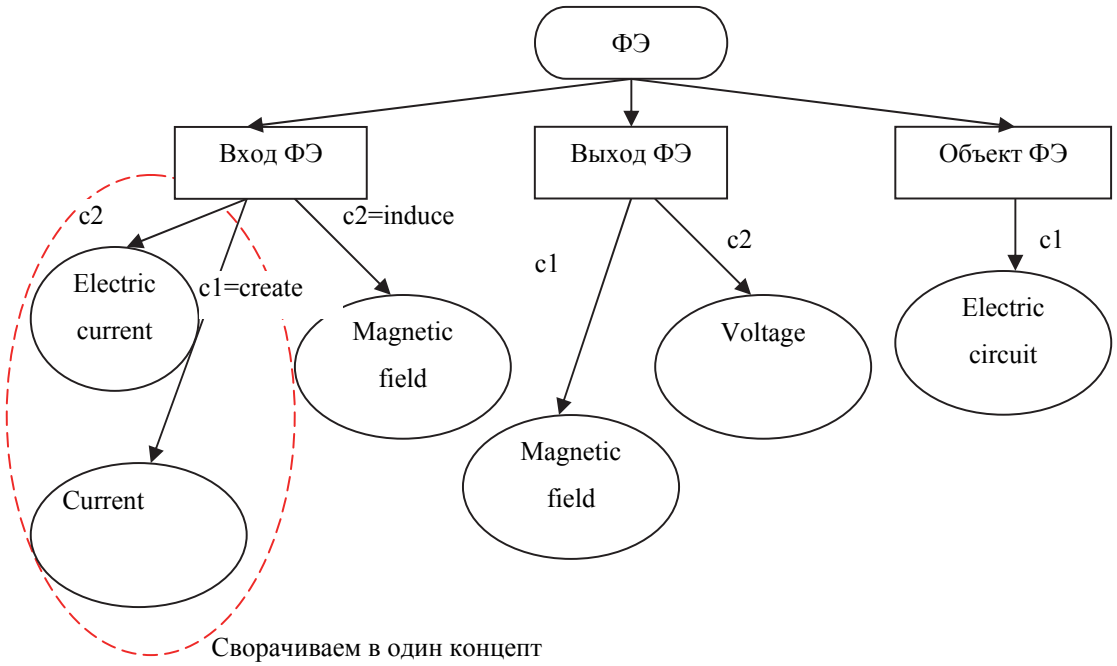


Рис. 2. Предварительное описание ФЭ

В данной статье рассмотрена методика извлечения описания физических эффектов. Преимущество описанной методики перед ранее известными [3, 5, 6] заключается в следующем: задействован метод контекстно-зависимого аннотирования [4], который обеспечивает формирование содержательной аннотации за счет использования двух методов ранжирования фрагментов документа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Фоменков, С. А.* Моделирование и автоматизированное использование структурированных физических знаний : моногр. / С. А. Фоменков, Д. А. Давыдов, В. А. Камаев. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 278 с.

2. *Коробкин, Д. М.* Автоматизация процесса формирования информационного обеспечения базы данных физических эффектов / Д. М. Коробкин, С. А. Фоменков, С. Г. Колесников // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2005. – № 3. – С. 22–25.

3. *Коробкин, Д. М.* Автоматизированная методика извлечения структурированных физических знаний в виде физических эффектов из текстов на естественном английском языке / Д. М. Коробкин, С. А. Фоменков // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 3(76) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 10. – С. 116–120.

4. *Зябрев, И.* Метод контекстно-зависимого аннотирования документов на основе спектральных оценок лексем / И. Зябрев, О. Пожарков // Труды РОМИП'2009. – СПб. : НУ ЦСИ, 2009. – С. 167–174.

5. *Попов, М. Ю.* Предметно-ориентированный анализ текстовых документов на примере системы поиска описаний физических эффектов / М. Ю. Попов, Д. М. Коробкин, С. А. Фоменков // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2005. – № 6. – С. 20–24.

6. *Попов, М. Ю.* Принципы работы и особенности реализации универсального семантико-синтаксического анализатора русского языка / М. Ю. Попов, С. А. Фоменков, А. В. Заболеева-Зотова // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2005. – № 7. – С. 37–42.

УДК 65.011.56: 621.317

В. Г. Леонтьев, А. В. Кизим

МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И СИНТЕЗ НАБОРА ОБРУДОВАНИЯ СИСТЕМ КОММЕРЧЕСКОГО УЧЕТА ПОТРЕБЛЯЕМОЙ ЭНЕРГИИ

Волгоградский государственный технический университет

leontevg@mail.ru, kizim@mail.ru

Приводятся результаты анализа предметной области, описание реализации основных функций системы автоматизированного проектирования (САПР) автоматизированной информационно-измерительной системы коммерческого учета электроэнергии (АИИС КУЭ). По результатам анализа предметной области выведены основные критерии для проведения функционально-стоимостного анализа элементов АИИС КУЭ, описан порядок проведения морфологического анализа, разработана методика морфологического синтеза АИИС КУЭ как системы и задача поддержки принятия решения для выбора ее оборудования.

Ключевые слова: автоматизированная информационно-измерительная система коммерческого учета электроэнергии (АИИС КУЭ), система автоматизированного проектирования (САПР), морфологический анализ, морфологический синтез, функционально-стоимостный анализ, поддержка принятия решений, оборудование, критерии выбора, выбор оборудования, обслуживание оборудования.

V. G. Leontiev, A. V. Kizim

COMTPUTER-AIDED DESIGN SYSTEM FOR DEVELOPING AUTOMATIC SYSTEMSFOR COMMERSIAL ACCOUNTING OF POWER CONSUMPTION

Volgograd State Technical University

This article presents the results of domain analysis, a description of the implementation of the basic functions of computer-aided design (CAD) of automated information-measuring systems for commercial metering (ASCAPC, AMR). According to the domain analysis we find basic criteria for the activity-based costing elements AMR. The procedure for the AMR morphological analysis and the methods of AMR morphological synthesis and the task of decision-making supporting to select its equipment are described.

Keywords: automated information and measuring system of commercial electricity metering, automatic system for commercial accounting of power consumption (ASCAPC), computer-aided design (CAD), morphological analysis, morphological synthesis, cost-functional analysis, decision-making support, equipment selection criteria, selection of equipment, equipment maintenance.

С каждым днем вопрос о модернизации энергетической системы России становится все более актуальным: энергетическая система проживает не лучшие времена и характеризуется высокой степенью износа. Одна из сложных задач для энергетиков – выбор оборудования при проектировании и модернизации автоматизированной информационно-измерительной системы коммерческого учета электроэнергии (АИИС КУЭ). В настоящее время наличие АИИС КУЭ в соответствии с договором о присоединении к торговой системе рынка электроэнергии является обязательным требованием для работы на рынке.

На основе опыта ОАО «Волгоградэнергосбыт» были выведены основные проблемы разработки и внедрения автоматизированных информационно-измерительных систем коммерческого учета электроэнергии (АИИС КУЭ):

1) на выбор оборудования огромное влияние оказывает человеческий фактор, что делает систему не всегда оптимальной и качественной;

2) большинство потребителей, которые начали создание систем в 2006 г., в основном ставят задачу создания АИИСКУЭ для расчетов на розничном рынке электроэнергии, без процедуры, связанной с установлением класса качества и испытаний на соответствие требованиям оптового рынка электроэнергии (ОРЭ). Однако согласно [1] технические характеристики создаваемых систем должны соответствовать техническим требованиям ОРЭ. То есть, фактически, системы создаются под требования ОРЭ, что предполагает соответствие установленным классам качества;

3) заявленные проектные и эксплуатационные характеристики оборудования имеют несоответствие;

4) с каждым годом количество выпускаемого оборудования растет, что усложняет выбор для системы и ее дальнейшую модернизацию;

5) обычно заказчики АИИС КУЭ настаивают на замене уже существующих компонентов системы, а не проектировании ее с нуля, что накладывает дополнительные требования к выбору оборудования, которое должно быть совместимым с уже имеющимся.

Отсюда следует, что для проектирования АИИС КУЭ разработчики должны, с одной стороны, произвести анализ существующего по-

стоянно обновляющегося набора оборудования, а также его опыт внедрения, а с другой стороны, проектировать такую систему, которая бы отвечала требованиям ОРЭ независимо от принадлежности системы к сегменту рынка (оптовому или розничному).

В статье [2] представляется возможный набор функций, которые должна выполнять система автоматизированного проектирования АИИС КУЭ. В него входит: генерация структурной схемы АИИС и выбор комплектующего оборудования (трансформаторы, программное обеспечение, счетчики и т. д.) под конкретного потребителя на основе входных данных предпроектного исследования, а также интеграция во всемирную сеть Интернет для обновления и пополнения данных о доступном оборудовании.

Таким образом, основной функцией САПР является структурно-параметрический анализ системы на основе входной информации предпроектного исследования. По своей сути, такая САПР реализует интегративную модель [3, 10], на первом уровне которой создается топология АИИС, на втором – происходит ее спецификация существующим оборудованием, на третьем – усечение множества сгенерированных систем, на четвертом – оценка систем по основной функции (рис. 1).

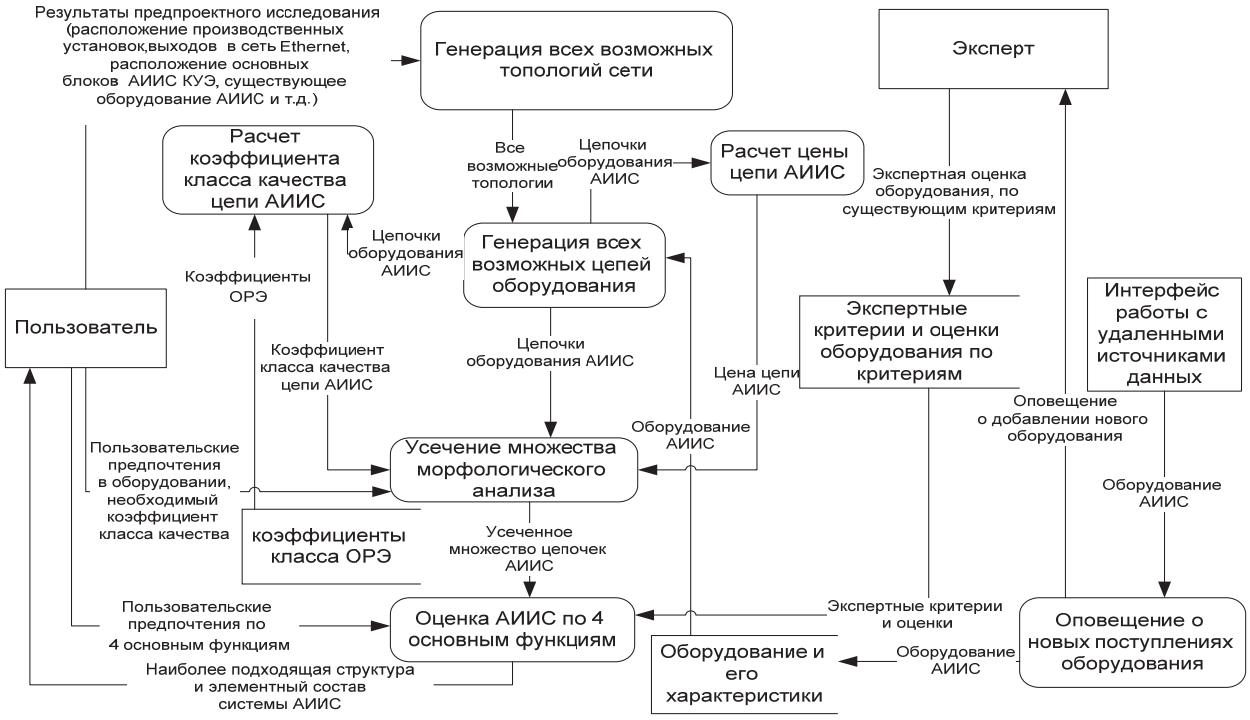


Рис. 1. Функциональная структура САПР АИИС КУЭ

По результатам структурного анализа предметной области на основании [4 и др.] АИИС КУЭ состоит из трех крупных блоков:

• информационно-измерительный комплекс (ИИК);

• информационно-вычислительный комплекс энергообъекта (ИВКЭ);

• информационно-вычислительный комплекс (ИВК).

Каждый такой блок состоит из совместимого оборудования. Совместимость между двумя связанными элементами определяется в зависимости от типов элементов. Например, если устройство сбора информации (например, POREG 2P) поддерживает интерфейс RS-485, то счетчик (основной элемент ИИК) должен иметь интерфейс для передачи выходной информации RS-485. Также нужно учитывать существующее оборудование (оно может быть устаревшим) и, соответственно, переходники с одного интерфейса на другой. Поэтому интерфейсы (каналы передачи) стоит рассматривать как отдельную сущность. Таким образом, обобщенное дерево морфологического анализа АИИС КУЭ будет выглядеть как на рис. 2.

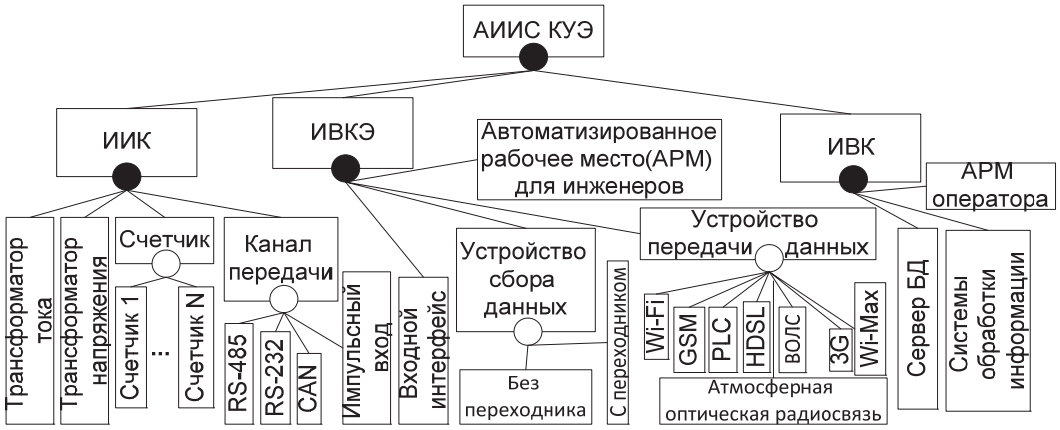


Рис. 2. Дерево морфологического анализа предметной области

Очевидно, что если дополнить данную модель спецификациями каждого элемента, мы получим огромное множество реализаций АИИС для каждой конкретной задачи, и оно тем больше, чем больше вариантов оборудования одного типа и соизмеримо с декартовым произведением всех возможных реализаций всех типов оборудования в системе.

Для усечения этого множества в первую очередь отсеем системы, возникающие в результате соединения несовместимого оборудования (по интерфейсам). Количество таких вариантов будет значительным, поскольку наличие хотя бы двух несовместимых элементов порождает множество бессмысленных вариантов реализации АИИС КУЭ. Для этого необходима таблица оборудования и типов взаимодействия по характеристикам оборудования [5]. Таким образом, если у сгенерированной модели находится пара альтернатив, не входящих в данную таблицу, то эта модель удаляется.

Генерация всех топологий сети АИИС происходит в соответствии с порядком соединения основных частей системы (ИИК, ИВКЭ и ИВК). Поскольку данный процесс тяжело формализуется, зависит от предметной области и не является универсальным, предлагается использование эвристик для отсеивания заведомо бессмысленных вариантов топологии. Данные эвристики можно выразить в следующих правилах:

• невозможно присоединить n устройств к устройству с m выходами ($n>m$);

• не имеет смысла для каждого счетчика устанавливать отдельное устройство сбора и передачи данных (УСПД);

• система должна иметь только один блок ИВК с возможностью выхода в Интернет для передачи информации АТС;

• преимущественно использовать локальную сеть предприятия для передачи информации с ИВКЭ на ИВК;

• группировать счетчики с учетом расположения измерительных каналов для соединения с одним УСПД, расстояние от самого удаленного счетчика до УСПД не должно превышать возможности канала передачи данных (предпочтительно RS-485);

• группировать блоки ИИК в зависимости от территориального расположения;

• каждый измерительный канал имеет один счетчик и два трансформатора (тока и напряжения).

Очевидно, что такое отсеивание является недостаточным, поскольку не учитывает экспертные оценки альтернатив, что может являться причиной неоправданно увеличенного времени поиска наиболее оптимальной реализации АИИС.

Для реализации четвертого уровня функциональной структуры САПР необходимо выделить обобщенный показатель качества варианта реализации системы, определяемый как функция от заданных эксплуатационных характеристик $W = F(Y) = F(Y_1,\ldots, Y_m)$. Согласно [6], введение обобщенного показателя качества позволяет свести задачу синтеза к однокритериальной задаче поиска экстремума функции $F(Y_1,\ldots, Y_m)$, обеспечивающего минимум (максимум) обобщенного показателя качества W. Очевидно, что внедрение какого-либо технического решения не имеет смысла без оценки его окупаемости, поэтому целевая функция имеет вид: «цена – техническая функция» и анализ оборудования АИИС сводится к функционально-стоимостному.

Коэффициент класса качества АИИС определяется следующими четырьмя показателями

качества: надежность, защищенность от несанкционированного доступа, функциональная полнота, степень автоматизации выполняемых функций [7]. Каждый критерий качества АИИС характеризуется набором параметров-подкритериев для каждого элемента системы, основанных на его характеристиках.

Чтобы учесть мнения экспертов, был проведен опрос разработчиков АИИС ОАО «Волгоградэнергосбыт» и выделены основные критерии по каждому типу оборудования. Эти критерии были систематизированы таким образом, чтобы заполнить пространство между основными четырьмя функциями и подкритериями ОРЭ для каждого типа оборудования в дереве критериев.

Рассмотрим использование данного подхода для выбора счетчика. В табл. 1 изображена иерархия критериев для выбора счетчика.

Таблица 1

Критерии выбора счетчиков

Основные функции	Экспертные характеристики		Критерии, отвечающие за класс качества системы.	
		Название	Критерии	Балл
Надежность (Н)	Кн1	Отказоустойчивость	Средняя наработка на отказ – не менее 35 000 ч; среднее время восстановления – не более 7 суток; межповерочный интервал – не менее 8 лет	3
	Кн2	Глубина журнала	Наличие фактов: параметрирования, пропадания напряжения, коррекции времени	3
	Кн3	Устойчивость к воздействиям	Счетчики должны обеспечивать работоспособность в диапазоне температур, определенных условиями эксплуатации	1
	Кн4	Мониторинг состояния	Возможность съема информации: автономным способом, удаленным способом, визуальным	3
Защищенность от несанкционированного доступа (З)	Кз1	Доступ к данным	Защита соответствует п. 5.5 ГОСТ Р 52320	1
	Кз2	Механическая защита	Наличие механической защиты проводников, промежуточных клемников, исп. коробки	2
	Кз3	Защита на программном уровне	Установка пароля на счетчик, возможность использования средств электронной цифровой подписи, безопасность хранения данных и программного обеспечения в соответствии с ГОСТ Р 52069.0–2003	3
Функциональна полнота (Ф)	Кф1	Профиль данных	Наличие профиля данных	1
	Кф2	Профиль качества	Наличие профиля качества электроэнергии	1
	Кф3	Класс точности	Класс точности – не хуже 0,5S	1
	Кф4	Глубина хранения профилей	Фиксация: попытки несанкционированного доступа, факты связи с изменением данных, изменение текущих значений времени и даты при синхронизации времени, отклонения тока и напряжения в измерительных цепях от заданных пределов, отсутствие напряжения при наличии тока, перерывы питания	6
Степень автоматизации выполняемых функций (А)	Ка1	Тип отчетного устройства	Автоматизация функций коррекции времени, хранения информации, синхронизации времени, расчет учетных показателей, измерений, состояний средств измерения.	6

Здесь каждому критерию присвоены баллы его важности в зависимости от количества реализованных функций, отвечающих за повышение класса качества.

Дальнейшее решение задачи произведем с помощью ФСА с использованием метода парных сравнений. Для этого определим основную функцию для оценки альтернатив по технико-экономическому критерию, как функцию четырех критериев (Н, З, Ф, А). Эксперт производит попарное сравнение всех критериев из табл. 1 (с учетом проставленных баллов) и затем проводит оценку альтернатив (см. табл. 2).

Таблица 2

Экспертная оценка альтернатив

	Относительные затраты на реализацию					Векторы приоритетов			
	Энергомера	Меркурий	Альфа	СЭТ	Wзi	Н	З	Ф	А
Энергомера	1	2	7	6	0,156	0,066	0,127	0,387	0,187
Меркурий	½	1	4	5	0,245	0,128	0,144	0,234	0,226
Альфа	1/7	1/6	1	2	0,416	0,442	0,135	0,238	0,258
СЭТ	1/6	1/5	½	1	0,183	0,364	0,594	0,141	0,329

Из данной оценки получаем интегральный вектор приоритета альтернатив $W_{\text{тЭ}}$ и вектор затрат $W_{\text{з}}$:

$$W_{\text{тЭ}} = \{0{,}066; 0{,}128; 0{,}456; 0{,}350\}^T;$$

$$W_{\text{з}} = \{0{,}088; 0{,}461; 0{,}416; 0{,}345\}^T.$$

Далее применяем модифицированный метод ФСА сопоставления затрат на функции с балльными оценками значимости функций из [6], согласно которому строится результирующий вектор из попарных отношений элементов векторов, соответственно $W_{\text{тЭ}}$ и $W_{\text{з}}$:

$$W_{\text{тЭ}_i}/W_{\text{з}_i} = \{0{,}750; 0{,}278; 1{,}100; 1{,}014\}^T.$$

В результате наиболее подходящим счетчиком является счетчик фирмы «Альфа». Данный метод может применяться для выбора остальных элементов АИИС. При переносе данного метода на всю систему АИИС, как говорилось выше, необходимо отсеивание цепочек. Коэффициент класса качества, по сути состоящий из оценок по критериям (Н, З, Ф, А), определенный пользователем, может определять границу отсечения множества вариантов. Таким образом, нам необходимо все реализации АИИС упорядочить по данным критериям, по методике [7] рассчитать коэффициент, и, в соответствии с определенным коэффициентом, отсечь все подряд идущие реализации АИИС, начиная с самой наихудшей. При этом на рассмотрение методом ФСА возможно попадание цепочки с меньшим классом качества, но с лучшими экспертными оценками. Данная задача аналогична построению «очереди» оборудования для необходимого ремонта и обслуживания с использованием методов многокритериального планирования, например, метода Парето [8, 9]. Данный подход не требует модификации под нашу задачу. Отсечение множества («очереди») будет проходить в соответствии с рассчитанным коэффициентом.

Таким образом, в статье приведены результаты анализа предметной области и описана реализация основных функций автоматизированной системы проектирования автоматизированной информационно-измерительной системы коммерческого учета электроэнергии (САПР АИИС КУЭ). По результатам анализа предметной области выведены основные критерии для проведения функционально-стоимостного анализа элементов АИИС КУЭ, описан порядок проведения морфологического анализа, разработана методика морфологического синтеза АИИС КУЭ как системы и задача поддержки принятия решения для выбора ее элементов. Полученные результаты позволяют проводить построение АИИС КУЭ масштаба региона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Коваль, Д. И.* АИИС КУЭ субъектов ОРЭ: опыт внедрения и основные проблемы [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.energosovet.ru/stat449.html.

2. *Игумнов, С. Н.* Автоматизированная система проектирования АИИС КУЭ / С. Н. Игумнов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 8(46) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 5). – С. 134–136.

3. *Акимов, С. В.* Четырехуровневая интегративная модель для автоматизации структурно-параметрического синтеза / С. В. Акимов // Труды учебных заведений связи / СПбГУТ. – СПб., 2004. – № 171. – С. 165–173.

4. Положение о порядке получения статуса субъекта оптового рынка и ведения реестра субъектов оптового рынка. Приложение 11.1. Автоматизированные информационно-измерительные системы коммерческого учета электрической энергии (мощности). Технические требования [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http:// www.np-sr.ru/ norem/marketregulation/register/registerappendix/currentedition/index.htm.

5. *Чугунов, Д. С.* Использование принципов теории принятия решения в методе морфологического синтеза / Д. С. Чугунов, Л. Н. Бутенко // Успехи современного естествознания. – 2005. – № 2. – С. 35–36.

6. *Андрейчиков, А. В.* Анализ, синтез, планирование решений в экономике / А. В. Андрейчиков, О. Н. Андрейчикова. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 368 с.

7. Положение о порядке получения статуса субъекта оптового рынка и ведения реестра субъектов оптового рынка. Приложение 11.2. Методика присвоения коэффициента класса качества АИИС коммерческого учета электрической энергии (мощности) субъекта оптового рынка [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://np-ats.par-king.ru/.

8. *Кизим, А. В*. Задачи прогнозирования и планирования для программно-информационной поддержки технического обслуживания и ремонта оборудования / А. В. Кизим, Е. В. Чиков, В. Ю. Мельник // Открытое образование. – 2011. – № 2(85). Ч. 2. – С. 224–227.

9. Программно-информационная поддержка технического обслуживания и ремонта оборудования с учетом интересов субъектов процесса / А. В. Кизим, Е. В. Чиков, В. Ю. Мельник, В. А. Камаев // Информатизация и связь. – 2011. – № 3. – С. 57–59.

10. *Кизим, А. В*. Структурно-функциональная параметрическая модель объектов проектирования как инвариант / А. В. Кизим // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2004. – № 2. – С. 45–54.

УДК 62–529

Д. Г. Ульянов

АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОДУЛЬНОГО ТИПА

Волгоградский государственный технический университет

dmitry@sweetfruit.ru

В статье рассмотрен новый вариант построения системы управления модульного типа. Предложен вариант структуры управляющего модуля и рассмотрен распространенный шинный интерфейс 1-wire. Приведен пример использования предложенной идеи в малом и среднем бизнесе.

Ключевые слова: система управления, уровень датчиков, 1-wire интерфейс.

D. G. Ulyanov

MODULE TYPE CONTROL SYSYTEMS ARCHITECTURE

Volgograd State Technical University

The article describes the main aspects of building new module type control systems. Suggest the variant of construction the control unit and considered popular bus interface 1-wire. Example of using the idea in the small and medium business is shown.

Keywords: control system, sensor level, 1-wire interface.

На протяжении долгого времени бизнес в развитых странах прикладывает усилия к разработке систем управления промышленным оборудованием для уменьшения издержек при производстве. В России автоматизация производства не является повсеместным явлением и используется лишь на крупных предприятиях. Это связано в первую очередь с высокой стоимостью внедрения автоматизированного оборудования, которое, как правило, изготавливается на заказ, либо является типовым заводским решением без возможности настройки и изменения (негибким), а также без возможности подбора устройств разных производителей (открытым).

К основным недостаткам существующих систем можно отнести следующее:

• распределенная открытая система очень дорога во внедрении из-за необходимости организации взаимодействия различных интерфейсов и протоколов [3];

• недорогие системы управления, изготовленные на заказ, негибкие и при небольших изменениях часто приходится внедрять новую систему;

• каждая система управления значительно дорабатывается под нужды заказчика на уровне микроконтроллера, что повышает ее стоимость.

Целью данной работы является разработка архитектуры гибкой, открытой и модульной системы управления с невысокой стоимостью внедрения в малом и среднем бизнесе.

Для разработки системы управления следует решить несколько задач. Для повышения гибкости системы нужно, чтобы пользователь имел возможность собрать при помощи типовых модулей систему с необходимым контрольным и исполнительным комплексом оборудования. Комплекс оборудования должен поддерживать добавление новых устройств и синхронизацию их с протоколом сети. Следует предусмотреть возможность настройки взаимодействия оборудования внутри комплекса на уровне оператора. Необходимо, чтобы информация о состоянии сети хранилась в базе данных.

При невысоком уровне требований к автоматизации производства на малых предприятиях и удобном способе задания начальных условий появляется возможность создавать адаптируемые системы управления с разумными трудозатратами. Подобные системы могут быть использованы малым бизнесом для автоматизации небольших производств.

Типовая система состоит из измерительных устройств (датчиков), устройств исполнения и управляющего устройства [2].

Управляющее устройство включает в себя уровни от микроконтроллера до программного модуля и решений оператора в реальном времени (рис. 1).

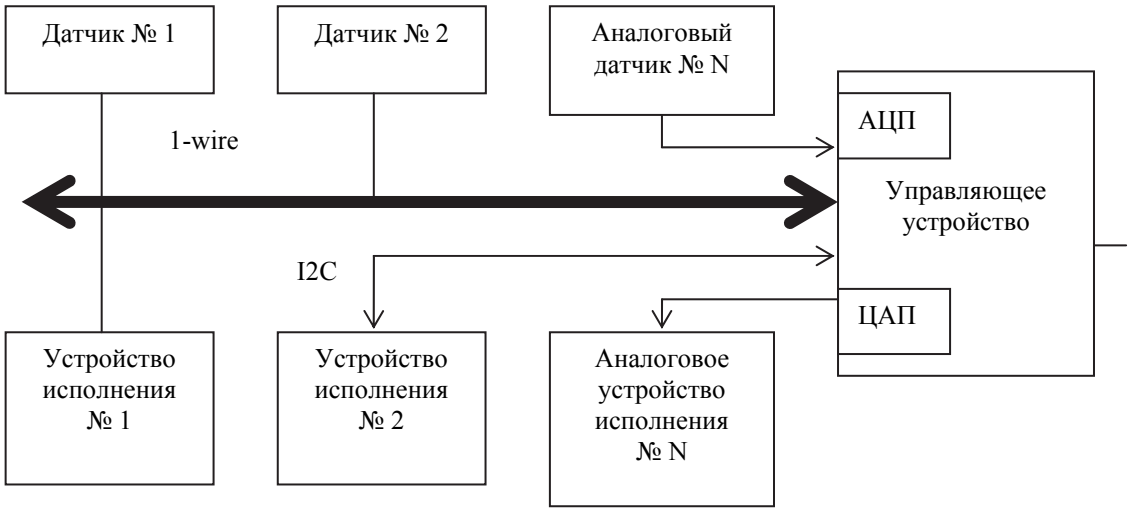


Рис. 1. Схема типовой системы управления

Подобная реализация подсети возможна, если количество датчиков невелико и система незначительно распределена в пространстве. Можно выявить следующие недостатки такой схемы:

• микроконтроллер в управляющем устройстве должен поддерживать все используемые комплексом оборудования интерфейсы, что повышает его стоимость;

• существует ограничение в выборе устройства исполнения, так как оно должно поддерживать требуемый интерфейс передачи данных;

• в программном коде микроконтроллера должна быть заложена и отлажена возможность использования определенного набора устройств.

Чтобы устранить указанные недостатки, можно использовать недорогие серийные промежуточные микроконтроллеры для каждого устройства в сети – конверторы. *Конвертор* – это устройство, которое согласует интерфейс и протокол обмена данными между используемым оборудованием в сети устройств и микроконтроллером. Конверторы и микроконтроллер

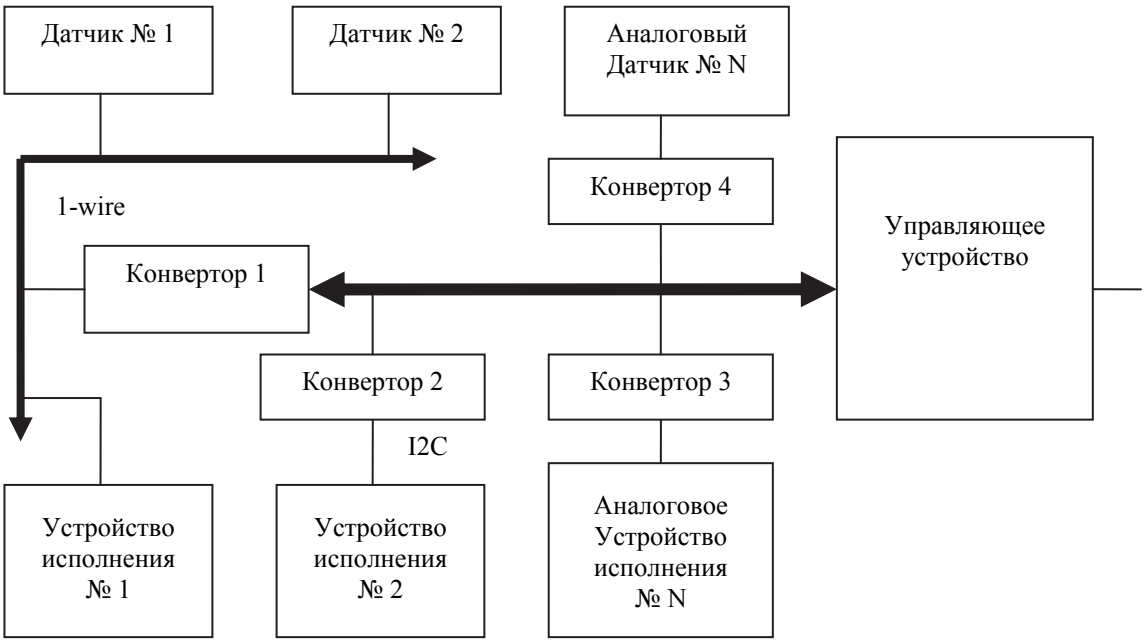


Рис. 2. Схема типовой модульной системы управления

объединены общей шиной. Для реализации подобной системы каждое устройство должно обладать уникальным кодом для идентификации на общей шине. Основная трудность в реализации системы это необходимость в унификации данных, передаваемых от разнотипных устройств, для их обработки управляющим устройством.

Как видно из рис. 2, функции каждого устройства сведены до необходимого минимума, что позволяет снизить трудозатраты на внедрение. Потребитель имеет возможность поменять неработающий модуль на новый типовой модуль по приемлемой цене, за счет модульного типа системы. Рассмотрим подробнее основные узлы системы.

Измерительные устройства (датчики)

Датчики в принципиальной схеме служат для сбора данных, необходимых для принятия решений. Это могут быть датчики контроля температура, влажности, веса, освещенности и т. д. Проблема разных серийных датчиков в том, что они используют различные интерфейсы и протоколы передачи данных, что требует индивидуального подхода к каждому виду. Для снижения стоимости системы наиболее рационально привести к единому протоколу несколько видов измерительных устройств при помощи промежуточного устройства конвертора. Это позволит иметь выбор между устройствами при проектировании типовых систем управления и получать данные с устройств по выбранному единому протоколу.

Устройство исполнения

Как правило, на малых предприятиях – это типичные устройства, получающие команду на включение и выключение. Для управления также необходимо привести стандартные команды управляющего устройства в понятные для данного устройства сигналы. Для этого можно использовать заранее разработанный для конкретного устройства конвертор, промежуточное устройство-драйвер, который преобразовывает команды от управляющего устройства в формат команд исполняющего устройства.

Конвертор

Конвертор отвечает за разделение системы на типовые модули, что делает систему более открытой. Он позволяет всей системе определять тип датчика и допустимые для него функции. Также, за счет уникального идентификационного номера, он позволяет организовать обмен данными между управляющим устройством и другими конверторами по общей шине.

Управляющее устройство

Управляющее устройство собирает информацию с конверторов, подключенных к общей шине, и в соответствии с исходными данными принимает решение об управлении устройствами исполнения. Устройство управления должно быть максимально универсально, чтобы свести к минимуму его программирование и, как следствие, стоимость внедрения и изменения системы. Кроме того, необходимо иметь возможность поэтапного внедрения частей будущей системы управления. Рассмотрим более подробно управляющее устройство.

В данной работе под термином *управляющее устройство* понимаются следующие уровни системы управления: микроконтроллер (МК), сервер внедрения и связывания объектов в управлении процессами (OPC-сервер), программный модуль, оператор. Каждый следующий уровень добавляет дополнительные возможности системе управления. Однако управляющее устройство не обязательно должно содержать все уровни иерархии, а только те, которые добавляют необходимые конечному пользователю функции. Архитектура системы управления показана на рис. 3.

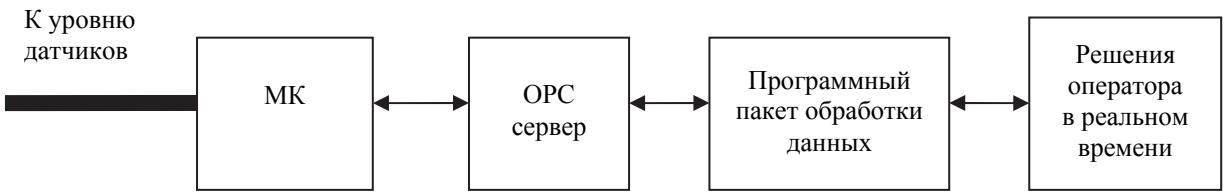


Рис. 3. Архитектура устройства управления

Рассмотрим отдельно каждый уровень и его влияние на функциональность системы управления в целом.

В системе управления, где в качестве управляющего устройства использован один микроконтроллер, есть возможность только про-

граммирования заранее известной логики работы, без возможности вмешательства и просмотра статистики. На данном уровне отличие предложенной модульной системы от обычной в том, что функции конвертора интерфейсов выведены из МК и за ним остаются лишь диспетчерские функции подсети и логика работы.

При добавлении к устройству управления OPC-сервера появляется возможность взаимодействия между собой подключенных к нему МК адаптеров, других OPC-серверов, серверов баз данных, программного пакета обработки данных. Таким образом, OPC-сервер обеспечивает согласование определенного набора интерфейсов. Как правило, на этом уровне появляется возможность доступа к сети Интернет для создания распределенных систем.

С использованием программного пакета обработки данных появляется возможность управления всей распределенной системой из одного места. Известны также программные модули, которые построены с использованием WEB-технологии, что позволяет обеспечить доступ к данным с мобильных устройств [1]. Производители программных пакетов обработки данных используют несколько стандартных интерфейсов для связи с OPC-серверами, что позволяет выбирать между подходящими продуктами [4].

К отдельному уровню в иерархии системы управления отнесены решения оператора, принимаемые в реальном времени. Это связано с тем, что только человек может экстренно вмешаться в неверную работу логики всей системы и не допустить аварии. С другой стороны, многие системы требуют указания начальных условий для верного выполнения функции, которые предоставляются человеком-экспертом.

В качестве примера модульной системы управления рассмотрим систему контроля влажности и температуры в помещении хранилища при помощи внешней среды. Для ее реализации нам необходим набор из трех элементов:

1) сеть датчиков температуры на 1-Wire интерфейсе;

2) два датчика влажности на аналоговом интерфейсе;

3) устройство исполнения в виде сервопривода управляющего заглушкой вентиляции.

Объединенная схема устройства (рис. 4) разработана в соответствии с идей модульной системы управления. В данном примере использованы 15 датчиков температуры с 1-wire интерфейсом, поэтому именно этот интерфейс был выбран для общей шины.

Данная система позволяет осуществлять круглосуточный мониторинг температуры на улице и добиваться приемлемой температуры в хранилище, в период с октября по март, без использования холодильного оборудования.

Рассмотрим 1-wire интерфейс как наиболее распространенный для построения небольших сетей из датчиков. Интерфейс подразумевает наличие ведущего устройства конвертора и ведомого, например, датчика температуры. Используются три линии: питание +5 В; земля 0 В; шина передачи данных, на которую выставляются сигналы от 0 до +5 В, по умолчанию +5 В.

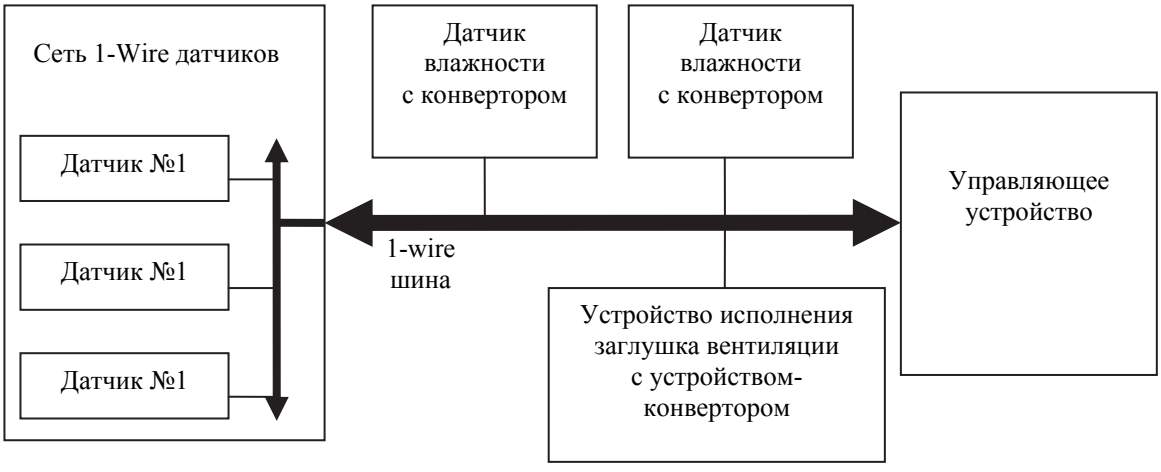


Рис. 4. Объединенная схема примера системы управления

Доступ к устройствам на шине осуществляется в следующей последовательности:

1) проведение инициализации;

2) выбор команды-функции устройства;

3) исполнение команды-функции устройства.

Проведение инициализации ведущим устройством

Работа с датчиком происходит при помощи последовательностей чтения и передач данных. Каждая из этих последовательностей начинается с процедуры инициализации [5, 6]. Далее следуют интервалы передачи и приема данных ведущим устройством.

Из примера использования видно, что предложенная архитектура модульной системы управления позволяет создавать недорогие открытые системы с невысокой стоимостью внедрения, которые доступны малому и среднему бизнесу. Себестоимость изготовления примера, с использованием типовых датчиков, в ценах 2013 года составляет около 2000 рублей. Система, разрабатываемая на заказ, требует минимум 20 часов рабочего времени специалиста по разработке программного кода для микроконтроллера, что увеличивает себестоимость системы на 10 000 рублей.

Как показала разработка системы, каждый модуль достаточно прост и может использоваться в других подобных системах. Полноценная имитация 1-wire интерфейса в устройствах-конверторах позволила реализовать микроконтроллеру функцию поиска датчиков 1-wire, благодаря чему появилась возможность определять новые устройства в системе. Использование базы данных для хранения параметров облегчило осуществление контроля над системой и отладку алгоритмов работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Быков, Д. В.* Варианты построения системы аутентификации при доступе к базам данных в сервис-ориентированных приложениях / Д. В. Быков, В. С. Лукьянов, А. В. Скакунов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 6(54) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 6). – С. 131–134.

2. *Есикадзу, Суэмацу* Микроконтроллерные системы управления. Первое знакомство / Суэмацу Есикадзу. – М.: Додэка XXI, 2009. – 276 с.

3. *Краснова, А. Е.* Цифровые системы управления в пищевой промышленности / А. Е. Краснова, Л. А. Злобин, Д. Л. Злобин. – М.: Высшая школа, 2007. – 415 с.

4. *Олссон, Г.* Цифровые системы автоматизации и управления / Г. Олссон, Д. Пиани. – СПб.: Невский Диалект, 2001. – 244 с.

5. *Филипс, Ч.* Системы управления с обратной связью / Ч. Филипс, Р. Харбор. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001. – 327 с.

6. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer [electronic recourse] // Maxim Integrated Product site. – 2008. – 22p. – Mode of access : http://www.maxim-ic.com/datasheet/index.mvp/id/2812

ПОСТРОЕНИЕ СЕТЕЙ И ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.94

В. С. Лукьянов, С. В. Гаевой, Ф. А. Х. Аль-Хадша

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СЕТЕЙ В СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ

Волгоградский государственный технический университет

luk-vs@mail.ru, gaevserge@mail.ru, alhadsha@mail.ru

В данной работе сделана попытка проанализировать систему, состоящую из двух узлов (источника и приемника) и набора промежуточных элементов. Система считается работоспособной, когда существует связь между источником и приемником. Одной из первичных целей является определение, какие элементы системы могут рассматриваться как абсолютно надежные.

Ключевые слова: сети, имитационное моделирование, показатели надежности, передача сообщений.

V. S. Lukyanov, S. V. Gaevoy, F. A. H. AL-hadsha

ASSESSMENT OF RELIABILITY OF NETWORK SYSTEMS IN STATIONARY CONDITION

Volgograd State Technical University

In this paper an attempt to analyze system containing two nodes (source and destination) and a number of intermediate nodes has been made. The system is assumed to be in operating state if there is a connection between source node and destination node. One of primary targets is to determine what system elements can be considered as absolutely reliable.

Keywords: net, network, simulation modeling, reliability indices, message transmission.

Введение

Сформулируем проблему следующим образом. Необходимо определить параметры надежности сети, состоящей из станций и соединительных линий. Одну станцию назовем *источником сигнала,* а вторую – *приемником*. Система будет считаться исправной, если существует хотя бы один исправный тракт передачи данных от источника к приемнику. Будем считать, что линии могут передавать сигнал в обоих направлениях [4, 6, 7].

Также примем, что в начальный момент времени система полностью исправна. Затем происходят отказы под действием пуассоновского потока отказов. Возможно восстановление отказавших элементов [2, 3, 5]. Необходимо определить следующие параметры стационарного режима:

– среднее время безотказной работы T_{wrk} ;

– среднее время пребывания системы в состоянии отказа T_{brk} ;

– коэффициент готовности K .

Рассмотрим систему, изображенную на рис. 1. Пуассоновские потоки отказов зададим такими: для элементов сети «Пр» и «Ус» – 0,1 отк/ч, для линий связи «Св» – 0,01 отк/ч, а для источника и приемника «А» и «В» – 0,02 отк/ч. Среднее время восстановления зададим для всех равным 2 ч. Стрелками указано направление прохождения сигнала [4].

Для получения решения воспользуемся методом имитационного моделирования, методом дискретных событий: много раз моделируем случайные исходы работы системы, а затем соберем статистику и по ней оценим требуемые параметры с достаточной степенью точности. В соответствии с Центральной предельной теоремой (ЦПТ) рассчитаем погрешность. В качестве доверительной вероятности возьмем 99,73 %, т. е. используем правило трех сигм [10, 12].

Моделирование работы системы будем проводить:

1) с экспоненциальным восстановлением (E);

2) восстановлением по закону Вейбула с параметром 3.3[1] (W);

3) детерминированным временем восстановления (C).

[1] Это делает закон близким к нормальному.

Рассмотрение системы без восстановления нецелесообразно, так как в этом случае не наблюдается стационарный режим.

Узлы восстанавливаются независимо.

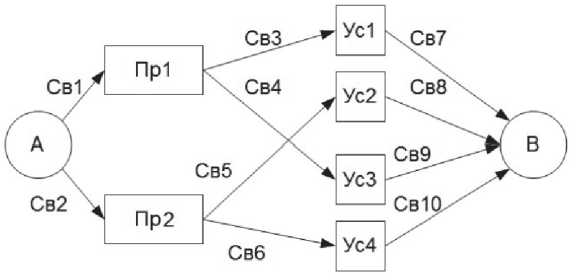


Рис. 1. Структура системы системы

Рассматриваются следующие варианты работы системы:

1) отказывают только промежуточные узлы (N);

2) отказывают промежуточные узлы и линии связи (NL);

3) отказывают все узлы и линии связи (All);

4) отказывают все узлы и линии связи, но источник и приемник имеют резервирование (AllR).

Под *резервированием* будем подразумевать нагруженное резервирование, когда существуют два источника и два приемника, работающих параллельно, и при отказе одного может продолжать работать другой.

Примеры обозначений систем: AllR-W, N-C.

Моделирование

1. Описание модели

Модель работает следующим образом. У каждого элемента есть состояние – рабочее или отказ – и время изменения состояния, отсчитанное от момента начала моделирования [8, 11]. Особым событием модели являются отказы и восстановления элементов [10]. При этом состояние элемента изменяется на противоположное.

Формализуем модель. Введем следующую терминологию. *Элементами системы* назовем линии связи и узлы (то есть A, B, Пр1, Пр2, Ус1-Ус4, Св1-Св10), а *экземпляром* – конкретный блок, который выполняет функции элемента (это может быть основной экземпляр или один из резервных). Используется нагруженный резерв: элемент функционирует, если функционирует хотя бы один его экземпляр.

Обозначим за get_time_for_work(i) процедуру получения случайного времени безотказной работы i-го экземпляра, а за get_time_for_break(i) – случайного времени пребывания его в состоянии отказа; m – число элементов системы; n – суммарное число экземпляров.

Введем матрицу состояния агрегата в начальный момент времени:

$$A = \begin{vmatrix} 1 & \text{get\_time\_for\_work(1)} \\ 1 & \text{get\_time\_for\_work(2)} \\ 1 & \text{get\_time\_for\_work(3)} \\ \dots & \dots \\ \dots & \dots \\ 1 & \text{get\_time\_for\_work(n-1)} \\ 1 & \text{get\_time\_for\_work(n)} \end{vmatrix}$$

Особые моменты будут происходить в моменты времени $A_{i,2}, i = \overline{1,n}$. Опишем цепь событий на псевдокоде:

```
if(A[i][1] == 1) {
    A[i][1] = 0;
    A[i][2] = A[i][2] + get_time_for_break(i);
}
else {
    A[i][1] = 1;
    A[i][2] = A[i][2] + get_time_for_work(i);
}
```

Единица в первом столбце будет означать исправность экземпляра, а ноль – пребывание в состоянии отказа. Для ускорения расчета времена событий можно хранить в бинарной куче.

Теперь необходимо по исправным экземплярам определить исправные элементы. Сопоставим каждому элементу счетчик, равный числу его исправных экземпляров, и будем обновлять его при каждом изменении флага экземпляра A[i] [1]. Признаком исправности будет положительное значение счетчика, а признаками отказа/восстановления, соответственно, переходы счетчика в нуль/из нуля.

Для ускорения расчета рассчитаем все пути от источника к приемнику заранее. После анализа [9], а также [1, 7] было предложено использовать рекурсивную процедуру поиска в глубину. Одна и та же вершина может включаться в разные ветви поиска, но не в одну и ту же.

Можно сохранить все возможные пути и затем проверить их каждый раз при восстановлении элемента в отказавшей системе и при отказе в функционирующей. Но есть более простой способ. Сопоставим каждый элемент со списком путей, в которые он входит. Сами пути хранить не надо. Каждый путь сопоставим с другим счетчиком – числом выпавших из него элементов. Признаком возможного пути является счетчик, равный нулю. При каждом отказе элемента будем инкрементировать счетчики

путей, в которые он входит, а при восстановлении – декрементировать их.

Признаком исправной системы в данном случае будет наличие пути с нулевым счетчиком. Заведем счетчик числа исправных *путей и будем изменять его значение при отключении/включении путей*.

Рассмотрим пример системы счетчиков. В качестве примера возьмем систему AllR, но для сокращения размеров схемы будем полагать линии связи абсолютно надежными. Результат – на рис. 2. Стрелками указываются воздействия счетчиков друг на друга.

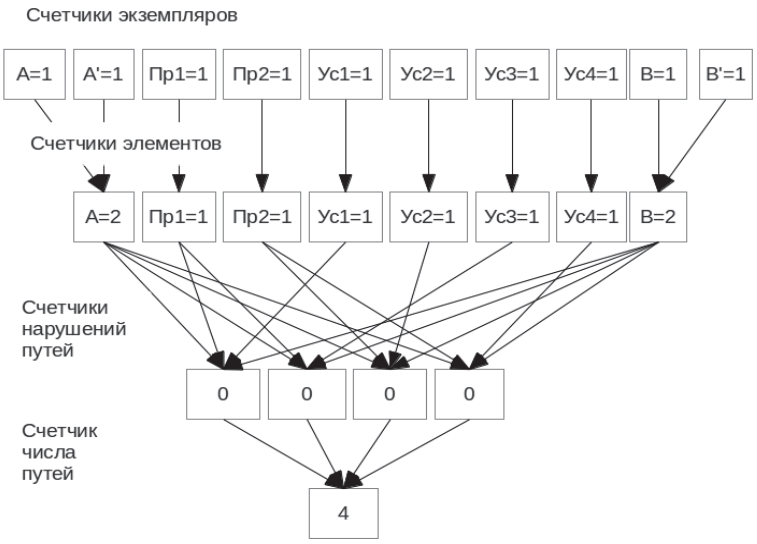


Рис. 2. Система счетчиков

В силу того, что рассматривается стационарный режим, моделирование необходимо ограничить по времени. *Число отказов* – это количество измерений времени рабочего состояния, а *число восстановлений* – времени отказа. Коэффициент готовности рассчитывается как

$$K = \frac{T_{wrk}}{T_{wrk} + T_{brk}}.$$

В данном случае моделирование можно проводить методом одного достаточно длинного испытания. Однако, чтобы легче было оценивать погрешность коэффициента готовности, проведем 30 испытаний (в литературе [3, 10, 12] рекомендуется минимум 20–40 испытаний). Это вполне достаточно, чтобы использовать ЦПТ. Время испытания в этом случае составит $3 \cdot 10^5$ ч $\approx 34{,}2$ года. Суммарное время всех испытаний $9 \cdot 10^6$ ч $\approx 1026{,}7$ лет. Это даст погрешность <1 % для временных показателей и $<0{,}1$ % для коэффициента готовности.

2. Рассмотрение политик восстановления

Сначала рассмотрим среднее время работы системы (рис. 3). Видно, что закон восстановления не играет роли.

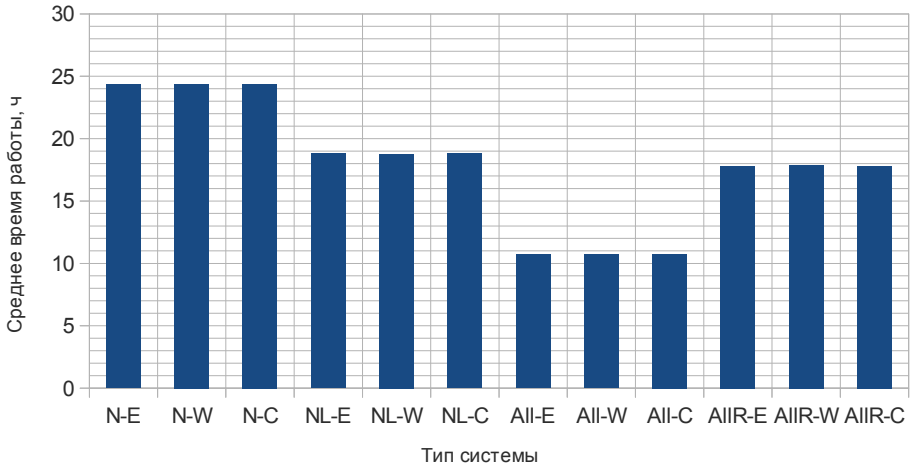


Рис. 3. Среднее время работы системы

Аналогичная картина наблюдается со средним временем отказа (рис. 4) и коэффициентом готовности (рис. 5).

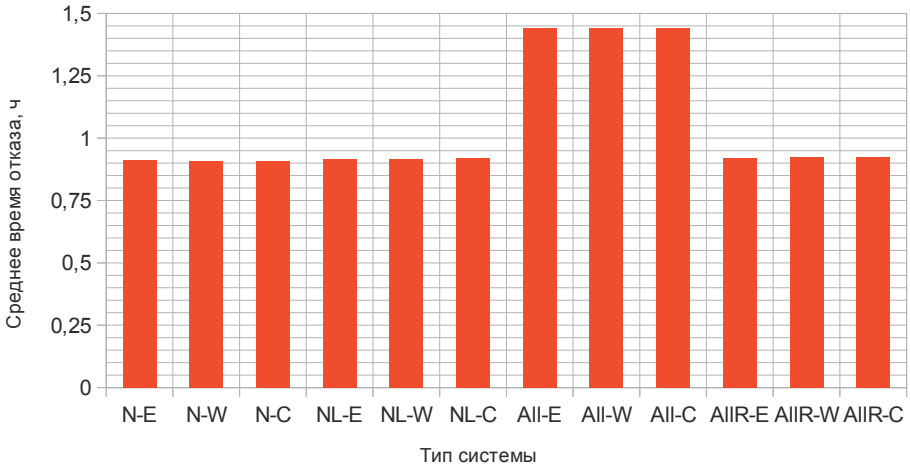


Рис. 4. Среднее время отказа

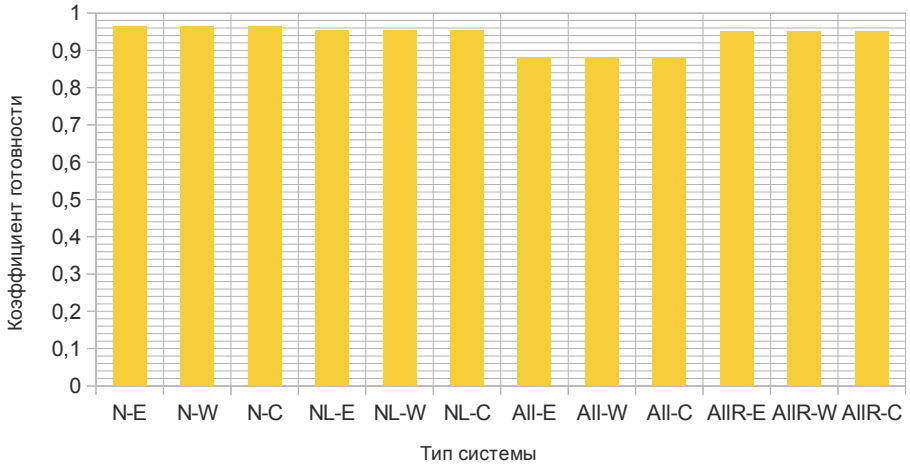


Рис. 5. Коэффициент готовности

3. Влияние допущений абсолютной надежности

Необходимо проанализировать, как допущения абсолютной надежности влияют на результат (рис. 3–5).

Очевидно, что допущение абсолютной надежности линий связи несостоятельно.

Резервирование и восстановление вместе значительно увеличивают время безотказной работы промежуточных элементов. Но в системе All источник и приемник не имеют резерва, а значит, несмотря на низкую интенсивность отказов, по сравнению с другими узлами, они являются слабым звеном. Поэтому возникает необходимость в резервировании источника и приемника. Этот вариант отражен в системе AllR. Наличие одного резервного элемента для источника и одного резервного элемента для приемника делает их работу практически абсолютно надежной по сравнению с элементами остальной системы. Без резервирования восстановление никак не влияет на работоспособность приемника и источника.

Заключение

Предложена новая имитационная модель, основанная на анализе комбинаций отказовых и рабочих состояний узлов и каналов связи.

Для конкретного варианта системы с избыточностью получены оценки различных параметров надежности – среднего времени безотказной работы, среднего времени пребывания системы в состоянии отказа и коэффициента готовности – с учетом возможности отказов каналов связи и резервированием отдельных узлов.

Наиболее уязвимыми узлами в системе являются начальный и конечный (источник и приемник) в силу отсутствия их резервирования. Были предложены меры по их резервированию. Данная картина косвенно свидетельствует о правильности построения модели.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Аль-Хадша, Ф. А. Х.* Выбор в сети k-кратчайших путей / Ф. А. Х. Аль-Хадша // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 11(84) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 12). – С. 136–137.

2. Имитационная модель гетерогенной вычислительной системы / В. С. Лукьянов, Д. Н. Жариков, С. В. Гаевой, Д. С. Попов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 9(82) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 11). – С. 85–88.

3. Имитационное моделирование грид-систем : моногр. / В. С. Лукьянов, А. Е. Андреев, Д. Н. Жариков, А. А. Островский, С. В. Гаевой ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – 215 с.

4. *Лукьянов, В. С.* Модели анализа вероятностно-временных характеристик и структур сетей передачи данных : моногр. / В. С. Лукьянов, А. В. Старовойтов, И. В. Черковский ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2006. – 184 с.

5. Моделирование отказоустойчивых GRID-систем / В. С. Лукьянов, Д. Н. Жариков, С. В. Гаевой, О. В. Шаповалов // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий : мат-лы Междунар. науч.-практ. конф. (Россия, г. Сочи, 1–10 окт. 2010 г.) / Московский гос. ин-т электроники и математики МИЭМ (ТУ) [и др.]. – М., 2010. – С. 253–254.

6. Моделирование GRID-систем / В. С. Лукьянов, Д. Н. Жариков, С. В. Гаевой, Ю. В. Шафран // Информационные технологии моделирования и управления. – 2009. – № 5. – С. 669–677.

7. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2010610693 от 20 янв. 2010 г. РФ, МПК (нет). Имитационная модель грид-системы (GridModel) / В. С. Лукьянов, Д. Н. Жариков, С. В. Гаевой, Ю. В. Шафран; ВолгГТУ. – Волгоград, 2010.

8. *Труханов, В. М.* Краткий курс теории и практики надежности сложных систем : учеб. пособие / В. М. Труханов ; ВолгГТУ. – 2-е изд., перераб. и доп. – Волгоград, 2008. – 162 с.

9. *Филлипс, Д.* Методы анализа сетей: пер. с англ / Д. Филлипс, А. Гарсиа-Диас. – М.: Мир. 1984. – 496 с., ил.

10. *Фоменков, С. А.* Моделирование систем [Электронный ресурс] / С. А. Фоменков. – Волгоград, 2004. – 1CD-ROM.

11. *Чернышов, К. В.* Показатели надежности технических систем : наработка до отказа, ресурс, срок службы : учеб. пособие / К. В. Чернышов ; Волгоград. гос. ун-т. – Волгоград : Политехник, 2007. – 80 с.

12. *Шеннон, Р.* Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Р. Шеннон ; пер. с англ. под ред. Е. К. Масловского. – М.: Мир, 1978. – 418 с.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

В сборнике научных статей «Известия высших учебных заведений», серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» публикуются статьи, которые содержат результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленных на совершенствование наземных транспортных и тяговых систем и их элементов, а также на повышение эффективности транспортных операций.

Вопрос об опубликовании статьи или ее отклонении решает редакционная коллегия сборника, которая утверждается ректором университета, ее решение является окончательным. Редколлегия направляет представленный для издания материал на рецензирование.

Рукопись должна быть набрана и сверстана в текстовом редакторе Word и распечатана на лазерном принтере в режиме полной загрузки тонера. Формат бумаги А4 (210×297 мм).

Для ускорения подготовки издания необходимо представлять файлы статей на дискетах или компакт-дисках (CD) в полном соответствии с распечатанным оригиналом. Дискета должна быть вложена в отдельный конверт, на этикетке дискеты указываются фамилии авторов статьи.

При наборе текста следует соблюдать следующие требования: поля – верхнее – 2,0 см, нижнее – 3,0 см, левое – 2,5 см, правое – 2,5 см; шрифт Times, кегль 14, интервал полуторный.

Текст набирается с применением автоматического переноса слов, перед знаками препинания (в том числе внутри скобок) пробелы не допускаются, после них ставится один пробел. Разрядка слов не допускается, следует избегать перегрузки статей большим количеством формул, рисунков, таблиц. Для набора символов в формульном редакторе MS Equation (MS Word) использовать установки (Стиль/Размеры) только по умолчанию; рисунки должны быть выполнены в редакторах векторной графики, таких как CorelDRAW или в любом приложении к Word. Допускается сканирование рисунков в программе Microsoft Photo Editor.

Инициалы и фамилия автора (авторов) пишутся над заглавием статьи. Ниже заглавия, перед основным текстом, указывается организация или предприятие, в котором работает автор статьи. В конце статьи ставится подпись автора (на бумажном варианте).

Литературные ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ 7.1–2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления». Библиографический список использованной литературы, составленный в порядке упоминания в тексте, дается в конце статьи; связь с основным текстом осуществляется цифровым порядковым номером в квадратных скобках в строке. Подстрочные ссылки не допускаются.

Иностранные фамилии и термины в тексте следует приводить в русском переводе. В библиографическом списке фамилии авторов, полное название книг и журналов приводится на языке оригинала.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

При обозначении единиц физических величин должна применяться Международная система единиц (СИ).

Объем статьи не должен превышать 8 страниц бумаги формата А4, включая таблицы и библиографический список; число рисунков – не более четырех, включая рисунки, помеченные буквами *а*, *б*, и т. д. Рекомендуется включать в сборник статьи с авторским коллективом не более четырех человек с участием каждого автора в одной – двух статьях.

Статьи должны представлять сжатое четкое изложение результатов, полученных автором без повторов приводимых данных в тексте статьи, таблицах и рисунках. К статье должны быть приложены: сведения об авторах (полное имя, отчество, фамилия, ученая степень, звание, домашний адрес, номер телефона служебный, домашний, E-mail), документация, подтверждающая возможность ее открытого опубликования.

Научное издание

И З В Е С Т И Я
Волгоградского государственного технического университета
№ 8 (111), 2013 г.

С е р и я «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ И ИНФОРМАТИКИ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»
Выпуск 16

Межвузовский сборник научных статей

Редактор *Л. Н. Рыжих*
Компьютерная верстка *Е. В. Макаровой*

Темплан 2013 г. (научные издания). Поз. № 52н.
Подписано в печать 18.06.2013. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл. печ. л. 20,00. Уч.-изд. л. 20,90.
Тираж 80 экз. Заказ

Волгоградский государственный технический университет.
400005, г. Волгоград, просп. им. В. И. Ленина, 28, корп. 1.

Отпечатано в типографии ИУНЛ ВолгГТУ.
400005, г. Волгоград, просп. им. В. И. Ленина, 28, корп. 7.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

УДК 004.94

В. В. Гетманский, А. С. Горобцов, Т. Д. Измайлов

РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЕ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТЕЛА В МНОГОТЕЛЬНОЙ МОДЕЛИ МЕТОДОМ ДЕКОМПОЗИЦИИ РАСЧЕТНОЙ ОБЛАСТИ

Волгоградский государственный технический университет

victor.getmanskiy@gmail.com

Рассмотрен параллельный метод моделирования напряженно-деформированного состояния тела в составе динамической модели системы тел. Реализована многопоточная версия расчетного модуля, приведены алгоритмы синхронизации и пример моделирования деформируемого рычага подвески в составе многотельной модели автомобиля.

Ключевые слова: мультифизическое моделирование, многопоточность, напряженно-деформированное состояние, декомпозиция, динамика систем тел.

V. V. Getmanskiy, A. S. Gorobtsov, T. D. Ismailov

PARALLELIZATION OF STRESS-STRAIN SOLVER COUPLED WITH MULTIBODY SOLVER USING DOMAIN DECOMPOSITION

Volgograd State Technical University

A parallel method of stress-strain simulation of single body in multibody dynamic model is proposed. Multithreaded implementation using POSIX threads library. Custom synchronization algorithms are implemented and example of deformable lower arm simulation in multibody truck model is given.

Keywords: multiphysics simulation, multithreading, stress strain solver, domain decomposition, multibody dynamics.

Введение

Для моделирования напряженно-деформированного состояния предлагается использовать параллельный метод дискретных элементов. Традиционным для решения таких задач является метод конечных элементов (МКЭ), который имеет ряд недостатков в случае больших нелинейностей и позволяет получить только квазистатические напряжения при динамическом расчете.

При проектировании машин актуальной является задача определения напряжений в деталях, подверженных наибольшим динамическим нагрузкам. Одним из примеров является нижний рычаг подвески автомобиля. Для расчета напряжено-деформированного состояния (НДС) используются реакции в связях, с помощью которых рычаг крепится ко всей конструкции. Эти реакции можно получить из динамического расчета пространственной модели системы тел со связями. В предлагаемом методе используется слабое связывание [1] динамической модели и модели НДС, т. е. передача реакций происходит на шагах синхронизации времени из решателя модели автомобиля в решатель НДС рычага подвески. Для расчета динамической модели используется расширенная постановка Лагранжа в физических координатах [2, 3].

При численном интегрировании системы дифференциальных уравнений, описывающих динамическую модель системы тел, распараллеливание вычислений возможно только в рамках одной итерации. При большом количестве итераций малое время выполнения параллельных участков кода относительно общего времени расчета не позволяет эффективно использовать потоки OpenMP из-за высоких накладных расходов [4]. Для повышения эффективности параллельных вычислений в рамках рассматриваемой задачи был разработан метод

синхронного параллельного расчета НДС, основанного на декомпозиции области с использованием стандартных потоков POSIX и собственной реализации примитивов синхронизации.

Метод дискретных элементов для представления упругих свойств тел

Нижний рычаг подвески автомобиля испытывает сильные динамические нагрузки, поэтому при его проектировании необходимо проводить анализ надежности. Использование МКЭ дает квазистатическое распределение напряжений. Такой подход описан, к примеру, в работе [6], он имеет ряд недостатков, связанных с плохим соответствием результатов расчета в сильно нелинейном случае. Для расчета деформаций в упругом теле используется аппроксимация тела дискретными твердотельными элементами с шестью степенями свободы, при этом расчетная область представляет собой регулярную ортогональную сетку. Каждый дискретный элемент имеет от одного до шести связей с соседними по граням элементами. Из-за одинаковой формы дискретных элементов значительно упрощается составление системы уравнений движения в физических координатах, так как матрица инерции является диагональной, а все элементы с точностью до количества связей описываются одинаковыми обыкновенными дифференциальными уравнениями вида

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{y}} = \mathbf{q}(\dot{\mathbf{y}}, \mathbf{y}, t) - \mathbf{M}\mathbf{a}(t) + \mathbf{s}(\dot{\mathbf{y}}, \mathbf{y}), \qquad (1)$$

где $\mathbf{y}$ – координаты дискретных элементов; $\mathbf{M}$ – матрица инерции; $\mathbf{a}$ – вектор, составленный из компонент вектора ускорений твердого тела, входящего в полную динамическую модель; $\mathbf{s}(\dot{\mathbf{y}}, \mathbf{y})$ – силы стабилизации.

Функция $\mathbf{q}(\dot{\mathbf{y}}, \mathbf{y}, t)$ описывает силы между дискретными элементами. Случайные возмущения, передаваемые от динамической модели, могут вызывать смещение дискретных элементов, поэтому для их привязки к опорному телу введены силы стабилизации $\mathbf{s}(\dot{\mathbf{y}}, \mathbf{y})$. Уравнение (1) записано в системе координат опорного тела, поэтому правая часть (1) также содержит силы инерции, рассчитываемые на основе ускорений опорного тела из динамической модели.

Деформируемое тело привязано к твердому телу, которое связано с другими телами в системы тел. Как показано на рис. 1, связи могут быть двух типов: упруго-демпфирующая $\mathbf{f}_1 = \mathbf{f}$ и шарнирная (жесткая связь) $\mathbf{f}_2 = (\mathbf{r}_x, \mathbf{r}_y, \mathbf{r}_z)$. Для

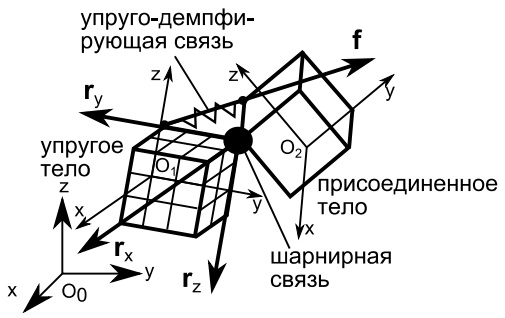


Рис. 1. Связи упругого тела с присоединенным телом

уравнений, описывающих граничные узлы, в правые части добавляются силы реакций, возникающие в связях. Уравнение для граничного элемента с использованием равномерного распределения внешних сил по граничным узлам имеет вид:

$$\mathbf{M}_i\ddot{\mathbf{y}}_i = \mathbf{f}(t)/|F| + \mathbf{q}_i(\dot{\mathbf{y}}, \mathbf{y}, t) - \mathbf{M}_i\mathbf{a}_i(t) + \mathbf{s}_i(\dot{\mathbf{y}}, \mathbf{y}), \quad i \in F, \qquad (2)$$

где F – множество индексов узлов, входящих в границу, к которой приложена сила $\mathbf{f}$.

Таким образом, данные, полученные из динамической модели, позволяют определить силы инерции и силы, возникающие в связях.

Уравнение (1) интегрируется явным методом Рунге – Кутта 4 порядка. При обновлении результатов расчета динамической модели происходит обновление правых частей для решателя НДС. Вспомогательная модель связана с динамической моделью в определенные шаги времени, которые могут не совпадать. Оба решателя итерационные, с шагами по времени Δt_{sub} для вспомогательной модели и Δt_{main} для основной. Для упрощения будем использовать только кратные шаги, т. е. если $\Delta t_{\text{sub}} < \Delta t_{\text{main}}$, $\Delta t_{\text{main}} = N \cdot \Delta t_{\text{sub}}$, где N – целое число. Так как шаги могут быть неодинаковыми, вводится общий счетчик времени с минимальным шагом Δt и счетчик времени для связывания с максимальным шагом Δt_{upd}. На каждом временном шаге вычисляются смещения дискретных элементов, по которым можно рассчитать деформации и напряжения, возникающие в упругом теле.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \psi & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \psi & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{13} \\ 2\varepsilon_{12} \end{bmatrix}, \qquad (3)$$

где σ – напряжения; ε – деформации; $\psi = \lambda + 2\mu$; $\lambda = E \cdot \nu / \left(1 - \nu^2\right)$; $\mu = E / \left(2 \cdot (1 + \nu)\right)$; E – модуль упругости материала.

Приведенные напряжения вычисляются в соответствии с гипотезой Мизеса:

$$\sigma = \sqrt{0{,}5 \sum_{i=1}^{2} \sum_{j=i+1}^{3} \left(\left(\sigma_{ii} - \sigma_{jj} \right)^2 + 6\sigma_{ij}^2 \right)}. \qquad (4)$$

Параллельный метод расчета НДС

При интегрировании используется понижение порядка уравнения (1) переходом к вектору неизвестных $\mathbf{x} = \left(\mathbf{y} \quad \dot{\mathbf{y}}\right)^{\mathrm{T}}$, при этом уравнение записывается в упрощенном виде как

$$\dot{\mathbf{x}} = \tilde{\mathbf{q}}(t, \mathbf{x}). \qquad (5)$$

Для шага интегрирования h:

$$\mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{x}_i + 1/6 \cdot \left(\mathbf{k}_1 + 2\mathbf{k}_2 + 2\mathbf{k}_3 + \mathbf{k}_4\right), \qquad (6)$$

где коэффициенты зависят от функций правых частей: $\mathbf{k}_1 = \tilde{\mathbf{q}}(t_i, \mathbf{x}_i)$; $\mathbf{k}_2 = \tilde{\mathbf{q}}(t_i + h/2, \mathbf{x}_i + \mathbf{k}_1/2)$; $\mathbf{k}_3 = \tilde{\mathbf{q}}(t_i + h/2, \mathbf{x}_i + \mathbf{k}_2/2)$; $\mathbf{k}_4 = \tilde{\mathbf{q}}(t_i + h, \mathbf{x}_i + \mathbf{k}_3)$.

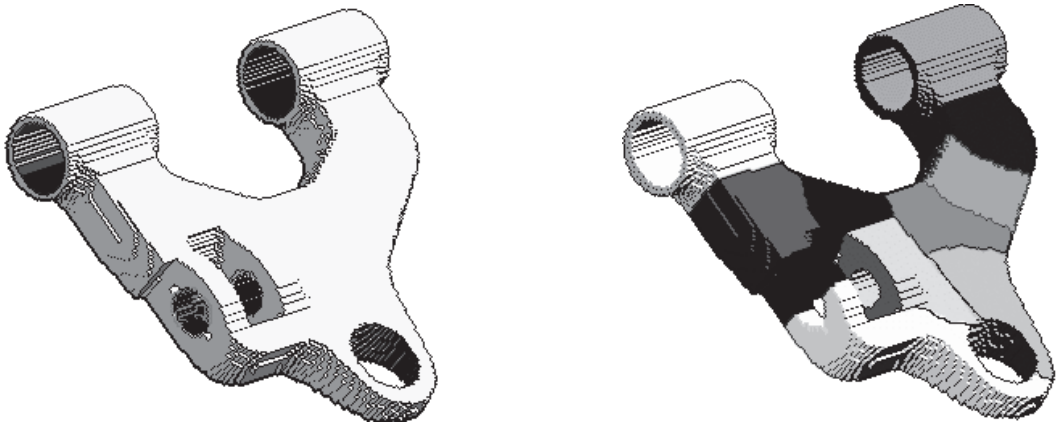
При расчете каждого из коэффициентов $\mathbf{k}_i$ происходит вычисление правых частей уравнения (5). При декомпозиции на подсистемы [5], для учета зависимостей по правым частям, после получения векторов коэффициентов, соответствующих полной модели, необходимо проводить пересылку данных из внутренних узлов во внешние для каждой пары смежных подмоделей; таким образом, необходимо четыре барьера: после вычисления каждого вектора коэффициентов $\mathbf{k}_1$, $\mathbf{k}_2$, $\mathbf{k}_3$, $\mathbf{k}_4$. Алгоритм параллельного метода приведен в таблице.

Параллельный алгоритм

1.	$t \leftarrow 0$, $t_{\text{sub}} \leftarrow 0$, $t_{\text{main}} \leftarrow 0$, $\Delta t \leftarrow \min\left(\Delta t_{\text{sub}}, \Delta t_{\text{main}}\right)$, $\Delta t_{\text{upd}} \leftarrow \max\left(\Delta t_{\text{sub}}, \Delta t_{\text{main}}\right)$
	Поток основной модели
2.	Пока $t < T$
3.	Если $t = t_{\text{main}}$
4.	Расчет реакций в связях для текущего времени
5.	$t_{\text{main}} \leftarrow t_{\text{main}} + \Delta t_{\text{main}}$
6.	Если $t = t_{\text{upd}}$
7.	Отправка реакций вспомогательным подмоделям
8.	Барьер
9.	Запись результатов расчета
10.	$t \leftarrow t + \Delta t$
	Поток каждой подмодели
11.	Пока $t < T$
12.	Если $t = t_{\text{upd}}$
13.	Барьер
14.	Обновление правых частей уравнений для решателя НДС
15.	$t_{\text{upd}} \leftarrow t_{\text{upd}} + \Delta t_{\text{upd}}$
16.	Если $t = t_{\text{sub}}$
17.	Расчет НДС для времени t_{sub} методом РК4
18.	Для $i \leftarrow 1$ до 4
19.	Расчет k_i
20.	Шаг обмена
21.	Барьер между подмоделями
22.	Расчет $y(t)$
23.	$t_{\text{sub}} \leftarrow t_{\text{sub}} + \Delta t_{\text{sub}}$
24.	Запись результатов расчета
25.	$t \leftarrow t + \Delta t$

Для получения высокой эффективности распараллеливания по данным с использованием декомпозиции критическими факторами являются сбалансированное разбиение и минимизация связей между подобластями.

1. Для декомпозиции области использованы многоуровневые методы декомпозиции графов [7], решающие NP-полную задачу минимизации сечений при декомпозиции графа с сохранением требуемого соотношения количества вершин в подграфах.



а *б*

Рис. 2. Модель нижнего рычага подвески до (*а*) и после (*б*) декомпозиции

Для декомпозиции использован многоуровневый алгоритм из библиотеки METIS [7], сохраняющий неразрывность подобластей. Результаты декомпозиции показаны на рис. 2, *б*. Для оценки качества декомпозиции использовались показатели избыточности R_n и дисбаланса D_n для разбиения на n частей, в каждой из которых N_i узлов, а требуемая относительная доля узлов P_i:

$$R_n = \sum_{i=1}^{n} \frac{N_i}{N}, \quad D_n = \max_i \left(\frac{|N_i - N \cdot P_i|}{N_i} \right). \quad (7)$$

Неравномерность распределения нагрузки в худшем случае составляет $R_{32} = 3\ \%$, а избыточность – для 32 частей $D_{32} = 4\ \%$.

Многопоточная реализация

Для распараллеливания использована библиотека для работы со стандартными потоками POSIX. Параллельная версия программы использует два примитива синхронизации потоков: барьер и сигнал без ожидания. При собственной реализации синхронизации используется ограниченный набор примитивов синхронизации, например, мьютексы, через которые можно создавать более сложные примитивы [8].

Механизм барьерной синхронизации гарантирует, что код, находящийся в программе после вызова барьера, не будет исполняться текущим потоком, пока число ожидающих в этом методе потоков не станет равно N. Используемая реализация допускает повторное использование барьера, необходимое для корректной работы циклической части программы. Барьер предотвращает преждевременное исполнение кода программы, расположенного после точки синхронизации, обеспечивая равную скорость работы нескольких потоков при их неравномерной загрузке.

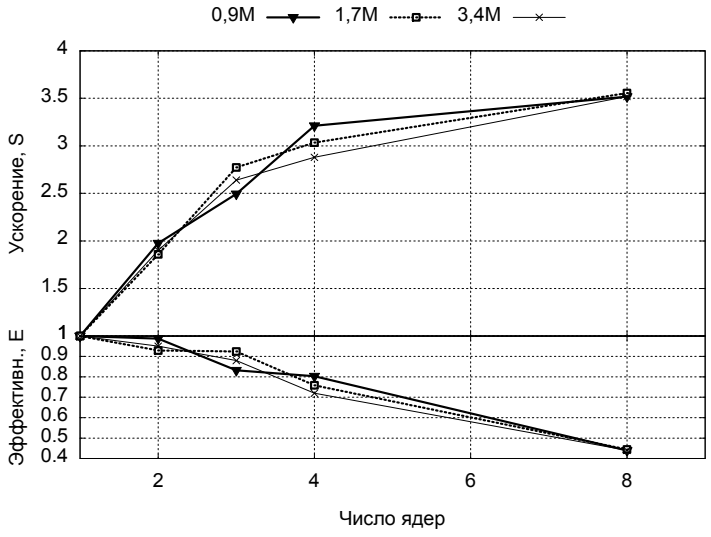
Синхронизация с использованием сигнала без ожидания расширяет функциональность условной переменной для использования в циклических частях программы. Сигнал без ожидания гарантирует, что поток, вызвавший метод ожидания, блокируется до тех пор, пока число вызовов этим потоком данного метода не окажется равным количеству срабатываний сигнала в сигнализирующем потоке. Сигнал без ожидания предотвращает исполнение кода программы, расположенного после точки синхронизации, ожидающими потоками до получения сигнала от сигнализирующего потока.

Результаты

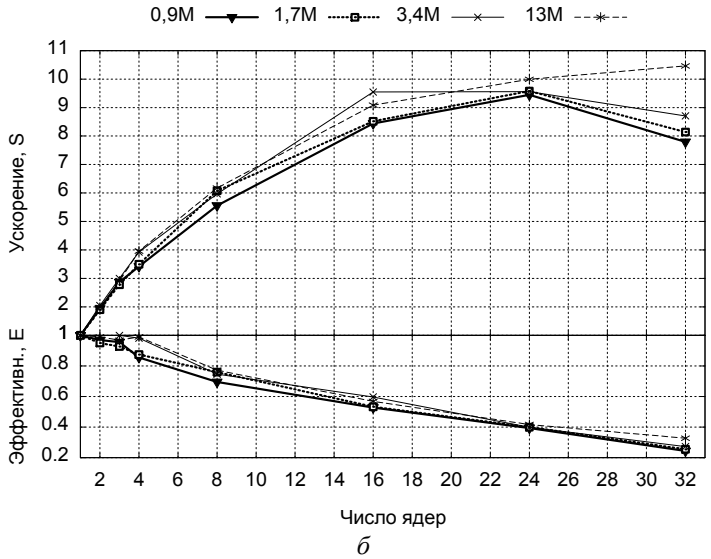
Исследовалось моделирование напряжений в рычаге подвески грузового автомобиля. Использовалась пространственная многотельная модель автомобиля [9] и дискретноэлементная модель деформируемого рычага (рис. 2). Результаты моделирования поля напряжений на одном из шагов по времени показаны на рис. 3.

Рис. 3. Результаты расчета НДС нижнего рычага подвески

Для расчетов использовались модели различной размерности. При параллельном расчете на небольшом количестве ядер, например, на ЭВМ с процессором Core i7-920 (рис. 4, *а*) ускорение практически не зависит от размерности. При использовании ЭВМ с двумя процессорами Opteron 6276 по 16 ядер каждый, ускорение продолжает расти после 24 ядер только на большой сетке с размерностью в 13 млн. дискретных элементов (рис. 4, *б*). При использовании сеток меньшей размерности ускорение падает из-за архитектуры с неоднородным доступом к памяти и сетевой деградации вычислений.



а



б

Рис. 4. Ускорение и эффективность параллельного расчета на платформе с одним 4-ядерным процессором Core i7 (*а*) и двумя 16-ядерными процессорами Opteron 6276 (*б*)

Полученное максимальное ускорение в 10 раз при использовании разработанного алгоритма синхронизации многопоточной программы превосходит получаемое с помощью распараллеливания с OpenMP почти в два раза, так как при использовании OpenMP возникают высокие на-

кладные расходы при порождении потоков на каждой итерации. Полученные результаты по ускорению и эффективности хорошо согласуются с исследованием, посвященным накладным расходам для многопоточных программ с OpenMP [10]. Разработанный параллельный метод применим для систем с распределенной памятью, так как предполагает независимый расчет подмоделей с синхронизацией.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Arnold, M.* Numerical methods for simulation in applied dynamics / M. Arnold // Simulation Techniques for Applied Dynamics / Ed. M. Arnold, W. Schiehlen. – Springer Vienna, 2008. – С. 191–246. – Англ.

2. *Bayo, E.* A modified Lagrangian formulation for the dynamic analysis of constrained mechanical systems / E. Bayo, J. Garcia de Jalon, M.A. Serna // Comput. Methods Appl. Mech. Eng. – 1988. – Vol. 71(2). – С. 183–195. – Англ.

3. *Valasek, M.* Multibody formalism for real-time application using natural coordinates and modified state space / M. Valasek, Z. Sika, O. Vaculin // Multibody System Dynamics. – 2007. – Vol. 17. – С. 209–227. – Англ.

4. *Carribault, P.* Enabling low-overhead hybrid MPI/OpenMP parallelism with MPC / P. Carribault, M. Pérache, H. Jourdren // Proc. of the 6th international conference on Beyond Loop Level Parallelism in OpenMP: accelerators, tasking and more. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. – С. 1–14. – Англ.

5. *Гетманский, В. В.* Решение задач большой размерности в системах моделирования многотельной динамики с использованием параллельных вычислений / В. В. Гетманский, А. С. Горобцов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 9 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 3). – С. 9–12.

6. *Rahman, M. M.* Modeling, analysis and fatigue life prediction of lower suspension arm / M.M. Rahman, M.M. Noor, K. Kadirgama, M.A. Maleque, R.A. Bakar // Advanced Materials Research. – 2011. – Vol. 264. – С. 1557–1562. – Англ.

7. *Karypis, G.* Multilevel algorithms for multi-constraint graph partitioning / G. Karypis, V. Kumar // Proc. of the 1998 ACM/IEEE conference on Supercomputing IEEE Computer Society. – Washington, DC, USA, 1998. – С. 1–13. – Англ.

8. *Downey, A. B.* The little book of semaphores 2nd edition / A.B. Downey. – CreateSpace, 2009. – 294 с. – Англ.

9. Concurrent simulation of multibody systems coupled with stress-strain and heat transfer solvers / В. В. Гетманский, А. С. Горобцов, Е. С. Сергеев, Т. Д. Измайлов, О. В. Шаповалов // Journal of Computational Science. – 2012. – Vol. 3, Iss. 6. – С. 492–497. – Англ.

10. *Fürlinger, K.* Analyzing overheads and scalability characteristics of OpenMP applications / K. Fürlinger, M. Gerndt // Proc. of the 7th international conference on High performance computing for computational science. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. – С. 39–51. – Англ.

УДК 537.53.001.5

А. В. Ермолаев, О. А. Оленникова, И. В. Поляков

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОНКУРЕНЦИИ ВИДОВ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ВОЗБУЖДЕНИИ КОМБИНАЦИОННЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ В СПЕКТРЕ ГЕНЕРАЦИИ МАГНЕТРОНА

Волгоградский государственный технический университет

magnetton@rambler.ru, kovolum@yandex.ru, liichkap@mail.ru

Рассматривается принцип построения самосогласованной математической модели магнетронного генератора. Показано, что при взаимодействии сигнала основного π-вида и побочного сигнала $\frac{N}{2}+1$-вида малой мощности в спектре выходного сигнала возможно появление комбинационных составляющих.

Ключевые слова: математическая модель, магнетронный генератор, сигнал, двухчастотное взаимодействие, комбинационные составляющие.

A. V. Ermolaev, O. A. Olennikova, I. V. Polyakov

MODELING OF THE BEHAVIOR OF THE ELECTRONIC EXCITATION OF COMBINATIONAL COMPONENTS IN THE SPECTRUM OF THE GENERATION OF THE MAGNETRON

Volgograd State Technical University

The principle of the construction of mathematical model of the magnetron generator is considered. It is shown that at interaction of the main signal π-mode and side signal $\frac{N}{2}+1$-mode of low power, in spectrum of output signal can appear combinational components.

Keywords: mathematical model, magnetron generator, signal, two-frequency interaction, combinational components.

В электронике приборов СВЧ компьютерное моделирование, широко развиваясь последние 50 лет, прочно утвердилось в качестве одного из основных инструментов исследования. Использование результатов компьютерного моделирования позволяет сократить время и стои-

мость разработки приборов, наметить новые пути повышения их эффективности. Развитие средств вычислительной техники позволяет усложнять математические модели, что приводит к тому, что появляется возможность анализировать «внутренние» характеристики электронно-волнового взаимодействия, недоступные в реальном эксперименте.

Большинство современных математических моделей используют метод самосогласованного поля. Такая математическая модель включает в себя уравнения движения заряженных частиц; уравнения, описывающие электрическое и магнитное поля; уравнения, описывающие эмиссию частиц.

При моделировании магнетронного генератора уравнения движения заряженных частиц в скрещенных электрическом и магнитном полях имеют вид [1]:

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} = |\eta| E_r + \frac{v_\varphi^2}{r} - \omega v_\varphi;$$

$$\frac{\partial v_\varphi}{\partial t} = |\eta| E_\varphi - 2\frac{v_r v_\varphi}{r} + \omega v_r; \qquad \frac{\partial v_z}{\partial t} = |\eta| E_z.$$

Здесь r,φ, z – координаты частицы в цилиндрической системе; v_r, v_φ. v_z – координатные составляющие скорости; E_r, E_φ, E_z – компоненты вектора суммарной напряженности высокочастотного, кулоновского и статического полей; ω – частота циклотронных колебаний.

Входящая в правую часть уравнений движения напряженность электрического поля представляется в виде суперпозиции напряженностей высокочастотного поля, постоянного поля приложенного между анодом и катодом и поля пространственного заряда [2]:

$$\mathbf{E} = \widetilde{\mathbf{E}} + \mathbf{E_0} + \mathbf{E'}.$$

Для нахождения распределения поля пространственного заряда решается уравнение Пуассона, записанное в цилиндрической системе координат:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial U}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 U}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = \rho(r,\varphi,z),$$

а затем, из соотношения

$$\mathrm{E}' = -grad\boldsymbol{U}\left(\mathrm{r},t\right)$$

вычисляется напряженность поля $\mathbf{E'}$ в точке нахождения частицы.

Высокочастотное поле $\widetilde{\mathbf{E}}$ резонансной системы представляют в виде разложения по структурным функциям электродинамической структуры магнетрона с коэффициентами, зависящими от времени:

$$\widetilde{\mathbf{E}} = \Sigma A_{\mathrm{n}}(t)\boldsymbol{e}_{\mathrm{n}}(x,y,z).$$

Амплитудная часть находится из системы уравнений возбуждения [3]:

$$\left(\frac{dA_n}{dt} - \delta_n A_n\right)\mathbf{e}^{-\delta_n t} =$$

$$= -\frac{1}{\pi N_n \omega_n \varepsilon_0}\int_{t-T_n}^{t}\int_V \frac{\partial \mathbf{j}}{\partial t}\mathbf{e}_{\mathrm{n}}\, dV\, cos\left(\omega_n \tau + \psi_n\right) d\tau;$$

$$\frac{d\psi_n}{dt} = -\frac{1}{\pi N_n \omega_n \varepsilon_0 A_n}\int_{t-T_n}^{t}\int_V \frac{\partial \mathbf{j}}{\partial t}\mathbf{e}_{\mathrm{n}}\, dV\, sin\left(\omega_n \tau + \psi_n\right) d\tau,$$

где N_n – эквивалентная емкость замедляющей системы или норма; T_n – период колебаний с номером n; j – возбуждающий ток; e_n – структурная функция поля данного вида колебаний.

$$e_r = -\frac{N\theta}{\pi kr}\sum_{m=-\infty}^{\infty}\gamma\left(\frac{\sin\gamma\theta}{\gamma\theta}\right)\frac{Z_\gamma(kr)}{Z'_\gamma(kr_a)}\sin(\gamma\varphi)\sin\left(\frac{\pi}{w}z\right),$$

$$e_\varphi = \frac{N\theta}{\pi}\sum_{m=-\infty}^{\infty}\left(\frac{\sin\gamma\theta}{\gamma\theta}\right)\frac{Z_\gamma(kr)}{Z'_\gamma(kr_a)}\cos(\gamma\varphi)\sin\left(\frac{\pi}{w}z\right),$$

где Z_γ и Z'_γ – комбинация функций Бесселя и Неймана:

$$Z_\gamma(kr) = \mathbf{J}_\gamma(kr) - \frac{\mathbf{J}_\gamma(kr_k)}{N_\gamma(kr_k)}N_\gamma(kr),$$

$$Z'_\gamma(kr) = \mathbf{J}'_\gamma(kr) - \frac{\mathbf{J}'_\gamma(kr_k)}{N'_\gamma(kr_k)}N'_\gamma(kr),$$

N – количество резонаторов в замедляющей системе; $\gamma = n + mN$ – постоянная распространения; k – волновое число; θ – половинный размер щели резонатора.

Предполагается, что взаимодействие заряженных частиц с электрическими и магнитными полями происходит в цилиндрическом трехмерном пространстве объемом V, ограниченном поверхностями анода и катода в радиальном направлении, а в аксиальном направлении – торцевыми экранами, которые в общем случае находятся под потенциалом катода.

Электронный поток представляется совокупностью модельных заряженных частиц-облаков («крупных частиц») объемом $dV = rdrd\varphi dz$, массой $m = Mm_e$ и зарядом $q = M e$, где M – коэффициент укрупнения; m_e и e – соответственно масса и заряд электрона. Выбор этого коэффициента влияет на соотношение между точностью модели и затратами основного ресурса ЭВМ-процессорного времени. Выбирается он таким образом, чтобы суммарный заряд всех частиц Nm_e и средняя плотность пространственного заряда $p = Nm_e/V$ в модели были бы такими же, как и в моделируемой фи-

зической системе. Число частиц N в модели должно удовлетворять условию $N>> n_d >> 1$, $n_d=n_0\ \lambda^3$ – дебаевское число, т. е. количество перекрытых облаков [4]; λ – дебаевский радиус экранировки; n_0 – концентрация частиц в рассматриваемом объеме. M имеет порядок нескольких миллионов, при этом количество частиц примерно составляет тысячи на одну пару резонаторов магнетрона. Такое представление заряда обычно называют CIC-методом [4].

Количество частиц N в модели с течением времени меняется вследствие поступления и ухода частиц через границы области. В реальной системе эти процессы обусловлены термоэмиссией и вторичной эмиссией.

В модели плотность тока частиц, эмитируемых с катода, задается в долях тока Ленгмюра цилиндрического диода в магнитном поле по формуле

$$j_L = 0,44\, j_L^* \left(1-\sqrt{1-\left(\frac{B_{\text{кр}}}{B}\right)^2}\right)\left(\frac{B}{B_{\text{кр}}}\right)^2 .$$

Координаты точек вылета частиц с поверхности катода определяются с помощью генератора псевдослучайных чисел с равномерным законом распределения, поскольку предполагается равномерность эмиссионных характеристик на площади катода. Для определения коэффициента вторичной эмиссии используется формула Паньшина [5]:

$$\sigma = 1,57\sigma_{\max}\left(\frac{E_{\text{кин}}}{E_{\max}}\right)^{0.45} \exp\left(-0,55\frac{E_{\text{кин}}}{E_{\max}}\right),$$

где $\sigma_{\max}$ – максимальный коэффициент вторичной эмиссии; $E_{\text{кин}}$ – кинетическая энергия первичной частицы; $E_{\max}$ – максимальная кинетическая энергия.

Вычисляемый с помощью формулы Паньшина коэффициент вторичной эмиссии, соответствующий кинетической энергии данной частицы, используется в качестве математического ожидания для генератора псевдослучайных чисел с пуассоновским законом распределения. Выходная целочисленная случайная величина рассматривается как количество вторично-эмиссионных частиц (обычно оно не больше 10), выбитых данной первичной частицей. Для того, чтобы избежать «налипания» частиц одной и той же порции друг на друга, они равномерно (точнее, псевдослучайно) распределяются в небольшой окрестности точки падения.

Работа программы начинается с обработки входных параметров и подготовки некоторых объектов модели, затем на печать выводятся значения редко изменяемых переменных, меняющихся в каждом цикле.

После этого начинается цикл по времени. Первым шагом в теле цикла является запуск порции частиц, моделирующий термоэмиссию с катода. Следующий этап – запуск вторично-эмиссионных частиц.

Моделирование поля пространственного заряда начинается с обнуления массива потенциала поля, заполнения его граничными условиями и раздачи заряда по узлам сетки по алгоритму «облако в ячейке», после чего решается уравнение Пуассона и находится распределение потенциала в пространстве взаимодействия.

Затем решаются уравнения движения, находятся распределение заряда на текущем временном шаге и интеграл взаимодействия.

На следующем этапе моделируются высокочастотные поля. Для каждого вида колебаний решается уравнение возбуждения и находятся амплитуды высокочастотного поля.

Тело цикла заканчивается выводом на печать изменяемых на каждом временном шаге переменных, необходимых для дальнейшей обработки.

После окончания работы цикла проводится окончательная обработка результатов (например, спектральный и корреляционный анализ), подготовка и вывод на печать графиков.

Рассмотренная модель позволяет исследовать широкий круг процессов, происходящих в магнетронном генераторе при взаимодействии электронного потока с высокочастотным полем сложного спектрального состава, отслеживать динамику электронного потока в этих процессах, вычислять основные выходные характеристики и спектральный состав выходного сигнала генератора [6].

Одной из интереснейших задач, решаемых с помощью этой модели, является исследование динамики электронного потока при конкуренции видов колебаний. В таких режимах помимо основного, π-вида колебаний, в генераторе возбуждается колебание побочного вида, чаще всего с номером $\frac{N}{2}\pm 1$. Долгое время такие колебания считались паразитными, от них старались избавляться, разделяя частоты колебаний так, чтобы частоты паразитных видов лежали далеко от достаточно узкой полосы пропуска-

ния генератора. Однако современные исследования процессов взаимодействия электронных потоков с полем полигармонической электромагнитной волны показывают, что влияние высокочастотного побочного сигнала может приводить к ряду эффектов, применение которых в классических магнетронах способно существенно расширить область применения этих приборов в устройствах электронной техники.

Одним из таких востребованных техникой эффектов является возбуждение в спектре генерации комбинационных составляющих и возможность управления частотой и уровнем этих гармоник. Так, в работе [7] показано, что комбинационные составляющие возбуждаются при подаче маломощного высокочастотного сигнала на дополнительный вход магнетрона.

Численные эксперименты, проведенные с использованием рассматриваемой модели, показывают, что возбуждение комбинационных составляющих возможно также при возбуждении в магнетроне $(N/2)+1$ вида колебаний с частотой, лежащей вне полосы пропускания. Для моделирования такого режима работы высокочастотное поле магнетрона рассматривается как суперпозиция полей π-вида и $(N/2)+1$ вида. Для расчета поля $(N/2)+1$ вид задаются его структурные функции e_r и e_φ, для вычисления амплитуды и фазы решается система уравнений возбуждения.

На приведенном ниже рисунке изображен спектр выходного сигнала магнетрона М-155, полученный для такого режима. Резонансная частота π-вида задается равной 2,45 ГГц, колебания $(N/2)\pm1$ равной 3,00 ГГц. Добротность побочного вида $Q_{\frac{N}{2}+1}$ = 1, однако норма (энергоемкость) этого сигнала подбирается таким образом, чтобы началось взаимодействие видов колебаний.

Для вычисления спектра используется дискретное преобразование Фурье в виде:

$$G(\omega_k)=\frac{1}{N}\sum_{m=1}^{N}P_m\exp(-i\frac{2\pi mk}{N}),$$

где P_m – значение анодного тока на m-м временном шаге интервала разложения; $\omega_k = k\Omega$ – частота k-й гармоники; N – число временных интервалов дискретизации, приходящихся на фундаментальный период.

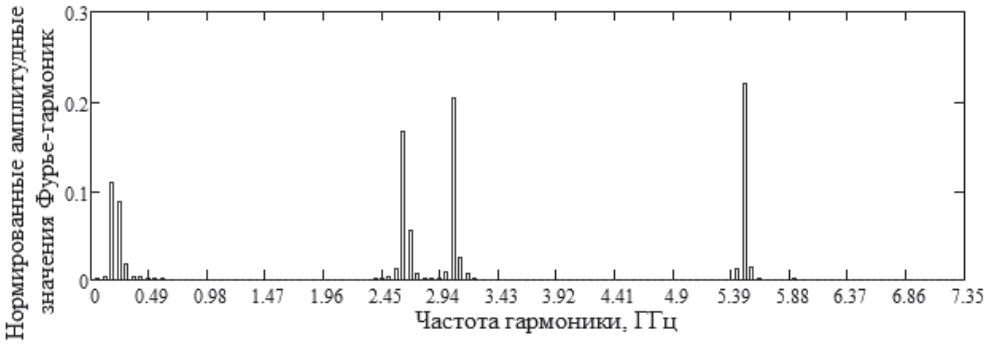
Полученные таким образом абсолютные значения амплитуд гармоник мощности на графике представляются в нормированном виде:

$$\frac{\left|G(\omega_k)\right|^2}{\sum_{j=1}^{M}\left|G(\omega_j)\right|^2},$$

где $\left|G(\omega_k)\right|^2$ – мощность приходящаяся на k-ю гармонику; $\sum_{j=1}^{M}\left|G(\omega_j)\right|^2$ – мощность всего спектра. Значение M (номер гармоники, на которой обрывается суммирование), зависит от распределения мощности в спектре электронного потока.

Спектр ВЧ-сигнала рассматривается в виде амплитудно-частотной характеристики, полученной разложением в ряд Фурье зависимости мгновенной электронной мощности от времени. По оси абсцисс на графике отложена частота гармоники. По оси ординат откладываются амплитудные значения Фурье-гармоник, нормированные на мощность спектра.

Для выделения гармоник, возникающих в спектре электронной мощности сигнала π-вида под влиянием сигнала побочного вида, Фурье-анализ сигнала проводится на интервале сигнала, составляющем около 40 периодов колебаний π-вида.



Колебания основного π-вида: добротность Q_π = 90. Колебания побочного $(N/2)+1$-вида: добротность $Q_{\frac{N}{2}+1}$ = 1. Анодное напряжение U_a=3,90 кВ

Спектр сигнала в двухчастотном режиме работы магнетронного генератора

Влияние побочного вида приводит к тому, что частота генерации основного вида колебания смещается на частоту 2,63 ГГц. Кроме того, в спектре появляются гармоники комбинационных составляющих. Одна из них, с частотой 3,04 ГГц, имеет уровень, равный –13,8 дБ, что превышает уровень основной гармоники, составляющей – 15,6 дБ. Две другие комбинационные составляющие: низкочастотная – 0,18 ГГц и высокочастотная – 5,49 ГГц. Уровень низкочастотной гармоники (–19,2 дБ), близок к уровню гармоники основного вида, а уровень высокочастотной (–13,2 дБ), к уровню гармоники, соответствующей частоте побочного вида колебаний.

Таким образом, использование рассмотренной математической модели классического магнетронного генератора позволяет рассчитывать режимы работы прибора, в которых взаимодействие электронного потока с несколькими возбуждаемыми высокочастотными сигналами приводит к насыщению спектра выходного сигнала комбинационными составляющими.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трехмерные цилиндрические уравнения движения электронов в неоднородных скрещенных полях / В. Б. Байбурин [и др.] // Радиотехника и электроника. – 2000. – Т. 45. – № 4. – С. 492–498.

2. *Моносов, Г. Г.* К решению уравнения Пуассона для пространства взаимодействия цилиндрического магнетрона на ЭЦВМ методом Фурье / Г. Г. Моносов // Электронная техника. Серия «Электроника СВЧ». – 1970. – Вып. 3. – С. 47–54.

3. Магнетроны сантиметрового диапазона / пер. с англ. под ред. С. А. Зусмановского. – М.: Советское радио, 1950. – Ч. 1. – 420 с.

4. *Хокни, Р.* Численное моделирование методом частиц : пер. с англ. / Р. Хокни, Дж. Иствуд. – М.: Мир, 1987. – 640 с.

5. *Паньшин, В. В.* Приближенный расчет энергии удара электронов об анод в магнетронных приборах / В. В. Паньшин // Электронная техника. Серия «Электроника СВЧ». – 1970. – Вып. 9. – С. 23–35.

6. *Снигур, А. А.* Экспериментальное исследование комбинационных составляющих в спектре излучения магнетронного генератора / А. А. Снигур, А. В. Ермолаев // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 3(63) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь» ; вып. 4). – С. 53–56.

УДК 519.71

В. В. Жога, В. Н. Скакунов, А. В. Филимонов, Д. В. Голубев

ДИНАМИКА МАРШЕВЫХ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ РОБОТА С ОРТОГОНАЛЬНЫМИ ДВИЖИТЕЛЯМИ

Волгоградский государственный технический университет

zhoga@vstu.ru, svn@vstu.ru

Разработанная математическая модель предназначена для параметрической оптимизации геометрических, массовых и энергетических характеристик робота, анализа его поведения в процессе эксплуатации, а также для синтеза системы управления движением.

Ключевые слова: робот с ортогональными движителями, математическая модель, алгоритмы движения робота, система управления.

V. V. Zhoga, V. N. Skakunov, A. V. Filimonov, D. V. Golubev

MARCHING DYNAMICS MODES OF THE ROBOT WITH ORTOGONAL PROPULSORS

Volgograd State Technical University

The developed mathematical model is designed to optimize the parametric geometry, mass and energy characteristics of the robot, the analysis of its behavior during operation, as well as for the synthesis of motion control systems.

Keywords: robot with orthogonal propulsors, mathematical model, algorithms of motion of the robot, control system.

Введение

Моделируется движение робота с шагающими движителями, схема которого изображена на рис. 1 [1]. Достоинства выбранного механизма состоят в надежности механизмов, исполнительные органы которых совершают поступательное движение; достаточности двух, независимо работающих приводов, осуществляющих курсовое движение и адаптацию к опорной поверхности; энергетической эффективности, обусловленной отсутствием затрат энергии на поддержание веса машины; простоте алгоритмов управления траекторией и законом движения опорной точки.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-08-00301-а)

Блочно-модульный принцип построения конструкции мобильного робота с использованием стандартных функциональных мехатронных модулей, имеет значительные преимущества при разработке специализированных роботов, наиболее полно отвечающих требованиям решения конкретной задачи и не обладающих избыточностью функций.

Предлагаемая математическая модель предназначена для параметрической оптимизации геометрических, массовых и энергетических характеристик робота, анализа его поведения в процессе эксплуатации, а также для синтеза системы управления движением. Достоверность информации, полученной при исследовании динамики движения робота с помощью математической модели, зависит от ее адекватности исходному физическому аналогу.

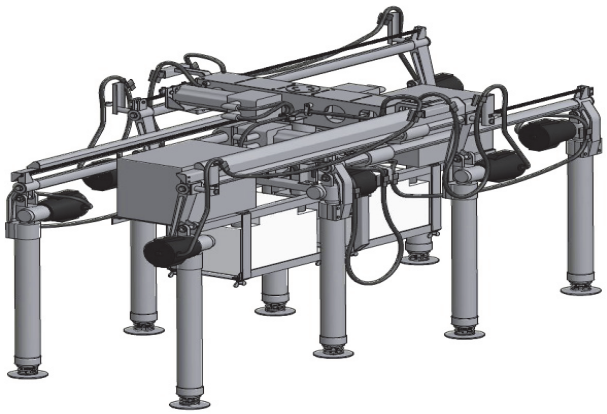


Рис. 1. Конструктивная схема робота

На практике часто используют несколько моделей [2, 3] для изучения характеристик одной и той же системы в разных режимах функционирования с учетом наиболее существенных для данного процесса факторов. Однако на этапе проектирования экспериментальные результаты зачастую отсутствуют, что не позволяет судить о приемлемости принятых допущений. Кроме того, мобильный робот с шагающими движителями представляет собой сложную мехатронную систему, состоящую из большого числа взаимосвязанных элементов, поэтому в ряде случаев анализ ее поведения не может быть выполнен с достаточной степенью точности исследованием простых моделей. В этих условиях целесообразно иметь универсальную динамическую модель пространственного движения робота по деформируемой опорной поверхности произвольного профиля, которая может быть трансформирована (на основании преемственности результатов) в более простые модели, предназначенные для решения частных задач.

Расчетная схема

Рассматриваемый робот (рис. 2) состоит из механической части, электродвигателей с редукторами, блока системы управления, системы очувствления и энергетической установки. Робот компонуется из модулей вертикальной адаптации и горизонтального перемещения.

Механическая часть представляется в виде шести массовых абсолютно твердых тел. На нижней части корпуса (*1*) массой m_1 размещены блок системы управления и энергетическая установка. Верхняя часть корпуса (*4*) массой m_4 связана с нижней частью корпуса цилиндрическим шарниром пятого класса. На каждой из частей корпуса закреплены по две направляющих, в которых с возможностью горизонтального перемещения установлены штанги (*2, 3, 5, 6*), каждая массой m_2, m_3, m_5, m_6, связанные с приводами горизонтального перемещения. На корпусе робота размещены энергетическая установка и блок системы управления. Корпус состоит из верхней и нижней частей, на каждой из которых закреплены пары направляющих. В направляющие пары установлены подвижные рамы с возможностью горизонтального перемещения, связанные с приводами горизонтального перемещения. На концах рамы смонтированы выдвижные вертикальные опорные стойки (рис. 1), связанные с приводами вертикального перемещения. На концах штанг смонтированы выдвижные опорные стойки, взаимодействующие с несущей поверхностью в точке, а реакция поверхности сводится к силам $\vec{N}_i$ ($i = 1 \div 8$).

Расчетная схема робота показана на рис. 2. Рассматривается движение робота относительно неподвижной системы отсчета $O\xi\eta\varsigma$ без маневрирования, т. е. без поворота верхней части робота относительно нижней. Оси координат C_1XYZ связаны с центром масс нижней части корпуса и перемещаются поступательно относительно неподвижной системы координат. Положение центра масс определяется радиус-вектором $\vec{r}_1$, вектором скорости $\vec{V}$ и вектором его угловой скорости $\vec{\omega}$. С каждым из твердых тел, составляющих механическую часть робота, связываются подвижные системы координат $C_kX_kY_kZ_k$ ($k = 1 \div 6$), оси которых являются главными центральными осями инерции.

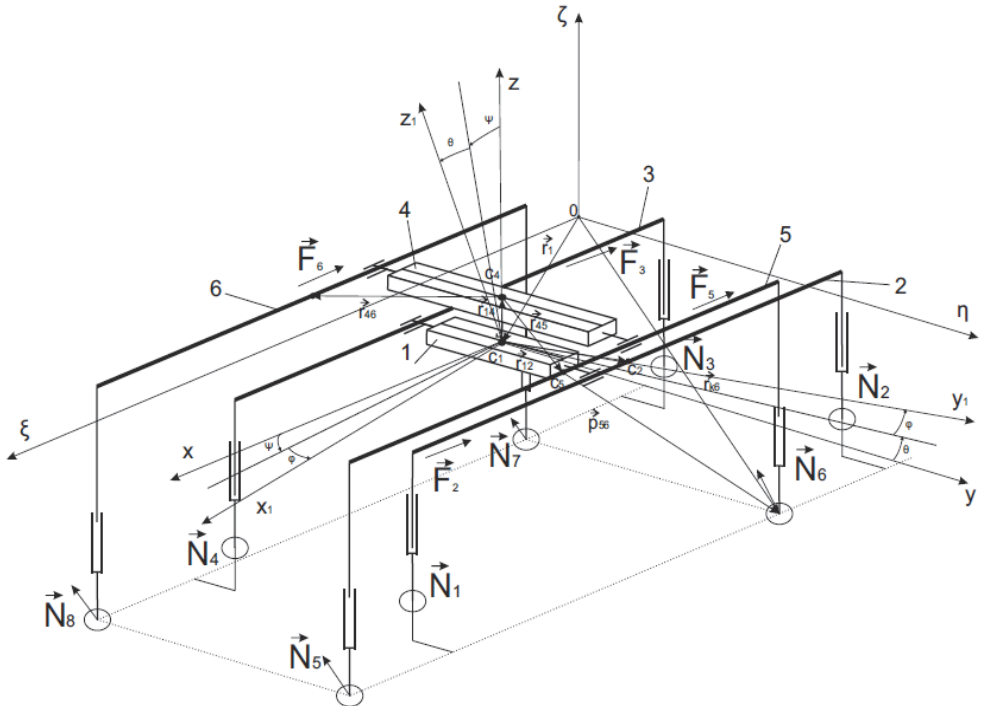


Рис. 2. Расчетная схема мобильного робота

В силу конструктивных особенностей робота и описываемого характера движений ориентация в пространстве главных центральных осей инерции всех частей робота одинакова. Их положения относительно осей C_1XYZ, перемещающихся поступательно, задаются с помощью корабельных углов Эйлера φ. ψ, θ. Статическая устойчивость робота возможна только при условии нахождения в контакте с опорной поверхностью не менее трех опорных стоек, расположенных по разные стороны оси продольной симметрии. Перемещение корпуса возможно при нахождении в опоре всех восьми опорных стоек. Таким образом, исследуемый робот представляет собой механическую систему переменной структуры. Его конфигурация, с учетом деформаций опорной поверхности, описывается минимум шестью, максимум восемью обобщенными координатами.

Математическая модель

Уравнения движения робота под действием сил тяжести, сил реакций опорной поверхности в точках контакта опорных плит составлялись в форме уравнения Лагранжа 2-го рода. Кинетическая энергия робота, как системы абсолютно твердых тел определяется выражением:

$$T = \sum_{i,k=1}^{i=3,k=6} \left(\frac{1}{2} m_k \dot{r}_k^2 + \frac{1}{2} I_{ik} \omega_{ik}^2\right), \qquad (1)$$

где $\dot{r}_k$ – скорость центра масс k части робота в абсолютной системе координат; I_{ik}, ω_{ik} – главные центральные моменты инерции и проекции вектора угловой скорости каждой из частей робота на оси подвижной связанной системы координат; $\vec{r}_{12}$, $\vec{r}_{13}$, $\vec{r}_{14}$ – радиус-векторы, определяющие положения центров масс второй, третьей (подвижные штанги) и четвертой (верхняя часть корпуса) частей робота, заданные своими проекциями в подвижной системе координат $C_1X_1Y_1Z_1$ нижней части корпуса; $\vec{r}_{45}$, $\vec{r}_{46}$ – радиус-векторы, определяющие положения центров масс пятой и шестой (подвижные штанги) части робота, заданные своими проекциями в подвижной системе координат $C_4\ X_4\ Y_4\ Z_4$ верхней части корпуса.

Радиус-векторы r_k в абсолютной системе координат, их производные по времени $\dot{r}_k$ определяются следующими выражениями (рис. 2):

$$\begin{aligned}
&\vec{r}_2 = \vec{r}_1 + \vec{r}_{12}, \quad \vec{r}_3 = \vec{r}_1 + \vec{r}_{13}, \quad \vec{r}_4 = \vec{r}_1 + \vec{r}_{14}, \quad \vec{r}_5 = \vec{r}_1 + \vec{r}_{14} + \vec{r}_{45}, \quad \vec{r}_6 = \vec{r}_1 + \vec{r}_{14} + \vec{r}_{46},\\
&\dot{\vec{r}}_2 = \dot{\vec{r}}_1 + \dot{\vec{r}}_{12} + \vec{r}_{12} \times \vec{\omega}, \qquad \dot{\vec{r}}_3 = \dot{\vec{r}}_1 + \dot{\vec{r}}_{13} + \vec{r}_{13} \times \vec{\omega}, \qquad \dot{\vec{r}}_4 = \dot{\vec{r}}_1 + \dot{\vec{r}}_{14} + \vec{r}_{14} \times \vec{\omega},\\
&\dot{\vec{r}}_5 = \dot{\vec{r}}_1 + \dot{\vec{r}}_{14} + \vec{r}_{14} \times \vec{\omega} + \dot{\vec{r}}_{45} + \vec{r}_{45} \times \vec{\omega}, \qquad \dot{\vec{r}}_6 = \dot{\vec{r}}_1 + \dot{\vec{r}}_{14} + \vec{r}_{14} \times \vec{\omega} + \dot{\vec{r}}_{46} + \vec{r}_{46} \times \vec{\omega},
\end{aligned} \qquad (2)$$

где $\dot{\vec{r}}_{12}$, $\dot{\vec{r}}_{13}$, $\dot{\vec{r}}_{14}$, $\tilde{r}_{45}$, $\dot{\vec{r}}_{46}$ – относительные производные радиус-векторов второй, третьей, четвертой, пятой и шестой частей робота.

Проекции вектора $\vec{r}_1$ в абсолютной системе координат: ξ,η,ς – обобщенные координаты. Проекции векторов $\vec{r}_{12}$, $\vec{r}_{13}$, $\vec{r}_{14}$, $\vec{r}_{45}$, $\vec{r}_{46}$ в собственных координатных системах: $x_{12}(t)$, $x_{13}(t)$, $x_{45}(t)$, $x_{46}(t)$ – относительные перемещения штанг (управляемые параметры, в режиме переноса опорных плит); y_{12}, z_{12}, $y_{13}=-y_{12}, z_{13}=z_{12}$, x_{14}, $y_{14}=0$, z_{14}, $y_{45}, y_{46}=-y_{45}$, $z_{45}=z_{46}$ – постоянные конструктивные параметры робота. Преобразование проекций векторов, заданных в подвижной системе к проекциям, заданным в абсолютной системе координат, осуществляется с помощью ортогональной матрицы поворота (направляющих косинусов).

Для принятого характера движения робота допустимо считать углы Эйлера малыми, тогда матрица поворота имеет вид:

$$\alpha=\begin{vmatrix} 1 & \varphi & -\psi \\ -\varphi & 1 & \theta \\ \psi & -\theta & 1 \end{vmatrix}, \qquad (3)$$

а проекции вектора угловой скорости робота $\vec{\omega}$, одинаковые для всех тел системы, на подвижные оси координат равны $\omega_1=\dot{\theta}$; $\omega_2=\dot{\psi}$; $\omega_3=\dot{\varphi}$.

Уравнения (2) с учетом (3) записываются в виде:

$$X_k=\xi+\alpha^T X_{1k}, \qquad (4)$$

где X_k – матрица столбец с элементами проекций векторов $\vec{r}_k$ (k=2,3,4); X_k – матрица столбец с элементами проекций векторов $\vec{r}_{1k}$ (k=2,3,4); ξ – матрица-столбец с элементами проекций вектора $\vec{r}_1$; α^T – транспонированная матрица поворота (3).

Аналогичные выражения имеют место и для векторов $\vec{r}_5, \vec{r}_6$.

Дифференциальные уравнения движения робота в матричной форме имеют вид:

$$A\ddot{q}=B(q,\dot{q})+F(t)+N(q,\dot{q}), \qquad (5)$$

где A – 10x10 симметричная матрица коэффициентов инерции; $B(q,\dot{q})$ – матрица-столбец слагаемых, зависящих от обобщенных координат и скоростей; $F(t)$ – матрица-столбец управляющих сил; $N(q,\dot{q})$ – матрица-столбец сил реакций опорной поверхности. Элементы матриц A и B:

$a_{11}=M$; $a_{12}=0; a_{13}=0$; $a_{14}=0$; $a_{15}=m_2(z_{12}+z_{13})-z_{14}(m_4+2m_5)-m_5(z_{45}+z_{46}); a_{16}=0; a_{17}=m_2$;

$a_{18}=m_3; a_{19}=m_5$; $a_{110}=m_6; a_{22}=M$; $a_{23}=0$;

$a_{24}=-m_2(z_{12}+z_{13})-z_{14}(m_4+2m_5)-m_5(z_{45}+z_{46})$; $a_{25}=0$;

$a_{26}=m_2(x_{12}+x_{14})+x_{14}(m_4+2m_5)+m_5(x_{45}+x_{46}); a_{27}=m_2\varphi; a_{28}=m_3\varphi; a_{29}=m_5\varphi; a_{210}=m_6\varphi$;

$a_{33}=M; a_{34}=0; a_{35}=-m_2(x_{12}+x_{13})+x_{14}(m_4+2m_5)+m_5(x_{45}+x_{46}); a_{36}=0; a_{37}=-m_2\psi$;

$a_{38}=-m_3\psi; a_{39}=-m_5\psi$; $a_{310}=-m_6\psi; a_{44}=I_{1\Sigma}$; $a_{45}=-I_{1xy}$; $a_{46}=-I_{1xz}$; $a_{47}=-m_2(z_{12}\varphi+y_{12}\psi)$;

$a_{48}=-m_3(z_{13}\varphi+y_{13}\psi); a_{49}=-m_5\left[(z_{14}+z_{45})\varphi+y_{45}\psi)\right]$; $a_{410}=-m_6\left[(z_{14}+z_{46})\varphi+y_{46}\psi\right]$;

$a_{55}=I_{2\Sigma}$; $a_{56}=0$; $a_{57}=m_2(z_{12}+x_{12}\psi)$; $a_{58}=m_3(z_{13}+x_{13}\psi)$; $a_{59}=m_5\left[(z_{14}+z_{45})+(x_{14}+x_{45})\psi\right]$;

$a_{510}=m_6\left[(z_{14}+z_{46})+(x_{14}+x_{46})\psi\right]; a_{66}=I_{3\Sigma}$; $a_{67}=-m_2(y_{12}-x_{12}\varphi)$; $a_{68}=-m_3(y_{13}-x_{13}\varphi)$;

$a_{69}=-m_5\left[y_{45}-(x_{14}+x_{45})\varphi\right]$; $a_{610}=-m_6\left[y_{46}-(x_{14}+x_{46})\varphi\right]$;

$a_{77}=m_2$; $a_{78}=0$; $a_{79}=0; a_{710}=0$;

$a_{88}=m_3$; $a_{89}=0$; $a_{810}=0; a_{99}=m_5$; $a_{910}=0$; $a_{1010}=m_6$.

$$b_1=\sum_{k=1}^{8}N_{k\xi}; b_2=-2\dot{\varphi}\left(m_2\dot{x}_{12}+m_3\dot{x}_{13}+m_5\dot{x}_{45}+m_6\dot{x}_{46}\right)+\sum_{k=}^{N}N_{k\eta};$$

$$b_3=2\dot{\psi}\left(m_2\dot{x}_{12}+m_3\dot{x}_{13}+m_5\dot{x}_{45}+m_6\dot{x}_{46}\right)+\sum_{k=1}^{8}N_{k\xi}-Mg;$$

$$b_4 = 2m_2\dot{x}_{12}\left(z_{12}\dot{\varphi} + y_{12}\dot{\psi}\right) + 2m_3x_{13}\left(z_{13}\dot{\varphi} + y_{13}\dot{\psi}\right) + 2m_5x_{45}\left[\left(z_{14} + z_{45}\right)\dot{\varphi} + y_{45}\dot{\psi}\right] + \\ + 2m_6x_{46}\left[\left(z_{14} + z_{46}\right)\dot{\varphi} + y_{46}\dot{\psi}\right] + M_\xi;$$

$$b_5 = \dot{\theta}\frac{dI_{1xy}}{dt} - \dot{\psi}\frac{dI_{2\Sigma}}{dt} + M_\eta; b_6 = -\dot{\varphi}\frac{dI_{3\Sigma}}{dt} + M_\xi;\ \ b_7 = -2m_2\varphi\dot{\varphi}\dot{x}_{12} - m_2\psi\dot{\psi}\dot{x}_{12};$$

$$b_8 = -2m_3\dot{x}_{13}\left(\varphi\dot{\varphi} + \psi\dot{\psi}\right);\ \ b_9 = -2m_5\dot{x}_{45}\left(\varphi\dot{\varphi} + \psi\dot{\psi}\right);\ \ b_{10} = -2m_6\dot{x}_{46}\left(\varphi\dot{\varphi} + \psi\dot{\psi}\right).$$

Опорные реакции

Для определения сил реакций взаимодействия опорной плиты с грунтом необходимо найти абсолютные координаты $\xi_i^\kappa, \eta_i^\kappa, \varsigma_i^\kappa$ точки входа ее в контакт с опорной поверхностью, т. е. координаты точки, одновременно удовлетворяющие уравнениям траектории опорной точки *i* штанги и поверхности грунта:

$$\begin{aligned} \varsigma_i^\kappa &= \varsigma + \alpha_{13}x_i + \alpha_{23}y_i + \alpha_{33}z_i, \\ \varsigma_i^\kappa &= f(\xi_i^\kappa, \eta_i^\kappa), \end{aligned} \qquad (6)$$

где ς – абсолютная координата центра масс корпуса робота; x_i, y_i, z_i – относительные координаты *i*-й опорной точки; α_{pq} – направляющие косинусы углов между осями $C_1X_1Y_1Z_1$ и C_1XYZ; $f\left(\xi_i^k, \eta_i^k\right)$ – уравнение опорной поверхности.

Для сокращения времени вычислений и выполнения условий устойчивости интегрирования момент касания опорной точки с грунтом определяется в точке пересечения прямой $\left[\left(\xi_i^k\right)^n, \left(\xi_i^k\right)^{n+1}\right]$ на *n* шаге интегрирования с уравнением поверхности $f\left(\xi_i^k, \eta_i^k\right)$ [4]. При дальнейшем взаимодействии опорной стойки с грунтом проекции силы реакции на оси неподвижной системы координат $O\xi\eta\varsigma$ определяются в соответствии с принятой реологической моделью грунта. При воздействии опоры шагающего движителя на грунт в нем возникают деформации, величина и характер которых обусловлены действием внешних и внутренних сил, вызывающих относительное смещение частиц. Наиболее простой моделью, описывающей характер взаимодействия опоры с грунтом, является вязко-упругая модель. Для нормальных реакций она имеет вид:

$$N = c_N\Delta_N + k_N\dot{\Delta}_N, \qquad (7)$$

где *N* – нормальная реакция грунта; Δ_N, $\dot{\Delta}_N$ – деформация и скорость деформации грунта; C_N – приведенный коэффициент жесткости грунта; k_N – приведенный коэффициент вязкого трения. Для касательных реакций

$$T = \begin{cases} c_\tau\Delta_\tau + k_\tau\dot{\Delta}_\tau, & \text{при } |T| < T_П, \\ f_{ск}N sign(\dot{\Delta}_\tau), & \text{при } |T| < T_П, \end{cases} \qquad (8)$$

где Δ_τ, $\dot{\Delta}_\tau$, c_τ, k_τ – имеют тот же смысл, что и для нормальных реакций; $T_П$ – сила трения покоя; $f_{ск}$ – коэффициент трения скольжения.

Описанная модель грунта является приближенной, однако ее применение оправдывается не только простотой, но и слабой корреляцией между характером деформирования грунта и большинством анализируемых параметров движения робота.

Программный комплекс расчета параметров шагающего робота

Математическая модель, описывающая динамику пространственного движения робота, реализована в виде комплекса программ на языке C# с использованием .NET Framework 4. Основной задачей программы является расчет и визуализация движения робота по результатам интегрирования дифференциальных уравнений движения. Файл исходных данных содержит управляющие переменные и параметры модели. В состав исходных данных входит признак продолжения решения – ноль или любое положительное целое число. При нулевом значении признака интегрирование начинается с нулевого значения времени и начальных условий по стандартной процедуре. При значении признака, отличного от нуля, интегрирование начинается с начальными условиями, записанными при предыдущем вызове программы. Это позволяет проводить последовательный расчет следующих друг за другом моделируемых режимов движения робота. Так, определение точных значений начальных условий проводилось в результате расчета динамики движения с неработающими приводами шагающих движи-телей.

Основной экран программы представлен на рис. 3. Окно разделено на несколько областей: область «Параметры модели» (рис. 4) отвечает за редактирование, сохранение и загрузку геометрических, весовых и динамических пара-

метров модели робота. Изначально уже установлены предполагаемые значения, однако имеется возможность изменить их во время работы программы.

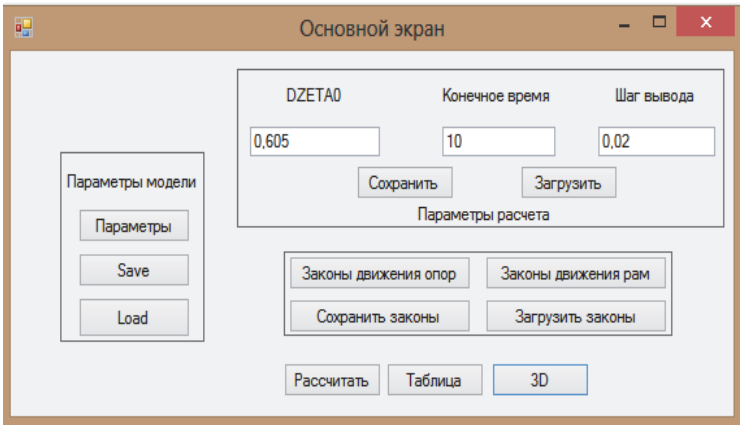


Рис. 3. Основной экран программы

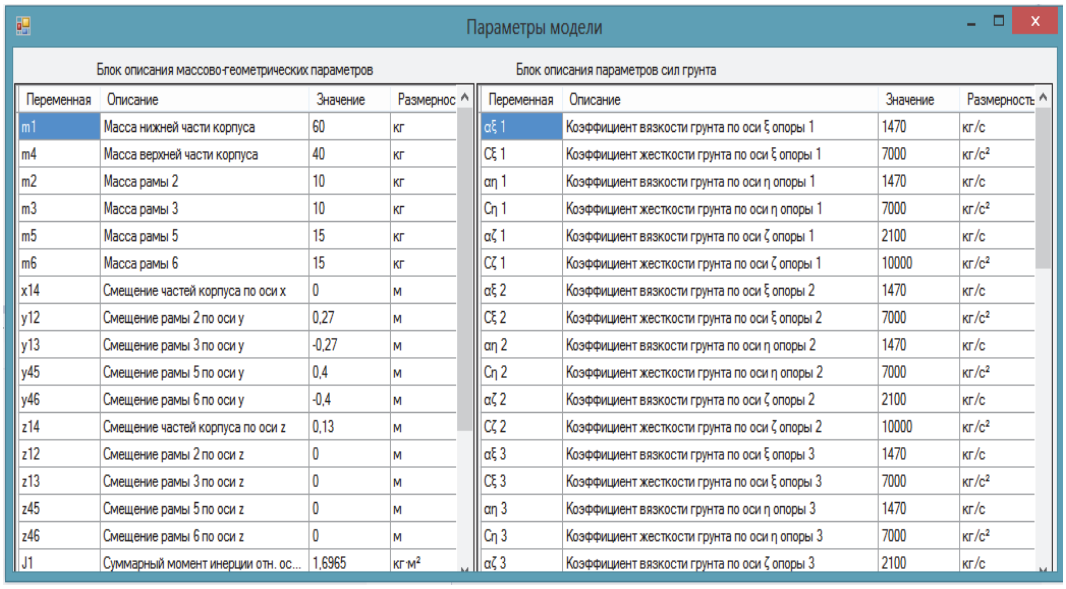


Рис. 4. Окно параметров модели

Блок «Параметры расчета» отвечает за установку начальной высоты, времени расчета, шага вывода данных расчета. Кнопками «Сохранить» и «Загрузить» осуществляется установка начального положения в пространстве робота.

Законы движения опор и рам задаются в соответствующих окнах (рис. 5, 6). В данном случае в полях левое и правое ограничение задаются временные промежутки действия законов, в поле $F(t)$ задается сила, действующая на соответствующую раму в соответствующий промежуток времени, выбрать которую можно в выпадающем списке в нижней правой части окна. В полях $X(t)$ и производная $X(t)$ задаются законы изменения скорости и координат опор.

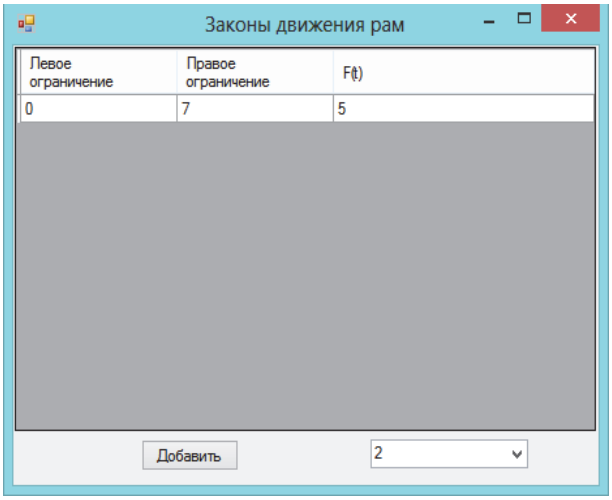


Рис. 5. Окно установки законов движения рам

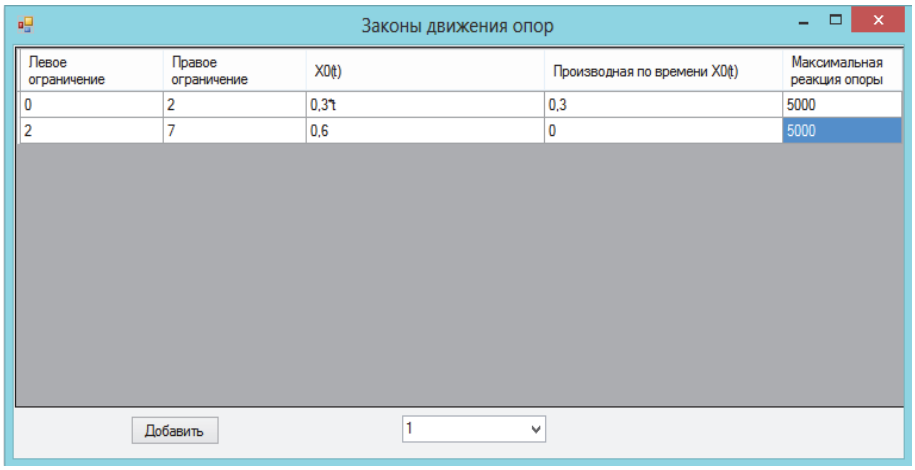


Рис. 6. Окно установки законов движения опор

После нажатия кнопки «Рассчитать» основного окна осуществляется интегрирование системы линейных дифференциальных уравнений по методу Рунге – Кутта – Мерсона. После окончания расчетов выдается таблица, содержащая полученные результаты. Для удобства анализа данных имеется возможность вывода графиков.

Визуализация полученных результатов (рис. 7) осуществляется при нажатии кнопки «3D» основного окна. Модуль визуализации предоставляет возможность наглядного отображения сил реакции опоры, пошагового отображения, перехода на шаг назад и перемотки на начало.

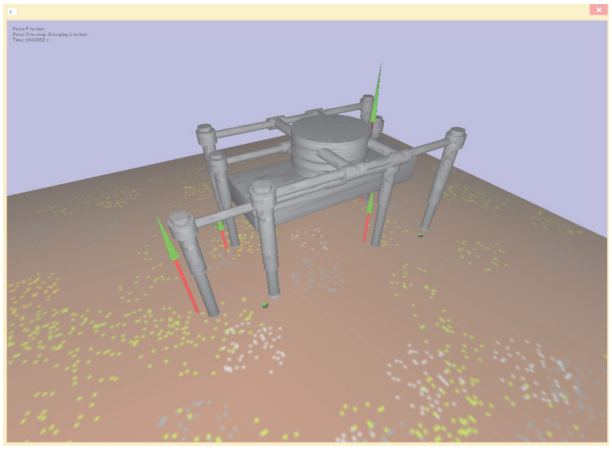


Рис. 7. Модуль визуализации

Математическая модель пространственного движения шагающего робота с ортогональными движителями позволяет решать задачи динамического анализа, проводить проверку допустимости упрощающих предположений при выборе динамических моделей различной сложности, используемых при решении частных задач – устойчивости, распределения реакций в опорах робота при задаваемых траекториях движения, а также определять энергозатраты на перемещение робота [4].

Результаты численного моделирования

При численном моделировании движений робота задавалась циклическая походка с постоянным коэффициентом режима [5]. Расчеты проводились для параметров робота и грунта, приведенных в таблице (рис. 4). На рис. 8 представлены расчетные зависимости нормальных реакций на опорных стойках одного левого борта (рис. 2) при движении по одному из множества старт-стопных режимов [6].

На первом интервале (этапе) движения определяются начальные условия робота, находящегося в покое на деформируемой поверхности. На втором участке движения происходит подъем опорных стоек второй и третьей рам робота. Реакции № 1 и № 2 (рис. 8) становятся нулевыми, а № 5 и № 6 соответственно увеличиваются. Горизонтальное перемещение второй и третьей рам происходит на третьем участке временной характеристики нормальных реакций, что отражается в незначительном изменении реакций пятой и шестой опор (№ 5, № 6). Четвертый участок соответствует опусканию опорных стоек второй и третьей рам (появляются реакции № 1 и № 2). На пятом участке происходит перемещение корпуса робота, обозначенного как части конструкции *1* и *2* на рис. 2.

Проведенные численные исследования позволили сформулировать технические требования к приводам экспериментального образца мобильного робота описанной конструкции.

1. Механическая мощность привода опорных стоек не менее 80 Вт; динамическое усилие – 500 Н; максимальная скорость – 0,17 м/с; ход максимальный – 400 мм; напряжение питания электродвигателя – 24 В.

2. Механическая мощность привода горизонтального перемещения – 160 Вт; максимальный момент на валу привода – 4 Нм; угловая скорость на приводном валу – 425 об/мин.

3. Механическая мощность привода поворота – 60 Вт; максимальный момент на валу привода – 34 Нм; угловая скорость на приводном валу – 17 об/мин.

Рис. 8. Временные диаграммы нормальных реакций

Выводы

Математическая модель пространственного движения шагающего робота с ортогональными движителями позволяет решать задачи динамического анализа, проводить проверку допустимости упрощающих предположений при выборе динамических моделей различной сложности, используемых при решении частных задач – устойчивости, распределения реакций в опорах робота при задаваемых траекториях движения, а также определять энергозатраты на перемещение робота.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Жога, В. В.* Оптимальный закон горизонтального перемещения мобильного робота с ортогональными шагающими движителями / В. В. Жога, А. Е. Гаврилов, А. В. Еременко // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 6(66) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 8). – С. 28–32.

2. *Жога, В. В.* К оценке эффективности шагающих движителей / В. В. Жога // Теория механизмов и машин. № 47. – Харьков, 1989. – С. 3–7.

3. *Гаврилов, А. Е.* Синтез оптимального программного закона перемещения робота с ортогональными шагающими движителями / А. Е. Гаврилов, В. В. Жога, П. В. Федченков // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2011. – № 5. – С. 174–183.

4. *Жога, В. В.* Система показателей качества шагающих транспортных машин / В. В. Жога // Справочник. Инженерный журнал. № 5. – М.: Машиностроение, 1997. – С. 21–28.

5. *Жога, В. В.* Динамический алгоритм стабилизации походки шагающей машины / В. В. Жога, А. Е. Гаврилов // Искусственный интеллект. – 2008. – № 3. – С. 428–443.

6. *Жога, В. В.* Программные движения робота с ортогональным шагающим движителем / В. В. Жога, Ан. Е. Гаврилов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 9(82) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 11). – С. 22–28.

УДК 621.762.4.044

А. В. Крохалев, В. О. Харламов, О. А. Авдеюк, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак

КОМПЬЮТЕРНЫЙ РАСЧЕТ ФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ СЖАТИЯ ПРИ ВЗРЫВНОМ ПРЕССОВАНИИ ПОРОШКОВ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОДЛОЖКАХ

Волгоградский государственный технический университет

kroch@vstu.ru

В работе рассмотрена методика расчетной оценки физических условий сжатия при взрывном нагружении порошков на металлических подложках, основанная на построении (P, u)-диаграмм процесса сжатия.

Ключевые слова: ударная волна, прессование порошков, ударная адиабата.

A. V. Krokhalev, V. O. Kharlamov, O. A. Avdeuk, S. V. Kuzmin, V. I. Lysak

COMPUTER CALCULATION OF COMPRESSION IN EXPLOSIVE LOADING POWDERSON METAL SUBSTRATES

Volgograd State Technical University

In this paper the technique of estimation of the physical conditions of compression under explosive loading of powders on metal substrates, based on the construction of (P, u)-diagrams of the compression process.

Keywords: shock of wave, compression of powders, shock adiabat.

При нанесении на поверхность деталей машин износостойких порошковых покрытий [1] оптимальной является схема нагружения, изображенная на рис. 1 и предусматривающая размещение исходной порошковой смеси непосредственно на поверхности металлической подложки и ее нагружение с помощью накладного заряда ВВ, отделенного от порошка промежуточной прокладкой.

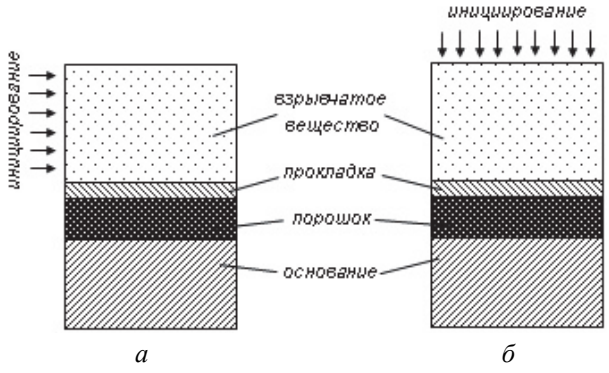


Рис. 1. Схема нагружения порошка взрывом:
а – скользящее нагружение; *б* – нагружение нормально падающей детонационной волной

Большинство имеющихся в настоящее время расчетных моделей оценки физических условий сжатия, реализуемых при использовании данной схемы, основано на решении задачи о метании продуктами детонации тел переменной массы и не учитывает процессов прохождения ударной волной самой прокладки и ее отражений от поверхности подложки и промежуточной прокладки. Это обстоятельство ограничивает расчет рассмотрением только первой ударной волны, распространяющейся по исходному неуплотненному порошку, и не позволяет оценить параметры его сжатия в отраженных ударных волнах. В полном объеме и точной постановке, однако, рассматриваемая задача практически не поддается решению, в связи с чем авторами была разработана методика приближенного решения, основанная на использовании метода (P, u)-диаграмм, базирующегося на поэтапном определении характеристик падающих и отраженных волн путем анализа пересечений ударных адиабат прокладки, порошка, основания и продуктов детонации в координатах «давление – массовая скорость» [4].

Необходимые для проведения расчетов ударные адиабаты продуктов детонаций, прокладки, порошка и основания строились по известной методике [2]. С целью реализации расчетов была составлена программа [3], общий вид основного рабочего окна которой приведен на рис. 2.

В окне предусмотрен выбор схемы нагружения и ввод необходимых для моделирования характеристик ВВ, порошкового материала, а также материалов промежуточной прокладки и основания, на котором располагается порошок. В результате расчета в поле табличного вывода выдаются параметры падающих и отраженных ударных волн в прокладке, порошке и основании, по которым может быть построена полная (P, u)-диаграмма процесса (рис. 3).

Помимо перечисленных параметров программа выдает время действия импульса макси-

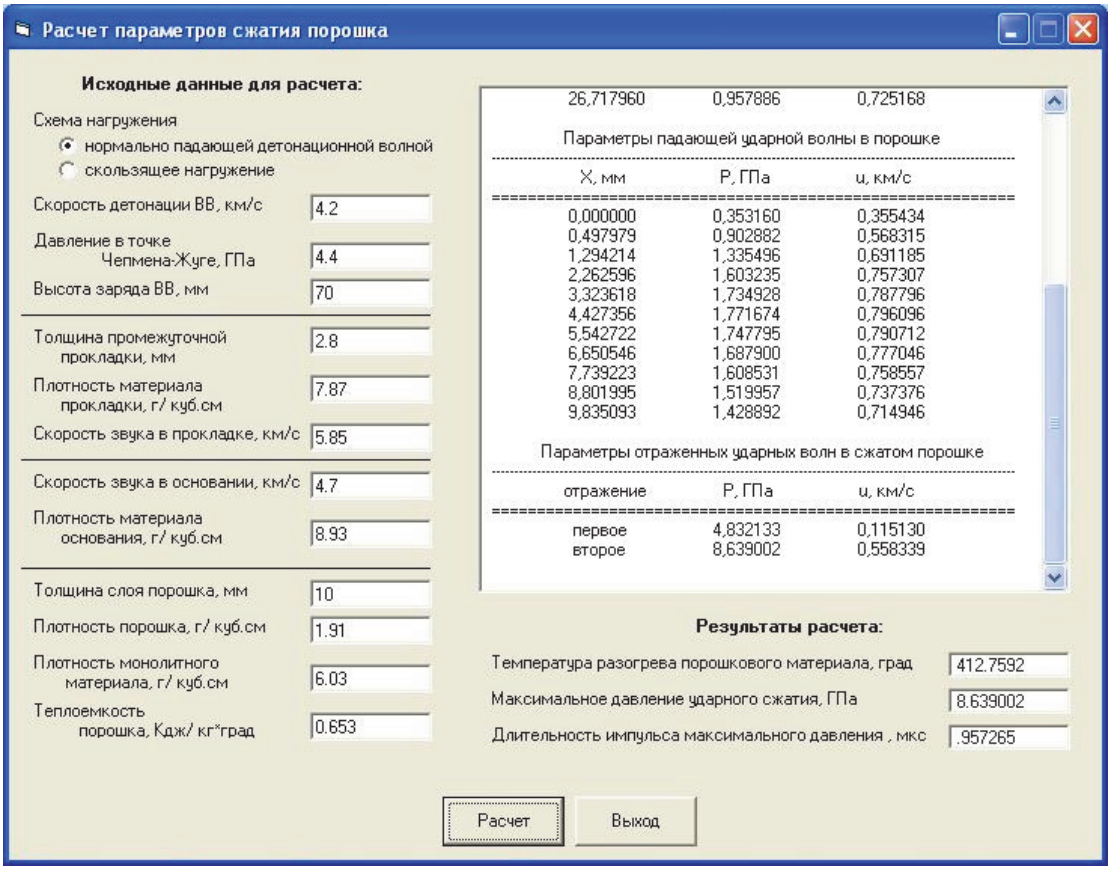


Рис. 2. Вид рабочего окна программы

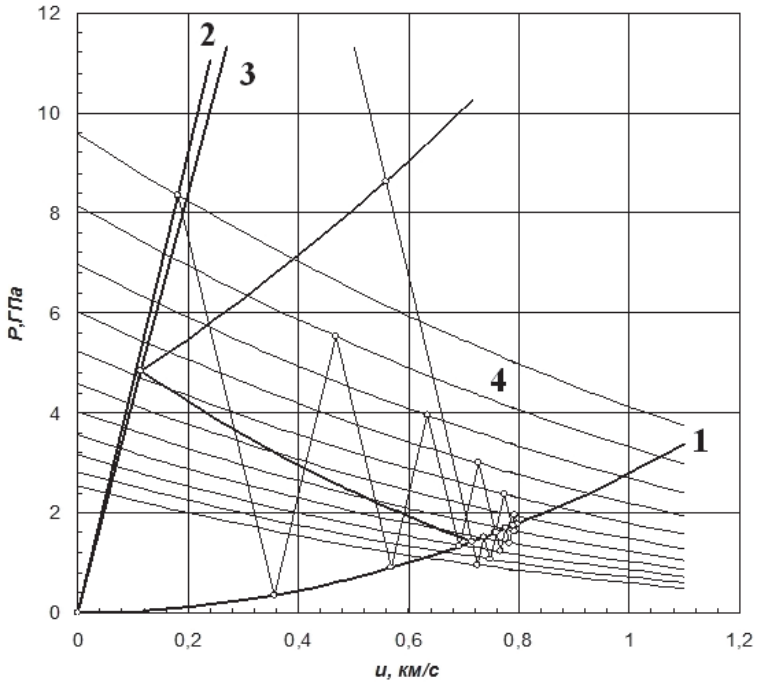


Рис. 3. Пример (P, u)-диаграммы процесса взрывного прессования:
1 – ударная адиабата порошкового материала; *2* – ударная адиабата промежуточной прокладки;
3 – ударная адиабата основания; *4* – адиабаты взрывчатого вещества в различные моменты времени

мального давления при взрывной обработке, которое для рассматриваемой схемы нагружения равно удвоенному времени прохождения ударной волной промежуточной прокладки,

и температуру разогрева порошка, вычисленную на основании приращения его внутренней энергии за фронтом падающей ударной волны.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Получение износостойких покрытий из смесей порошков карбида хрома с металлической связкой с использованием взрывного нагружения / А. В. Крохалев, В. О. Хаарламов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 5 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Сварка взрывом и свойства сварных соединений» ; вып. 4). – С. 117–122.

2. Компьютерный расчет параметров сжатия при нанесении порошковых покрытий взрывом / А. В. Крохалев, В. О. Харламов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 5 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Сварка взрывом и свойства сварных соединений» ; вып. 4). – С. 110–116.

3. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2010616142 (РФ). Программа для расчета параметров сжатия порошковых материалов при импульсном нагружении (взрывное компактирование) / А. В. Крохалев, В. О. Харламов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак. – 2010.

4. Компьютерный расчет параметров сжатия при взрывном нагружении порошков на металлических подложках / А. В. Крохалев, В. О. Харламов, О. А. Авдеюк, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак / Тезисы МНПК «Инновационные информационные технологии», Прага, 23–27 апреля 2012 г. – С. 210–212.

УДК 669.018.25.017

А. В. Крохалев, В. О. Харламов, О. А. Авдеюк, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак

КОМПЬЮТЕРНОЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ КАРБИДА ХРОМА

Волгоградский государственный технический университет

kroch@vstu.ru

Приведены результаты термодинамического моделирования фазовых равновесий в системах Cr-C-Cu, Cr-C-Ni и Cr-C-Cr. Описаны особенности возможного взаимодействия между компонентами карбидохромовых твердых сплавов с различной связкой.

Ключевые слова: компьютерное термодинамическое моделирование, квазибинарное сечение, фазовый состав сплавов.

A. V. Krokhalev, V.O. Kharlamov, O. A. Avdeuk, S. V. Kuzmin, V. I. Lysak

COMPUTER SIMULATION OF THE PHASE HARD ALLOYS BASED ON CHROMIUM CARBIDE

Volgograd State Technical University

The results of thermodynamic modeling of phase equilibria in the systems Cr-C-Cu, Cr-C-Ni and Cr-C-Cr. The features of possible interact-tion between the components karbidohromovyh hard alloys with a different band.

Keywords: computational thermodynamic modeling, quasi-binary section, phase composition of alloys.

В настоящее время твердые сплавы чаще всего получают путем прессования исходных смесей порошков тугоплавких карбидов с металлами и спекания. Это накладывает определенные ограничения на подбор состава материалов, связанные, прежде всего, с химической совместимостью компонентов сплавов, и не позволяет принципиально повысить их эксплуатационные свойства. Решение этих проблем может быть найдено путем использования при компактировании порошковых смесей карбидов с металлами энергии взрыва. Взрывная обработка порошков позволяет одновременно достигать и давлений, достаточных для уплотнения порошков до практически беспористого состояния, и температур, достаточных для сварки структурных компонентов порошкового материала в единое целое [1, 2].

Для анализа процессов, происходящих при ударно-волновом воздействии на порошковые смеси, большое значение имеет информация о характере межфазного взаимодействия между их компонентами. При использовании новых, малоизученных составов твердых сплавов подобная информация, как правило, отсутствует. В этих условиях приходится прибегать к проведению компьютерного термодинамического моделирования. Так, например, при исследовании триботехнических твердых сплавов на основе карбида хрома Cr_3C_2 с медной, никелевой и титановой связкой нами с использованием программного комплекса Thermo-Calc 5 были построены политермические разрезы тройных систем Cr-C-Cu, Cr-C-Ni и Cr-C-Cr, соответствующие квазибинарным системам Cr_3C_2-Cu, Cr_3C_2-Ni и Cr_3C_2-Ti (рис. 1–3).

Анализ полученных разрезов показал, что при использовании медной связки химическое взаимодействие между компонентами сплава практически отсутствует и жидкая фаза может

появляться при температуре плавления меди. Сплавы с никелевой связкой являются классическими квазиэвтектическими сплавами: жидкая фаза может появляться в них при температуре выше 1200 ºС, что существенно ниже температуры плавления никеля. При этом карбидная фаза способна растворяться в жидкости при нагреве и выпадать из нее при охлаждении. В результате при комнатной температуре фазовый состав сплавов будет близок к исходному.

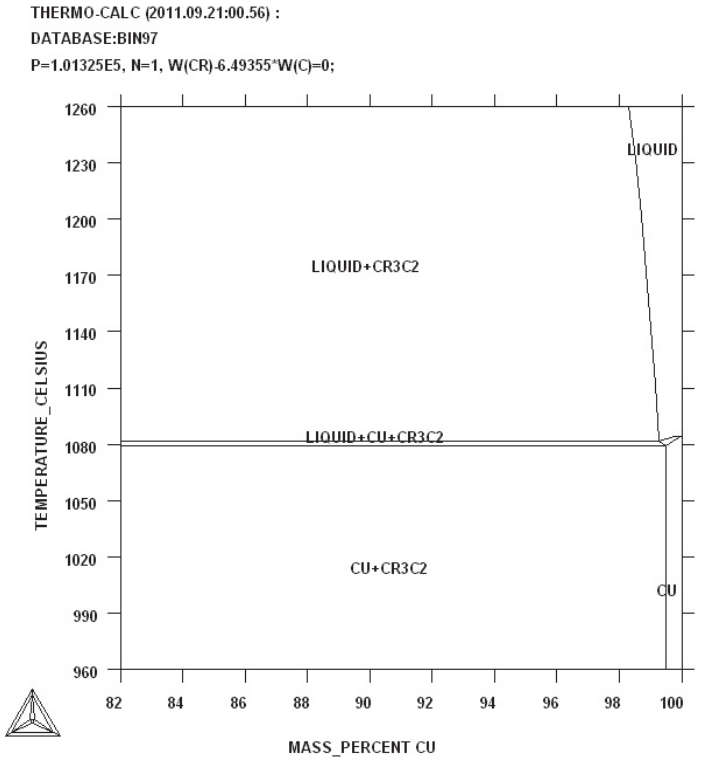


Рис. 1. Квазибинарное сечение Cr_3C_2-Cu системы Cr-C-Cu

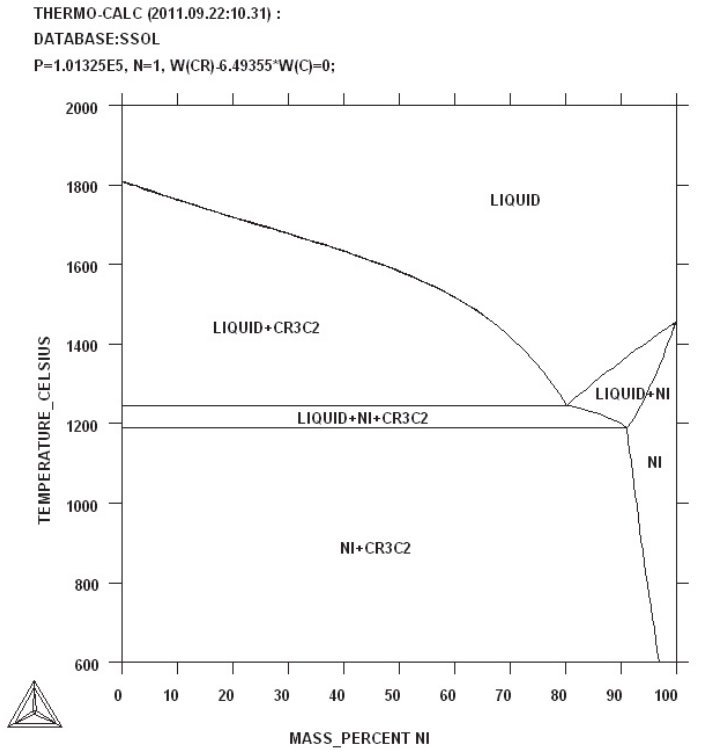


Рис. 2. Квазибинарное сечение Cr_3C_2-Ni системы Cr-C-Ni

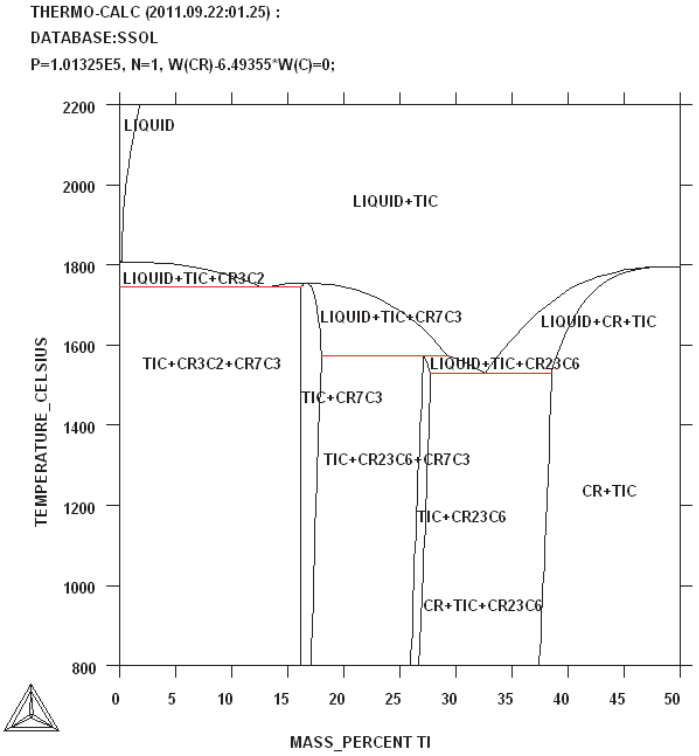


Рис. 3. Квазибинарное сечение Cr_3C_2-Ti системы Cr-C-Ti

В сплавах карбида хрома с титаном возможно химическое взаимодействие компонентов, ведущее к образованию карбида титана и обедненных углеродом карбидов хрома или даже чистого хрома. Спекание таких сплавов в отличие от сплавов с медью и никелем без изменения фазового состава практически невозможно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Получение износостойких покрытий из смесей порошков карбида хрома с металлической связкой с использованием взрывного нагружения / А. В. Крохалев, В. О. Харламов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 5 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Сварка взрывом и свойства сварных соединений» ; вып. 4). – С. 117–122.

2. Компьютерное моделирование фазового состава твердых сплавов на основе карбида хрома / А. В. Крохалев, В. О. Харламов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак // Тезисы МНПК «Инновационные информационные технологии», Прага, 23–27 апреля 2012 г. – С. 207–209.

УДК 621.762.4.044

А. В. Крохалев, В. О. Харламов, О. А. Авдеюк, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ КАРБИДНЫХ ЧАСТИЦ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ ПРЕССОВАНИИ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

Волгоградский государственный технический университет
kroch@vstu.ru

Приведены модельные представления и результаты расчетов кинетики выравнивания температуры по сечению частиц порошка при обработке ударными волнами.

Ключевые слова: математическая модель процесса, конечно-разностная аппроксимация, моделирование процесса сжатия порошка в ударных волнах.

A. V. Krokhalev, V. O. Kharlamov, O. A. Avdeuk, S. V. Kuzmin, V. I. Lysak

COMPUTER SIMULATION OF THE TEMPERATURE FIELD IN CARBIDE PARTICLES EXPLOSIVE PRESSING HARD ALLOYS

Volgograd State Technical University

Presents model concepts and results of calculations of the kinetics of temperature equalization in the cross section of powder particles in the processing of shock waves.

Keywords: mathematical model of the process, the finite-difference approximation, the simulation of the compression of powder in shock waves.

Расчет параметров ударно-волнового сжатия при взрывной обработке порошковых слоев на монолитных подложках может достаточно точно предсказать значение максимального давления, времени его действия и средней температуры разогрева порошка в процессе обработки [1…3]. Достоверность первых двух параметров особых сомнений не вызывает. Использование третьего требует, однако, определенной осторожности, так как известно, что при прохождении ударной волны по порошку распределение температуры по сечению его частиц может быть существенно неравномерным вследствие сосредоточенности процессов высокоскоростной деформации в поверхностных слоях частиц [4]. В этой связи оценка времени выравнивания температуры по сечению частиц порошка является важным этапом моделирования процесса сжатия порошка в ударных волнах.

Для осуществления этой оценки авторами были использованы следующие модельные представления: форма частиц порошка принималась сферической; температурное поле внутри частицы – центрально симметричным; выделение тепла при пластической деформации считалось сосредоточенным в поверхностном слое толщиной, соответствующей 10 % радиуса частицы. Температура в центральной части частицы в начальный момент времени принималась равной исходной температуре порошка, а в поверхностном слое выбиралась, исходя из равенства теплосодержания частицы до и после выравнивания температуры по ее сечению.

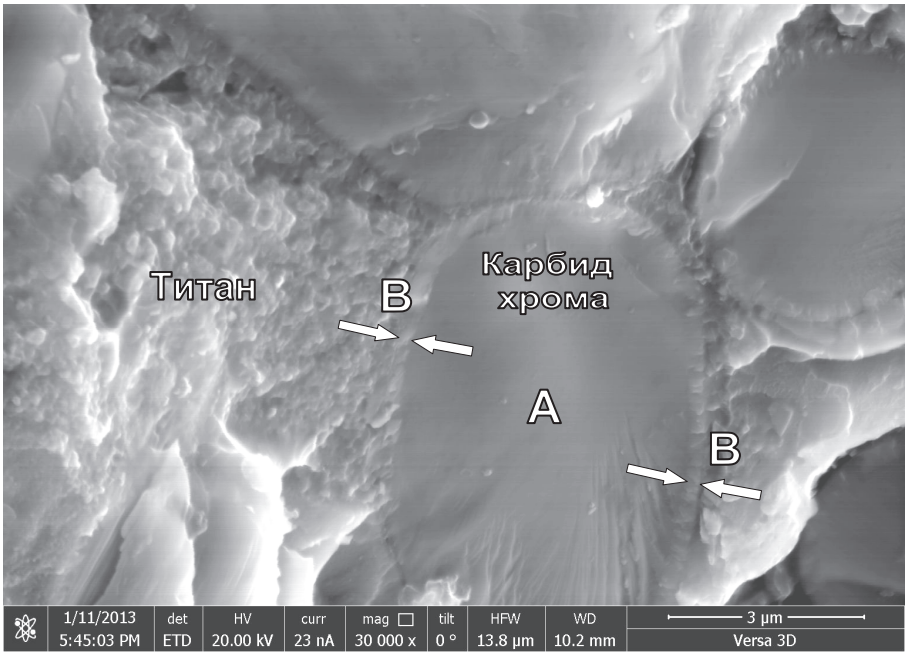


Рис. 1. Транскристаллитный излом твердого сплава карбида хрома с титаном, полученного взрывом

Основой подобных допущений послужили результаты фрактографических исследований твердых сплавов на основе карбида хрома, выполненных с использованием многофункционального сканирующего электронного микроскопа Versa 3D, в результате которых была выявлена округлая форма частиц карбидной фазы (рис. 1) и обнаружено существенное различие в свойствах и, соответственно, в характере разрушения центральной части частицы (зона А) и ее поверхностного слоя, толщиной приблизительно в 10…20 раз меньшей, чем размер частицы (зона В).

Принятые допущения позволили записать математическую модель процесса в виде:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial t}{\partial \tau} = \dfrac{\lambda}{c\rho}\cdot\left(\dfrac{\partial^2 t}{\partial x^2} - \dfrac{2}{S-x}\cdot\dfrac{\partial t}{\partial x}\right) \\ \left(\dfrac{\partial t}{\partial x}\right)_{x=0} = 0 \\ \left(\dfrac{\partial t}{\partial x}\right)_{x=S} = 0 \\ t(x,0) = \begin{cases} t_{\max}, & \text{при} \quad 0 < x < 0{,}1\cdot S \\ t_0, & \text{при} \quad 0{,}1\cdot S < x < S \end{cases} \end{cases},$$

где $t = t(x,\tau)$ – температура; λ, c, ρ – теплопроводность, теплоемкость и плотность материала частиц порошка; τ – время; S – радиус частицы

порошка; $x = 0$ и $x = S$ – поверхность и центр частицы.

Полученная система уравнений решалась методом конечных разностей с использованием четырех точечной неявной разностной схемы. Для конечно-разностной аппроксимации граничных условий использовали метод неопределенных коэффициентов [5]. Использование численного метода решения уравнения позволяет учитывать нелинейный характер коэффициентов, задающих тепловые параметры материала.

Расчет проводился для случая взрывного нагружения слоя порошковой смеси карбида хрома с 14 % титана высотой 7 мм на стальной подложке накладным зарядом взрывчатого вещества через стальную промежуточную прокладку толщиной 0,75 мм по известной схеме [6]. Размер карбидных частиц в исходной порошковой смеси был равен 3,5 мкм.

Процесс взрывной обработки при использовании выбранной схемы нагружения сопровождается распространением по порошковой смеси падающей ударной волны и ее отражением от поверхности монолитной подложки и промежуточной прокладки. При этом рост температуры порошкового материала происходит в основном в первой волне, движущейся по невозмущенному порошку, а максимальное давление его сжатия достигается в отраженных ударных волнах.

Расчеты, выполненные по методике [1, 2], показывают, что длительность распространения по порошку падающей ударной волны в нашем случае составляет величину порядка 23 мкс, длительность импульса максимального давления в отраженных ударных волнах – 0,256 мкс. При этом в процессе обработки достигается средняя температура 600 ºС и давление 12,3 ГПа. В рамках принятых допущений о первоначальном распределении температуры по сечению частиц порошка это означает, что температура на их поверхности может достигать 1500 ºС.

Результаты расчета кинетики выравнивания температуры по объему частицы порошка приведены на рис. 2. Из рисунка следует, что первоначальная разница температур в 1500 ºС падает до 200 ºС за 0,08 мкс, а через 0,2 мкс температуры поверхности и центра частицы становятся практически одинаковыми.

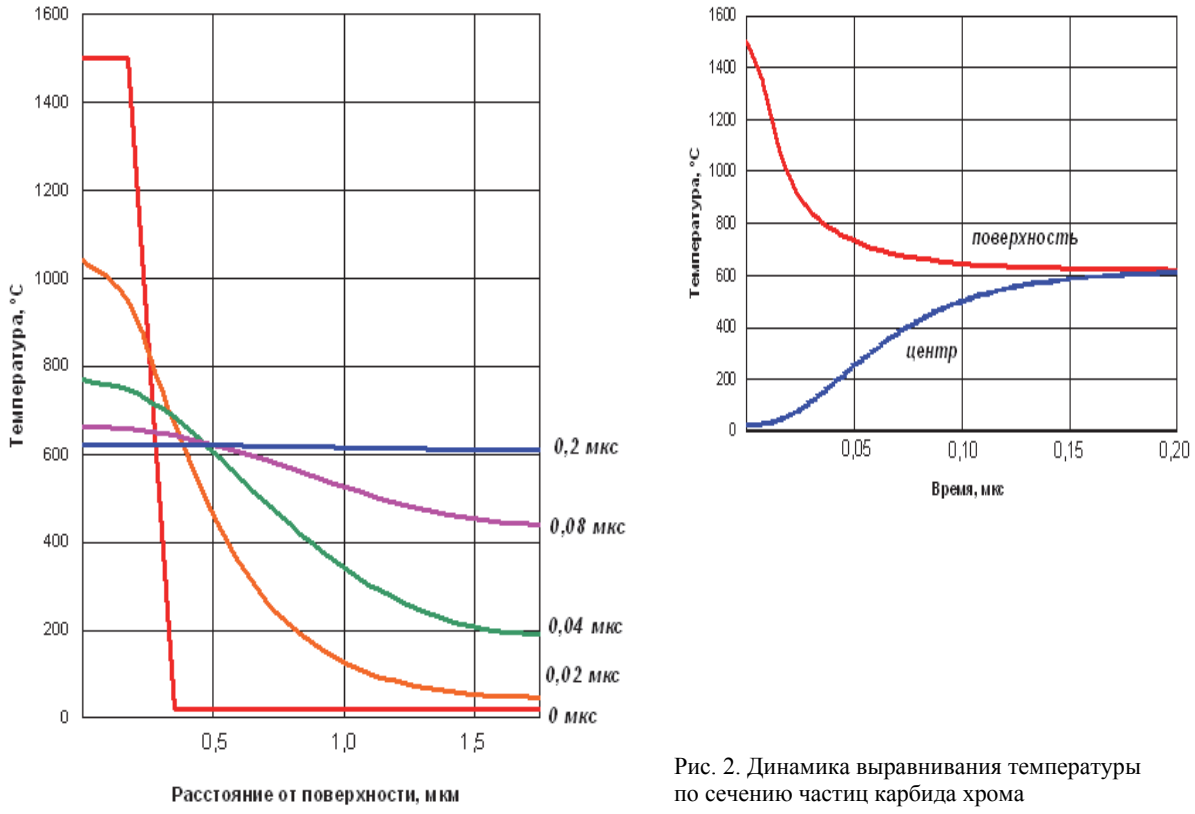


Рис. 2. Динамика выравнивания температуры по сечению частиц карбида хрома

Применительно к нашему случаю это означает, что к моменту окончательного сжатия порошковой смеси импульсом максимального давления температура порошка соответствует расчетной средней температуре 600 ºС.

Подводя итоги, следует констатировать, что

неоднородность температурного поля по сечению частиц порошка при взрывном прессовании по схемам, использующим многократное отражение ударных волн, будет проявляться на заключительных стадиях прессования лишь в случае достаточно крупнозернистых порошков (с размером частиц, превышающим по крайней мере 3,5 мкм).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Компьютерный расчет параметров сжатия при нанесении порошковых покрытий взрывом / А. В. Крохалев, В. О. Харламов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 5 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Сварка взрывом и свойства сварных соединений» ; вып. 4). – С. 110–116.

2. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2010616142 (РФ). Программа для расчета параметров сжатия порошковых материалов при импульсном нагружении (взрывное компактирование) / А. В. Крохалев, В. О. Харламов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак. – 2010.

3. Компьютерное моделирование температурного поля карбидных частиц при взрывном прессовании твердых сплавов / А. В. Крохалев, В. О. Харламов, О. А. Авдеюк, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак // Тезисы МНПК «Инновационные информационные технологии», Прага, 23–27 апреля 2012 г. – С. 248–250.

4. *Рогозин, В. Д.* Взрывная обработка порошковых материалов : монография / В. Д. Рогозин; ВолгГТУ. – Волгоград, 2002. – 136 с.

5. Элементы теории систем и численные методы моделирования процессов тепломассопереноса / В. С. Швыдкий [и др.]. – М.: Интермет Инжиниринг, 1999. – 528 с.

6. Получение износостойких покрытий из смесей порошков карбида хрома с металлической связкой с использованием взрывного нагружения / А. В. Крохалев, В. О. Харламов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 5 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Сварка взрывом и свойства сварных соединений» ; вып. 4). – С. 117–122.

УДК 681.586:621.37

В. К. Михайлов, И. А. Плешаков

РАБОТА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ ДЛЯ ПРОСТЕЙШИХ МОДЕЛЕЙ ТЕРМОКАМЕРЫ: ФОРМИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЮЩЕЙ ФУНКЦИИ ДЛЯ ТЕПЛОВОЙ МОДЕЛИ С КОСВЕННЫМ ПОДОГРЕВОМ

Волгоградский государственный технический университет
ephys@vstu.ru

Построен алгоритм управления температурой в рабочем объеме термокамеры известной конструкции с косвенным подогревом на основе разработанного ранее подхода.

Ключевые слова: алгоритм управления, линейный инерционный объект, тепловая модель термокамеры.

V. K. Mikhailov, I. A. Pleshakov

THE WORK OF ALGORITHM OF CONTROL IN TEMPERATURE FOR THE ELEMENTARY MODELS OF A HEAT-CHAMBER: FORMATION OF THE OPERATING FUNCTION FOR THE THERMAL MODEL WITH INDIRECT HEATING

Volgograd State Technical University

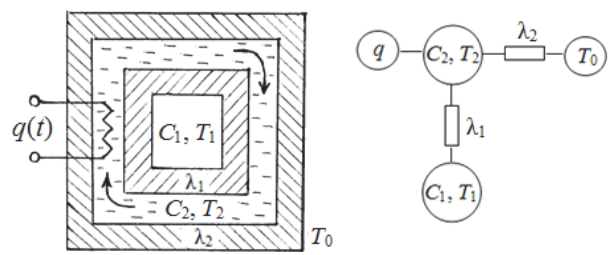
The algorithm of control the temperature in working volume of a heat chamber of a known design with indirect heating on the basis of developed before the approach is constructed.

Keywords: algorithm of the control, linear inertial object, thermal model of a heat-chamber.

Ранее, в работе [1], нами был предложен алгоритм управления температурой в рабочем объеме термокамеры при прямом подогреве на основе подхода, изложенного в статьях [2, 3].

Рассмотрим теперь простейшую модель термокамеры с косвенным нагреванием рабочего объема, в случае, когда тепло от нагревателя передается непосредственно какому-либо другому телу, например, воде, которая, циркулируя по замкнутой и охватывающей рабочий объем оболочке, передает ему часть полученного тепла через теплопроводящие стенки, как показано на рисунке, поз. *а*.

Тепловой граф, соответствующий такой модели, изображен на рисунке, поз. *б*. На основе этого



Модель термокамеры с косвенным нагреванием рабочего объема (*а*) и ее тепловой граф (*б*):
$q(t)$ [Дж/с] – тепловая мощность, поступающая от нагревателя; λ_1 [Дж/(К·с)] – теплопроводность стенок между водой и рабочим объемом; λ_2 [Дж/(К·с)] – теплопроводность внешних стенок камеры; T_1 [К] – температура в рабочем объеме; T_2 [К] – температура подогреваемой воды; C_1 [Дж/К] – теплоемкость рабочего объема; C_2 [Дж/К] – суммарная теплоемкость воды и тонкостенной оболочки; T_0 [К] – температура окружающей среды

графа легко составить уравнения теплового баланса для тел C_1 и C_2:

$$\left.\begin{aligned} C_1\frac{dT_1}{dt} &= \lambda_1(T_2 - T_1),\\ C_2\frac{dT_2}{dt} &= q(t) - \lambda_1(T_2 - T_1) - \lambda_2(T_2 - T_0)\end{aligned}\right\}.$$

Полагая T_0=0, т. е. ведя отсчет температур T_1 и T_2 от температуры окружающей среды T_0, получаем:

$$\left.\begin{aligned} C_1\frac{dT_1}{dt} &= \lambda_1(T_2 - T_1),\\ C_2\frac{dT_2}{dt} &= q(t) - \lambda_1(T_2 - T_1) - \lambda_2 T_2\end{aligned}\right\}. \qquad (1)$$

Поскольку в этой модели, как и в предыдущей, два эквитемпературных тела C_1 и C_2, и описывается она двумя дифференциальными уравнениями (1), то эта модель термокамеры также будет являться моделью второго порядка. Матрица структуры A [2] для системы (1) будет такой:

$$\mathrm{A} = \begin{bmatrix} -\frac{\lambda_1}{C_1} & \cdots & \frac{\lambda_1}{C_1} \\ \cdots & & \cdots \\ \frac{\lambda_1}{C_2} & \cdots & -\frac{\lambda_1+\lambda_2}{C_2} \end{bmatrix},$$

а матрица управления [2]:

$$\mathrm{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/C_2 \end{bmatrix}.$$

Построим теперь управление $q(t)$ температурой T_1 в рабочем объеме камеры, считая, что эталонный закон ее изменения $\theta_1(t)$ задан, а структурные параметры C_1, C_2, λ_1 и λ_2 известны.

Пусть температура T_1 изменяется точно в соответствии со своей *эталонной функцией* $\theta_1(t)$, т. е. $T_1(t) = \theta_1(t)$. Тогда *вспомогательная эталонная функция* $\theta_2(t)$, которой будет следовать температура T_2, сразу определяется из первого уравнения системы (1):

$$\theta_2 = \theta_1 + \frac{C_1}{\lambda_1}\frac{d\theta_1}{dt}, \qquad (2)$$

а управление $q(t)$ – из второго:

$$q(t) = \frac{C_1C_2}{\lambda_1}\frac{d^2\theta_1}{dt^2} + (C_1\frac{\lambda_1+\lambda_2}{\lambda_1} + C_2)\frac{d\theta_1}{dt} + \lambda_2\theta_1. \qquad (3)$$

Следует отметить, что здесь функции $\theta_2(t)$ и $q(t)$ не зависят от начального условия $T_2(0)$. Это объясняется тем, что в данной модели внутри рабочего объема C_1 нет источников тепла и, следовательно, температура T_1 определяется только температурой внешнего тела C_2, т. е. если функция $T_1(t)=\theta_1(t)$ задана, то этот заданный закон $\theta_1(t)$ может быть обеспечен только вполне определенным законом изменения температуры $T_2(t)$, определяемым из первого уравнения системы (1) и задаваемым формулой (2).

Проведем, как и ранее, линеаризацию эталонной функции $\theta_1(t)$, т. е. аппроксимируем ее на каждом интервале управления отрезком

$$\theta_1 = at + b,$$

где a и b – коэффициенты на данном интервале. Тогда для этого интервала вместо (2) и (3) можно записать:

$$\theta_2 = at + b', \qquad (4)$$

где $b' = b + a\frac{C_1}{\lambda_1}$,

$$q = \lambda_2 at + \lambda_2 b + a\left(C_1\frac{\lambda_1+\lambda_2}{\lambda_1} + C_2\right). \qquad (5)$$

Управление (5) является идеальным, т. е. когда температуры T_1 и T_2 изменяются по своим эталонным законам $\theta_1(t)$ и $\theta_2(t)$. Если же $T_2(t)$ отклонилась от своей эталонной функции $\theta_2(t)$ на некотором интервале, то управление $q(t)$ следует скорректировать, не дожидаясь, пока через некоторое время задержки $\tau_з$ начнет отклоняться и температура T_1 в рабочем объеме. Для этого на следующем интервале вместо эталонной функции (4) вводится *корректирующая*

$$\tilde{\theta}_2(t) = \tilde{a}t + \tilde{b},$$

где $\left.\begin{aligned}\tilde{b} &= T_2(0),\\ \tilde{a} &= \frac{1}{\tau}(\theta_2(\tau) - T_2(0))\end{aligned}\right\}$; τ – интервал управления; $T_2(0)$ – реальная температура, измеренная в начале следующего интервала управления.

Тогда корректирующее управление на интервале, следующем после обнаружения ошибки $\Delta T_2(0)=T_2(0)-\theta_2(0)$, будет определяться из второго уравнения системы (1) подстановкой в него $\theta_1=at+b$ вместо T_1, и $\tilde{\theta}_2(t) = \tilde{a}t + \tilde{b}$ вместо T_2:

$$q = C_2\frac{d\tilde{\theta}_2}{dt} + (\lambda_1+\lambda_2)\tilde{\theta}_2 - \lambda_1\theta_1 =$$
$$= \left[(\lambda_1+\lambda_2)\tilde{a} - \lambda_1 a\right]t + \left[\tilde{a}C_2 + \tilde{b}(\lambda_1+\lambda_2) - \lambda_1 b\right].$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Михайлов, В. К.* Работа алгоритма управления температурой для простейших моделей термокамеры. Формирование управляющей функции для тепловой модели с прямым подогревом / В. К. Михайлов, И. А. Плешаков // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. научн. ст. № 15(102) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 15). – С. 23–26.

2. *Михайлов, В. К.* Принцип построения алгоритма управления состоянием линейных инерционных объектов / В. К. Михайлов, И. А. Плешаков // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. научн. ст. № 10(97) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 14). – С. 36–41.

3. *Михайлов, В. К.* Принцип построения алгоритма управления от одного источника / В. К. Михайлов, И. А. Плешаков // Извести\ ВолгГТУ : межвуз. сб. научн. ст. № 15(102) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 15). – С. 19–22.

4. *Янушевский, Р. Т.* Управление объектами с запаздыванием / Р. Т. Янушевский. – М.: Наука, 1978. – 416 с.

5. *Разоренов, Г. Н.* Теория и системы оптимального управления / Г. Н. Разоренов, А. А. Самарин. − М.: МО, 2007.− 476 с.

6. *Разоренов, Г. Н.* Метод синтеза законов «мягкого» и «сверхмягкого» управления конечным состоянием динамических систем / Г. Н. Разоренов // Мехатроника, автоматизация, управление. − 2011. − № 4. – С. 2–11.

7. *Семенов, В. Г.* Математическая модель микроклимата теплицы / В. Г. Семенов, Е. Г. Крушель // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. научн. ст. № 6 (54) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 6). – С. 32–35.

УДК 62-529

А. Д. Мохов, А. С. Олейников

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШИРОКОВЕЩАТЕЛЬНОГО КАНАЛА ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ВРЕМЕННЫХ ЗАДЕРЖЕК В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ШАГАЮЩИМ ДВИЖИТЕЛЕМ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

Волгоградский государственный технический университет

vm@vstu.ru

Рассмотрена проблема минимизации временных задержек при передаче управляющих сигналов в системах управления большой размерности. В работе приводится архитектура системы управления, взаимодействие между элементами в которой происходит с использованием широковещательной передачи сообщений. Приведено сравнение временных задержек для систем управления с последовательным режимом передачи сообщений для системы управления роботом с ортогонально-поворотными движителями.

Ключевые слова: система управления, шагающий движитель, широковещательный канал.

A. Mokhov, A. Oleynikov

USING BROADCASTING FOR MINIMIZE TIME DELAYS IN THE CONTROL SYSTEM OF MOBILE ROBOT WITH WALKING DRIVER

Volgograd State Technical University

The problem of minimizing the time delay in the transmission of control signals in the control systems of large dimension is described. The architecture of the control system, in which the interaction between elements carries out with use of broadcast mode communications, is proposed. The article contains comparison of the time delays for control systems with sequential mode of communication for the system of the robot with orthogonally-rotating drive.

Keywords: control system, motion motor, broadcasting.

В системах управления движениями робототехнических систем особенно актуальна такая характеристика, как время передачи сообщений между элементами системы управления. С увеличением количества исполнительных механизмов и сенсоров время опроса устройств начинает оказывать значительное влияние на формирование управляющих сигналов, которое необходимо учитывать.

Для любого из вариантов рабочих циклов системы управления роботом [1] одной из центральных проблем является сокращение времени опроса нескольких или всех измерительных устройств.

В большинстве подобных систем управляющие сигналы направляются одному выбранному элементу. К примеру, для систем, построенных на основе TORP: The Open Robot Project [2], доступен метод, осуществляющий запрос значения измеряемой величины только с одного датчика.

В системе, управляющей движением шагающей машины с ортогонально-поворотными движителями [4], применен коммуникационный протокол Modbus. Программные драйвера для работы с Modbus-сетями реализованы для большинства систем контроля и управления. ModBus реализует последовательный режим передачи сообщений, в связи с этим запрос в такой сети отправляется каждому устройству отдельно, поэтому при увеличении количества устройств в сети временные задержки при опросе нескольких устройств будут достаточно велики. Экспериментально для вышеуказанной

системы управления шагающей машиной, в составе которой присутствуют 20 датчиков и 20 исполнительных механизмов, получено время постоянной сетевой задержки такой операции – 305 мс. Тогда во время движения привода с максимальной скоростью – 635 мм/с – ошибка в определении положения стойки достигает

$$\delta = 305 \text{ мс} * 635 \text{ мм/с} = \\ = 0{,}305 \text{ с} * 0{,}635 \text{ м/с} \approx 19 \text{ см}.$$

Предлагаемым вариантом решения вышеописанной проблемы является создание такой системы управления, в которой будет возможность передачи сигналов с запросами одновременно нескольким устройствам.

Для реализации взаимодействия функциональных элементов шагающей машины может быть использован широковещательный канал [3]. Это позволит сократить количество формируемых запросов на получение данных, что уменьшит, соответственно, время, необходимое для составления полной картины состояния робота. Функциональная схема системы на основе широковещательного канала приведена на рис. 1.

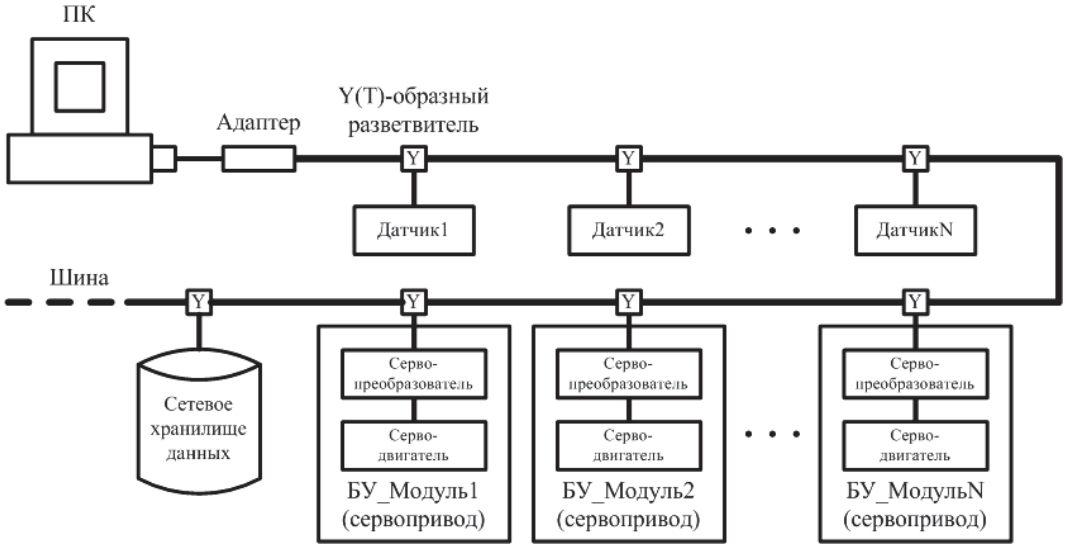


Рис. 1. Функциональная схема системы управления шагающей машины с ортогональными движителями на основе широковещательного канала

Для подключения персонального компьютера к шине необходим адаптер, преобразующий пересылаемые данные в кадры, соответствующие формату, который используется в системе. Связь может быть реализована с помощью любого интерфейса персонального компьютера.

Подключение измерительных и исполнительных устройств производится Y(T)-образными разветвителями.

Сервоприводы, выступающие в роли исполнительных устройств, состоят из блоков управления – сервопреобразователей, имеющих соответствующий интерфейс для взаимодействия с общей шиной, и непосредственно серводвигателей.

Для оценки и сравнения временных задержек рассмотрим семейство протоколов, позволяющих осуществлять широковещательную передачу сообщений – протоколы, основанные на промышленном стандарте CAN. Основным преимуществом стандарта CAN является высокая устойчивость к помехам, что в условиях постоянных вибраций при движении является одним из важных критериев выбора коммуникационного протокола.

Для нижней оценки времени реакции системы на внешние запросы примем, что общая длина шины CAN не более 40 м. В таком случае кадры будут пересылаться со скоростью 1 Мбит/с. Также допустим, что преобразование кадра в адаптере происходит мгновенно и время задержки датчиков для формирования ответа незначительно.

Базовый формат кадра данных CAN приведен в таблице.

Таким образом, общая длина кадра составляет 44–108 бит. Примем, что поле данных содержит один байт информации. Тогда длина кадра будет составлять 52 бита.

Для управления одним или несколькими двигателями достаточно отправить в сеть запрос, состоящий из одного кадра CAN. Ответа можно не ожидать, так как ошибки в пересылке данных через сеть стандарта CAN фиксируются на нижних уровнях протокола.

Базовый формат кадра данных, соответствующего стандарту CAN

Поле	Длина (в битах)
Начало кадра	1
Идентификатор	11
Запрос на передачу	1
Бит расширения идентификатора	1
Зарезервированный бит	1
Длина данных	4
Поле данных	0-64 (0–8 байт)
Контрольная сумма	15
Разграничитель контрольной суммы	1
Промежуток подтверждения	1
Разграничитель подтверждения	1
Конец кадра	7

Время передачи кадра CAN:

$$t = \frac{52 \text{ бит}}{1 \text{ Мбит/с}} = \frac{52 \text{ бит}}{1048576 \text{ бит/с}} \approx 50 \text{ мкс}.$$

Временная диаграмма операции приведена на рис. 2.

В результате время для реакции системы на операцию управления будет не менее 50 мкс.

Для сбора информации с датчиков в системе присутствует сетевое хранилище данных, которое периодически производит опрос измерительных устройств и хранит актуальные значения измеряемых величин. Произведение одной операции опроса требует отправления одного кадра с запросом и получения по одному кадру с ответом от каждого из датчиков.

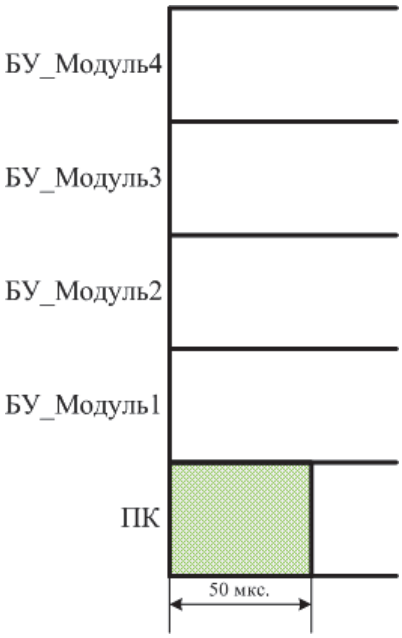


Рис. 2. Временная диаграмма сетевого обмена операции управления

Предположим, что шагающая машина имеет четыре модуля-ноги, каждая из которых имеет по одному однотипному сенсору. Тогда длительность выполнения операции будет определяться длительностью пяти CAN-кадров. Временная диаграмма приведена на рис. 3.

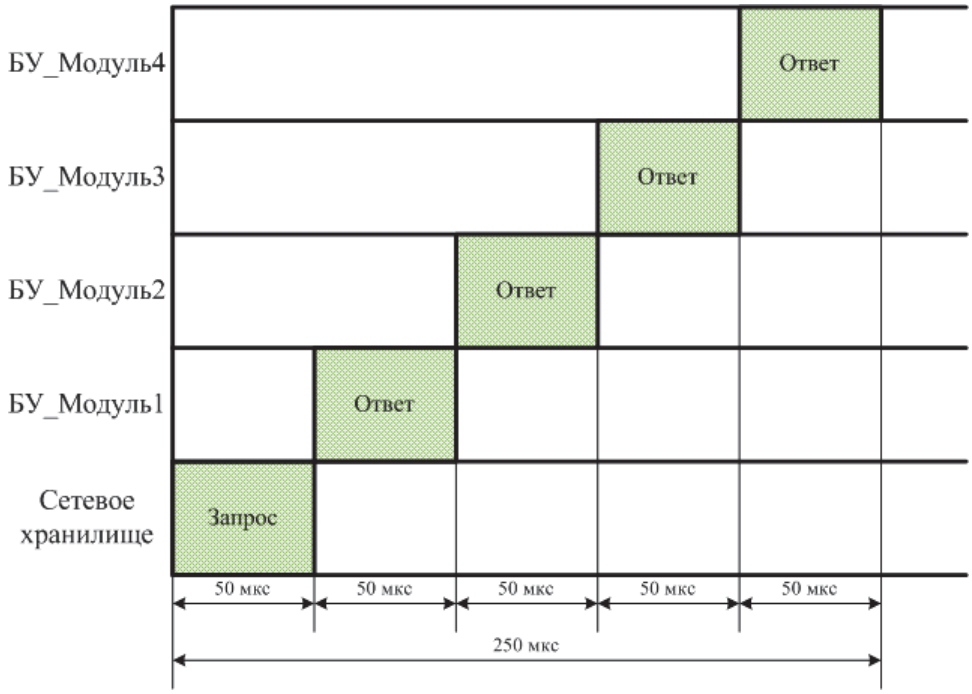


Рис. 3. Временная диаграмма сетевого обмена операции сбора данных с датчиков

В итоге время выполнения операции сбора данных будет не менее 250 мкс.

Таким образом, для получения актуальных данных персональному компьютеру будет достаточно принять и отправить по одному CAN-кадру. Поле данных принимаемого кадра должно содержать информацию по всем сенсорам, поэтому, принимая для каждого датчика один байт данных, в нашем случае длительность пересылки кадра ответа будет

$$t = \frac{44+4*8\ \text{бит}}{1\ \text{Мбит/с}} = \frac{76\ \text{бит}}{1048576\ \text{бит/с}} \approx 72\ \text{мкс}.$$

Временная диаграмма приведена на рис. 4.

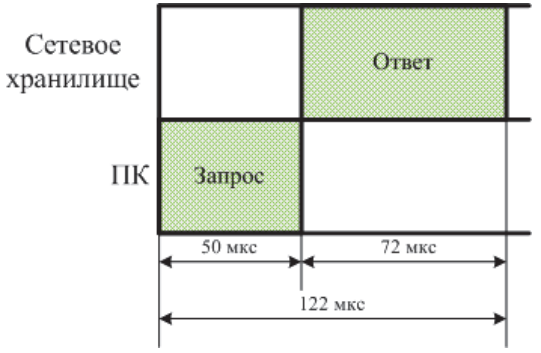


Рис. 4. Временная диаграмма сетевого обмена операции получения персональным компьютером актуальных значений измеряемых величин

Ошибка в определении положения стойки тогда составит

$$\delta = 72\ \text{мкс} * 635\ \text{мм/с} = 7{,}2 * 10^{-5}\ \text{с} * 0{,}635\ \text{м/с} \approx 0{,}05\ \text{мм},$$

что значительно меньше рассчитанной ранее ошибки при использовании протокола Modbus.

Для качественного управления движениями шагающего движителя необходим постоянный контроль за исполнительными устройствами и своевременное получение данных о состоянии системы. Применение предлагаемого решения позволит минимизировать временные задержки в системах управления большой размерности и повысить точность системы управления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Rosenblatt, J. K.* A Fine-Grained Alternative to the Subsumption Architecture for Mobile Robot Control / J. K. Rosenblatt, D. W. Payton // Hughes Artificial Intelligence Center. – 1992. – Vol. 2. – P. 317–323.

2. *Simões, A.* da S. TORP: The Open Robot Project / A. da S. Simões, Colombini E. L., Matsuura J. P., Franchin M. N. // Journal of Intelligent & Robotic Systems. – 2012. – Vol. 66. – P. 3–22.

3. *Денисенко, В. В.* Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием / В. В. Денисенко. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – С. 83–94.

4. *Шурыгин, В. А.* Моделирование движения шагающей машины с ортогонально-поворотными движителями / В. А. Шурыгин, В. А. Серов, Н. Г. Шаронов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 9(82) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 11). – С. 41–44.

УДК 517.5

Б. В. Симонов, И. Э. Симонова

СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ МОДУЛЯМИ ГЛАДКОСТИ В РАЗНЫХ МЕТРИКАХ*

Волгоградский государственный технический университет

simonov-b2002@yandex.ru, simonova-vstu@mail.ru

В работе доказана справедливость неравенства между модулями гладкости дробного порядка функций из пространств L_p и C.

Ключевые слова: неравенство, пространство, дробный модуль гладкости.

B. V. Simonov, I. E. Simonova

CONNECTIONS BETWEEN MODULUS OF SMOOTHNESS IN DIFFERENT METRICS

Volgograd State Technical University

Validity of inequality between fractional moduli of smoothness of functions in spaces L_p and C is established in this paper.

Keywords: inequality, space, fractional modulus of smoothness.

---

* Исследования первого автора проводились при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 13-01-00043) и программы ведущих научных школ (грант НШ-979-2012-1).

1. Введение

Одним из основных инструментов изучения гладкости функций является модуль гладкости. В данной работе рассматриваются модули гладкости дробного порядка в пространствах Лебега. Получены неравенства, описывающие взаимосвязь между модулями гладкости функции в разных метриках. Полученные оценки могут использоваться в теории вложения функциональных пространств. В свою очередь, теоремы вложения используются при исследовании решений задач, моделируемых уравнениями математической физики.

Пусть $L_p(1 \le p < \infty)$ – пространство 2π – периодических измеримых функций с нормой $\|f\|_p = \left(\int_0^{2\pi} |f(x)|^p \, dx \right)^{\frac{1}{p}}$; L_∞ – пространство 2π – периодических непрерывных функций с нормой $\|f\|_\infty = \max_{0 \le x \le 2\pi} |f(x)|$; $f^{(p)}(x)$ – производная в смысле Вейля порядка $p (p > 0)$ функции $f(x)$ [1]; $T_n(x) = \sum_{v=0}^{n} (a_v \cos vx + b_v \sin vx)$ – тригонометрический полином порядка не выше n; $E_n(f)_p = \inf_{T_n(x)} \|f(x) - T_n(x)\|_p$ – наилучшее приближение функции $f(x) \in L_p$ при помощи тригонометрических полиномов порядка не выше n в метрике L_p; $S_n(f)$ – частная сумма ряда Фурье функции $f(x)$; $V_0(f) = S_0(f)$, $V_n(f) = \frac{S_n(f) + \cdots + S_{2n-1}(f)}{n} (n = 1,2,\ldots)$ – сумма Вале – Пуссена функции $f(x)$; $\omega_\alpha(f,t)_p$ – модуль гладкости функции $f(x) \in L_p$ порядка $\alpha (\alpha > 0)$ в метрике L_p, т. е.

$$\omega_\alpha(f,t)_p = \sup_{|h| \le t} \left\| \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k C_\alpha^k f\left(x + (\alpha - k)h\right) \right\|_p ,$$

где $C_\alpha^k = 1$ для $k = 0$; $C_\alpha^k = \alpha$ для $k = 1$; $C_\alpha^k = \frac{\alpha(\alpha-1)\cdots(\alpha-k+1)}{k!}$ для $k \ge 2$.

В работах [2], [3] П. Л. Ульянов нашел связь между модулями гладкости первого порядка в разных материках. Он доказал следующее неравенство: если $f(x) \in L_p$, $1 \le p < q < \infty$, то для любого $\delta \in (0,1)$

$$\omega_1(f,\delta)_q \le C_1 \left(\int_0^{\delta} \left(t^{-\frac{1}{p}+\frac{1}{q}} \omega_1(f,t)_p \right)^q \frac{dt}{t} \right)^{\frac{1}{q}}, \quad (1)$$

где C_1 – положительная постоянная, не зависящая от f и δ.

Заметим, что все эти и нижеследующие неравенства понимаются таким образом: из конечности правой части следует конечность левой части. Далее, C_1, C_2, … – положительные постоянные, не обязательно одинаковые в различных формулах; $C_1(\alpha), C_2(\alpha), \ldots$ – положительные постоянные, зависящие лишь от фиксированного α и, вообще говоря, разные в разных формулах.

В работе [4] В. А. Андриенко доказал, что если $f(x) \in L_p$, $1 \le p < \infty$, то для любого $\delta \in (0,1)$

$$\omega_1(f,\delta)_\infty \le C_2 \int_0^{\delta} t^{-\frac{1}{p}} \omega_1(f,t)_p \frac{dt}{t}, \quad (2)$$

где C_2 – положительная постоянная, не зависящая от f и δ.

Заметим, что здесь через $\omega_1(f,\delta)_\infty$ (и далее через $\omega_\alpha(f,\delta)_\infty$) обозначается модуль гладкости первого порядка (порядка α) функции $g \in L_\infty$, эквивалентной f.

В работе [5] В. И. Коляда усилил неравенства (1) и (2). Он доказал, что если $f(x) \in L_p$, $1 < p < q \le \infty$, то для любого $\delta \in (0,1)$

$$\delta^{1-\frac{1}{p}+\frac{1}{q}} \left(\int_\delta^1 (t^{\frac{1}{p}-\frac{1}{q}-1} \omega_1(f,t)_q)^p \frac{dt}{t} \right)^{\frac{1}{p}} \le$$

$$\le C_3 \left(\int_0^{\delta} (t^{-\frac{1}{p}+\frac{1}{q}} \omega_1(f,t)_p)^{q^*} \frac{dt}{t} \right)^{\frac{1}{q^*}}, \quad (3)$$

где $q^* = q$, если $q < \infty$ и $q^* = 1$, если $q = \infty$, C_3 – положительная постоянная, не зависящая от f и δ.

В работе [6] неравенство (1) было усилено по-другому: если $f(x) \in L_p$, $1 < p < q < \infty$, то для любого $\delta \in (0,1)$

$$\omega_1(f,\delta)_q \le C_4 \left(\int_0^{\delta} \left(t^{-\frac{1}{p}+\frac{1}{q}} \omega_{1+\frac{1}{p}-\frac{1}{q}}(f,t)_p \right)^q \frac{dt}{t} \right)^{\frac{1}{q}}, \quad (4)$$

где C_4 – положительная постоянная, не зависящая от f и δ.

Неравенства, аналогичные неравенствам (1)–(4) могут быть получены и для модулей гладкости порядка $\alpha > 0$ (см., например, [7], [8], [9]).

Неравенство (4) следует из более общей теоремы А.

Т е о р е м а А ([6],[10]). *Пусть* $f(x) \in L_p$, $1 < p < q < \infty$ *или* $1 = p < q = \infty$, $\alpha > 0$. *Тогда для любого* $\delta \in (0,1)$

$$\omega_\alpha\left(f,\delta\right)_q \le C_5\left(\int_0^\delta\left(t^{-\frac{1}{p}+\frac{1}{q}}\omega_{\alpha+\frac{1}{p}-\frac{1}{q}}\left(f,t\right)_p\right)^{q^*}\frac{dt}{t}\right)^{\frac{1}{q^*}}, \quad (5)$$

где $q^* = q$, *если* $q < \infty$ *и* $q^* = 1$, *если* $q = \infty$, C_5 – *положительная постоянная, не зависящая от* f *и* δ.

В работе [11] показано, что в предельных случаях $1 = p < q < \infty$ или $1 < p < q = \infty$ неравенство (5) несправедливо.

В работе [10] С. Ю. Тихоновым доказана следующая теорема.

Т е о р е м а В ([10]). *Пусть* $f(x) \in L_p$, $1 = p < q < \infty$ *или* $1 < p < q = \infty$, $\alpha > 0$. *Тогда для любого* $\delta \in (0,1)$

$$\omega_\alpha(f,\delta)_q \le$$

$$\le C_6\left(\int_0^\delta\left(t^{-\frac{1}{p}+\frac{1}{q}}\left(\ln\frac{2}{t}\right)^{\max\left(1-\frac{1}{p},\frac{1}{q}\right)}\omega_{\alpha+\frac{1}{p}-\frac{1}{q}}(f,t)_p\right)^{q^*}\frac{dt}{t}\right)^{\frac{1}{q^*}}, \quad (6)$$

где $q^* = q$, *если* $q < \infty$ *и* $q^* = 1$, *если* $q = \infty$, C_6 – *положительная постоянная, не зависящая от* f *и* δ.

В данной работе уточняются неравенства (1), (2) и (6) в предельных случаях, когда $1 = p < q < \infty$ или $1 < p < q = \infty$.

Сформулируем основную теорему.

Т е о р е м а. *Пусть* $f(x) \in L_p$, $1 = p < q < \infty$ *или* $1 < p < q = \infty$, $\beta > \alpha > 0$, $r \ge 0$. *Тогда для любого* $\delta \in (0,1)$

$$\omega_\alpha\left(f^{(r)},\delta\right)_q \le C_7\left(\delta^{\alpha q^*}\int_\delta^1\left(t^{-r-\alpha-\frac{1}{p}+\frac{1}{q}}\omega_{\beta+r+\frac{1}{p}-\frac{1}{q}}\left(f,t\right)_p\right)^{q^*}\frac{dt}{t}+\int_0^\delta\left(t^{-r-\frac{1}{p}+\frac{1}{q}}\omega_{\beta+r+\frac{1}{p}-\frac{1}{q}}\left(f,t\right)_p\right)^{q^*}\frac{dt}{t}\right)^{\frac{1}{q^*}}, \quad (7)$$

где $q^* = q$, *если* $q < \infty$ *и* $q^* = 1$, *если* $q = \infty$, C_7 – *положительная постоянная, не зависящая от* f *и* δ.

2. Вспомогательные утверждения

Л е м м а 1 ([12–14]). *Пусть* $f(x) \in L_p$, $1 \le p \le \infty$, $\alpha > 0$, $m \in N$. *Тогда*

$$C_1\left(m^{-\alpha}\left\|V_m^{(\alpha)}(f)\right\|_p + E_m(f)_p\right) \le$$

$$\le \omega_\alpha\left(f,\frac{1}{m}\right)_p \le C_2\left(m^{-\alpha}\left\|V_m^{(\alpha)}(f)\right\|_p + E_m(f)_p\right),$$

где положительные постоянные C_1 *и* C_2 *не зависят от* f *и* m.

Л е м м а 2. *Пусть* $f(x) \in L_p$, $1 \le p < q \le \infty$, $\alpha > 0$, $n = 0,1,\ldots$ *Тогда*

$$E_n(f)_q \le C_3 \times$$

$$\times\left((n+1)^{\frac{1}{p}-\frac{1}{q}}E_n(f)_p + \left(\sum_{k=n+1}^\infty k^{q^*\left(\frac{1}{p}-\frac{1}{q}\right)-1}E_k^{q^*}(f)_p\right)^{\frac{1}{q^*}}\right),$$

где $q^* = q$, *если* $q < \infty$ *и* $q^* = 1$, *если* $q = \infty$, C_3 – *положительная постоянная, не зависящая от* f *и* n.

Лемма 2 при $q < \infty$ доказана в [3], а при $q = \infty$ – в [15].

Л е м м а 3 ([16]). Пусть $a_k \ge 0, b_k \ge 0$, $\sum_{k=1}^n a_k = a_n\gamma_n$. Тогда, если $1 \le p < \infty$, то

$$\sum_{k=1}^\infty a_k\left(\sum_{n=k}^\infty b_n\right)^p \le p^p\sum_{k=1}^\infty a_k(b_k\gamma_k)^p.$$

Л е м м а 4. *Пусть* $f(x) \in L_p$, $1 \le p < q \le \infty$, $n = 0,1,\ldots$, $q^* = q$, *если* $q < \infty$ *и* $q = 1$, *если* $q = \infty$. *Тогда*

$$\left\|V_{2^n}(f) - V_0(f)\right\|_q \le$$

$$\le C_4\left(\sum_{k=0}^n 2^{kq^*\left(\frac{1}{p}-\frac{1}{q}\right)}\left\|V_{2^k}(f) - V_{\left[2^{k-1}\right]}(f)\right\|_p^{q^*}\right)^{\frac{1}{q^*}},$$

где $[m]$ – *целая часть числа* m; *постоянная* $C_4 > 0$ *не зависит от* n *и* f.

Доказательство.

Применяя леммы 2 и 3, имеем

$$\left\|V_{2^n}(f)-V_0(f)\right\|_q \le C_5\left(\sum_{k=0}^{n}2^{kq^*\left(\frac{1}{p}-\frac{1}{q}\right)}\left\|V_{2^n}(f)-V_{\left[2^{k-1}\right]}(f)\right\|_p^{q^*}\right)^{\frac{1}{q^*}} \le$$

$$\le C_6\left(\sum_{k=0}^{n}2^{kq^*\left(\frac{1}{p}-\frac{1}{q}\right)}\left(\sum_{m=k}\left\|V_{2^m}(f)-V_{\left[2^{m-1}\right]}(f)\right\|_p\right)^{q^*}\right)^{\frac{1}{q^*}} \le C_7\left(\sum_{k=0}^{n}2^{kq^*\left(\frac{1}{p}-\frac{1}{q}\right)}\left\|V_{2^k}(f)-V_{\left[2^{k-1}\right]})(f)\right\|_p^{q^*}\right)^{\frac{1}{q^*}},$$

где $C_7>0$ не зависит от n и f.

Лемма 4 доказана.

Лемма 5 ([17]). *Пусть* $1\le p\le\infty,\alpha>0$, $T_n(x)$ *– тригонометрический полином порядка не выше* $n(n\in N)$. *Тогда*

$$\left\|T_n^{(\alpha)}\right\|_p \le C_8(\alpha)n^{\alpha}\left\|T_n\right\|_p.$$

Лемма 6 ([18]). *Пусть* $f(x)\in L_p, 1\le p\le\infty$. *Тогда* $\left\|f-V_n(f)\right\|_p \le C_9E_n(f)_p$, *где положительная постоянная* C_9 *не зависит от* f *и* n.

3. Доказательство теоремы

Пусть $r=0$. Применяя леммы 1, 2, 4, 5 и 6, будем иметь для $n=1,2,...$

$$\omega_{\alpha}\left(f,2^{-n}\right)_q \le C_{10}\left(2^{-n\alpha}\left\|V_{2^n}^{(\alpha)}(f)\right\|_q+E_{2^n}(f)_q\right)\le$$

$$\le C_{11}\left(2^{-n\alpha}\left(\sum_{m=0}^{n}2^{mq^*\left(\frac{1}{p}-\frac{1}{q}\right)}\left\|V_{2^m}^{(\alpha)}(f)-V_{\left[2^{m-1}\right]}^{(\alpha)}(f)\right\|_p^{q^*}\right)^{\frac{1}{q^*}}+\left(\sum_{m=n-1}^{\infty}2^{mq^*\left(\frac{1}{p}-\frac{1}{q}\right)}E_{2^m}^{q^*}(f)_p\right)^{\frac{1}{q^*}}\right)\le$$

$$\le C_{12}\left(2^{-n\alpha}\left(\sum_{m=0}^{n}2^{mq^*\left(\alpha+\frac{1}{p}-\frac{1}{q}\right)}E_{\left[2^{m-1}\right]}^{q^*}(f)_p\right)^{\frac{1}{q^*}}+\left(\sum_{m=n-1}^{\infty}2^{mq^*\left(\frac{1}{p}-\frac{1}{q}\right)}E_{2^m}^{q^*}(f)_p\right)^{\frac{1}{q^*}}\right)\le$$

$$\le C_{13}\left(2^{-n\alpha}\left(\sum_{m=0}^{n}2^{mq^*\left(\alpha+\frac{1}{p}-\frac{1}{q}\right)}\omega_{\beta+\frac{1}{p}-\frac{1}{q}}^{q^*}\left(f,2^{-m}\right)_p\right)^{\frac{1}{q^*}}+\left(\sum_{m=n+1}^{\infty}2^{mq^*\left(\frac{1}{p}-\frac{1}{q}\right)}\omega_{\beta+\frac{1}{p}-\frac{1}{q}}^{q^*}\left(f,2^{-m}\right)_p\right)^{\frac{1}{q^*}}\right),$$

где положительная постоянная C_{13} не зависит от f и n.

Доказательство теоремы при $r>0$ проводится аналогично.

Теорема доказана.

4. Замечания

Покажем, что при $1=p<q<\infty$ или $1<p<$ $<q=\infty$ неравенство (7) при $r=0$ точнее неравенств (1), (2) и (6).

Введем обозначение. Будем писать $F(f,\delta)\approx$ $\approx G(f,\delta)$, если существуют положительные постоянные C_1 и C_2, не зависящие от f и δ, такие, что $C_1\cdot G(f,\delta)\le F(f,\delta)\le C_2\cdot G(f,\delta)$.

А. Пусть $f_0(x)=\sin x$. Тогда для этой функции правые и левые части неравенства (7) имеют следующие соотношения:

$$\omega_{\alpha}\left(f_0,\delta\right)_q \approx \delta^{\alpha},$$

$$\left(\delta^{\alpha q^*}\int_{\delta}^{1}\left(t^{-\alpha-\frac{1}{p}+\frac{1}{q}}\omega_{\beta+\frac{1}{p}-\frac{1}{q}}\left(f_0,t\right)_p\right)^{q^*}\frac{dt}{t}+\int_{0}^{\delta}\left(t^{-\frac{1}{p}+\frac{1}{q}}\omega_{\beta+\frac{1}{p}-\frac{1}{q}}\left(f_0,t\right)_p\right)^{q^*}\frac{dt}{t}\right)^{\frac{1}{q^*}}\approx\delta^{\alpha},$$

т. е. имеют один порядок.

Для этой функции правые и левые части неравенств (1) и (2) имеют следующие соотношения:

$$\omega_1\left(f_0,\delta\right)_q \approx \delta,$$

$$\left(\int_0^{\delta}\left(t^{-\frac{1}{p}+\frac{1}{q}}\omega_1\left(f_0,t\right)_p\right)^{q^*}\frac{dt}{t}\right)^{\frac{1}{q^*}} \approx \delta^{1-\frac{1}{p}+\frac{1}{q}},$$

т. е. имеют разный порядок.

Для этой функции правые и левые части неравенства (6) имеют следующие соотношения:

$$\omega_\alpha\left(f_0,\delta\right)_q \approx \delta^{\alpha},$$

$$\left(\int_0^{\delta}\left(t^{-\frac{1}{p}+\frac{1}{q}}\left(\ln\frac{2}{t}\right)^{\max\left(1-\frac{1}{p},\frac{1}{q}\right)}\omega_{\alpha+\frac{1}{p}-\frac{1}{q}}\left(f_0,t\right)_p\right)^{q^*}\frac{dt}{t}\right)^{\frac{1}{q^*}} \approx \delta^{\alpha-\frac{1}{p}+\frac{1}{q}}\left(\ln\frac{2}{\delta}\right)^{\max\left(1-\frac{1}{p},\frac{1}{q}\right)},$$

т. е. имеют разный порядок.

Б. При $1=p<q<\infty$ или $1<p<q=\infty$ имеют место следующие неравенства:

$$\left(\delta^{\alpha q^*}\int_{\delta}^{1}\left(t^{-\alpha-\frac{1}{p}+\frac{1}{q}}\omega_{\beta+\frac{1}{p}-\frac{1}{q}}\left(f,t\right)_p\right)^{q^*}\frac{dt}{t}+\int_0^{\delta}\left(t^{-\frac{1}{p}+\frac{1}{q}}\omega_{\beta+\frac{1}{p}-\frac{1}{q}}\left(f,t\right)_p\right)^{q^*}\frac{dt}{t}\right)^{\frac{1}{q^*}} \le C_3\left(\int_0^{\delta}\left(t^{-\frac{1}{p}+\frac{1}{q}}\omega_{\alpha}\left(f,t\right)_p\right)^{q^*}\frac{dt}{t}\right)^{\frac{1}{q^*}},$$

где положительная постоянная C_3 не зависит от f и δ.

С. При $1=p<q<\infty$ или $2\le p<q=\infty$ имеют место следующие неравенства:

$$\left(\delta^{\alpha q^*}\int_{\delta}^{1}\left(t^{-\alpha-\frac{1}{p}+\frac{1}{q}}\omega_{\beta+\frac{1}{p}-\frac{1}{q}}\left(f,t\right)_p\right)^{q^*}\frac{dt}{t}+\int_0^{\delta}\left(t^{-\frac{1}{p}+\frac{1}{q}}\omega_{\beta+\frac{1}{p}-\frac{1}{q}}\left(f,t\right)_p\right)^{q^*}\frac{dt}{t}\right)^{\frac{1}{q^*}} \le$$

$$\le C_4\left(\int_0^{\delta}\left(t^{-\frac{1}{p}+\frac{1}{q}}\left(\ln\frac{2}{t}\right)^{\max\left(1-\frac{1}{p},\frac{1}{q}\right)}\omega_{\alpha+\frac{1}{p}-\frac{1}{q}}\left(f,t\right)_p\right)^{q^*}\frac{dt}{t}\right)^{\frac{1}{q^*}},$$

положительная постоянная C_4 не зависит от f и δ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Зигмунд, А.* Тригонометрические ряды. Т. 2 / А. Зигмунд. – М.: Мир, 1965. – 538 с.

2. *Ульянов, П. Л.* Вложение некоторых классов функций H_p^{ω} / П. Л. Ульянов // Известия АН СССР. Сер. математическая, 1968. – Т. 32, № 3. – С. 649–686.

3. *Ульянов, П. Л.* Теоремы вложения и соотношения между наилучшими приближениями (модулями непрерывности) в разных метриках / П. Л. Ульянов // Математический сборник, 1970. – Т. 81(123), № 1. – С. 104–131.

4. *Андриенко, В. А.* Вложение некоторых классов функций / В. А. Андриенко // Известия АН СССР. Сер. математическая, 1967. – Т. 31, № 6. – С. 1311–1326.

5. *Коляда, В. И.* О соотношениях между модулями непрерывности в разных материках / В. И. Коляда // Труды математического института АН СССР, 1988. – Т. 181. – С. 117–136.

6. *Потапов, М. К.* О соотношениях между модулями гладкости в разных метриках / Б. В. Симонов, С. Ю. Тихонов // Вестник Московского университета. Математика. Механика, 2009. – № 3. – С. 17–25.

7. *Ильясов, Н. А.* К неравенству между модулями гладкости различных порядков в разных метриках / Н. А. Ильясов // Математические Заметки, 1991. – Т. 50, № 2. – С. 153–155.

8. *Гольдман, М. Л.* Критерий вложения разных метрик для изотропных пространств Бесова с произвольными модулями непрерывности / М. Л. Гольдман // Труды математическог института РАН, 1992. – Т. 201. – С. 186–218.

9. *Trebels, W.* Inequalities for moduli of smoothness versus embeddings of function spaces // Arch. Math., 2010. – V. 94. – P. 155–164.

10. *Tikhonov, S.* Weak type inequalities for moduli of smoothness: the case of limit value parameters // J. Fourier Anal. Appl., 2010. – V. 16, Is. 4. – P. 590–608.

11. *Simonov, B.* Sharp Ul'yanov-type inequalities using fractional smoothness / S. Tikhonov // J. of Approximation Theory, 2010. – V. 162. – P. 1654–1684.

12. *Симонов, Б. В.* Некоторые вопросы теории приближений / Б. В. Симонов // Кандидатская диссертация. – М., 1985. – 125 с.

13. *Potapov, M. K.* On interrelation of the generalized Besov-Nikol'skiĭ and Veyl-Nikol'skiĭ classes of functions / Simonov B. V. // Anal. Math.,1996. – V. 22. – P. 299–316.

14. *Симонов, Б. В.* Теоремы вложения в конструктивной теории приближений / Б. В. Симонов, С. Ю. Тихонов // Математический сборник, 2008. – Т. 199, № 9. – С. 107–148.

15. *Конюшков, А. А.* Наилучшее приближение тригонометрическими полиномами и коэффициенты Фурье / А. А. Конюшков // Математический сборник, 1958. – Т. 44(86). – С. 53–86.

16. *Потапов, М. К.* Об одной теореме вложения / М. К. Потапов // Mathematica (Румыния, Клуж), 1972. – V. 14(37). – P. 123–146.

17. *Taberski, R.* Differences, moduli and derivatives of factional orders // Roczn. Pol. tow. mat., 1977. – V. 19. – № 2. – P. 389–400.

18. *Дзядык, В. К.* Введение в теорию равномерного приближения функций полиномами. – М.: Наука, 1977. – 511 с.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 531.383

В. В. Алешкин

РЕКУРРЕНТНЫЕ АЛГОРИТМЫ НЕЛИНЕЙНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ ГИРОСКОПИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ВЕКТОРА УГЛОВОЙ СКОРОСТИ

Саратовский государственный технический университет

aleshkinvv@yandex.ru

Получены рекуррентные алгоритмы асимптотического оценивания вектора угловой скорости на основе уравнений обратной задачи для блока трех гиротахометров. Изучены условия числовой устойчивости и особенности частотных характеристик. Получены численные оценки периода квантования и погрешностей определения компонентов вектора угловой скорости по полному и упрощенным алгоритмам.

Ключевые слова: блок гиротахометров, методические погрешности, алгоритмическая компенсация, рекуррентные алгоритмы, результаты моделирования.

V. V. Aleshkin

RECURRENT ALGORITHMS OF A NONLINEAR FILTRATION FOR GYROSCOPIC MEASURE OF ANGULAR VELOSITY VECTORE

Saratov state technical university

Recurrent algorithms for asymptotic evaluation of angular velocity vectore, based on equations of the three gyrotachometers reverse problem are built. Computation stability conditions and features of the frequency response characteristics are learned. Time sample needed and angular rate components calculation errors of the full and simplified algorithms are evaluated.

Keywords: block of gyroscopes, methodic errors, algorithmic compensation, recurrent algorithms, results of modeling.

Введение

Как показано в [1, 2], использование уравнений обратной задачи в качестве алгоритма определения компонентов вектора абсолютной угловой скорости объекта по сигналам тройки гиротахометров (ГТ) позволяет теоретически точно компенсировать, а с учетом инструментальных погрешностей гироскопов – существенно снизить погрешности перекрестных связей, нелинейностей масштабных коэффициентов, погрешности от действия угловых ускорений объекта и динамические погрешности ГТ. Степень компенсации этих погрешностей зависит от собственных динамических свойств системы дифференциальных уравнений обратной задачи, реализуемых в бортовом вычислителе в реальном масштабе времени. В настоящей работе изучены динамические характеристики рекуррентных алгоритмов, получены оценки погрешностей определения компонентов вектора угловой скорости по этим алгоритмам.

Числовая устойчивость рекуррентных алгоритмов

Реализация алгоритмов вычисления оценок угловых скоростей в бортовом вычислителе налагает ограничения на период квантования (шаг вычисления) T. Оценим допустимую величину T исходя из условий числовой устойчивости и влияния T на качество переходных процессов и частотные характеристики дискретных алгоритмов асимптотического оценивания угловых скоростейна основе уравнений обратной задачи для блока трех гиротахометров.

Нелинейная нестационарная система трех дифференциальных уравнений обратной задачи в матричной форме может быть записана в виде [1]:

$$\dot{\mathbf{V}} = -h\mathbf{D}_1^{-1}\mathbf{D}_2\mathbf{V} - \frac{B}{A}\mathbf{D}_1^{-1}\mathbf{S} + \mathbf{D}_1^{-1}\mathbf{F}, \qquad (1)$$

$\mathbf{S}=[S_i\ (V)]$ – матрица 3×1 с элементами $S_i = y_i z_i$,

где
$$y_i = d_{21}^i V_1 + d_{22}^i V_2 + d_{23}^i V_3;$$
$$z_i = d_{31}^i V_1 + d_{32}^i V_2 + d_{33}^i V_3; \qquad (2)$$

$\mathbf{V} = [V_1, V_2, V_3]^T$; $\mathbf{F} = [f_i]$; – матрица 3×1 элементов f_i

$$f_i = -\ddot{\beta}^i - \frac{n}{A}\dot{\beta}^i - \frac{1}{A}Q^i \quad (i=1, 2, 3);$$

$$h = H / A; \qquad (3)$$

Q^i и β^i – моменты датчиков моментов и углы относительных поворотов чувствительных элементов (ЧЭ) ГТ, соответственно; H, A – кинетические моменты и моменты инерции ЧЭ ГТ вокруг их выходных осей; B – разность моментов инерции поплавка и всего ЧЭ вокруг двух других осей; V_1, V_2, V_3 – оценки входных угловых скоростей; d^i_{kj} – элементы κ-х строк матриц $\mathbf{D}_i$.

Матрицы $\mathbf{D}_1$, $\mathbf{D}_2$, $\mathbf{D}_3$, соответствующие ориентации осей ГТ, полученной в [2], имеют вид:

$$\mathbf{D}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.406736 & -0.913545 \\ 0.85886 & 0.200455 & -0.471355 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{D}_2 = \begin{bmatrix} 0 & \cos\beta^1 & \sin\beta^1 \\ -\cos\beta^2 & 0.913545\sin\beta^2 & 0.406736\sin\beta^2 \\ -0.34322\cos\beta^3 + & 0.908311\cos\beta^3 + & -0.239103\cos\beta^3 + \\ +0.380208\sin\beta^3 & +0.367135\sin\beta^3 & +0.848913\sin\beta^3 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{D}_3 = \begin{bmatrix} 0 & \sin\beta^1 & \cos\beta^1 \\ \sin\beta^2 & 0.913545\cos\beta^2 & 0.406736\cos\beta^2 \\ 0.34322\sin\beta^3 + & -0.908311\sin\beta^3 + & 0.239103\sin\beta^3 + \\ +0.380208\cos\beta^3 & +0.367135\cos\beta^3 & +0.848913\cos\beta^3 \end{bmatrix}. \qquad (4)$$

Рекуррентные уравнения, соответствующие (1), запишем с помощью формулы Эйлера для интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\mathbf{V}_{n+1} = \mathbf{V}_n - hT\mathbf{D}_1^{-1}\mathbf{D}_{2n}\mathbf{V}_n - dT\mathbf{D}_1^{-1}\mathbf{S} + \mathbf{D}_1^{-1}T\mathbf{F}_\mathbf{n}. \qquad (5)$$

Индекс n означает, что элементы соответствующих матриц вычислены или измерены в n-й тактовый момент времени. Применение более сложных методов, с одной стороны, затруднит аналитическую оценку величины периода квантования, с другой, при практической реализации этих методов, потребуется вычисление правых частей не только в моменты времени, кратные T, но и в промежуточных точках. Последнее возможно при увеличении частоты опроса датчиков, либо при применении алгоритмов интерполяции, что усложнит реализацию системы в целом. Применение неявных методов [3] в данном случае невозможно, так как алгоритмы работают в реальном времени.

Для оценки числовой устойчивости воспользуемся уравнением возмущенного движения системы (1):

$$\mathbf{y}' = -h\mathbf{D}_1^{-1}\mathbf{D}_2\mathbf{y} + d\mathbf{D}_1^{-1}\mathbf{R}(\mathbf{y}, \mathbf{x}^0) \qquad (6)$$

$$y' = dy / d\tau; \quad \tau = ht; \quad h = H / A; \quad d = B/A,$$

где $\mathbf{x}^0(x_1{}^0, x_2{}^0, x_3{}^0)$ – невозмущенное движение; $\mathbf{y}(y_1, y_2, y_3)$ – возмущения; $\mathbf{R}(\mathbf{y}, \mathbf{x}^0)$ – матрица нелинейных членов уравнения. В отличие от (2), коэффициенты уравнения (6) не зависят от параметров гироскопов в первом приближении.

Уравнения первого приближения возмущенного движения для системы (6)

$$\mathbf{y}' = -h\mathbf{N}_1^{-1}\mathbf{N}_2\mathbf{y} \qquad (7)$$

могут быть записаны в рекуррентной форме с помощью матричной экспоненты

$$\mathbf{Y}_{n+1} = \mathbf{\Phi}\mathbf{Y}_n; \; \mathbf{\Phi} = e^{\mathbf{M}T} = \mathbf{E} + \mathbf{M}T + \mathbf{M}^2T^2 / 2! + \ldots, \qquad (8)$$

где $\mathbf{M} = -h\mathbf{N}_1^{-1}\mathbf{N}_2$; $\mathbf{N}_1$, $\mathbf{N}_2$ – матрицы $\mathbf{D}_1$, $\mathbf{D}_2$ при $\beta^i = 0$. Ограничиваясь двумя членами разложения и выполнив z-преобразование, получим характеристическое уравнение

$$\det(\mathbf{E}z - \mathbf{\Phi}) = 0,$$

корни которого имеют вид:

$$z_j = S_j hT \; (j=1,2,3),$$

где S_j – корни характеристического уравнения системы (7).

Условия устойчивости дискретной системы (8) $|z_j| < 1$ позволяют в первом приближении оценить допустимый период квантования

$$T < 1/\left|S_j^{\max}\right| h. \qquad (9)$$

Приведем численную оценку величины T для блока трех ГТ с параметрами:

h=10^{3}с;

$$S_{1,2} = (-1,4667 \pm i2,945)h; \quad S_3 = -2,5709h. \quad (10)$$

Из (9) следует T<0,3*10^{-3}с.

Оценка (9) должна уточняться по результатам моделирования работы вычислителя по полным нелинейным алгоритмам. На рис. 1 приведены графики изменения значений оценки одного компонента V_1 вектора угловой скорости, вычисленного по алгоритму вида (1) при единичном скачке входных угловых скоростей $\omega_j(t)$ $(j=1,2,3)$.

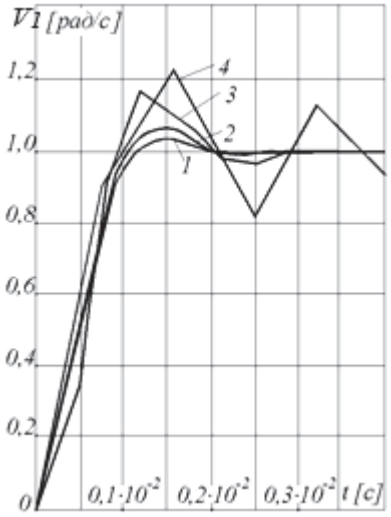


Рис. 1. Переходные процессы $V_1(t)$

Кривые *1, 2, 3, 4* соответствуют T=0,1*10^{-4} с; 0,1*10^{-3} с; 0,4*10^{-3} с; 0,8*10^{-3} с. Максимальное значение T, при котором решения сходятся, – 1.4*10^{-3}с (рис. 2). Однако при этом время переходных процессов в оценках увеличивается с 0.25*10^{-2}с до 0.14*10^{-1}с, что снижает эффективность алгоритмов. Заметим, аналогичный параметр в самих ГТ равен 0.6*10^{-1}с. Из графиков также следует, что вычислять оценки угловых скоростей по алгоритму (1) с параметрами (4,10) с шагом, меньшим 0.1*10^{-3}с, нецелесообразно, так как это незначительно улучшает динамику решений.

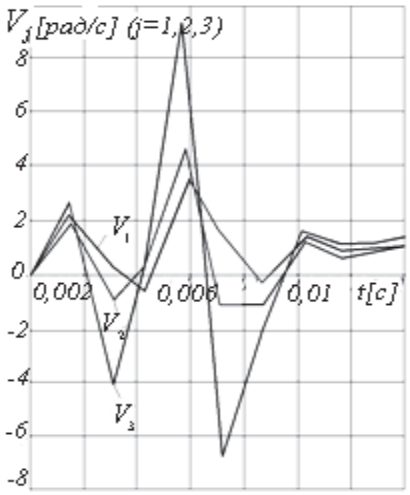


Рис. 2. Переходные процессы в оценках $V_j(t)$

Частотные характеристики

Сопоставим частотные характеристики дискретной системы (5) с АФЧХ аналоговых алгоритмов (1), приведенных в [1]. Получим z-передаточные функции уравнений первого приближения системы (5)

$$\mathbf{V}_{n+1} = \mathbf{V}_n - hT\mathbf{D}_1^{-1}\mathbf{D}_{2n}\mathbf{V}_n + \mathbf{D}_1^{-1}T\mathbf{F}_\mathbf{n}. \quad (11)$$

Передаточная матрица W(z), элементами которой являются z-передаточные функции Wij от входов fi к выходам Vi (i,j=1.2.3), имеет вид

$$\mathbf{W}(z) = [\mathbf{E}(z-1) + hT\mathbf{D}_1^{-1}\mathbf{D}_2]^{-1}\mathbf{D}_{-1}^{1}T$$

Элементы Wij(z) матрицы W(z) уравнений первого приближения (βi=0) при T=0.1*10-3 с имеют числители, приведенные в табл. 1, и знаменатель

$$z^3 - 2.435z^2 + 2.037z - 0.5806.$$

Таблица 1

Числители передаточных функций

Wi,j	1	2	3
1	$-0.00028z^2 - 9.151\cdot10^{-5}z +$ $+0.00037$	$-0.00023z^2 + 2.347\cdot10^{-5}z +$ $+0.1866\cdot10^{-3}$	$0.00044z^2 - 7.269\cdot10^{-5}z -$ $-3.676\cdot10^{-4}$
2	$0.0069z^2 - 0.01368z +$ $+0.006786$	$0.004221z^2 - 0.008237z +$ $+0.4017\cdot10^{-2}$	$-0.007957z^2 + 0.01593z -$ -0.007972
3	$0.003075z^2 - 0.00604z +$ $+0.003046$	$0.001771z^2 - 0.3478\cdot10^{-2}z +$ $+0.1737\cdot10^{-2}$	$-0.003545z^2 + 0.007031z -$ -0.003574

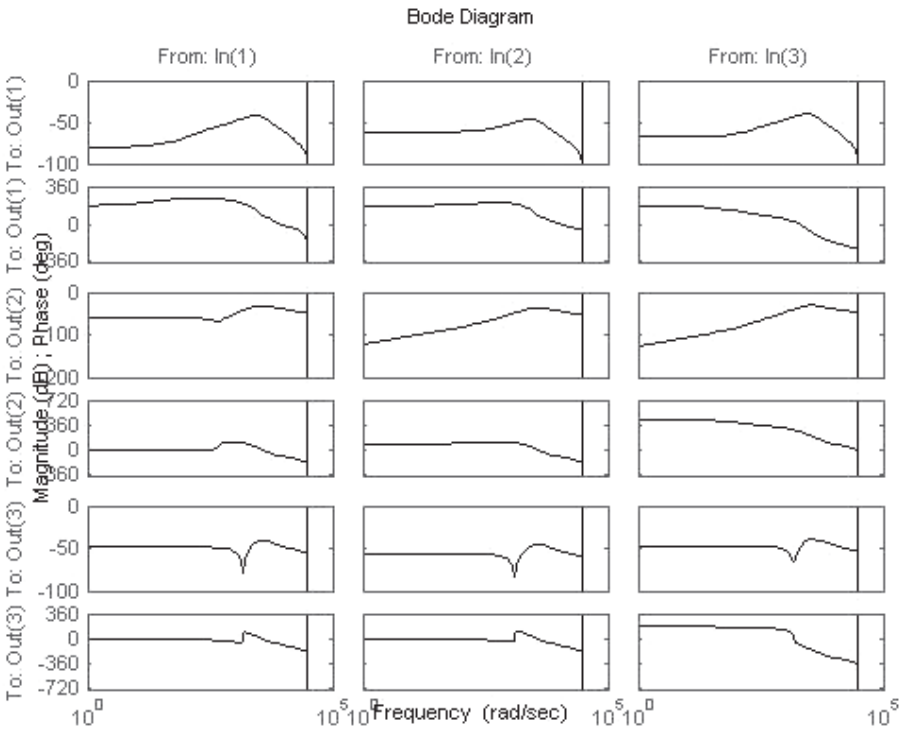


Рис. 3. АФЧХ дискретной системы при T=0.0001 с

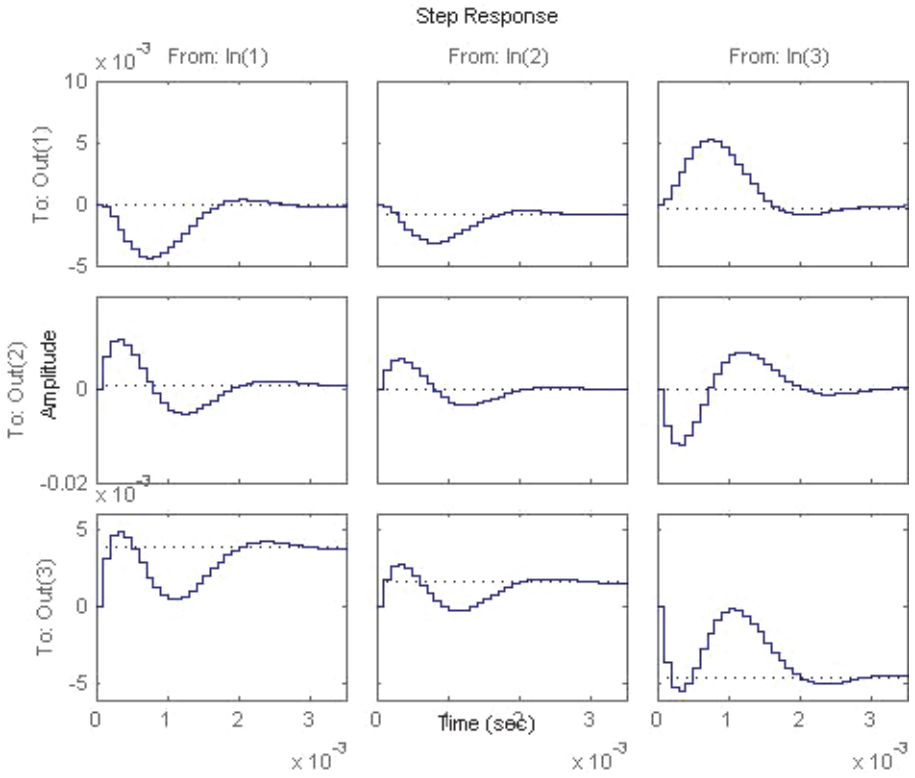


Рис. 4. Переходные процессы в дискретной системе

На рис. 3 приведены АФЧХ системы, из которых следует, что до частоты Шеннона характеристики дискретной системы (11) по форме совпадают с соответствующими характеристиками непрерывной системы. То же самое можно сказать и о переходных процессах, графики которых приведены на рис. 4.

Это означает, что в соответствии с результатами, полученными в [1], и фазо-частотными характеристиками рис. 3, часть каналов много-

мерной системы являются неминимально-фазовыми и при оценивании низкочастотных гармонических сигналов возможно изменение знака оценок по каналам W11(z), W23(z), W33(z) на противоположный из-за сдвига фазы в 180° на низких частотах. В связи с этим рассмотрим упрощенные рекуррентные алгоритмы.

Упрощенные алгоритмы. Результаты моделирования

Если в качестве исходных уравнений движения ЧЭ ГТ использовать прецессионные уравнения, соответствующее уравнение обратной задачи приобретает вид

$$h\mathbf{D}_2\mathbf{V}=\mathbf{F};\ f_i=\frac{1}{A}Q^i, \qquad (12)$$

решением которого является выражение

$$\mathbf{V}=h^{-1}\mathbf{D}_2^{-1}\mathbf{F}. \qquad (13)$$

Учитывая «чистое запаздывание» на период квантования при вычислении оценок, получим выражение

$$\mathbf{V}_{n+1}=h^{-1}\mathbf{D}_{2n}^{-1}\mathbf{F}_n. \qquad (14)$$

Условия существования и единственности решений (13) налагают ограничения на ориентацию только осей чувствительности ГТ в блоке, в отличие от этих условий для системы (1). Они выполняются как при ориентации, полученной в [2], так и при более простой, например, взаимно-ортогональной ориентации осей ГТ. Матрицы направляющих косинусов $\mathbf{N}_i$ (i=1,2,3) осей гироскопов в этом случае имеют, например, вид

$$\mathbf{N}_1=\mathbf{E};\ \mathbf{N}_2=\begin{bmatrix}0&0&1\\1&0&0\\0&1&0\end{bmatrix};\ \mathbf{N}_3=\begin{bmatrix}0&1&0\\0&0&1\\1&0&0\end{bmatrix}.$$

Определитель матрицы гироскопических коэффициентов d^i_{2j} (i,j=1,2,3) равен

$$\det\mathbf{D}_2=-\Pi\sin\beta^i-\Pi\cos\beta^i \qquad (15)$$

и не обращается в нуль ни при каких, достаточно малых, β^i (i=1,2,3). Таким образом, алгоритм вычисления оценок V_j угловых скоростей $\omega_j\,(j=1,2,3)$ имеет вид конечных выражений (14), в котором *fi* заданы выражением (3). Соответствующая матричная передаточная функция $\mathbf{W}(z)$ имеет вид:

$$\mathbf{W}(z)=\mathbf{E}z^{-1}h^{-1}\mathbf{D}_2^{-1}(z).$$

В первом приближении $\mathbf{D}_2=\mathbf{N}_2$, поэтому динамические погрешности системы сводятся к «чистому запаздыванию» по фазе на время вычисления оценок (14).

Алгоритм (14) может быть дополнен нелинейными членами уравнения (1)

$$\mathbf{V}_{n+1}=h^{-1}\mathbf{D}_{2,n}^{-1}(\mathbf{F}_n-d\mathbf{S}). \qquad (16)$$

Результаты моделирования работы блока ГТ и вычисления V_j по алгоритмам (5), (14), (16) с шагом $0.1*10^{-3}$с при ступенчатом и гармоническом изменениях угловых скоростей с частотой 2.5 Гц сведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты моделирования

Параметры	$t_{пп}$, с	σ, %	$\delta\omega_{уст}$, %	$\delta\omega_{max}$, %
Алг.(5)	0.055	12,28	$0,6*10^{-8}$	$0,62*10^{-4}$
Алг.(14)	0.0001	0,005	0,1086	0,628
Алг.(16)	0.0001	0,005	$0,6*10^{-8}$	$0,24*10^{-6}$

Здесь $t_{пп}$ – время переходных процессов; σ – перерегулирование; $\delta\omega_{уст}$ – погрешность определения угловой скорости в установившемся режиме; $\delta\omega_{max}$ – максимальное значение погрешности при гармоническом изменении угловых скоростей по отношению к амплитудному значению.

Видим, что применение рекуррентных алгоритмов асимптотического оценивания (16), построенных на основе упрощенных уравнений обратной задачи, позволяет практически полностью компенсировать методические погрешности блока трех ГТ как в установившемся режиме, так и при гармонических колебаниях объекта с частотой в несколько герц.

Полученные численные оценки погрешностей справедливы при точном задании параметров ГТ, точном съеме сигналов по Q^i, β^i и производным, и периоде квантования $0.1*10^{-3}$ с.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Алешкин, В. В*. Частотные свойства алгоритма асимптотического оценивания компонентов вектора угловой скорости / В. В. Алешкин // Вестник СГТУ. – Саратов, 2012. – № 2 (65). – Вып. 1. – С. 105–111.

2. *Алешкин, В. В*. Оптимизация ориентации гиротахометров в блоке при алгоритмической компенсации их погрешностей / В. В. Алешкин // Вестник ТГТУ. – Тамбов, 2011. – Т. 17. – № 2. – С. 333–341.

3. *Джон, М. Смит*. Математическое и цифровое моделирование для инженеров и исследователей / Джон М. Смит ; пер. с англ. Н. П. Ильиной ; под ред. О. А. Чембровского. – М.: Машиностроение, 1980. – 271 с.

УДК 882 – 1 «11» +882.09 – 1 «11» 519.25

Г. И. Брызгалин

НОРМАЛИЗОВАННЫЙ ТЕКСТ ИГОРЕВА СЛОВА

Волгоградский государственный технический университет

vm@vstu.ru

В настоящей статье [7]–[9] приведен несколько уточненный нормализованный текст «Слова о полку Игореве», сопровождаемый объяснением всех его отклонений от П1800. Раскрываются количественные свойства структуры, симметрия и смыслы уникального поэтического произведения.

Ключевые слова: текст, структура, симметрия, смыслы, количественные свойства текста.

G. I. Bryzgalin

NORMALISED TEXT OF IGORS WORD

Volgograd State Technical University

This paper [7]–[9] presents normalised text of the «Slovo o polku Igoreve» and explanations for every case of changing the signs in the First Print Book of 1800 Year. The original quantities of the poetical text and symmetry of sences are describing.

Keywords: text, structure, symmetry, meaning, the quantitative properties of the text.

Попытки исправления текста «Слова о полку Игореве», дошедшего до нас в форме первого печатного издания 1800 года (П1800), широко ведущиеся исследования специалистами в разных областях знания, в частности [1]–[12], свидетельствуют о следующем факте: *оригинальный порядок Авторского текста, а также отдельные слова и выражения претерпели со временем существенные нарушения*. В [7]–[9] обосновано утверждение, что кроме накопления естественных искажений при переписках, текст пережил в своей истории две фундаментальные катастрофы. С использованием математических расчетов были опознаны и отделены друг от друга перестановки частей в каждой из катастроф, разработана и записана в формах, обусловленных технологией восстановления, новая версия, названная *нормализованным текстом Авторских листов «Слова о полку Игореве*. В настоящей статье, продолжающей эти работы, приведен несколько уточненный нормализованный текст, сопровождающийся объяснением всех его отклонений от П1800. Раскрываются количественные свойства структуры, симметрия и смыслы уникального поэтического произведения.

1. Нормализация текста. Одним из достоверных источников, на основе которых ведутся исследования «Слова», кроме П1800 и Екатерининской рукописи, служит реабилитированный Н. К. Гаврюшиным известный Щукинский список [2], [4]. Ценность его прирастает за счет его особенной неполноты: текст производит впечатление аккуратно сокращенного (примерно на 2000 букв) списка с протографа П1800 с сохранением порядка этого печатного издания и удалением «темных» мест». При этом субъективно приобретается существенно большая ясность прочтения, полагаться на достоверность которой, разумеется, приходится с осторожностью.

Как признано исследователями, системно занимавшимися этим вопросом, оригинальный Авторский список «Слова» был создан на рубеже 11–12 веков. Используемая в [7]–[9] версия его дальнейшей судьбы предполагает (по-видимому, случайную) перестановку части Авторских листов перед записью первой рукописной книги (1-я катастрофа текста). Потом книга этого, скажем, *первого рукописного издания*, или может быть список с нее, претерпела примерно через 300 лет физическое разрушение с разрывом отдельных листов на части (2-я катастрофа текста). Все листы в начале 16 века были собраны и с них восстановлены два текста: дошедший до нас в виде Щукинского списка, сокращенный и в виде Екатерининского списка – полный.

Триединая цель нормализации:

1) восстановить Авторский порядок текста, понять логику и смыслы повествования;

2) исправить описки и «темные места»;

3) записать древний текст современными буквами, расставив (предположительно) ударения, поддерживающие стихотворный ритм и размер, и разбив на смысловые части.

При достижении этой цели используется гипотеза о наличии условного куплета, как единицы длины текста в 120 буквомест, и ра-

венстве общего объема Авторского текста 120 таким куплетам. Все «Слово» при этом занимает ровно 120^2=14 400 буквомест.

Будем понимать нормализацию произведения как запись его текста буква в букву с заменой каждой старинной на современную. Исключение составляют лишь явно пропущенные либо ошибочно вставленные буквы, а главное – так называемые «темные места», где править приходится искаженные группы слов, иногда с утраченным смыслом.

Процесс исправления средневековой рукописной книги по дошедшим до нас *спискам со списков* отчасти можно считать обработкой текстовой информации посредством замены ее языкового носителя на другой, более приемлемый носитель. В более полном понимании следует вести речь также об осознании смыслов и сохранении художественной ценности поэтического произведения, для чего приходится учитывать не только фактуру информации, но личность автора, его связи и мировоззрение.

Относительно имени Автора исследуемого здесь произведения, ограничимся декларацией, что оно четко и традиционно указано в заглавиях обоих сохранившихся полных источников древнего текста «Слова о полку Игореве *Игоря сына Святславля внука Ольгова*» [7].

Что касается языка, то он, конечно, был другим, но не настолько, чтобы его совсем нельзя было понимать современному человеку, не порвавшему связи с русским народным говором и достаточно восприимчивым к разнообразию его ударений и иных признаков местных форм. Можно, например, быстро приспособиться к тому, что вместо одной буквы «о» в старинном тексте используются две: краткое «ъ» и долгое «о», или когда вместо двух привычных букв «и», «ы» применяется набор из четырех, выражавших целый спектр звуков «ї, і, и, ы». Однако к искажениям ряда хорошо знакомых нам слов, таких как «полки», «волки», которые почти так же писались и произносились в конце 12 века, но в последующие годы получили написание с перестановкой соседних гласного и согласного «плъкы», «влъци» (болгарское влияние), – привыкнуть трудно. Обстоятельства такого рода обусловили запись нормализованного текста буквами современной русской азбуки. Собственно, это всего лишь следование веками сложившейся традиции, когда теряется Авторское написание букв, а значит, результат такой работы уже нельзя назвать восстановлением.

Несомненно, что строгость соблюдения в поэтическом тексте доступно измеримых размеров его частей объективно служит *повышению живучести* рукописного произведения. Не исключено, что Автор «Слова», подбирая стандартные размеры стихов, тем самым позаботился снабдить будущих переписчиков, говоря современным жаргоном, «критериями оценки эксплуатационной пригодности ветшающих текстов». Во всяком случае, близость размера стихов П1800 к значениям, кратным 120 буквоместам, рассматривается здесь как один из признаков сохранности имеющегося в наших руках текста. Насколько именно должна соблюдаться точность этих размеров – вопрос тонкий, ведь перед нами удивительно чувствительное к нюансам ритма и смысла творение, так что само по себе, без некой высшей цели, количества букв в стихах вряд ли заботили Автора.

2. Структура и статистика нормализованного текста. Формальным критерием (разумеется, не абсолютным) правильности нормализуемого текста служит точность соблюдения кратности размеров стихов, глав и разделов с введенной единицей измерения – мерным куплетом из 120 буквомест (119 букв) при условии согласования смыслов и художественного качества поэмы. Собственно, *реально достигаемый на этом пути оптимум и называется нормализованным текстом*.

С тем, чтобы любой мог легко проверять эту близость, текст приведен здесь без знаков препинания. При работе над ним количество букв помеченного фрагмента выводилось на экран одним щелчком управляющего устройства («мышки»). Эта возможность современных компьютерных средств не просто облегчила продвижение в описываемых изысканиях, но качественно обеспечила получение итоговых фактов, а благодаря им и чисто литературоведческих выводов.

Следует оговорить, что гипотеза о покуплетном строении текста с размером куплета a=119 буквам не предполагает наличия самостоятельных одиночных куплетов, имеющих в точности этот размер. Стихи (короткие части поэмы с относительно самостоятельным смыслом), содержащие количество букв, точно кратное 119, изредка встречаются, но чаще имеют отклонения в ту или иную сторону. Причем, судя по их конкретному смыслу – в частности по личности, которой они посвящены, – такая избирательность в точности раз-

мера частей текста и количестве букв в них не вполне случайна, а определяется особым отношением Автора к этим лицам или тематике стихов. Весь нормализованный текст «Слова», состоящий из 14 280 букв, разбит на 4 раздела (крупные структурно и тематически определенные части), 16 глав и 40 стихов. Представленный ниже текст с последними поправками снабжен заголовками, дающими возможность отслеживать место и смысл отдельных частей в общей структуре произведения.

Обозначения структурных характеристик постишного и сквозного счета:

a_i – длина стиха в буквах; $a_i = 119k_i + \delta_i$; k_i – длина стиха в куплетах; ***δ_i – погрешность в кратности $\delta_i = a_i - ak_i$***;

***A_i – накопленная длина текста постишно: $A_i = 119K_i + \Delta_i$.; K_i – текущее количество накопленных куплетов*;**

$\Delta_i = A_i - 119K_i = \Sigma\delta_i$ – накопленная погрешность с начала произведения до конца i-го стиха.

Логическое обоснование утверждения, что *постишная структура всех частей произведения из условных куплетов, кратных по количеству букв числу 119, выстроена самим Автором «Слова»*, состоит в следующем:

1) количество букв в стихотворном куплете подчиняется законам поэтического творчества и, как правило, не укладывается в заранее заданные формальные рамки, так что *размеры реальных стихотворных куплетов поэмы, измеренные в буквах, можно признать величинами случайными*;

2) стих, глава и раздел поэмы составляются из куплетов, так что *размеры более крупных частей и все произведение в целом можно признать суммами случайных величин* – размеров отдельных реальных стихотворных куплетов;

3) если признать, что Автор подчинялся только своему вдохновению и не управлял количеством букв в поэме и ее отдельных частях, то определённые *выше случайные величины должны быть в совокупности независимыми друг от друга*;

4) согласно известной теореме теории вероятностей *дисперсия суммы независимых случайных величин равна сумме их дисперсий*. Из нее следует, что *при объединении куплетов в стихи, главы, разделы и все произведение в целом средние квадратические отклонения от размера куплета a=119 среднестатистически* ***должны возрастать***;

5) на деле, как при внимательном (даже и неформальном) анализе бесспорно обнаруживается из представленных ниже таблиц постишной структуры, *отклонения от значений, кратных a=119*, ***в целом явно убывают*** *с ростом числа куплетов в части произведения,* ***достигая нуля*** *для всех четырех больших разделов произведения.*

Следовательно, ***размеры частей поэмы не являются независимыми случайными величинами***. Некое целенаправленное воздействие обеспечивало систематическое убывание величин, которые должны бы возрастать.

Заключительное замечание. Произведенные изменения в тексте П1800 непосредственно опирались на предложения исследователей самых разных профессий, либо избирательно учитывали догадки, попытки, соображения, накопленные за восемь столетий трудом радетелей «Слова» по его сохранению (см., в частности, [1]–[5], [10]–[12].

ПРИЛОЖЕНИЯ

I. Перечень исправлений букв текста Первого печатного издания (П1800)

Обозначения источников сведений о количестве *добавленых* (либо *изъятых* (тогда при них ставится знак «минус») букв в определенном слове или группе слов):

Щ – Щукинский список по [2]; **Г** – Гудзий [3]; **Т** – Творогов [5]; **П** – П 1800

(Е) – подтверждение в списке для Екатерины II по данным Н. К. Гаврюшина в [2].

В последнем (правом) столбце по центру – количество принятых здесь исправлений букв в соответствии с указанными источниками; а слева в этом же столбце жирным шрифтом – счет, так сказать, «отсебятины» автора этой статьи.

* – знак, подтверждающий принятое исправление таким же написанием в другом месте П 1800.

	П1800	Исправленное	Щ	Г	Т	П	Счет добавленных букв
1.	мыслію	мыс**е**лью					**1**
2	бо рече	бо реко**ша**					**2**
3	песь, песь,песьми	пес**н**ь, пес**н**ь, пес**ньми**(E)	1	1	1	*	3
4	Олга, Олзе, …	Ол**ь**га, Ол**ь**ге,…				*	5
5	Половец**ь**кую	Половецкую				*	-**1**
6	Рус**ь**кую, Рус**с**кую	Рускую				*	-**1** -1
7	славы	славо**ю**	1				1
8	зби	**въ**зби**ся**		2	2		**2** 2
9	пяткъ	пят**ъ**къ		1	1		1
10	не былонъ	не было **о**но	1	1	1		1
11	тоже звон	то**й** же звон		1	1		1
12	Даж**дь** – Божа	Дажьбожа				*	-**1**
12	дебрь Кисаню и не сошлю	дебрь**с**ки сани и несоша		1			
13	опу**с**тоша	опуташа(E)	-1	-1	-1		-1
14	убуди	убуди**ста**		3	3		3
15	Кіевскый, … Кіевскаго	Киев**ь**ский (E)	1				**1** 2
16	Святславъ	Свят**ъ**славъ(E)	1		1	*	3
17	бес щитовь	без**ъ** щитовъ				*	1
18	злачены**м**и	злачёные	-1				-1
19	Галичкы	Галичкы́**й**	1				1
20	Угорскыи	Угор**ь**ские(E)	1			*	1
21	утрпе	утр**ъ**пе(E)	1		1		1
22	Мстисла́вичи	Мстислав**л**ичи (E)	1				1
23	кровать и рекъ	кровь а т**ой** и рекъ		1			**1** 1
24	не бысь	не быс**т**ь	1	**1**	1		1
25	воз**з**ни	вонзи			-1	*	-1
26	от**т**вори	отвори			-1	*	-2
27	Полотске	Полот**ь**ске(E)	1				1
28	се**го** бо ныне	се бо ныне					-**2**
29	роз**и** нося	розно ся		-1	-1		-1
30	гласъ слышитъ	гласъ **ся** слышитъ		2			2
33	въшуме	въ**с**шуме	1				1
34	вежи ся подвизаша**ся**	вежи ся подвизаша					**-2**
35	Ростиславя	Ростислав**л**я		1	1		1
36	стугою	с**ъ** тугою		1			1
37	преклонило	преклонило**ся**		2	2	*	2
38	втроскóташа	в**с**троскоташа		1			1
39	тол**ь**ко	толко(E)	-1	-1			-1
40	сокол**ь**ца	соколца	-1			*	-1
		Изменено букв:					**14** **14**+47 = 61
		удалено					**–7** **–7–**9 = –16
		добавлено					**7** **7**+38 = 45
		увеличено на					**0** **0**+29 = 29

II. Таблицы стихотворной структуры нормализованного текста: $a=119$, $a^2=14\,280$

Раздел I. НАЧАЛА. Букв 3332=28 *a*

I	1. ОБАЯНИЕ СТАРЫХ СЛОВЕС 811=7*a*–22		2. СВЯТОСЛАВИЧИ 752=6*a*+38		3. К СИНЕМУ ДОНУ 828=7*a*–5		4. В ПОЛЕ ПОЛОВЕЦКОМ 941=8*a*–11	
	Пролог	**Зачин**	***Запев***	***Братья***	***Решение***	**В пути**	**Первый бой**	**Предчувствия**
a_i	621	346	217	379	355	473	483	458
k_i	5	3	2	3	3	4	4	4
K_i	5	8	10	13	16	20	24	28
δ_i	26	–11	–21	22	–2	–3	7	–18
Δ_i	26	15	–6	16	14	11	18	**0**
A_i	621	967	1184	1563	1918	2391	2874	**3332=28*a***

Раздел II. ГЛАВНЫЕ СОБЫТИЯ. Букв 3689=31 *a*.

II	5. ОЛЕГ ГОРИСЛАВИЧ 714=6*a*		6. БИТВА 1182=10*a*–8			7. ПОСЛЕДСТВИЯ 843=7*a*+10		8. СОН СВЯТОСЛАВА 950=8*a*–2	
	Память Ольговича	***Былые усобицы***	***Западня***	***Всеволод***	**Поражение**	**Вести беды**	**Обиды и напасти**	***Мутен сон***	***Речи бояр и дружины***
a_i	248	466	253	329	**600**	370	473	333	617
k_i	2	4	2	3	5	3	4	3	5
K_i	30	**34**	36	39	44	47	51	54	59
δ_i	10	–10	15	–28	5	13	–3	–24	22
Δ_i	10	**0**	15	–13	–8	5	2	–22	**0**
A_i	3580	4046	4299	4628	5228	5598	6071	6404	**7021=59*a***

Раздел III. СУД И РАЗБОРКИ. Букв: 3451=29 *a*

III	9. МНЕНИЕ ЕВРОПЫ 481=4*a*+5		10. УПРЕКИ СВЯТОСЛАВА 1004=8*a*+52			
	Кают Игоря	***Славят Святослава «грозного»***	**Игорю и Всеволоду Северским**	**Брату Ярославу Черниговскому**	**О себе и Владимире Переяславском**	**Всеволоду Суздальскому и рязанским князьям**
a_i	104	377	346	214	225	219
k_i	1	3	3	2	2	**1**
K_i	60	63	66	68	70	71
δ_i	–15	20	–11	–24	–13	100
Δ_i	–15	5	–6	–30	–43	57
A_i	7125	7502	7848	8062	8287	8506

III	11. ПРИЗЫВЫ СВЯТОСЛАВА 1266=11*a*–431				12. АСИММЕТРИЧНЫЙ ОТВЕТ 700=6*a*–14		
	Рюрику и Давыду	**Ярославу Галицкому**	**Роману Волынскому**	**Турово-Пинским князьям**	**Сушь на Руси**	**Изяслав Городенский**	**Автор новгородскому и полоцким князьям**
a_i	217	346	484	219	114	380	206
k_i	2	3	4	2	1	3	2
K_i	73	76	80	82	83	86	88
δ_i	–21	–11	8	–19	–5	23	–32
Δ_i	36	25	33	14	9	32	**0**
A_i	8723	9069	9553	9772	9886	10266	**10472=88 *a***

Раздел IV. РУСЬ НЕПОДСУДНАЯ. Букв: 3808 букв=32 *а*

IV	13. ВСЕСЛАВ ПОЛОЦКИЙ 973=8*а*+21			14. ЯРОСЛАВНА **800**=7*а*–33		15. ОСВОБОЖДЕНИЕ 1083=9*а*+12			16. ВОЗВРАЩЕНИЕ 952=8*а*	
	Дерзость и удачи	**Власть и судьба**	**Святой Владимир**	**Весть на Дунай**	**Мольбы Ярослав-ны**	**Знак Божий**	**Побег**	**Донец и Стугна**	**Погоня**	**Русь!**
a_i	375	466	132	**200**	**600**	109	496	478	476	476
k_i	3	4	1	2	5	1	4	4	4	4
K_i	91	95	96	98	103	104	108	112	116	**120**
δ_i	18	–10	13	–38	5	–10	20	2	1	–1
Δ_i	18	8	21	–17	–12	–22	–2	**0**	**0**	**0**
A_i	10647	11313	11445	11645	12245	12354	12850	**13328**	13804	**14280**

III. Нормализованный текст «Слова о полку Игореве»

◄ *Первая половина текста*	► *Вторая половина текста*	Пояснения
I. НАЧАЛА **1. Обаяние старых словес** ***Пролог*** **СЛОВО О ПО́ЛКУ ИГО́РЕВЕ** И́горя сына Святъсла́вля Внука Ольго́ва Не ле́по ли ны́ бяшеть бра́тие Нача́ти стары́ми слове́сы Трудныхъ пове́стий О по́лку Иго́реве Игоря Святъсла́влича Нача́ти же ся́ тъй песни По былинамъ сего времени А не по́ замышле́нию Бо́яню Боянъ бо вещий аще кому Хотяще песнь творити То растека́шется Мы́селью по́ древу Серымъ вълко́мъ по зе́мли Сизымъ орломъ подъ о́блакы Помня́шеть бо ре́коша Первыхъ времёнъ усобицы Тогда пу́щашеть Ї соко́ловъ На стадо лебе́дей Который доте́чаше Та́ преди песнь поя́ше Старо́му Яро́слову Храброму Мсти́славу И́ же зареза Реде́дю Предъ по́лкы Касо́жьскыми Красному Романови Святъсла́вличу Боянъ же братие не Ї соко́ловъ На стадо лебе́дей пуща́ше Но своя вещиа пе́рсты На живая струны въсклада́ше Они же сами Княземъ славу роко́таху ***Зачин*** Почнёмъ же братие повесть сию О́тъ стара́го Владимира До ныне́шняго Игоря И́ же истя́гну умъ Крепостию своею И́ поостри́ Сердца своего мужествомъ Наполнився ратнаго духа Наведе́ своя храбрыя по́лкы На землю Поло́вецкую	**III. СУД И РАЗБОРКИ** **9. Мнение Европы** ***Кают Игоря*** Ту́ немцы́ и вене́дицы Ту́ грецы́ и морава Поютъ славу Святъсла́влю Кають князя Иго́ря И́ же погрузи жиръ Во́ дне Каялы ре́кы поло́вецкия ***Славят Святослава*** Тии бо два́ храбра́я Святъсла́влича Иго́рь и Всево́лодъ Уже лжу убуди́ста Которую то бя́ше успи́лъ Отецъ ихъ Святъсла́въ Грозный великый Кие́вьскый Грозою бяшеть притрепалъ Своими сильными по́лкы И́ харалу́жными ме́чи На́ступи́ на землю Поло́вецкую Притопта хълмы и яру́гы Взмути́ реки и о́зеры И́ссуши́ потоки́ и болота А поганаго Ко́бяка изъ луку моря Отъ железныхъ великихъ Полковъ половецкихъ Яко вихрь выто́рже И па́деся Ко́бякъ въ граде Кие́ве Въ гридни́це Святъсла́вли **10. Упрёки Святослава** ***Игорю и Всеволоду*** Тогда великий Святъславъ И́зрони́ злато сло́во Слеза́ми смеше́но и ре́че О моя сыновча Игорю и Всево́лоде Рано е́ста нача́ла Половецкую землю ме́чи квели́ти А себе славы искати Но́ не честно́ одоле́сте Не честно бо Кро́вь поганую про́лиясте Ваю храбрая се́рдца Въ жесто́цемъ хара́лузе скована А въ буести закалена́	Подтвержденные другими источниками вставки (или изъятия) очевидным образом пропущенных (лишних) букв обычно не комментируются. И счет изменения числа букв здесь для них не ведется Текст «Слова» записан двумя столбцами: в левом разделы I-II ◄, в правом ►III-IV. Так удобно прослеживать организованную его Автором смысловую перекличку двух половин произведения ► Уже лжу убуди́ста. В П1800: *убуди..* Немцы и венедцы утверждают, что Игорь и Всеволод убудили, возбудили зло. Убуди́ста – старинная форма глагола при подлежащем в двойственном числе. ► П1800: *Киевский* (см. ниже) ◄ П1800: *мыслию.* Следуя мнению, что речь идет о белке, следовало бы писать «мысью» или «мышелью». Полагаем, однако, что в слово «мы́селью» или, например, «мысьлию» Автор мог вложить два смысла: это звучит и как *белка,* и как *мысль*. Первый выстраивает ряд предварительных состояний деятельности и познания Бояна: как белка, волк, орёл. Второй связывается дальнейшими творческими действиями, см. конец следующего стиха. **+1** ◄ **П**омня́шеть бо ре́ко**ша** – Вспоминал, как говорили... Прошедшее в прошедшем времени. **+2** ◄ пес**нь** – вставлена пропущенная «н». . ►Святъслав**ъ** – вставлен «ъ» ◄ В двух словах «Половецькую, Руськую» из текста П 1800 удален «**ь**», потому что далее в этих же словах П1800 он отсутствует **–2**

За́ землю Рускую О Бояне Соловию стараго времени Абы ты́ сиа по́лкы ущекоталъ Ска́ча славию́ по мы́слену древу Летая умомъ подъ о́блакы Свивая славою О́баполы́ сего времени Рыща въ тропу Трояню Чрезъ по́ля на го́ры **2. Святославичи** ***Запев*** Пети было песнь Иго́реви Того О́льга внуку Не буря соко́лы зане́се Чрезъ по́ля широкая Га́лицы ста́ды бежать Къ Дону Великому Чи́ли воспети было Вещий Боя́не Велесовь вну́че Ко́мони ржуть за Сулою Звенить слава въ Кие́ве Трубы трубять въ Новегра́де Стоять стязи въ Путивле ***Братья*** Игорь ждётъ Мила брата Всево́лода И рече ему Буй Туръ Всево́лодъ Оди́нъ бра́тъ Одинъ све́тъ светлый Ты Игорю Оба есве Святъсла́влича Седлай брате Свои бо́рзыи ко́мони А мои ти готовы осе́дланы У Курьска напе́реди А мои ти куряни све́домы къме́ти Подъ трубами по́вити По́дъ шело́мы възлеле́яны Конецъ ко́пия въскоръмлены Пути имъ веду́мы Яру́ги и́мъ знаемы Луки у нихъ напряжёны Ту́лы отво́рены Сабли изъо́стрены Сами скачуть Аки серые во́лки въ поле Ищучи себе чти́ а князю славы **3. К Синему Дону** ***Решение*** Тогда И́горь възре На светлое солнце И ви́де отъ него тьмою Вся́ своя во́я прикрыты И ре́че Игорь Къ дружине своей Братие и дружино Лу́це жъ бы по́тяту быти Не́же поло́нену быти А вся́демъ братие На свои бо́рзыя ко́мони Да по́зримъ Синего Дону Спала́ князю умъ похо́ти Искусити Дону Великаго И жалость ему знаме́ние за́ступи Хощу бо рече Копие́ приломи́ти Конець поля поло́вецкаго Съ вами ру́сичи хо́щу Главу свою приложи́ти А ли́бо испи́ти шело́момъ Дону	Нъ рекосте мужа́имеся сами Пре́днюю славу сами похитимъ А задню́ю ся сами поделимъ Се́ ли створи́сте Моей сребре́ней еди́не ***Брату Ярославу*** А́ уже не́ вижду власти Сильнаго и богатаго И многово́и брата моего Ярослава Съ черниговьскими быля́ми Съ мо́гуты и съ татра́ны И́ съ шельби́ры и съ то́пчакы И́ съ ревуги и съ о́льберы Тии бо́ безъ щито́въ съ засапо́жникы Кликомъ полкы побеждаютъ Звоня́чи въ прadéднюю славу ***О себе и Владимире Переяславском*** А чи ди́во ся братья Ста́ру по́молоди́ти Ко́ли соколъ въ мы́техъ бываетъ Вы́соко́ птицъ възбиваетъ Не дастъ гнезда своего въ обиду Но се́ зло́ Княже ми непособие На ниче си годины обрати́ша Се у Ри́мъ кричатъ Подъ сабля́ми поло́вецкыми А Володи́миръ подъ ранами Туга́ и тоска сыну Глебову ***Всеволоду Суздальскому и Рязанским*** Великый княже Всево́лоде Не мыслию ти прелете́ти изда́леча О́тня зла́та стола́ поблюсти́ Ты бо можеши Волгу Вёслы раскропити А Донъ шеломы выльяти А же́ бы ты бы́лъ То была бы чага́ по ногате А кощей по резане Ты бо можеши по́суху Живыми шере́ширы стре́ляти У́далы́ми сыны Глебовы **11. Призывы Святослава русским князьям:** ***Киевскому областному и Смоленскому*** Ты́ буй Рюриче и Давыде Не ваю́ ли злачёные ше́ломы По́ крови пла́ваша Не ваю́ ли хра́брая дру́жина Ры́кають а́ки туры́ Ране́ны сабля́ми калёными На поле незна́еме Вступита господи́на Въ злата́ стремена́ За обиду сего времени За́ землю Рускую за раны Иго́ревы Буего Святъславлича ***Галицкому*** Га́личкы́й Осмомы́сле Яро́славе Высо́ко еди́ши На́ своёмъ златоко́ваннемъ сто́ле По́дперъ го́ры Уго́рьскыи Своими железными по́лки Заступивъ коро́леви путь Затворивъ Дунаю воро́та Меча бремены чрезъ облаки Суды рядя́ до Дуная Гро́зы твоя по зе́млямъ тукъ̀тъ Отворя́еши Киеву вра́та	◄ Ранее подобно белке, скачущей по реальному дереву, а теперь соловьем-поэтом по древу своих мыслей. ◄ В П1800 было «славы». Добавлена буква +**1** ◄О́льга – Добавлен «**ь**». Это слово «О́лга», записано без «**ь**» в П1800, с удивительным единодушием все это слово исключается в авторитетных современных прочтениях. Представляется, однако, невероятным, чтобы составители П1800, которые буква в букву следовали имевшемуся у них древнему списку, позволили себе исключить целое слово. Именно благодаря тому, что переписчики в течение сотен лет следовали этому правилу и могла сохраниться количественная структура оригинального текста «Слова». Согласно статье Н. К. Гаврюшина в [2], слово «Олга» отсутствует в тексте Щукинского списка и в цитатах из поэмы в «Истории государства Российского» Карамзина, но сохранено в списке для императрицы Екатерины и в выписках А. Ф. Малиновского. Учитывая значительное сокращение Щукинского списка по сравнению с Мусин-Пушкинским (в нем исключены практически все «темные места»), исключение это не следует считать аргументом. А вот В. А. Жуковский, прочтение которого высоко ценил А. С. Пушкин, сохранил это слово, см. [2]. Всего в П1800 имя Олег в разных формах используется 11 раз, из них в 5 словах буква «е» исключена, в 4 словах редуцирована в «ь», а в двух сохранена в полной форме. В нормализованном тексте исключения этой буквы заменены на редуцированный вариант «ь», поскольку в поэтическом произведении это давало Автору степень свободы для сохранения ритма стиха ► П1800: злачён**ыми** П1800: Уго́рскыи, однако ранее в главе об Олеге Святославиче читаем «Между уго́рьскими иноходьцы». Здесь принят вариант с «**ь**»

В пути Тогда въступи́ Игорь князь Въ златъ стре́мень И поеха по чистому полю Солнце ему тьмою путь заступа́ше Но́щь стонущи ему грозою Птичь убуди́ Свистъ зверинъ въста Възби́ся Ди́въ Кличетъ ве́рху древа Велитъ послу́шати зе́мли незна́еме Вълзе́ и Помо́рию и́ Посули́ю И Суро́жу и Ко́рсуню И́ тебе́ Тьму́торока́ньский болванъ А поло́вци негатовами дорогами Побегоша къ Дону Великому Крычатъ телегы полу́нощи Рцы лебе́ди роспу́жены Игорь къ Дону во́и ведётъ Уже бо бе́ды его Пасётъ птичь по дубию Волки грозу воскрожа́ть по яру́гамъ Орлы клёктомъ на кости Звери зовутъ Лисицы брешутъ На́ чърлёные щиты **4. В поле половецком** ***Первый бой*** О Руская зе́мля Уже за шело́мянемъ е́си Долго ночь меркнетъ Заря светъ запала́ Мъгла по́ля покрыла Щёкотъ славий успе́ Говоръ гали́чь убуди́ Русичи вели́кая по́ля Чьрлёными щи́ты пре́городи́ша Ищучи себе чти́ а князю славы Съ зара́ния въ пя́тъкъ пото́пташа Поганыя по́лкы поло́вецкыя И рассу́шась стре́лами по́ полю По́мчаша красныя девкы поло́вецкыя А съ ними злато и па́волокы И драгыя оксами́ты Орьтъма́ми И я́пончица́ми и ко́жухы Начаша мосты мости́ти По болотомъ и гря́зивымъ ме́стомъ И вся́кыми узо́рочьи Поло́вецкыми Чьрленъ стягъ Бе́ла хорю́говь Чьрлена чёлка Сре́брено стру́жие Храброму Святъсла́вличу ***Предчувствия*** Дремлетъ въ поле Ольго́во хоро́брое гне́здо Далече залетело Не бы́ло оно обиде поро́ждено Ни́ соко́лу ни кре́чету Ни́ тебе чёрный воронъ Поганый поло́вчине Гзакъ бежитъ серымъ вълко́мъ Кончакъ ему следъ править Къ Дону Великому Дру́гаго дня́ велми ра́но Кровавыя зо́ри Светъ поведаютъ Чёрныя тучи съ моря идутъ Хотятъ прикрыти 4 солнца	Стреляеши съ отня зла́та стола Салтаны за зе́млями Стреляй господи́не Кончака Поганого кощея За́ землю Рускую за раны Иго́ревы Буего Святъсла́влича ***Волынским*** А ты буй Рома́не и Мсти́славе Храбрая мысль Носитъ вашъ умъ на де́ло Высо́ко плава́еши На дело въ буести Яко соколъ на ве́трехъ ширя́яся Хотя птицу въ буйстве́ одоле́ти Суть бо у ваю железныи па́порзи Подъ шело́мы латинскими Теми тре́сну земля и многи страны Хино́ва Литва́ Ятвя́зи Дере́мела И́ поло́вцы сулицы своя повергоша А главы своя́ подклони́ша Подъ тыи мечи́ харалу́жныи Нъ уже княже Иго́рю Утрьпе со́лнцю светъ А древо не бологомъ листвие срони По Рси́ и по Су́ли грады поделиша А Иго́рева храбраго по́лку не́ кресити́ Донъ ти княже кличетъ И зовёть князи́ на победу Ольго́вичи храбрыи кня́зи Доспе́ли на брань ***Турово-Пинским*** Инъгва́рь и Всево́лодъ И все́ три Мстисла́вличи Не ху́да гнезда шестокры́лцы Не победными жребии Собе власти расхы́тисте Ко́е ваши златыи шело́мы И сули́цы ляцки́и и щи́ты За́городи́те Полю воро́та Своими острыми стрелами За́ землю Рускую за раны Иго́ревы Буего Святъсла́влича **12. Асимметричный ответ** ***Сушь на Руси*** Уже́ бо Сула́ не течётъ Сребрёными струями Къ граду Пе́реясла́влю И́ Двина болотомъ течёть О́нымъ грознымъ поло́чаномъ Подъ кликомъ поганыхъ ***Изяслав Городенский*** Еди́нъ же Иза́славъ Сынъ Василько́въ позвони́ Своими острыми ме́чи О шело́мы литовския Притрепа славу Деду свое́му Всеславу И самъ подъ чьрлёными щи́ты На кроваве траве Притре́панъ литовскыми ме́чи Исходи́ юна кро́вь А той и рекъ Дружину твою княже Птичь крылы́ приоде́ А звери кровь полиза́ша Не бы́сть ту брата Брячи́слава Ни́ другаго Всево́лода Единъ же изрони же́мчужну душу Изъ хра́бра тела Чрезъ злато́ ожере́лие Уныли голо́сы пони́че весе́лие Трубы трубятъ городе́ньскии	► П1800: «оттвори́еши». Хотя пятью строками выше «Затво́ривъ Дунаю воро́та». Возможно формальное правописание переписчика, приставляющего соответствующие приставки «за» и «от» ◄**Въ**зби́**ся** Ди́въ – добавлено 4 буквы к «зби́». Первые две из них неподтверждены, вторые подтверждены в приведённой литературе. Естественное прочтение на современном русском: «взвился» **+2** ► П1800: «утрпе». Принято написание в **Щ** и Екатерининском списке. В переводе на современный: «оттрепетал» ◄ В П1800 «пя́тъкъ», современное «пято́к», пятница как пятый день недели. ► В П 1800 довольно невразумительное: «И схоти ю на кровать и рекъ». «Той» значит тот. **+1** .

А въ нихъ трепещуть
Синии молнии
Быти грому великому
Итти дождю стрелами
Съ Дону Великаго
Ту ся копиéмъ приламáти
Ту ся саблѧмъ потручáти
О шелóмы полóвецкыя
На реке на Каѧле
У Дону Великаго
О Руская зéмле
Уже за шелóмянемъ еси

II. ГЛАВНЫЕ СОБЫТИЯ

5. Олег Святославич

Память Ольговича

Были вéчи Трояни
Минула лета Ярославля
Были пóлки Ольгóвы
Ольга Святъслáвлича
Тóй бо Олегъ
Мечёмъ крамóлу ковáше
И стрелы по зéмли сеѧше
Ступаетъ въ златъ стрéмень
Въ граде Тьмуторокáне
Той же звонъ слы́ша
Давный великый
Ярóславь сынъ Всевóлодъ
А Владимиръ по вся утра
Уши́ закладáше въ Чернигове

Усобицы

Бориса же Вѧчеслáвлича
Слáва на судъ приведé
И на Кáнину зéлену нáполому́
Постлá за обиду Ольгóву
Храбра и млáда князя
Съ тоѧ же Каѧлы Святóпълкъ
Повелé я отца своегó
Между угóрьскими иноходьцы
Ко святей Софии къ Киеву
Тогда при Ользé Горислáвличи
Сеяшется
И растѧшеть усобицами
Погибашеть жизнь
Дажьбóжа внука
Въ кнѧжихъ крамóлахъ
Вецú человéкомъ скратúшась
Тогда по Руской земли
Ретко ратáеве кúкахуть
Но часто врáны граѧхуть
Трупиа себе делѧче
А галицы свою речь говорѧхуть
Хотять полетети на уедúе
То бы́ло въ ты рати
И въ ты́ полкы
А сúцеи рати не слы́шано

6. Битва.

Западня

Се вéтри Стрибóжи внуци
Веютъ съ моря стрелами
На храбрыя пóлкы Игóревы
Зéмля тутнéтъ
Реки мутно текуть
Порóси поля прикрываютъ
Стязи глаголютъ полóвцы
Идуть отъ Дона и óтъ моря
И отъ всехъ странъ
Руские пóлкы обстýпиша
Дети бесови кликомъ
Пóля прегорóдиша
А храбрыи русичи прéградúша
Чьрлёными щиты

Автор Ярославу Владимировичу Новгородскому и Полоцким князьям

Ярославе
И вси внуце Всеславли
Уже понúзить стязи свои
Вонзить свои мéчи вережены
Уже бо выскóчисте
Изъ дéдней славы
Вы́ бо своими крамóлами
Начасте наводити поганыя
Нá землю Рускую
На жизнь Всеславлю
Которóю бо бéше насилие
Отъ зéмли Полóвецкыи

IV. РУСЬ НЕПОДСУДНАЯ

12. Всеслав Брячиславич

Дерзость и удачи

На седьмомъ веце Трояни
Вържé Всеславъ жребий
О девúцу себе любу
Утро же вонзи стрикусы
Отвори врата Новуграду
Расшибе славу Ярóславу
Скочи вълкóмъ
До Немúги съ Дудýтокъ
На Немúзе снопы
Стелятъ головами
Молóтятъ цéпы харáлужными
На тóце живóтъ кладутъ
Вéютъ душу отъ тела
Немúзе кровавы брéзе
Не бологомъ бѧхуть посéяны
Посéяны кóстьми
Рускихъ сыновъ
Тóй клюкáми подпрéся о кóни
И скочú къ граду Киéву
И дотчеся стружиемъ
Злáта стóла Киéвьскаго

Власть и судьба

Всеславъ князь любемъ судѧше
Кнѧземъ грады рядѧше
А самъ въ ночь
Вълкóмъ рыскáше изъ Киева
Доры́скаше дó куръ Тьмýторокáня
Великому Хърсóви вълкóмъ
Путь прерыскáше
Тому въ Полотьске позвониша
Заутренюю рано
У святыя Софеи въ колоколы
А онъ въ Киеве звонъ слыша
Скóчи отъ нихъ лютымъ звéремъ
Въ пълночи изъ Белаграда
Обéсися сине мъгле
Аще и веща душа въ друзе теле
Нъ часто беды страдáше
Тому вещий Бóянъ
Й пръвóе припевку
Смыслёный речé
Нú хытрý ни горазду
Ни птицу горазду
Судá Бóжиа не мúнути
О стонати Руской земли́
Помянýвше пéрвую гóдину
И пéрвыхъ князей

Святой Владимир

Того стáраго Владимира
Нéльзе бé пригвоздúти
Къ гóрамъ Киéвьскымъ
Се бо ныне сташа
Стязи Рюриковы

Ярослав Владимирович неоднократно получал шаткий княжеский «стол» Новгородской республики благодаря покровительству Суздальского князя Всеволода, сына Юрия Долгорукого.
Участвовал во враждебных действиях против Южной Руси.
Поскольку «насилие» от половцев вряд ли грозило новгородцам, речь идёт о Руси как целом.
Тогда налицо противопоставление действий Игоря и Ярослава в строках левого и правого столбцов

Века Трояна» открывают обе симметричные главы, подчеркивая параллельность их содержания – жизнеописания двух энергичных и влиятельных князей Олега и Всеслава, не принадлежащих ветви Мономашичей

► В П 1800: «воззни».
► В П 1800: «оттвори», как и «оттворяеши Киеву врата», вопреки «Затворивъ Дунаю ворóта»

Дальнодействие колокольного звона и упоминания Святой Софии тоже симметричны.

► П1800: «Киéвскаго». Это слово встречается три раза. Согласно Н. К. Гаврюшину, в Щукинском списке (**Щ**), как и в списке для Екатерины Второй есть «**ь**». Стих о Всеславе **в Щ** отсутствует вместе с третьим упоминанием этого слова. Как описано в [2], список **Щ**, похоже, составлен почти одновременно с протографом П1800 по общей предыдущей рукописи так, что из ее текста в **Щ** выброшены все непонятные слова, а в протограф П1800 записывалось все подряд. Будем доверять тексту **Щ. –1**

◄ П1800: «Даждь-божа». Ещё раз это слово встречается без «д». Здесь выбран именно второй вариант. **–1**

Всево́лод

Яръ туре Всево́лоде
Стои́ши на бо́рони
Прыщеши на вои стрелами
Гре́млеши о́ шело́мы
Мечи́ харалу́жными
Ка́мо туръ поскоча́ше
Своимъ златы́мъ
Шело́момъ посве́чивая
Та́мо лежатъ поганыя
Головы поло́вецкыя
Поскепа́ны сабля́ми калёными
Шело́мы Оварьские
Отъ тебе Яръ ту́ре Всево́лоде
Кая рана до́рога братие
Забывъ чти и живо́та
И града Чернигова
О́тня зла́та стола́
И своя милыя хо́ти
Кра́сныя Глебовны
Свычая и обычая

Поражение

Съ зара́ниа до вечера
Съ вечера до́ света
Летятъ стрелы калёныя
Гри́млютъ сабли о шеломы
Трещатъ копия́ харалу́жныя
Въ поле незна́еме
Среди зе́мли поло́вецкыи
Чёрна земля подъ копыты
Ко́стьми была посея́на
А кро́вию по́льяна
Туго́ю взыдо́ша
По Руской земли
Что́ ми шумить
Что́ ми звенить
Да́веча рано предъ зо́рями
И́горь полкы заворо́чаетъ
Жаль бо ему
Мила брата Всево́лода
Би́шася день би́шася дру́гый
Третьяго дня къ полудню
Падоша стязи Иго́ревы
Ту́ ся брата разлучиста
На брезе быстрой Кая́лы
Ту кроваваго ви́на недо́ста
Ту пи́ръ докончаша
Храбрыи русичи
Сваты́ попои́ша а сами
Поле́гоша за́ землю Рускую
Рускаго злата насы́паша
Ту́ Игорь князь выседе
Изъ се́дла злата́
А въ се́дло щи́ево
Ни́чить трава жало́щами
А древо съ тугою
Къ земли преклонилося

7. Последствия

Вести беды

О далече зайде соко́лъ
Птиць бья къ морю
А Иго́рева храбраго по́лку не́ креси́ти
За нимъ кли́кну Карна́
И Жля поскочи́ по Руской земли́
Сма́гу мы́чучи въ пламяне ро́зе
Жёны руския въспла́кашась а́ркучи
Уже́ намъ своихъ милыхъ ладъ
Ни мыслию смыслити
Ни думою сдумати
Ни о́чима съгля́дати
А злата и сре́бра

А друзи́и Давыдовы
Но ро́зно ся имъ хо́боты па́шутъ
Копиа поютъ

13. Ярославна

Весть на Дунай

На́ Дуна́е
Яро́славнынъ гласъ **ся** слышитъ
Зе́гзицео́ незнаема
Рано кыче́ть
Полечу ре́че
Зе́гзицео́ по Дуна́еви
Омочу бе́брянъ рукавъ
Въ Каяле реке
Утру князю кровавыя его раны
На жесто́цемъ его теле
Яро́славна рано плачетъ
Въ Путивле́ на забра́ле аркучи

Мольбы Ярославны

О ве́тре ветри́ло
Чему господи́не насильно вее́ши
Чему мычеши хино́вскыя стре́лкы
На свое́ю нетру́дною кры́лцю
На моея лады вои
Мало́ ли ти бя́шеть горе́
Подъ о́блакы ве́яти
Леле́ючи ко́рабли на́ Сине море
Чему́ господи́не моё весели́е
По ковылию разве́я
Яро́славна рано плачетъ
Путивлю городу
На забороле аркучи
О Дне́пре Словутицю
Ты про́билъ е́си
Каме́нные горы
Сквозе зе́млю поло́вецкую
Ты леле́ялъ е́си на се́бе
Святославли наса́ды
До по́лку Коб я́кова
Възлеле́й господи́не
Мою ладу къ мне
А быхъ не сла́ла къ нему
Слёзъ на́ море рано
Яро́славна рано плачетъ
Въ Путивле́ на забра́ле аркучи
Светлое и тре́светлое Сълнце
Всемъ тёпло и кра́сно е́си
Чему́ господи́не простре́
Горячую сво́ю лучю
На ладе вои
Въ поле безводне
Жаждею и́мъ луки съпряже́
Тугою имъ ту́ли затче

14. Освобождение

Знак Божий

Пры́сну море Полу́нощи
Идутъ смо́рцы мъглами
Иго́реви князю Бо́гъ путь кажетъ
Изъ зе́мли Поло́вецкой
На́ землю Рускую
Къ о́тню зла́ту столу

Побег

Погасоша вечёру зари́
Игорь спитъ Игорь бдитъ
Игорь мыслию по́ля мери́тъ
Отъ Великого Дону
До Малаго Донца
Ко́монь въ полу́ночи
Овлу́ръ свисну за ре́кою
Велитъ князю разумети
Князю Иго́рю не быть

►П1800: «Се**го** бо ныне» Смысл этого «го» в литературе по «Слову» нигде не объясняется. Видимо описка. **–2**

Игоревы полки окружены, а братья Рюрик и Давыд не могут договориться о выходе в поход.

Ярославнин голос слышит**ся**.

Преданный брат богатырь Всеволод и любимая жена Ярославна –
два самых близких Игорю человека.
Стихо о них расположены симметрично, и поэтические образы в них перекликаются.

Слева описывается
поражение и пленение Игоря,
а справа – знак его освобождения.

Ни мáло того потрепáти
И нáчаша кня́зи про малое
Сé великое мóлвити
А сами на себя крамóлу ковати
А поганыи съ всехъ странъ
Прихождáху съ победами
На́ землю Рускую

Обиды и напасти

Ужé бо братие
Невесёлая гóдина въстала
Уже пу́стыни силу прикрыла
Въстала Обида
Въ силахъ Дажьбóжа внука
Вступила девóю на землю Трояню
Въсплескала лебедиными кры́лы
На Синемъ море у Дону
Плещучи упу́ди жирня́ времена
Усобица кня́земъ на поганыя погыбе
Рекоста бо братъ брату
Сé моё а тó моё же
А́ въстонá бо братие Киевъ тугóю
А Черниговъ напáстьми
Тоска разлия́ся по Руской земли
Печаль жи́рна течé
Средь земли Руской
А кня́зи сами на себя крамóлу ковáху
А поганыи сáми победами
Нары́щуще на Рускую землю
Е́мляху дань по бéле отъ двора
Уны́ша бо градомъ забрáлы
А веселие пони́че

8. Вещий сон и его толкование

Мутен сон

А Святъславъ мутенъ сонъ
Ви́де въ Киéве на гóрахъ
Си́ ночь съ вечёра
Одевáхъте мя рéче
Чърною нáполомóю
На́ кроваты тисóве
Чърпахуть ми си́нее ви́но
Съ тру́домъ смешéно.
Сыпахуть ми́ тощими ту́лы
Поганыхъ толкóвинъ
Великый женчугь на лóно
И нéгуютъ мя
Ужé доскы безъ кнéса
Въ моёмъ теремé златовéрсемъ
Всю́ нощь съ вечёра
Бусовы враны възгрáяху
У Плесньска на болони
Бéша дебрьски сани
И несóша къ Синему морю

Речи бояр и дружины

И ркóша бояре князю
Уже кня́же тугá умъ полони́ла
Се бó два сокóла слетéста
Съ óтня стóла златá
Пои́скати грáда Тьму́тороканя
А любо испи́ти
Шелóмомъ Дону
Уже соколама крылца
Припешáли поганыхъ сабля́ми
А́ самаю опуташа
Въ пути́ны железны
Темно бо бе въ 3 день
Два солнца помéркоста
Оба багряная стóлпа погáсоста
И съ ни́ма молóдая месяца
Олегъ и Святъслáвъ
Тьмою ся́ поволóкоста

Кли́кну стукну земля
Въсшуме трава
Вéжи ся полóвецкие подви́заша
А Игорь князь поскочи́
Горнастáемъ къ трóстию
И белымъ гоголемъ на́ воду
Въврьжéся на борзъ кóмонь
И скочи́ съ него бóсымъ вълкóмъ
И потéче къ лугу Донцá
И полетé соколóмъ подъ мьглами
Избивая гуси и лебеди
Завтроку и обеду и ужине
Коли Игóрь соколóмъ полетé
Тогда Влуръ вълкóмъ потечé
Трусá собою студёную рóсу
Прéтъргостá бо своя́
Бóрзая кóмоня

Донец и Стугна

Донецъ рéче Княже Игóрю
Нé мало́ ти вели́чия
А Кончаку нелю́бия
А Руской зéмли весéлия
Игорь рéче о Дóнче
Нé мало ти́ величия
Лелéявшу князя́ на волнáхъ
Стлáвшу ему зелёну траву
На своихъ сребреныхъ брéзехъ
Одевáвшу его тёплыми мъглами
Подъ сéнию зéлену древу
Стрежáще е гоголемъ на́ воде
Чайцáми на стру́яхъ
Чьрня́дьми на вéтрехъ
Не тáко ли рéче рéка Стугна́
Ху́ду струю имея
Пóжръши чу́жи ручьи
И стругы ростре́ на кусту
Уношу князя Рости́слава
Затвори днé при тёмне березе
Плачется мати Рости́славля
По у́ноши князи Рости́славе
Уныша цветы жалобою
И древо съ тугóю
Къ земли преклонилося

Гзак и Кончак

А не сорокы встроскóташа
На слéду Игóреве ездитъ
Гзакъ съ Кончакомъ
Тогда враны не граяхуть
Галицы помолкъша
Сороки не троскоташа
По лóзию ползаша толко
Дятлове тéктомъ путь
Къ реке кажутъ
Соловии весёлыми песньми
Светъ поведаютъ
Молвитъ Гзакъ Кончакови
Аже соколъ къ гнéзду летитъ
Сокóлича ростреляеве
Своими злачёными стрелами
Рече Кончакъ ко Гзе
А́же соколъ къ гнезду летитъ
А ве сокóлца опутаеве
Краснóю девúцею
И рéче Гзакъ къ Кончакови
А́ще его опутаеве краснóю девúцею
Ни нáма будетъ сокóлца
Ни нáма крáсны девúце
То почнутъ наю птицы бити
Въ поле Полóвецкомъ

Русь!

Рекъ Боянъ и Ходына
Святъславля песнетворца

► П1800: «Въшуме»
► П1800: «вежи **ся** подвизаша**ся**», явный перебор «ся». **–2**

►В этом стихе, как и в П1800, ровно 4 мерных куплета, т. е. 476 букв. Однако слово песньми, конечно, должно иметь «н». Слово встроскóташа, очевидно, потеряло букву «с».

Чтобы восстановить объём текста оригинала, сделаны ещё два исправления. Разумеется, это повлекло просмотр всего текста в П1800, дабы не нарушить единообразия записи каждого слова.

Подтверждение именно такого написания в других источниках (см. в листе исправлений)

Тогда граяли вороны, а теперь поют соловьи.

◄ «Бéша дебрьски сани…». Принимаем запись этого места из книги [3]. Чтение Бéша как Веша позволяет прочитать это так: «Подымали дровни и несли их к Синему морю», имея в виду, что вороны несли сани для исполнения ритуала погребения павших на поле битвы.

Здесь слово «сокóлца», как и в П1800 написано без мягкого знака, четырьмя строками ниже в П1800 этот знак присутствует. Больше эта форма слова не встречается. Выбран ва-

И въ море погру́зиста На реке́ на Кая́ле Тьма светъ покрыла По Руской земли́ Простроша́ся поло́вцы Аки па́рдуже гне́здо И великое буйство Падо́ста хино́ви Уже снесе́ся хула́ на хвалу Уже тре́сну нужда на волю Уже́ върже́ся Дивъ на землю Се бо го́тския красные девы Въспе́ша на бре́зе Синему морю Звоня́ рускымъ златомъ Поютъ время Бусово Лелеють месть Шароканю А мы уже дру́жина Жадны веселия	Стараго времени Ярославля Ольго́ва кога́ня хоти́ Тя́жко ти́ головы́ кроме́ плечю Зло́ ти те́лу кроме́ головы́ Руской земли́ безъ Иго́ря Солнце свети́тся на не́бесе И́горь князь въ Руской земли́ Деви́цы поютъ на Дунаи Вьются голо́сы Чрезъ море до Ки́ева Игорь едетъ по Боричёву Къ святе́й Богородици Пи́рогощей Страны рады гра́ды весёлы Пе́вше песнь старымъ княземъ А пото́мъ молодымъ пети Слава Иго́рю Святъсла́вличу Буй туру Всево́лоду Вла́дими́ру Иго́ревичу Здравы кня́зи и дру́жина Поба́рая за́ христья́ны На́ поганыя по́лки Княземъ слава и дру́жине Аминь	риант без «ь». В летописны источниках того времени нередко этот знак опускается. Вполне возможно, что в таких случаях произношение слова остается неизменным, просто «л» произносится мягко как «ль». Последний стих состоит из 476 букв, что точно равно четырём мерным куплетам. Никаких правок букв этого стиха из П1800 не производилось. *Готские девицы пели на берегу Синего моря, а русские – на Дунае. Это не значит, что госких нет на Дунае, а русских – на Синем море.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Слово о полку Игореве : Древнерусский текст и переводы / сост. В. И. Стеллецкий; под ред. чл.-корр. АН СССР Ф. П. Филина. – Сов. Россия, 1981. – 280 с.

2. *Гаврюшин, Н. К.* Щукинская рукопись «Слова о полку Игореве» в кн. [4]. – С. 393–412.

3. *Гудзий, Н. К.* Хрестоматия по древней русской литературе / Н. К. Гудзий ; науч. ред. проф. Н. И. Прокофьев. 8-е изд. – М.: Просвещение, 1973. – 528 с.

4. Слово о полку Игореве и его время. Сборник статей под ред. Б. А. Рыбакова. – М.: Наука, 1985. – 415 с.

5. Слово о полку Игореве. Тексты / пер. О. В. Творогова. – М.: Искусство, 1987. – Вкладыш в издание [12].

6. *Брызгалин, Г. И.* Чудесной тайны ключ / Г. И. Брызгалин. – Волгоград : Изд-во Института качеств. – 1994. – 92 с.

7. *Брызгалин, Г. И.* Конфликт утраты авторства «Слова о полку Игореве». Теория конфликта и ее приложения / Г. И. Брызгалин // Мат-лы IV Всероссийской научно-технической конференции. Ч. I / сост. И. Я. Львович, Ю. С. Сербулов ; АНОО ВИВТ ; РосНОУ (ВФ). – Воронеж : Научная книга, 2006. – С. 32–37, 286–303.

8. *Брызгалин, Г. И.* Формальное обоснование порядка текста рукописной книги «Слово о полку Игореве» 13–15 вв. / Г. И. Брызгалин // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1(27) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычисдительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 1). – С. 23–33.

9. *Брызгалин, Г. И.* Постраничное распределение текста «Слова о полку Игореве» / Г. И. Брызгалин // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 8(46) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычисдительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 5). – С. 51–62.

10. *Булахов, М. Г.* «Слово о полку Игореве» в литературе, искусстве, науке. Краткий энциклопедический словарь / под ред. Л. А. Дмитриева. – Минск, Университетское, 1989.

11. *Писарев, Л. И.* Там на Каяле у Дона. В Кн. Встречи с историей. Очерки, статьи, публикации / сост С. Елисеев ; худож. В. Примаков. – М.: Молодая гвардия, 1990.

12. «Слово о полку Игореве» в гравюрах В. А. Фаворского. – М.: Искусство, 1987.

УДК 004.89

А. С. Дмитриев

АДАПТАЦИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-ТЕМПОРАЛЬНОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ В СИСТЕМАХ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Волгоградский государственный технический университет
dmitriealeksan@yandex.ru

В статье представлена комбинированная топологико-темпоральная логика, методики ее исчисления и применение этой логики для идентификации связи между событиями в тексте на естественном языке.

Ключевые слова: семантический анализ, пространственные отношения, темпоральные отношения, комбинированная логика, машинное обучение.

A. S. Dmitriev

ADAPTATION OF COMBINED SPACE-TEMPORAL LOGIC FOR IMPLEMENTATION IN SYSTEMS MACHINE LEARNING

Volgograd State Technical University

The paper presents a combined spatial-temporal logic, method of its calculation and application of this logic to identify the connection between the events in natural language text.

Keywords: semantic analysis, spatial relationships, temporal relationships, combined logic, machine learning.

1. Актуальность проблемы

Общеизвестно, что в последнее время существует большое количество попыток (и иногда довольно успешных) по созданию современных интеллектуальных систем семантического анализа текстов и речи на естественных языках. Существующие системы с разным успехом справляются с поставленными перед ними задачами, но их общий и главный недостаток состоит в том, что семантика текста строится в основном по конечным высказываниям и предложениям. При этом смысл всего текста не рассматривается. Такой подход чреват сильным искажением описанной информации в тексте, если, например, какой-либо факт расписан в нескольких последовательных или разбросанных по тексту предложениях [1].

Естественно, что для решения данной проблемы необходимо использовать методику построения сюжетных линий, или, по-другому, цепочки событий. Именно события в тексте играют в связке различных предложений ключевую роль [2]. Как правило, события описываются глаголами или отглагольными образованиями. Определив все события текста, используя метод анализа текста на основе коммуникативной грамматики, можно попытаться вы-строить между ними причинно-следственную связь, которая позволит достаточно точно описать семантику всего текста, а не отдельно взятых предложений.

При исследовании работ лингвистов Всеволодовой, Золотовой (и других), пришли к выводу, что наиболее эффективным и простым способом определения взаимосвязи между предложениями, наряду с выявлением субъекта событий, является использование пространственных и временных данных о происходящих событиях.

Для определения смысла конечных предложений используется неоднородная семантическая сеть, выявляющая события в рамках одного предложения. В данной семантической сети могут содержаться высказывания, описывающие пространственную и временную информацию. Но эта информация довольно слабо связана между собой, поэтому целесообразно использовать комбинированную логику темпоральных и пространственных отношений, для того, чтобы описываемые в предложениях события представляли собой максимально четкую модель в пространстве и времени [1].

Кроме того, использование комбинированной пространственно-временной (или, по-другому, топологико-темпоральной) логики снижает потребление вычислительных ресурсов. Использование каждой логики в отдельности, с дальнейшими попытками связать результат их работы с событиями, требует существенных временных затрат. Доказано, что такая модель рассуждений относится к классу задач ExpSpace [5]. Так или иначе, задача построения эффективной и достаточно полной топологико-темпоральной логики требует тщательного исследования, поскольку разные ее комбинации относятся к принципиально разным классам сложности.

2. Логика топологических пространств

За основу анализа пространственных отношений взята топологика. Логика топологических пространств в настоящий момент является одним из самых успешных подходов в описании пространственных отношений в искусственном интеллекте. Но до сих пор не было составлено эффективной модели взаимодействия пространственных и временных отношений, поскольку обычное сложение пространственных и временных логик не дает желаемого результата. Связано это в первую очередь с проблемами достижимости и сохранения условий динамических систем.

В работе используется пространственная логика, основанная на пропозициональной логике, в которой унарные предикаты обозначают пространственные объекты, а топологические отношения между ними представляются с помощью внутренних операторов и операторов замыкания, кванторами общности и существования в пространстве и обычными логическими операциями. Данная логика называется модальной логикой и рассматривается как логика топологических пространств. Обозначается как $S4_u$ [3].

Пространственные термы этой логики представляют собой выражения следующего вида:

$$\tau = p_i \mid \overline{\tau} \mid \tau_1 \cap \tau_2 \mid \tau_1 \cup \tau_2 \mid I\tau \mid C\tau, \qquad (1)$$

где p_i пространственные переменные; I и C – операторы включения и замыкания.

Топологическая модель представляет собой структуру следующего вида:

$$Mod = (P, p_0^{Mod}, p_1^{Mod}, ...), \qquad (2)$$

где $P = (U, I)$ – топологическое пространство, а $p_i^{Mod} \subseteq U$ для любого i, U – универсальное непустое множество пространства и I – оператор включения на U.

В работе для описания приведения к одной размерности описываемых пространственных объектов используется понятие регулярных замкнутых множеств (в дальнейшем «Регионы»).

Для описания регионов используется язык RCC-8. RCC-8 является фрагментом логики $S4_u$ и служит для повышения ее выразительности. В дальнейшем под RCC-8 будет подразумеваться логика $S4_u$, расширенная предикатами RCC-8. Синтаксис RCC-8 состоит из переменных, обозначающих регионы r, s, ... и восьми бинарных предикатов:

DC(r,s) – регионы r и s не связаны;

EC(r,s) – r и s внешне связаны;

EQ(r,s) – r и s равны;

и др.

Каждый из этих операторов может использоваться совместно с логическими операциями.

Аргументы RCC-8 предикаты – региональные переменные, интерпретируемые как регулярные замкнутые множества (регионы) топологических пространств. Расширить RCC-8 можно путем представления ее фрагментом логики $S4_u$:

$$DC(r,s) = (p_r \cap p_s = \varnothing) \quad (3)$$

$$EC(r,s) = \neg(p_r \cap p_s = \varnothing) \wedge (Ip_r \cap Ip_s = \varnothing) \quad (4)$$

и др.

3. Темпоральная логика LTL

Временная логика в работе представлена линейной темпоральной логикой LTL.

Темпоральная логика является подходом к рассуждению о времени с использованием темпоральных связок без явного указания количества времени. Самый популярный вариант данной логики – это LTL, которая успешно используется в тестировании и верификации программного обеспечения.

Выбор логики LTL обусловлен тем, что при достаточной выразительной емкости данная логика относится к приемлемому в отношении неклассических логик (к которым принадлежат темпоральные логики) классу сложности PSPACE. Для сравнения более выразительная логика ветвящегося времени BTL относится к практически невыполнимому классу задач 2ExpTime [5].

Размеченное течение времени для LTL является любой строгой линейной последовательностью (W,<), с временными точками $w \in W$ и отношением предшествования <. LTL-формулы построены из пропозициональных переменных p_0, p_1 используя логические операторы и темпоральный оператор *til* – «пока». Например, $x\ til\ y$ означает, что «*x* справедливо, пока имеет место быть *y*». Другие темпоральные связки *Rf* – когда-то в будущем; *Ff* – всегда в будущем; *Nf* – в следующий момент.

LTL-модель представляет собой структуру следующего вида:

$$Mod = (T, p_0^{Mod}, p_1^{Mod}, ...), \quad (5)$$

где $T = (W, <)$, а $p_i^{Mod} \subseteq U$ для любого *i*.

Логики $S4_u$ и LTL относятся к классу сложности вычислений PSPACE и доказано, что эти логики алгоритмически разрешимы [5]. Казалось бы, можно провести последовательно обработку скомбинированных высказываний $S4_u$ и LTL и остаться в рамках сложности PSPACE. Но, к сожалению, подобные рассуждения не принимают во внимание взаимодействие между топологическими и темпоральными операторами. Данные взаимодействия осложнены тем, что топологическое пространство в момент времени *n* может не иметь ничего общего с пространством в момент *n*+1, т. е. каждая точка пространства имеет свою историю.

4. Комбинированная топологико-темпоральная логика

Далее рассмотрим комбинирование топологической и темпоральной логики. Передвижение пространственных объектов во времени представляется в виде модели «снимок экрана», т. е. в каждый момент времени фиксируется текущее положение объекта. Топологико-темпоральная модель – это пара *Mod* = (*P*, *DT*), где *P* = (*U*, *I*) – топологическое пространство, а *DT* – это множество пространственных точек *p* в каждый момент времени $n \in N$.

Ниже приведен следующий список требований для топологико-темпоральной комбинации логик [3]:

• язык логики должен быть способным выразить изменения во времени значений истинности для простых пространственных суждений;

• язык логики должен быть в состоянии выразить изменения или развитие пространственных объектов за несколько фиксированных конечных промежутков времени;

• язык логики должен быть в состоянии выразить изменения или развитие пространственных объектов на всем протяжении времени.

При комбинировании всех трех подходов мы получаем логики, которые либо вообще неразрешимы, либо разрешимы за крайне длительное время. В ходе работы было выяснено, что для существенного снижения сложности работы алгоритма логического вывода на осно-

ве резолюции достаточно исключить из рассмотрения последний принцип.

В итоге мы получим логику, в которой будут исключены все темпоральные операторы, кроме *Nf* (т. е. исключая принцип изменчивости объектов на всем протяжении времени, мы исключаем операторы *Rf* и *Ff*). Полученная логика LTL*RCC-8 хоть и менее выразительна, чем удовлетворяющая описанным выше трем принципам логика LTL*$S4_u$, но при этом вывод из нее осуществляется гораздо быстрее – PSPACE против ExpSpace. Это легко проверить, проведя анализ алгоритма резолюции из двух видов логики. Можно сделать вывод, что приведенную выше модель можно внедрить в реальные системы обработки текстов и при этом разработанные для нее алгоритмы будут разрешимы за разумное время.

Для топологико-темпоральной логики LTL*RCC-8 вводятся следующие термы и формулы:

$$\rho = CIp \mid CI(\rho_1 U \rho_2)$$

$$\tau = \rho \mid \bar{\tau} \mid \tau_1 \cap \tau_2 \mid \tau_1 \cup \tau_2 \mid I\rho \mid Nf\,\tau$$

$$\varphi = Q(\rho_1, \rho_2) \mid \neg\varphi \mid \varphi_1 \wedge \varphi_2 \mid \varphi_1 \vee \varphi_2 \mid \varphi_1 U \varphi_2 \qquad (6)$$

где ρ – региональный терм; φ – формула комбинированной логики и Q – обозначает восемь предикатов RCC-8.

В качестве примера можно привести описание следующего предложения на естественном языке: «Через два месяца Россия станет полноправным членом ВТО». Данное предложение описывается на языке логики LTL*RCC-8 следующим образом:

$$EQ(Nf\ Nf\ WTO, WTO \cup Russia) \qquad (7)$$

5. Идентификация пространственно-временных отношений в тексте

Для описания пространственных и временных выражений представлена следующая модель:

$$R{:}TPF \to TPR(T,P)$$

$$R{:}TPF \to TPR(e_1, e_2), \qquad (8)$$

где R – фунционал соответствия; TPF – параметры временных и пространственных отношений; T= {*te*, *tr*, *ts*} (*te* – интервал события; *tr* – точка отсчета; *ts* – интервал речи); P= {*pe*, *pr*} (*pe* – место действия события; *pr* – место отсчета).

$TPR(T, P)$={*BEGIN&IN*, *END&ON*, *FUTURE&ALONG* и т. д.}, т. е. отношение между временем и местом события, а также местом отсчета и одним из двух отсчетов времени (времени отсчета и времени речи).

$$TPR(e_1, e_2) = \{AFTER\&TO, BEFORE\&ON, DURING\&IN\}.$$

Идентификация временных и пространственных отношений производится посредством методики машинного обучения. Для этого система на вход получает два типа корпуса текстов. Первый корпус – аннотированный синтаксически размеченный корпус; второй – неразмеченный, по которому вручную расставляются метки с обозначением временных и пространственных отношений. Для выстраивания взаимосвязи между пространственно-временными категориями и событиями в тексте используется механизм логико-марковских сетей (Markov-logic networks – MLNs), позволяющий оперировать в своих вершинах обычными логическими формулами, представляющими собой комбинированную пространственно-временную логику. В дальнейшей работе алгоритма производится разбиение сети на атомарные выражения, используемые в обыкновенной Марковской сети [4]. Марковская сеть выполняет задачу классификации по присваиванию тех или иных событий к определенной цепочке событий.

MLNs может ответить на запросы в произвольной форме «Какова вероятность того, что формула F_1 верна с учетом того, что формула F_2 верна?» Если F_1 и F_2 являются двумя формулами в логике первого порядка и C является конечным набором констант, включая любые константы, которые появятся в F_1 или F_2, и L является *MLNs*, тогда:

$$P(F_1 \mid F_2, L, C) = P(F_1 \mid F_2, M_{L,C}) = \frac{P(F_1 \wedge F_2 \mid M_{L,C})}{P(F_2 \mid M_{L,C})} = \frac{\sum_{x \in X_{F_1} \cap X_{F_2}} P(X = x \mid M_{L,C})}{\sum_{x \in X_{F_2}} P(X = x \mid M_{L,C})}, \qquad (9)$$

где X_{Fi} является множеством «миров» (интерпретаций), в которых выполняется формула F_i.

Подставляя в сеть утверждения, которые необходимо проверить (например, принадлежит ли событие к данной цепочке событий) мы, опираясь на обученную сеть, можем получить с некоторой степенью достоверности ответ на принадлежность события к определенной цепочке событий.

6. Краткие выводы

Описанная система может применяться в задачах семантического поиска, поскольку использование расширенных категорий событийности позволяет извлекать смысл не только из конкретных предложений, но также из связных текстов, в которых прослеживается четкая последовательность событий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кондрашина, Е. Ю.* Представление знаний о времени и пространстве в интеллектуальных системах / Е. Ю. Кондрашина, Л. В. Литвинцева, Д. А. Поспелов ; под ред. Д. А. Поспелова. – М.: Наука, 1989. – 328 с.

2. *Бердник, В. Л.* Семантический анализ высказываний идентификации сущности / В. Л. Бердник, А. В. Заболеева-Зотова // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 9(35) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 3). – С. 43–46.

3. *Дмитриев, А. С.* Извлечение пространственно-временных отношений из текста на естественном языке / А. С. Дмитриев // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте : сб. науч. тр. VI междунар. науч.-практ. конф. (Коломна, 16–19 мая 2011 г.). В 2 т. Т. 2 / Российская ассоциация искусственного интеллекта [и др.]. – М., 2011. – С. 883–889.

4. *Фамхынг, Д. К.* Применение нечеткой нейронной сети к обработке временной информации в тексте на русском языке / Д. К. Фамхынг, С. С. Захаров // AIS`08. CAD-2008. Интеллектуальные системы. Интеллектуальные САПР (пос. Дивноморское, 3–10 сент. 2008 г.) : тр. междунар. науч.-техн. конф. / ФГОУ ВПО «Юж. федерал. ун-т» [и др.]. – М., 2008. – Т. 3. – С. 16–22.

5. *Gabelaia, D.* Combining Spatial and Temporal Logics: Expressiveness Vs. Complexity / David Gabelaia, Roman Kontchakov, Agi Kurucz, Frank Wolter, Michael Zakharyaschev // Journal of artificial intelligence research. – 2005. – P. 167–243.

УДК 004.82

А. С. Дмитриев

ОБРАБОТКА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ И ТЕМПОРАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СЕМАНТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ТЕКСТОВ

Волгоградский государственный технический университет

dmitriealeksan@yandex.ru

В статье представлена методика интеллектуального анализа, в основе которой лежит обработка пространственной и темпоральной информации из текста на естественном языке.

Ключевые слова: семантический анализ, коммуникативная грамматика, пространственные отношения, темпоральные отношения.

A. S. Dmitriev

PROCESSING OF SPATIAL AND TEMPORAL DATA TO INCREASE AS THE SEMANTIC ANALYSIS OF THE TEXT

Volgograd State Technical University

The paper presents a methodology mining, which is based on processing of spatial and temporal information from natural language.

Keywords: semantic analysis, communicative grammar, spatial relationships, temporal relationships.

1. Актуальность проблемы

Задачи анализа текста на сегодняшний момент являются одними из самых динамично развивающихся и востребованных на международном рынке услуг в сфере обработки информации. Анализ текста используется повсеместно: поиск информации в Интернет, реферирование текстов, вопрос-ответные системы (суперкомпьютер Watson, поисковая система Wolfram Alpha) и т. д.

В связи с увеличением количества текстовой информации в окружающем нас мире все более актуальным становится проведение интеллектуального анализа текста или, по-другому, семантического анализа.

За последние годы был достигнут большой прогресс в семантическом анализе текстов: разработаны различные подходы и экспериментальные системы (Exactus, ДИАЛИНГ, SemEval, OpenNLP, UIMA и т. д.). Но их общим недостатком является то, что они анализируют структуру отдельных предложений, а не всего текста в целом. Из-за этого теряется последовательность изложения и логическая структура документа. Для решения этой проблемы необходимо идентифицировать взаимосвязи между предложениями, представляя текст в виде единой модели многомерного пространственно-временного универсума.

2. Описание пространственных и временных категорий в тексте

Определение пространственных отношений в тексте производится на основе так называемых *оппозиций*. На первом уровне разбиения всех существующих в русском языке именных локативных групп наиболее важным является отношение локализуемого предмета к локуму, которое основано на нахождении предмета в какой-либо момент времени в пределах локума. В том случае, если предмет в любой момент времени есть, был или будет в пределах локума, то можно говорить о семе сопространствен-ности: в поля, в поле, из поля, полем, через поле, по полю. Иначе, если локализуемый предмет не находится, или не будет находиться в пределах локума, то можно говорить об отношении несопространственности: около поля, у поля, в двух километрах от поля, к полю, мимо поля и т. д. [3].

Остальные уровни описания пространственных отношений в русском языке представлены на рис. 1.

Рис. 1. Описание отношения сопространственности в русском языке

В построении временного порядка используется множество грамматических категорий. К ним относятся видовременные формы глаголов, наречия времени, лексико-семантическая информация и представление о познаваемом мире.

Для идентификации временных категорий из текста на естественном языке используются различные грамматические категории (например видо-временные формы глаголов, наречия времени и т. д.). Большая часть событий выражается через глаголы, время и вид которых определяют временной порядок событий.

Таблица 1

Временные параметры для отдельного события

Временная форма	Прошлое, Настоящее, Будущее
Вид	Совершенный, Несовершенный
Аспектуальный класс	Состояние, Процесс, Моментальное событие, Развивающее событие
Способ действия	Начальный, Пердуративный, Финитивный, Кумулятивный
Модальность	Возможность, Вероятность, Обязанность
Полярность	Положительное, Отрицательное
Форма имени событий	Глагол (в личной форме и инфинитив), Краткое прилагательное, Отпредикатное имя, Причастие, Деепричастие

Идентификация временных отношений проводится по параметрам событий, представленных в табл. 1.

3. Коммуникативная грамматика русского языка

В настоящей работе для обработки текстов автором используется коммуникативная грамматика русского языка, разработанная Г. А. Золотовой [1], [2]. Основная идея данной грамматики состоит в том, что синтаксис и семантика тесно взаимосвязаны в рамках анализа смысла предложений.

Главная характерная особенность синтаксического анализа состоит в том, что для дальнейшего семантического анализа составляются все допустимые деревья синтаксических зависимостей рассматриваемого высказывания. В дальнейшем, на этапе семантического анализа, производится отбор наиболее подходящего по смыслу дерева зависимостей.

Основным термином коммуникативной грамматики является *синтаксема*. Она представляет собой слово или словосочетание, значение которого определяется в зависимости от категориального значения слова в предложении и морфологической формы, которые, в свою очередь, реализуются в определенной синтаксической позиции. Смысл предложения (высказывания)

определяется совокупностью значений входящих в него синтаксем и отношений между ними. Значительная часть синтаксем строится на описании категорий пространства и времени. Идентификация этих категорий позволит с высокой точностью определить значения синтаксем.

Для поиска значений синтаксем и отношений между ними используется методы машинного обучения, описанные в разд. 5. В основе их работы лежит поиск предикатных слов (глаголов и отглагольных образований) на основе семантического словаря, после чего производится поиск значений синтаксем путем сопоставления предикатного слова и составленных синтаксическим анализатором деревьям зависимости. Семантический словарь составляется экспертами-лингвистами.

В итоге для описания проанализированного текста используется неоднородная семантическая сеть с расширенным семейством отношений. Вершинами этой сети являются значения синтаксем, ребрами – отношения между синтаксемами.

Примеры значения синтаксем:

• субъект – основное лицо в предложении;

• темпоратив – некоторый компонент времени и других 85 значений.

Примеры отношений между синтаксемами:

• Des – дестинативное, один компонент означает назначение другого;

• Dir – директивное, и еще около 65.

4. Реализация семантического анализа предложений

Рассмотрим процесс проведения семантического анализа применительно к коммуникативной грамматике. На рис. 2 показан пример синтаксического анализа предложения «Каждый человек дышит воздухом», с указанием семантических интерпретаций. Синтаксический анализ осуществляется программой MaltParser, обученной проводить синтаксический разбор предложений на русском языке и усовершенствованной разработанным автором модулем квазилогического описания семантики.

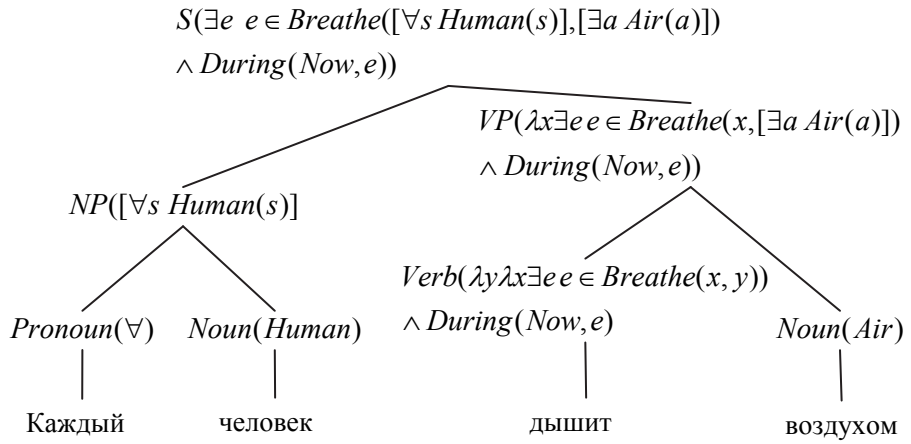


Рис. 2. Пример дерева синтаксического анализа предложения с семантическими интерпретациями

Квазилогическая форма представляет собой промежуточную форму, служащую посредником между синтаксисом и семантикой. Преимуществом этой формы является то, что она соответствует синтаксическому разбору предложения и при этом содержит в себе все возможные семантические интерпретации предложения (которые необязательно совпадают с синтаксисом). На рис. 2 введены следующие обозначения: *S* – предложение; *NP* – именное словосочетание; *VP* – глагольное словосочетание; *Pronoun* – местоимение; *Noun* – существительное; *Verb* – глагол. Местоимение обозначено квантором всеобщности в силу своего семантического смысла «каждый». Также на дереве обозначены λ-выражения, позволяющие динамически формировать новые функциональные символы. Видно, что в процессе анализа эти выражения заменяются необходимыми. Глаголы, в свою очередь, дополняются предикатами, описывающими время события *e*, в данном случае это *During*(*Now*,*e*).

В дальнейшем системой семантического анализа выстраиваются возможные интерпретации описанных квазилогических форм. Для описанной квазилогической формы на рис. 2 возможны следующие интерпретации, описанные на языке логики первого порядка:

$$[\forall s\ Human(s) \rightarrow \exists a\ Air(a)] \wedge \exists e(e \in Breathe(s,a,Now))$$
$$[\exists a\ Air(a) \wedge \forall s\ Human(s)] \rightarrow \exists e(e \in Breathe(s,a,Now)) \quad (1)$$

Первая интерпретация говорит о том, что каждый человек дышит воздухом, а вторая означает, что существует такой воздух, которым дышат все люди. Выбор нужной интерпретации производится системой устранения неоднозначности. Для устранения неоднозначности используется метод, основанный на аппарате вероятностной классификации логико-марковских сетей (MLN) [5]. Данная классификация производится на основе пространственной и временной информации, указанной в тексте на естественном языке.

Указанная система синтаксическо-семантического анализа также отвечает за идентификацию событий в тексте. В русском языке события можно выразить с помощью следующих форм: глагол, краткое прилагательное, отглагольное имя существительное, причастие и деепричастие. Данная информация получается из синтаксического блока, как это показано в примере (1) – событие $Breathe(s,a,Now)$.

Для определения значения синкасем и связей между ними используются две полносвязных нейронных сети. Нейронная сеть определения значения синтаксем имеет два скрытых слоя и получает в качестве параметров всю информацию о синтаксеме от синтаксического анализатора (часть речи, время, не/сопространственность, род, связь с событием и т. д.) и о связанном с ней событием. Всего на вход подается 53 параметра, сеть имеет 85 выходов, по одному на каждое возможное значение синтаксемы (рис. 3).

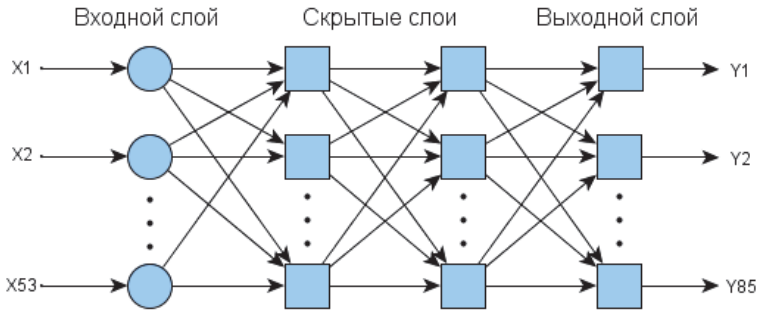


Рис. 3. Структура нейронной сети для определения значения синтаксем

Аналогично работает сеть для определения взаимодействия синтаксем между собой, где на вход поступает 55 параметров, описывающих две синтаксемы, а на выходе 65 значений, описывающих все взаимоотношения синтаксем.

Получив значения синтаксем и отношения между ними, можно обобщить полученные семантические интерпретации (1), разбив отношения между предикатами и термами по классам отношений синтаксем (как было описано выше). На основе этого обобщения строится неоднородная семантическая сеть, описывающая предложение.

Для установления между предложениями взаимосвязи используется пространственно-темпоральные отношения между предикатными словами и синтаксемами в предложениях. Структурно это представляет собой расширение неоднородной семантической сети.

Например: «Вася опаздывал в школу. Он срезал путь через дворы» (рис. 3).

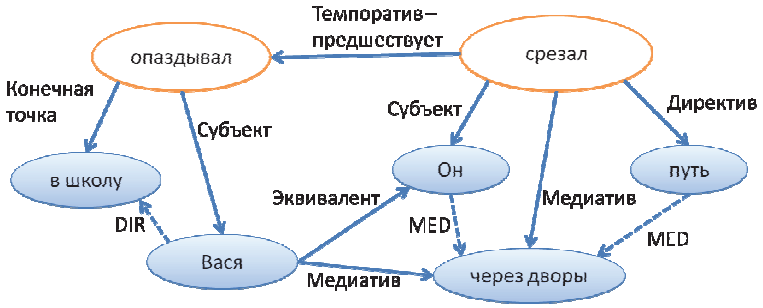


Рис. 4. Пример пространственно-темпоральной связки между семантическими моделями двух предложений

На рисунке сплошными линиями показаны значения синтаксем, а штриховыми – отношения между синтаксемами. Для установки семантической взаимосвязи между двумя предложениями используется категория событийности. В тексте повествование идет, как правило, последовательно или колеблется относительно определенной сюжетной линии. Соответственно в тексте прослеживается цепочка событий, попеременно сменяющих друг друга. Для выявления событийности используется изменение пространственных и временных данных, связанных с указанными событиями.

В отличие от построения семантики одного высказывания определение взаимосвязи событий между разными предложениями является более сложной задачей. Для определения взаимосвязи событий между предложениями используется механизм машинного обучения на основе логико-марковских сетей. Для составления событийной цепочки необходимо выявить темпоральные и пространственные характеристики из текста, которые извлекаются с помощью описанного выше метода на основе коммуникативной грамматики, и затем, оперируя разработанной в рамках данной работы пространственно-темпоральной логикой и методами классификации на основе логико-марковских сетей (MLN) [5], выявить принадлежность события к той или иной цепочке событий.

Описанная методика призвана повысить качество работы существующих семантических систем обработки текстов, в частности интеллектуального поиска, вопрос-ответных систем и др.

5. Оценка качества работы семантического анализа

Для оценки качества предложенных методов приняты общие критерии в задачах информационного поиска. Наиболее популярными критериями оценки качества являются точность (precision) и полнота (recall).

Точность (precision) – отношение числа правильных временных и пространственных отношений, найденных системой, к общему числу найденных временных и пространственных отношений.

Полнота (recall) – отношение числа найденных правильных временных и пространственных отношений к общему числу правильных временных и пространственных отношений в базе пространственных и временных данных.

$$\text{Precision} = \frac{|R \cap A|}{|A|} \quad \text{Recall} = \frac{|R \cap A|}{|R|} \qquad (2)$$

Таблица 2

Сравнение результата методов MLNs и SVM

Методы	Точность	Полнота	F-мера
SVM	0,63	0,63	0,63
MLN	0,69	0,74	0,73

В табл. 2 приведен пример сравнения по этим показателям разработанного метода MLN с методом опорных векторов SVM.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Осипов, Г. С.* Приобретение знаний интеллектуальными системами / Г. С.Осипов. – М.: Наука Физматлит, 1997. – 109 с.

2. *Золотова, Г. А.* Коммуникативные аспекты русского синтаксиса / Г. А. Золотова. – М.: КомКнига, 2010. – 368 с.

3. *Всеволодова, М. В.* Способы выражения пространственных отношений / М. В. Всеволодова, З. Г. Паршукова. – М.: Изд-во МГУ, 1968. – 172 с.

4. *Бердник, В. Л.* Задача идентификации сущности заданной слабоструктурированным текстом / В. Л. Бердник, А. В. Заболеева-Зотова // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 2(28) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 2). – С. 26–28.

5. *Дмитриев, А. С.* Извлечение пространственно-временных отношений из текста на естественном языке / А. С. Дмитриев // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте : сб. науч. тр. VI Междунар. науч.-практ. конф. (Коломна, 16–19 мая 2011 г.). В 2 т. Т. 2 / Российская ассоциация искусственного интеллекта [и др.]. – М., 2011. – С. 883–889.

УДК 004.89: 656.1/.5

А. В. Кизим, М. В. Денисов

ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ДОРОЖНЫХ РАБОТ И МОНИТОРИНГА ТЕХНИКИ

Волгоградский государственный технический университет

kizim@mail.ru, maxden33@gmail.com

В статье представлен анализ необходимости создания ипроектные решения по системе поддержки принятия решений (СППР) по проведению дорожных строительно-ремонтных работ и обслуживанию дорожной техники на основе данных систем спутниковой навигации. Описаны структура, основные подсистемы, механизмы поиска решений в системе СППР; использование информационно-логических моделей для решения данной задачи. Показаны этапы непрерывного процесса мониторинга дорожных работ, расхода ГСМ и состояния техники, и основные элементы методики диспетчерского управления. Представленная система позволяет на основе данных позиционирования и о состоянии техники принимать решения по распределению техники и проведении ее технического обслуживания и ремонта, а также накапливать знания.

Ключевые слова: система поддержки принятия решений, мониторинг, GPS, ГЛОНАСС, знания, дорожная техника, техническое обслуживание и ремонт, ТОиР, информационно-логические модели, методика диспетчерского управления.

A. V. Kizim, M. V. Denisov

DECISION SUPPORT FOR ROAD WORKS AUTHORITY AND MONITORING EQUIPMENT

Volgograd State Technical University

The paper presents an analysis of the need for and design of the solution for decision support system (DSS) for the road construction and repair and maintenance of the road the art on the basis of satellite navigation systems. Described structure of the, major subsystems, the mechanisms to find solutions to the DSS system, describes the use of information and logical models for the solution of this problem. The stages of a continuous process of monitoring road works, fuel consumption and the state of technology, and the basic elements of supervisory control techniques. This system allows on the basis of data on the position and state of the art to make decisions on the distribution of equipment and the conduct of its maintenance and repair, as well as gaining knowledge.

Keywords: decision support system, monitoring, GPS, GLONASS, knowledge, road equipment, maintenance and repairs, maintenance and repair, information and logical model, method dispatching.

Введение

В настоящее время в России ведется проект по реформированию дорожного хозяйства, одним из пунктов которого является совершенствование структуры управления дорожным хозяйством. Согласно приказу Минтранса РФ от 26 января 2012 г. № 20 «Об оснащении транспортных средств спутниковой навигацией» с 1 января 2013 г. транспортные средства, перевозящие пассажиров и опасные грузы должны быть оснащены оборудованием спутниковой навигации ГЛОНАСС. Данные, передаваемые ГЛОНАСС, можно использовать для дистанционного управления выполнением дорожных работ. Это дает, прежде всего, возможность контроля выполнения работ, а также накопления сведений о техническом состоянии каждой единицы техники, и на ее основе – планирования ее технического обслуживания и ремонта.

Особенность проведения строительных и дорожных работ заключается в распределении автодорожной техники по филиалам. Центральный отдел автодорожной организации отвечает за работоспособность и распределение техники по работам. Для более рационального распределения техники необходима система, которая на основе полной информации о расположении техники и проводимых работах осуществляет поддержку принятия решений о перераспределении техники, планировании работ, а также о ее своевременном техническом обслуживании и ремонте. В оперативно-диспетчерском отделе, на основании переданных данных с филиалов, составляется справка о состоянии автомобильных дорог и работе техники на дорогах. На данный момент передача осуществляется при помощи телефона. Для сбора сведений данным способом и принятия соответствующих решений оперативно-диспетчерский отдел затрачивает немало времени. Для сокращения затрат и автоматизации работы ему нужна система поддержки принятия решений по проведению дорожных строительно-ремонтных работ, а также техническому обслуживанию и ремонту (ТОиР) дорожной техники на основе передаваемых данных [6].

Таким образом, на основе вышеприведенной информации, а также [3, 4] создание проблемно-ориентированной системы управления, поддержки принятия решений и дистанционного

оперативного контроля выполнения дорожных работ, обеспечивающей предотвращение аварийных и внештатных ситуаций и осуществление оптимального распределения техники по дорожным работам является актуальной задачей.

Модель, алгоритмы

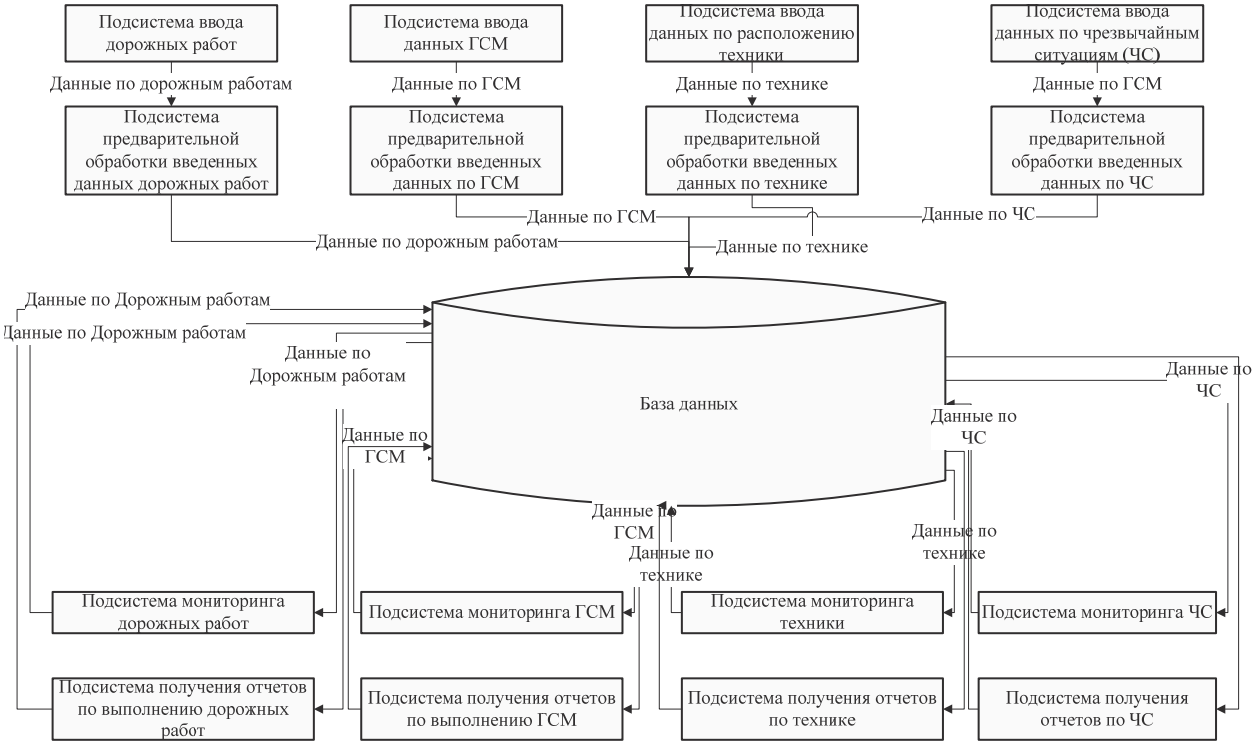
Результатом работы системы принятия решений является перечень мероприятий решения задач:

- развития, проектирования и модернизации дорожных сетей;
- оперативного диспетчерского управления дорожными работами;
- мониторинга состояния дорожных сетей;
- обеспечения профилактических и аварийных ремонтных работ;
- оперативного реагирования на аварии и внештатные ситуации;
- анализа деятельности предприятия подрядчика и качества его услуг.

С позиции теории системного анализа весь комплекс задач управления дорожными работами Znобразует многоуровневую структуру, состоящую из последовательности подсистем, объединенных информационными потоками. Тогда для формализованного описания методики управления и поддержки принятия решений согласно [1] можно использовать множество информационно-логических моделей (ИЛМ): M = (d1, K, di, K, dN, p1, K, pj,...,pS), где M – оператор ИЛМ; d1, K, dN – множество данных ИЛМ; p1, K, pS – множество правил и продукционных моделей (ПМ) поддержки принятия решений. Продукционные правила ПМ строятся по типу: если (if) … (условия выполняются), то (then) … (реализация следствия), и их можно записать как

$$p^k: \begin{Bmatrix} \text{if}\left(\left(d_1^{k'} A_1 z_1^{k'}\right) \Lambda_2 \dots \Lambda_{n-1}\left(d_n^{k'} A_n z_n^{k'}\right)\right) \\ \text{then}\left(d_{1m}^{k'} A_1 z_{1M}^{k'}\right) \end{Bmatrix}$$

где $A_1^r, A_i \in \{=, >, \geq, <, \leq\}, i = \overline{1,n}$, арифметический оператор; $\Lambda_i \in \{\wedge, \vee\}$– логический оператор; d_s^r, d_{1m}^r – входные и выходные данные модели $Z_k^r = \{z_k^r, \dots, z_1^r\}$ – множество значений входных данных; $d_s^{k'}; z_1^{k'} \in \left\{z_{11}^{k'}, \dots, z_{1M}^{k'}\right\}$ – значение для выходных данных $d_s^{k'}$; n – количество условий; k – индекс продукционного правила.



Обобщенная схема СППР дорожных сетей города

В связи со сложностью разработки ИЛМ и ПМ для поддержки принятия решений во всей структуре дорожных работ были предложена модель и методика поддержки принятия решений только для системы мониторинга дорожных работ,расхода ГСМ и состояния техники. Основными отличиями и преимуществами методики являются:

• использование данных с навигационного оборудования для диспетчерского управления объектами дорожных сетей;

• визуализация оперативных результатов полученной и обработанной информации и выработка рекомендаций;

• генерация необходимых действий в той или иной ситуации.

Для реализации методики поддержки принятия решений была предложена архитектура системы поддержки принятия решений (СППР) для решения задач дистанционного диспетчерского контроля объектов и процессов в системе дорожного хозяйства (см. рисунок) [2].

СППР включает следующие основные подсистемы:

• мониторинга дорожных работ;

• получения отчетов по выполнению дорожных работ;

• мониторинга данных ГСМ;

• получения отчетов ГСМ;

• мониторинга техники;

• получения отчетов по технике;

• мониторинга ЧС;

• получения отчетов по ЧС;

Непрерывный процесс мониторинга дорожных работ, техники, ГСМ и ЧС происходит следующим образом:

1) оператором филиала заполняет наряд на работы. У оператора каждого филиала имеется имя пользователя и пароль, которые предоставляют конкретному пользователю права на заполнение наряда. Каждому филиалу соответствуют свои дороги;

2) происходит получение данных со спутника о положении техники. Системой осуществляется получение данных о положении техники со спутника;

3) администратор осуществляет диспетчерское управление дорожными работами и техникой.Для контроля проделанных дорожных работ и техники необходимо обладать правами администратора. Администратору предоставляется отличный от пользовательского интерфейс.

Методика диспетчерского управления на основе [5] включает следующие этапы:

• сбор данных;

• передача данных на диспетчерский сервер;

• накопление данных в БД;

• многомерный анализ данных (DataMining);

• оповещение ЛПР и других лиц о внештатных и аварийных ситуациях

• в случае необходимости выработка управляющего воздействия с поддержкой системой принятия решений (с определением степени необходимости вмешательства в процесс).

Апробация и внедрение системы поддержки принятия решений

Система поддержки и принятия решений для управления дорожными работами и контролем техники в филиалах разрабатывается областного государственного унитарного предприятия «Волгоградавтодор».

В состав клиентских приложений входят пользовательская и административная часть. В связи с этим при разработке системы учтено требование на разделение интерфейсов на пользовательскую и административную части.

Выводы и результаты

По результатам анализа выделены проблемы оперативно-диспетчерского контроля и поддержки принятия решений при проведении дорожных работ. В соответствии с задачами определена структура системы поддержки принятия решений. Разработана архитектура системы поддержки принятия решений и диспетчерского мониторинга и управления дорожными работами и техникой по проведению дорожных строительно-ремонтных работ и обслуживанию дорожной техники на основе данных систем спутниковой навигации. Разработаны проектные решения по программно-аппаратным средствам дистанционного контроля для СППРОГУП «Волгоградавтодор» и прототип автоматизированной системы мониторинга дорожных работ и техники, запланированы испытания и экспериментальные исследования работы системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Камаев, В. А*. Применение нечетких нейросетевых моделей для идентификации состояния автомобильных дорог / В. А. Камаев, М. В. Щербаков, Д. А. Скоробогатченко // Вестник компьютерных и информационных технологий. Вып. 12. – М.: Машиностроение, 2010. – С. 36–41.

2. *Камаев, В. А*. Интеллектуальные системы автоматизации управления энергосбережением / В. А. Камаев, М. В. Щербаков, А. Бребельс // Открытое образование. – 2011. – № 2. – С. 227–231.

3. Программно-информационная поддержка технического обслуживания и ремонта оборудования с учетом интересов субъектов процесса / А. В. Кизим, Е. В. Чиков, В. Ю. Мельник, В. А. Камаев // Информатизация и связь. – 2011. – № 3. – С. 57–59.

4. *Кизим, А. В*. Исследование и разработка методики автоматизации ремонтных работ предприятия / А. В. Кизим, Н. А. Линев // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 2(40) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – (Серия «Акту-

альные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 4). – С. 43–45.

5. *Кизим, А. В.* Задачи прогнозирования и планирования для программно-информационной поддержки технического обслуживания и ремонта оборудования / А. В. Кизим, Е. В. Чиков, В. Ю. Мельник // Открытое образование. – 2011. – № 2(85). Ч. 2. – С. 224–227.

6. *Кизим, А. В.* Обоснование необходимости автоматизации работ по ремонту и техническому обслуживанию оборудования / А. В. Кизим // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 6(54) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в техн. системах» ; вып. 6). – С. 118–121.

УДК 004.413

С. А. Овчинников

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЕКТОМ ПО РАЗРАБОТКЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПРОЕКТНЫХ РИСКОВ

Волгоградский государственный технический университет

stepan@volgograd.ru

В статье рассматривается состояние вопроса оптимального управления проектом разработки ПО с целью повышения качества на основе анализа проектных рисков, изучаются основные подходы к решению, вводится содержательная и формальная постановка задачи.

Ключевые слова: case-технологии, методологии процесса разработки по, каскадная разработка, водопадная разработка, итеративная разработка, agile/scrum, оценка проектных рисков, выбор методологии.

S. A. Ovchinnikov

SOFTWARE DEVELOPMENT PROJECT MANAGEMENT FOR QUALITY IMPROVEMENT BASED ON PROJECT RISK ESTIMATION

Volgograd State Technical University

The article is devoted to making general review of optimal management of software development projects for quality improvement based on risks estimation.

Keywords: case, software development process, waterfall, agile, scrum, risk estimation, methodologies.

Введение

Ключевым процессом в современных IT-проектах (создания, поддержки, развития информационных систем) является разработка программного обеспечения (ПО).

С прикладной точки зрения значимость процесса разработки ПО постоянно нарастает. Это основная деятельность для 3 из 10 самых доходных мировых компаний [1], а среди 500 самых крупных компаний рейтинга Fortune 500 доля разработчиков ИТ-компаний растет в течение последние 15 лет [2].

Далее в статье будет рассматриваться Проект – разработка одной организацией уникального ПО по заказу другой организации. Будем называть участников Проекта Заказчиком и Разработчиком. Заказчик и Разработчик имеют независимое управление (не подчинены административно, не являются частью одной организации). Критерием успеха проекта является создание качественного ПО без превышения отведенных ресурсов.

В статье исследованы существующие подходы к решению этой проблемы, сформулированы актуальные задачи. Осуществлена формальная постановка задачи с применением моделей теории игр. Дана интерпретация компонентов предложенной модели.

Содержательное описание процесса управления проектом по разработке ПО

Заказчик формирует Заказ, включающий необходимые Требования, Сроки, Стоимость. Чтобы проект состоялся, Разработчик оценивает Заказ и решает, что он может его выполнить. Принимая решение о выполнимости, Разработчик делает некоторое предположение, которое может оправдаться или нет в зависимости от поведения сторон.

После начала проекта Заказчик и Разработчик, обладая свободой принятия решений, реализуют каждый свою стратегию. Проект управляется ими совместно (на практике это осуществляется путем формирования проектной команды из представителей обеих сторон).

Несмотря на общие декларируемые планируемые результаты проекта (качество, сроки, стоимость), Заказчик и Разработчик имеют противоположные интересы:

• заказчик хочет заплатить меньше; получить более функциональный и качественный продукт за меньшее время;

• разработчик хочет получить оплату полностью, выполнив как можно меньше работы.

Эти интересы вытекают из соображений экономической целесообразности деятельности сторон проекта.

Таким образом, имеется конфликт интересов участников при общем объекте управления. Такая постановка задачи характерна для теории игр [3, 4].

Дано: Заказ состоит из трех составляющих: требования, сроки, стоимость.

Исполнитель решает что может исполнить Заказ. Это оценка рискованная, вероятностная.

Проект – рискованное мероприятие, вероятность успеха которого определяется действиями двух независимых сторон.

Необходимо получить: Стратегии поведения Заказчика и Исполнителя, которые в ходе проекта путем взаимодействия приводят к достижению планируемого результата (Продукта).

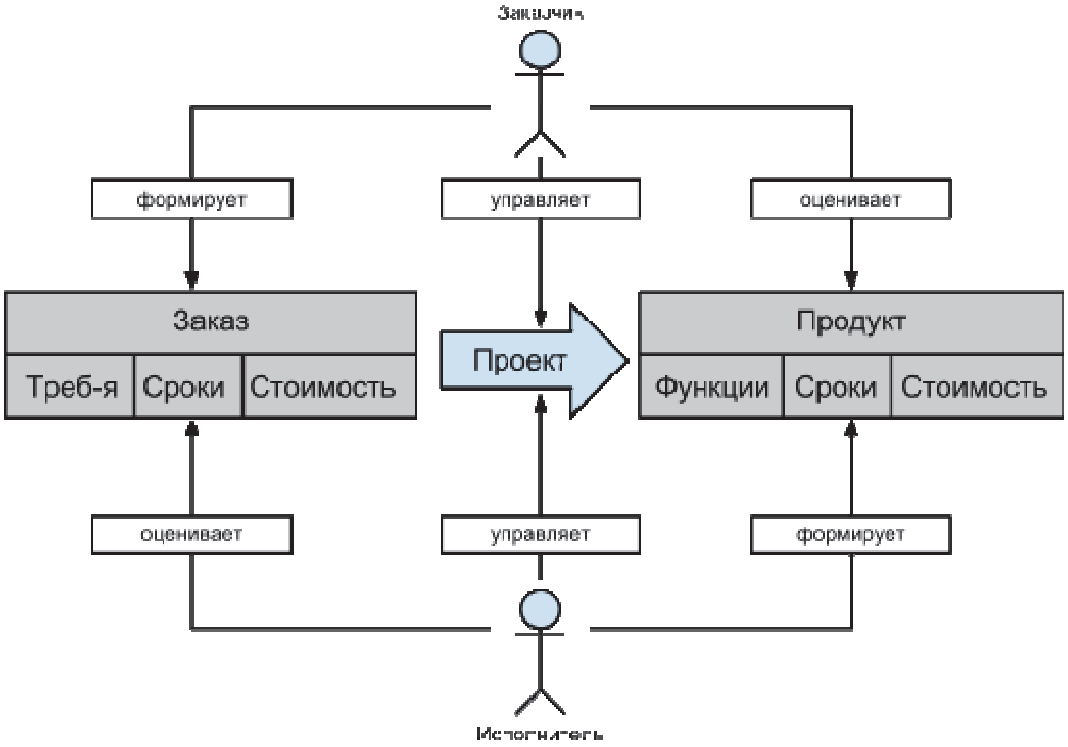


Схема взаимодействия Заказчика и Исполнителя в ходе работы над Проектом

Особенность в одновременном управлении объекта двумя субъектами отражена на рисунке.

Исследуем известные подходы к решению задачи.

Промышленные и отраслевые стандарты управления проектами по разработке ПО

Развитие разработки ПО в последние несколько десятилетий привело к современному состоянию программной инженерии, когда существует ряд документов, признанных как стандарты (стандарты «де-факто», шаблоны поведения или «лучшие практики») управления проектами разработки ПО.

Первоисточниками для таких стандартов являются практические исследования и опыт множества специалистов. В частности, можно отметить работы В. Ройса [5], Б. Боэма [6, 7], С. МакКоннелла [8, 9], М. Фаулера [10], А. Коуберна [11].

В аннотациях к стандартам [12, 13, 14] указано: это эмпирически проверенные, развивающиеся методические рекомендации, сфера применимости каждой не описана.

Рассмотрим наиболее значимые стандарты управления проектами:

• PMBoK [12]. Стандарт ProjectManagement-BaseofKnowledge не является специфическим для разработки ПО и освещает общие принципы организации проектной работы. В 2008 году была выпущена четвертая версия стандарта, имеющая ряд важных нововведений, в том числе касающихся управления проектами разработки ПО;

Для управления проектами по разработке ПО PMBoK полезен в первую очередь как первоисточник терминов и основных принципов организации работы. Конкретных рекомендаций и алгоритмов в стандарте нет;

• SWEBOK [13]. Стандарт SWEBOK, в отличие от PMBoK, является специфичным именно для разработки ПО. Стандарт вводит множество понятий, процессов, моделей, практик разработки ПО. В стандарте определено, что каждая проектная ситуация может требовать своего процесса разработки ПО и определяет основной цикл управления процессом разработки ПО, в рамках которого определяется конкретный процесс.

При этом стандарт оставляет свободу принятия решения проектной команде и аналитикам заказчика в определении стратегии и конкретных шагов управления проектом;

• группа «водопадных» стандартов и отечественные ГОСТы [14, 15]. Отечественные ГОСТы серии 19 [14] и 34 [15], построены на так называемом принципе «водопада» (термин определен в 1970 году WinstonRoyce [5]). Суть принципа состоит в том, что последовательность этапов регламентирована, каждый этап основывается на предыдущем. Возврат на предыдущие этапы в рамках стандарта невозможен.

В статье [5] 1970 года, которая ввела в обиход концепцию «водопада»; эта технология управления рассматривалась критически, и автор подводит читателя к необходимости итеративного управления проекта jv на основании уточнения требований. При этом «водопад» рекомандован для крупных проектов. Более подробно анализ идей Ройса, изложенных в статье 1970 года [5], см в [16].

• RUP [17, 18]. RUP является существенным движением вперед по сравнению с более ранними стандартами. RUP, основанный на итеративном подходе к разработке, декларирует приоритетом раннее выявление и устранение основных рисков. Проектные процедуры, описанные в RUP, являются типовыми для большинства средних и крупных проектов разработки ПО.

Декларируя основные принципы разработки и позволяя гибко перестраивать проект с учетом рисков, RUP, однако, не предлагает конкретных способов учета рисков и методик принятия решений;

• MSF [19]. MicrosoftSolutionsFramework (как и RUP) – это итеративная методология разработки. MSF специально разработан для крупных проектов с высоким уровнем критичности. В стандарте описаны основные роли участников проекта, артефакты и вехи. MSF позиционируется как базовая методология, требующая адаптации к конкретным условиям;

• CMMI. Модель CapabilityMaturityModel [20], разработанная в США институтом Software-EngineeringInstitute (SEI), позволяет оценить уровень развития текущей методологии управления программными проектами и направить их совершенствование. Модель является абстракцией еще более высокого уровня, нежели RUP и MSF.

Подводя итог обзору стандартов, можно сказать следующее:

• стандартов разработки и методологий много. Сравнение стандартов между собой и поиск лучшего вне анализа решаемой задачи бессмысленны [21];

• стандарты описывают широкое поле возможных вариантов поведения, любой из которых укладывается в тот или иной стандарт;

• выбор между стандартами в конкретном проекте является нетривиальной и недостаточно изученной задачей;

• при обилии стандартов ни в одном из них не проработан вопрос оценки влияния проектных рисков и принятия решения для повышения качества.

Методы анализа проектных рисков. Нечеткие оценки. Рассуждения по прецедентам

Известен тезис Тома Демарко [21], что «управление проектами – это управление рисками». Если представить управление проектом как задачу альтернативного выбора или цепочку таких задач, то для решения достаточно иметь оценку качества каждой альтернативы в каждой ситуации.

Получить такую оценку можно, используя знания и оценки экспертов, опыт принятых ранее решений и их фактических последствий. Чтобы качественно решить задачу таким способом, нужно иметь два компонента:

• базу знаний по проектным рискам (классификацию, методику исследования, способы оценки тяжести и прогнозирования последствий);

• математический аппарат или алгоритмическое обеспечение оценки альтернатив.

Общепринятой классификации рисков с методикой их оценки нет. Каждый автор приво-

дит свою классификацию и приемы оценки рисков [22, 23, 24, 25]. Применяются алгоритмы альтернативного выбора на основе взвешенных показателей. При этом веса показателей, методика усреднения исследованы недостаточно.

Стоит особо отметить две выдающиеся работы по этой теме: книга С. Архипенкова «Лекции по управлению программными проектами» [24] и диссертация доктора наук А. И. Таганова «Научные основы идентификации, анализа и мониторинга проектных рисков качества программных изделий в условиях нечеткости» [25]. Они задают прочный фундамент прикладному и теоретическому исследованию оптимального управления программными проектами.

Подход рассуждений по прецедентам и нечеткого анализа проектных рисков имеет серьезные п р о б л е м ы :

• отсутствие общепринятой классификации рисков: все авторы предлагают различные категоризации рисков, методы определения и шкалы измерения рисков;

• полнота и качество набора прецедентов: качество анализа и принятия решения напрямую зависит от накопленной базы прецедентов, а она, учитывая колоссальную размерность пространства задачи и малое число экспертно проработанных прецедентов, априори недостаточна;

• локальность оптимумов: даже при наличии многих положительных прецедентов мы ничего не знаем о том, существует ли лучшее решение, и даже метрика качества прецедента принципиально непроверяема;

• корректное обобщение мнений экспертов и обоснованный логический вывод по базе прецедентов затруднительны.

Вывод по обзору известных подходов к решению задачи

Таким образом, можно зафиксировать следующие основные в ы в о д ы :

• известные подходы применяют слабоформализованные практические рекомендации и методы рассуждения по прецедентам;

• принятие решение выбора стратегии управления проектом и конкретных шагов в рамках стратегии является экспертной задачей;

• задача выбора оптимальной стратегии управления проектом не сформулирована и не решена;

• исследование методов выбора и реализации оптимальной стратегии управления программными проектами является актуальной научной задачей.

Требования к модели

При выборе модели необходимо обеспечить выполнение следующих у с л о в и й :

• рассмотрение сторон, управляющих проектом и преследующих свои интересы;

• использование оценок альтернатив в лингвистических, числовых и нечетких шкалах;

• анализа как стратегии в целом, так и отдельных шагов в рамках стратегии;

• возможность изменять оценки после каждого шага.

Построение модели и постановка задачи выбора оптимальной стратегии управления проектом по разработке программного обеспечения

Всем перечисленным требованиям соответствуют модели теории игр, а именно модели биматричной игры (игры с ненулевой суммой) двух игроков.

Опишем задачу выбора оптимальной стратегии с применением модели биматричной игры. Игра может быть задана как

$$\Gamma = (X, Y, F, G),$$

где X, Y – наборы стратегий Заказчика и Разработчика соответственно, а F, G – их функции выигрыша.

Решением игры является пара стратегий (x_i, y_j).

Функции выигрыша могут быть заданы матрицами $A = (a_{ij})$ и $B = (b_{ij})$.

При этом в игре известными методами теории игр могут быть определены седловые точки игры (ситуации равновесия) (x_0, y_0), а также Парето-оптимальные решения [4, 5].

Для задачи выбора конкретного шага в рамках стратегии нужно использовать модель позиционной многошаговой игры; к поставленной задаче она приводится при переходе к стратегической форме игры [4, 5].

Интерпретация модели

Представляет интерес практический смысл компонентов модели (см. таблицу).

На модели могут быть поставлены и решены следующие з а д а ч и :

1) вычисление матриц A, B для задания функций выигрыша F, G и решения игры в стратегической форме. Вычисление матриц может быть основано на любой из описанных в обзоре методик, позволяющей свести экспертные оценки к функциям выигрыша;

Интерпретация компонентов модели

Компонент модели	Интерпретация, практический смысл
Функция выигрыша *F, G* в виде матрицы платежей$A = (a_{ij})$ и $B = (b_{ij})$	Вероятность успеха, оценка риска, полученная анализом прецедентов, расчетами, методом опроса экспертов. Если используются нечеткие оценки, то игра также будет нечеткой
Решение игры (x_0,y_0)	Использованная методология управления проектом
Седловая точка игры, ситуация равновесия	Методология управления проектом, в рамках которой каждый участник не может сделать результат лучше, действуя в одиночку. Локальный оптимум
Парето-оптимальное решение	Искомая оптимальная методология управления проектом, в рамках которой участники не могут сделать результат лучше, даже действуя согласованно. Глобальный оптимум

2) рассмотрение известных методологий ведения проектов (RUP, MSF) к стратегиям игры и оценка оптимальности методами теории игр. Формальный ответ на вопрос: является ли применяемая методология управления Парето-оптимальной или равновесной? Решение задачи выбора лучшей методологии для конкретного проекта;

3) разработка методов перехода от многоходовой позиционной игры к играм в стратегической форме (получение новых методологий на базе исследования отдельных шагов).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. CNN MONEY: FORTUNE 500 – URL [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://money.cnn.com/magazines/fortune/fortune500/2012/full_list/. Дата обращения : 01.12.2012.

2. Топ 100 крупнейших компаний мира – URL [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://orange-finance.ru/analitika/147-top-100-krupnejshikh-kompanij-mira-2012. Дата обращения : 01.12.2012.

3. *Петросян, Л. А.* Теория игр : учеб. пособие для унтов / Л. А. Петросян, Н. А. Зенкевич, Е. А. Семина. – М.: Высш. шк., Университет, 1998. – С. 304.

4. *Писарук, Н. Н.* Введение в теорию игр / Н. Н. Писарук. – Минск : БГУ, 2012. – 231 с.

5. *W. Royce*. Managing the Development of Large Software Systems, Proc. Westcon, IEEE CS Press, 1970.

6. *Barry Boehm*. Cocomo II model manual – URL: http://alarcos.inf-cr.uclm.es/doc/pgsi/doc/teo /8/cocomo2-modelman.pdf. Датаобращения : 01.12.2012.

7. *Barry W. Boehm*. A Spiral Model of Software Development and Enhancement, Computer, May 1988.

8. *Макконнелл, С.* Сколько стоит программный проект / С. Макконнелл. – Питер, 2007.

9. *Макконнелл, С.* Остаться в живых. Руководство для менеджера программных проектов. Библиотека программиста / С. Макконнелл. – СПб.: Питер, 2006. – 240 стр.

10. *Мартин Фаулер*. Проектирования больше нет. – URL: http://citforum.ru/SE/project/design_dead/. Дата обращения : 01.12.2012.

11. *АлистэрКоуберн*. Варианты использования, десять лет спустя. – URL: http://www.maxkir.com/sd/useCasesTenYearsLater_RUS.html. Дата обращения : 01.12.2012.

12. Руководство к своду знаний по управлению проектами (Руководство PMBoK). – 4-е изд. – 2008. – Project ManagementInstitute.

13. SWEBOK 3 Review – URL: http://computer.central-desktop.com/swebokv3review / Дата обращения : 01.12.2012.

14. ГОСТ 19.102–77. Стадии разработки программного обеспечения.

15. ГОСТ 34.601–90. Автоматизированные системы. Стадии создания.

16. Водопадная модель: сеанс абстракции с последующим разоблачением http://blogs.uml2.ru/post/Vodopadnaya-model-seans-abstrakcii-s-posleduyushchim-razoblacheniem – URL: http://blogs.uml2.ru/post/Vodopadnaya-model-seans-abstrakcii-s-posleduyushchim-razoblacheniem. Дата обращения : 01.12.2012.

17. *Крачтен, Ф.* Введениев Rational Unified Process / Ф. Крачтен. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2002. – 240 с.: ил.

18. *Якобсон, А.* Унифицированный процесс разработки программного обеспечения / А. Якобсон, Г. Буч, Дж. Рамбо. – Спб.: Питер, 2002. – 496 с.: ил.

19. MSF–URL:http://technet.microsoft.com/en-us/library/bb497060.aspx. Дата обращения : 01.12.2012.

20. CMM Capability Model – URL: http://citforum.ru/programming/digest/cmm.shtml. Дата обращения : 01.12.2012.

21. *АлистерКоуберн*. Каждому проекту своя методология – URL: http://citforum.ru/SE/project/meth_per_project/. Дата обращения : 01.12.2012.

22. *Демарко, Том*. Deadline. Роман об управлении проектами – URL: http://www.hrazvitie.ru/books/projects/deadline.doc. Дата обращения : 01.12.2012.

23. *Демарко, Том*. Вальсируя с Медведями. Управление рисками в проектах по разработке программного обеспечения / Том ДеМарко, Тимоти Листер. – М., Компания p.m.Office, 2005.

24. *Архипенков, Сергей.* Лекции по управлению программными проектами – URL: http://www.arkhipenkov.ru/resources/sw_project_management.pdf. Дата обращения : 01.12.2012.

25. *Таганов, А. И.* Научные основы идентификации, анализа и мониторинга проектных рисков качества программных изделий в условиях нечеткости : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / А. И. Таганов. – Рязань, 2011. – 39 с.

УДК 519.876.2

Н. П. Садовникова

ОЦЕНКА ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛАНОВ ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ

Волгоградский государственный технический университет

npsn1@ya.ru

Рассмотрены вопросы поддержки принятия решений в задачах стратегического планирования развития урбанизированных территорий. Определены основные положения методологии комплексного анализа эколого-экономической эффективности градостроительных проектов.

Ключевые слова: эколого-экономическая эффективность, стратегическое планирование, оценка воздействия на окружающую среду, экологическая безопасность, сценарный подход.

N. P. Sadovnikova

ENVIRONMENTAL AND COST-EFFECTIVENESS ANALYSIS OF URBAN DEVELOPMENT PROJECTS

Volgograd State Technical University

The questions of support decision-making in strategic planning and development of urban areas have been contemplated. Main provisions of the methodology of complex analysis of environmental and economic efficiency of urban projects have been defined.

Keywords: environmental and economic efficiency, strategic planning, environmental impact assessment, environmental safety, scenario approach.

Создание единого, научно-обоснованного подхода к принятию решений по обеспечению устойчивого развития города – необходимое условие для формирования эффективных стратегий управления. Можно говорить о кардинальной смене парадигм природопользования и ведения хозяйственной деятельности. Установка на «охрану природы» заменяется «эффективным взаимодействием природы и общества». С точки зрения управления градостроительной деятельностью это означает появление новых функций, формирующих механизмы реализации концепции биосферосовместимости на всех уровнях принятия решений, что, в свою очередь, приводит к появлению новых задач управления.

Деятельность по стратегическому управлению регламентируется целым набором документов, среди которых:

– «Стратегия (концепция) развития города»;

– «Инвестиционная карта города»;

– «Стратегический план»;

– «Генеральный план города»;

– «Схемы территориального развития»;

– «Программа социально-экономического развития города»;

– «Инвестиционная программа города» и др.

Создание этих документов связано с необходимостью решения целого ряда аналитических задач:

1) анализ эффективности использования территориальных и природных ресурсов;

2) анализ вариантов использования территорий;

3) анализ инвестиционной активности;

4) анализ динамики строительства и реконструкции жилья;

5) анализ эффективности функционирования транспортной, инженерной и социальной инфраструктуры;

6) анализ экологической обстановки.

В связи с тем, что анализируемые процессы относятся к разным сферам жизни города и получаемая в результате анализа информация поступает разным ведомствам, общая оценка эффективности тех или иных решений, как правило, не проводится. Поэтому необходимо создать механизмы для комплексного анализа планов и программ развития города, которые бы позволили учитывать социальные экологические и экономические факторы и формировать единые требования к процессу планирования.

В контексте исследуемой проблемы управление территориальным развитием города рассматривается как системная деятельность, направленная на решение задач распределения территориальных ресурсов и градостроительное регулирование, обеспечивающее устойчивое развитие города. Стратегический подход к управлению подразумевает приоритет долгосрочных целей и согласование задач управления состоянием и развитием. Решения принимаются на стратегическом уровне в процессе создания принципов управле-

ния и на оперативном в процессе выбора способов использования территории, распределения средств, изменения условий хозяйствования и пр.

Основные этапы процесса поддержки принятия решений при планировании развития городских территорий представлены на рис. 1.

Рис. 1. Стратегический уровень принятия решений в процессе управления развитием УЭС

Ключевым моментом этого процесса является оценка эффективности проектов, планов и программ. В мировой практике принятие решений и обоснование, как отдельных проектов, так и стратегических программ развития территорий обязательно связаны с доказательством оптимальности выбранного варианта. Причем согласование при этом целей экологического и экономического развития является обязательным условием.

Эколого-экономическая эффективность проекта – показатель, характеризующий соотношение общих экономических выгод и потерь от проекта, включая внешние экологические эффекты, и связанные с ними социальные и экономические последствия, затрагивающие интересы населения и будущих поколений в результате реализации данного проекта [1]. В итоге эколого-экономического анализа должен быть выявлен наиболее эффективный способ расходования средств в процессе реализации программы или проекта при условии сохранения определенных параметров состояния окружающей среды.

В зависимости от вида воздействия, характера намечаемой деятельности и негативных последствий выбирается состав факторов, определяющих уровень экологических затрат и выгод, учитываемых в расчетах. Как правило, исходные данные для подобных расчетов получают из соответствующих разделов проектной документации и отчетов, составленных по результатам начальных этапов оценки воздействия на окружающую среду (рис. 2). Важно по-

Рис. 2. Схема эколого-экономического анализа планов территориального развития

нять, что под оценкой воздействия в данном контексте понимается не только анализ воздействий (выбросов, сбросов, отходов, изымаемых ресурсов), но и информация о возможных изменениях в результате реализации намечаемой деятельности.

В результате эколого-экономического анализа необходимо определить величину воздействия на окружающую среду и соотношение затрат и выгод реализуемых проектов.

В процессе проведения экологического оценивания рассматриваются возможные сценарии реализации предложенных программ территориального развития и определяются условия, при которых экологическая нагрузка будет находиться в пределах заданных ограничений.

Для расчета эколого-экономической эффективности используются следующие показатели [1]: экологические и социальные выгоды (Be_t); экологические и социальные затраты (Ce_t); ставка дисконтирования (r); год оценки (t); период времени, учитываемый в анализе (T); капитализированная стоимость утраченного природного ресурса или стоимость его замещения (Vr).

Структуры затрат и выгод проекта представлены на рис. 3, 4.

Рис. 3. Структура экологических затрат

Следует отметить высокий уровень неточности при определении количественных характеристик затрат и выгод, которые, как правило, зависят от взаимодействия социальных экологических и экономических факторов, закономерность изменения которых трудно спрогнозировать на длительный период времени. В связи с этим для оценки отдельных показателей предлагается использовать процедуру экспертного анализа.

Определение чистой приведенной стоимости экологических затрат и выгод проекта проводится методом дисконтирования экологических затрат и экологических выгод, включаемых в анализ экономической эффективности проекта с учетом потери ресурсов с длительным сроком существования.

На рис. 5 представлен обобщенный алгоритм оценки эколого-экономической эффективности проектов развития территорий.

Оценка эколого-экономической эффективности выполняется на всех стадиях проектного цикла от разработки инвестиционного предложения и декларации о намерениях до разработки технико-экономического обоснования и осуществления проекта. При этом необходимым условием является сравнение разных вариантов реализации проекта, в том числе варианта отказа от деятельности.

Рис. 4. Структура экологических выгод

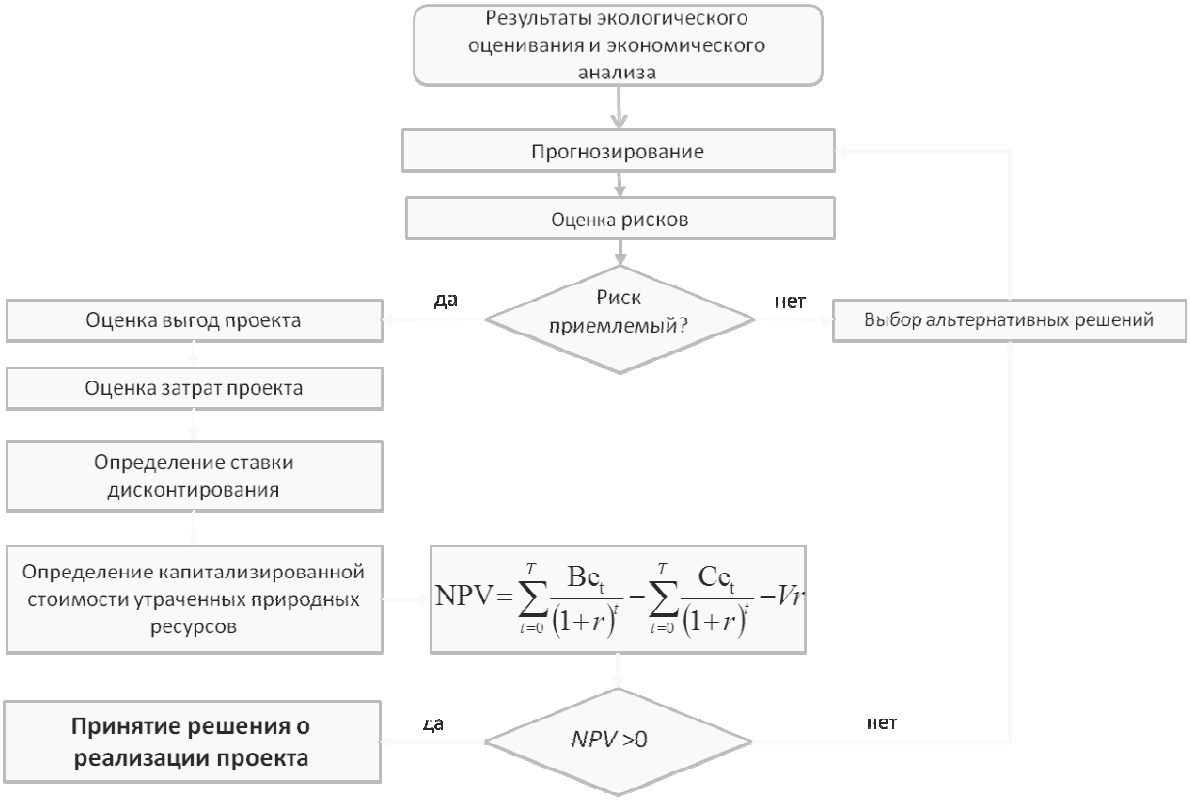


Рис. 5. Обобщенный алгоритм оценки эколого-экономической эффективности проектов развития территорий

Наибольшую сложность при реализации данного подхода представляет определение адекватных прогнозных оценок. Большие объемы разнородной информации, получаемые на этапах предварительного исследования, создают существенные трудности при сопоставлении между собой возможных вариантов осуществления хозяйственной деятельности, что не-

избежно приводит к необходимости применения специальных методов анализа и обработки.

В подобной ситуации фактически создаются условия, при которых необходимый уровень точности прогнозных оценок можно получить только с помощью моделей, обладающих адаптивными свойствами [2]. Такие модели на основе данных, полученных в ходе экологической экспертизы, способны учитывать эволюцию динамических характеристик анализируемого проекта.

Одним из эффективных подходов к исследованию поведения сложных слабоструктурированных систем является когнитивное моделирование.

Цель когнитивного моделирования − получение новых, уникальных знаний о возможном развитии системы в будущем. Эти знания позволяют существенно снизить неопределенность оценки будущих состояний моделируемой системы.

Этапы когнитивного анализа

1. Формирование понятийной модели в виде набора понятий и причинно-следственных связей между ними.

1.1. Определение зависимостей и тенденций в исследуемых процессах.

1.2. Определение ограничений, условий и требований.

1.3. Выделение факторов, по мнению экспертов характеризующих проблемную ситуацию:

– выделение базисных факторов;

– выделение в совокупности базисных факторов управляющих и целевых факторов;

– определение связей между факторами;

– определение направления влияний и взаимовлияний между факторами.

2. Построение когнитивной карты (графа) ситуации.

3. Практическое изучение ситуации с позиции заданной цели:

– прогноз развития ситуации без воздействия;

– прогноз развития ситуации с выбранным комплексом мероприятий (прямая задача).

Для получения различных сценариев развития ситуации может быть использован метод импульсных процессов [3], относящийся к категории динамических методов. Импульсный процесс позволяет определять состояние концептов в дискретные моменты времени, анализируя которые эксперт получает прогноз изменения состояния системы при реализации различных стратегий управления и изменениях внешней среды.

Пример реализации метода импульсных процессов для построения сценариев территориального развития г. Волгограда приведен в работе [4].

Для оценки рисков инвестиционных проектов градостроительной деятельности в условиях неопределенности, как правило, используются методы имитационного моделирования [5, 6]. Непосредственно в ходе имитационного эксперимента можно вводить дополнительные данные, конструировать новые информативные показатели, наблюдать графики изменения показателей и переменных и оценивать происходящие процессы.

Городская территория представляет собой ресурс, распоряжение которым, с одной стороны, дает возможность в случае эффективного его использования, получать прибыли и преференции городу как субъекту конкурентной среды; с другой стороны, городская территория – основа существования и функционирования городского сообщества. Для создания комфортной и безопасной городской среды необходимо находить согласованные решения для экологических и экономических задач. Обязательным условием является включение экологических затрат и выгод в денежные потоки, учитываемые при анализе проектов любого уровня.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Медведева, О. Е.* Методические рекомендации по осуществлению эколого-экономической оценки эффективности проектов намечаемой хозяйственной деятельности / О. Е. Медведева // АНО «Союзэкспертиза» ТПП РФ. – М. : АНО «Экологический юридическо-правовой центр», 2004. – 96 с.

2. *Садовникова, Н. П.* Применение когнитивного моделирования для анализа эколого-экономической эффективности градостроительных проектов [Электронный ресурс] / Н. П. Садовникова // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер. : Строительная информатика. – 2011. – Вып. 5 (14). – С. 1–4. – Режим доступа : www.vestnik.vgasu.ru.

3. *Робертс, Ф. С.* Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам : пер. с англ. / Ф. С. Робертс. – М.: Наука, 1986. – 496 с.

4. *Садовникова, Н. П.* Построение траекторий территориального развития на основе методов сценарного прогнозирования [Электронный ресурс] / Н. П. Садовникова, Д. С. Парыгин, Н. П. Жидкова // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер. : Строительная информатика. – 2012. – № 8(24). – Режим доступа : http://vestnik.vgasu.ru/?source=4&articleno=1114.

5. *Садовникова, Н. П.* Общие вопросы применения методологии имитационного моделирования для оценки эколого-экономической эффективности проектов градостроительной деятельности / Н. П. Садовникова, А. К. Ермощенко // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 9(82) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 11). – С. 94–97.

6. *Садовникова, Н. П.* Построение моделей развития города. Системно-динамический подход / Н. П. Садовникова, Д. С. Парыгин, Е. В. Манунина // Modern problems and ways of their solution in science, transport, production and education SWorld – 18–27 December 2012 : мат. науч.-практ. интернет-конф. – Одесса, 2012. – Вып. 4. – Т. 13. – С. 73–76.

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 541.64:547.759.32

Д. В. Девятых, О. М. Гергет, И. В. Михаленко

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ПЕРИНАТАЛЬНОГО ПОРАЖЕНИЯ НЕРВНОЙ СИСТЕМЫ

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

ddv.edu@gmail.com

Обсуждается проблема использования нейронных сетей для оценки и прогнозирования состояния здоровья биообъекта. Обоснована архитектура нейронной сети, приведены: этапы построения, обучения нейронной сети; результаты исследования.

Ключевые слова: искусственная нейронная сеть, система гемостаза.

D. V. Devjatykh, O. M. Gerget, I. V. Mikhalenko

ARTIFICIAL NEURAL NETWORK IMPLEMENTATION FOR NEWBORN NERVOUS SYSTEM PERINATAL DAMAGE DIAGNOSING

National Research Tomsk Polytechnic University

The article describes application of artificial neural networks designed for diagnosing of severe perinatal damage to the central nervous system in newborns with different gestational ages.

Keywords: artificial neural network, hemostatic system.

Введение

Особую роль в математическом моделировании биомедицинских систем играют динамические системы, в которых с течением времени происходят существенные изменения. *Динамической системой* называют систему, изменяющую под действием сил свое состояние. Совокупность всевозможных состояний системы образует пространство состояний. В нашем случае под *динамической системой* будем понимать состояние здоровья организма ребенка в раннем возрасте.

Одним из эффективных способов поддержания сложных динамических систем в требуемом состоянии является совершенствование и развитие алгоритмического диагностического контроля показателей их функционирования (системы гемостаза).

Большой вклад в разработку методов оценки состояния здоровья детей внесли специалисты, как в области медицины, так и в области математики. Анализ отечественной и зарубежной литературы показал, что исследования системы гемостаза проводятся более 50 лет [1–4]. Однако для новорожденных методики, используемые у взрослых и требующие больших заборов крови, неприемлемы.

Нарушения в системе гемостаза у новорожденных детей, особенно у недоношенных, рассматриваются как наиболее частые и грозные осложнения неонатального периода. Роды и ранний постнатальный период жизни представляют собой уникальное сочетание экстремальных воздействий, требующее непрерывной смены механизмов адаптации на разных уровнях саморегуляции. С этих позиций актуальным является поиск диагностических и прогностических критериев, отражающих сохранение и выраженность патологических изменений в системе гемостаза, с целью адекватного и своевременного терапевтического вмешательства в патологический процесс, когда лечение приходится на фазу обратимых нарушений.

На основании вышеизложенного появляется новая техническая задача, направленная на повышение точности и информативности прогнозирования риска развития перинатального поражения центральной нервной системы (ППЦНС)

у новорожденных детей, а также расширение области применения, в частности, для новорожденных с различным сроком гестации.

Для построения данной прогностической модели риска развития тяжелого ППЦНС у новорожденных детей различного гестационного возраста, было построено несколько нейронных сетей. Для каждого набора параметров использовались нейронные сети, отличающиеся друг от друга такими параметрами, как количество нейронов в выходном слое, активационная функция, метод обучения. Для создания нейронной сети использовался Neural Network ToolBox MatLab 2011b.

Количество нейронов в скрытом слое

В 1987–1991 гг. профессором Калифорнийского университета (США) Р. Хехт-Нильсеном теоремы Арнольда – Колмогорова были переработаны применительно к нейронным сетям. Было доказано, что для любого множества непротиворечивых между собой пар произвольной размерности (X_q, D_q), q = 1, ..., Q существует двухслойный персептрон с сигмоидальными активационными функциями и с конечным числом нейронов, который для каждого входного вектора X_q формирует соответствующий ему выходной вектор D_q. Таким образом, была доказана принципиальная возможность построения нейронной сети, выполняющей преобразование, заданное любым множеством различающихся между собой обучающих примеров, и установлено, что такой универсальной нейронной сетью является двухслойный персептрон, т. е. персептрон с одним скрытым слоем, причем активационные функции его нейронов должны быть сигмоидными.

Необходимое количество нейронов в скрытых слоях персептрона можно определить по формуле, являющейся следствием из теорем Арнольда – Колмогорова – Хехт-Нильсена [5]:

$$\frac{N_y Q}{1 + log_2(Q)} \leq N_w \leq N_y \left(\frac{Q}{N_x} + 1\right)(N_x + N_y + 1) + N_y, \quad (1)$$

где N_y – размерность выходного сигнала; Q – число элементов множества обучающих примеров; N_w – необходимое число синаптических связей; N_x – размерность входного сигнала. Оценив с помощью этой формулы необходимое число синаптических связей N_w, можно рассчитать необходимое число нейронов в скрытых слоях. Например, число нейронов скрытого слоя двухслойного персептрона будет равно:

$$N = \frac{N_w}{N_x + N_y}. \quad (2)$$

Данная формула позволяет определить лишь минимальное и максимальное количество нейронов, само число находится эмпирическим путем.

Формула (2) дает возможность вычислять количество нейронов в скрытом слое, если функция активация сигмоидальная. Если же передаточная функция отличается, то согласно [5–8], количество нейронов в скрытом слое определяется как

$$\frac{2N_x}{3} + N_y. \quad (3)$$

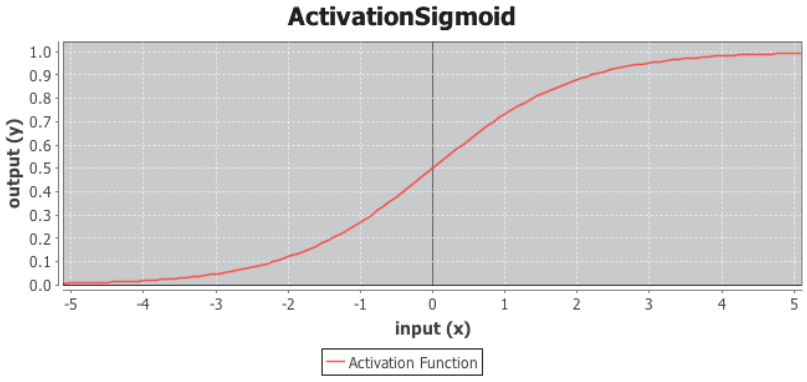
Активационная функция

В качестве активационной функции наиболее часто используются сигмоидальная активационная функция и функция гиперболического тангенса. Сигмоидальная функция задается выражением:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha x}}, \quad (4)$$

где α – параметр, определяющий наклон функции.

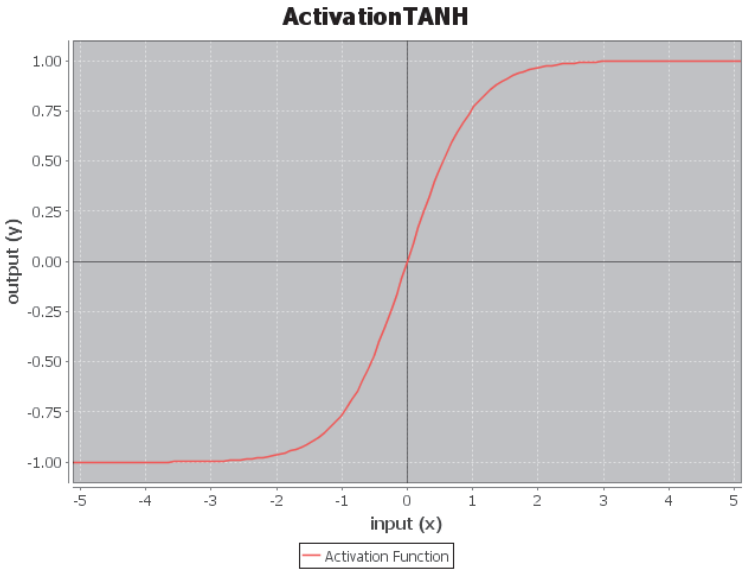
Варьируя параметр α, можно получить разные виды сигмоиды. Наиболее часто используется α = 1. В случае, когда параметр α равен бесконечно большому числу, функция вырождается в пороговую.



Как видно из рисунка, сигмоидальная функция может использоваться, только если ожидаемое выходное значение будет положительным.

Функция гиперболического тангенса:

$$f(x) = \frac{e^{2x} - 1}{e^{2x} + 1}. \qquad (5)$$



Обучение сети

В общем случае задача обучения нейронной сети (НС) сводится к нахождению некой функциональной зависимости $y = F(x)$, где x – входной, а y – выходной векторы. В общем случае такая задача, при ограниченном наборе входных данных, имеет бесконечное множество решений. Для ограничения пространства поиска при обучении ставится задача минимизации целевой функции ошибки НС, которая находится по методу наименьших квадратов:

$$E(w) = \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{p}(y_j - d_j)^2, \qquad (6)$$

где y_j – значение j-го выхода нейросети; d_j – целевое значение j-го выхода; p – число нейронов в выходном слое.

При обучении методом градиентного спуска значения весовых коэффициентов на каждой итерации изменяется по формуле

$$\Delta w_{i,j} = -\eta \frac{dE}{dw_{i,j}}, \qquad (7)$$

где $w_{i,j}$ – весовой коэффициент синаптической связи, соединяющей i-й нейрон слоя n-1 с j-м нейроном слоя n; η – коэффициент скорости обучения, $0 < \eta < 1$.

При обучении методом эластичного распространения весовые коэффициенты сети изменяются согласно формуле

$$\Delta w_{ij}^{(t)} = \begin{cases} -\Delta_{ij}^{(t)}, & \frac{dE}{dw_{i,j}}^{(t)} > 0 \\ +\Delta_{ij}^{(t)}, & \frac{dE}{dw_{i,j}}^{(t)} < 0 \end{cases} \qquad (8)$$

$$\Delta_{ij}^{(t)} = \begin{cases} \eta^{+}\Delta_{ij}^{(t-1)}, & \frac{dE}{dw_{i,j}}^{(t-1)} > 0 \\ \eta^{-}\Delta_{ij}^{(t-1)}, & \frac{dE}{dw_{i,j}}^{(t-1)} < 0 \end{cases} \qquad (9)$$

Согласно [6–8], метод эластичного распространения превосходит метод градиентного спуска по многим показателям, наиболее важными из которых являются меньшее количество итераций для обучения и устойчивость к попаданию в локальный минимум.

Точность распознавания

В качестве входных данных нейронной сети для прогнозирования развития перинатального поражения центральной нервной системы у новорожденных детей использованы нормализованные данные показателей гемостаза, которые представлены в виде матрицы размерностью 102x9, где строки – объекты исследования (детей); количество столбцов соответствует показателям гемостаза, которые использовались для описания состояния здоровья организма. Каждому объекту входного множества ставится в соответствие выходной вектор, который описывает состояние здоровья.

Общие черты у всех сетей: количество нейронов во входном слое – 9, в выходном – 2. Количество примеров – 102; обучающая выборка – 72; тестирующая выборка – 30.

Далее приводятся результаты обучения и тестирование конкретно для каждой нейронной сети.

Активационная функция	Нейронов в скрытом слое	Точность обучения, %	Точность тестирования, %
Сигмоид	3	91.6	83.5
Сигмоид	5	93	86,8
Сигмоид	10	94.4	90.1
Сигмоид	15	90,2	87.1
Сигмоид	25	100	66.6
Гипертангенс	8	95.8	93.4

В качестве активационных функций в нейронных сетях использована сигмоид- и гипертангенс-активационная функция, с параметром пологости a=1. Согласно формулам (1), (2) было определено, что количество нейронов в скрытом слое следует задать в диапазоне [3–26].

Для нейронной сети, использующей гипертангенс в качестве активационной функции, согласно формуле (3), в скрытый слой было добавлено 8 нейронов.

Ошибка, при которой пример считался распознанным верно – 0,1.

Как видно из приведенной выше таблицы, нейронная сеть с сигмоидальной активационной функцией показала лучшие результаты тестирования при количестве нейронов в скрытом слое, равном десяти. При увеличении их количества результаты работы с обучающим множеством улучшались, однако результаты тестирование ухудшались, происходило переобучение сети.

Нейронная сеть с гипертангенс-активационной функций показала лучшую точность. Чтобы проверить, не является ли это преимущество результатом «удачного» разделения выборки на обучающую и тестирующую или начальной инициализации весовых коэффициентов были созданы дополнительные экземпляры сетей и варианты разбиения выборки. Незначительное преимущество в точности, достигаемое при использовании гипертангенс-активационных функций сохранялось при работе с разными вариантами разбиения выборки на обучающую и тестирующую.

Заключение

Принятие решения на основе нейронных сетей апробировано на тестовых примерах при задании разных значений информативных признаков и при использовании разных активационных функций. Практическая апробация предложенных методов на реальных данных показала, что качество решения удовлетворяет требованиям практического врача. Данная модель позволяет, оценив опыт квалифицированных специалистов-экспертов, выдать рекомендации для проведения дополнительного обследования состояние здоровья ребенка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Баркаган, З. С.* Основы диагностики нарушений системы гемостаза / З. С. Баркаган, А. П. Момот. – М.: Ньюдиамед-АО, 1999. – 224 с.

2. *Барашнев, Ю. И.* Перинатальная неврология / Ю. И. Барашнев. – Москва: Триада-Х, 2001. – 640 с.

3. *Момот, А. П.* Способ контроля эффективности заместительной терапии ДВС-синдрома / А. П. Момот, А. Н. Мамаев, З. С. Баркаган // Клиническая лабораторная диагностика. – № 9. – 2002. – С. 27–28.

4. *Алексеева, Л. А.* ДВС-синдром / Л. А. Алексеева, А. А. Рагимов. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2010. – 120 с.

5. *Hecht-Nielsen, R.* 1987a. Counterpropagation networks. In Proceedings of the IEEE First International Conference on Neural Networks, eds. M. Caudill and C. Butler, vol. 2, pp. 19–32. San Diego, CA: SOS Printing.

6. Саймон Хайкин Нейронные сети: полный курс = Neural Networks: A Comprehensive Foundation. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2006. – С. 1104.

7. A. D. Anastasiadis, G. D. Magoulas und M. N. Vrahatis: New globally convergent training scheme based on the resilient propagation algorithm. Neurocomputing 64, 253–270, 2005.

8. Elisseeff, A., and Paugam-Moisy, H. (1997), «Size of multilayer networks for exact learning: analytic approach». Advances in Neural Information Processing Systems 9, Cambridge, MA: The MIT Press, pp. 162–168.

9. Norsalini Salim: Medical diagnosis using neural networks, Faculty of Information Technology, University Utara Malaysia, Sintok, Kedah, 2004.

10. *Гергет, О. М.* Решение актуальных медицинских задач математическими методами / О. М. Гергет, В. А. Кочегуров // LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, LAP, 2012, 1–145.

УДК 629.1.03

А. В. Леонард

ЦИКЛОВЫЙ ШАГАЮЩИЙ ДВИЖИТЕЛЬ С НАПРАВЛЯЮЩИМИ. СВОЙСТВА. УПРАВЛЕНИЕ. ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ*

Волгоградский государственный технический университет

Alex-Leonard@yandex.ru

Рассматриваются варианты конструкций шагающих движителей на базе циклового шагающего механизма с направляющей. Исследуются способы управления шагающей машиной при движении вдоль прямой линии. Анализируются пути совершенствования циклового шагающего движителя с направляющими.

Ключевые слова: цикловой движитель с направляющей, управление шагающей машиной, моделирование движения, уравнения Лагранжа.

A. V. Leonard

CYCLE WALKING PROPELLER WITH DIRECTINGS. PROPERTIES. CONTROL. WAYS OF UPGRADE

Volgograd State Technical University

Variants of constructions of walking propeller on base cyclic walking mechanism with directing has been considered. Control methods of walking machine moving along a straight line has been investigated. Ways of upgrade of cycle walking propeller with directing has been analyzed.

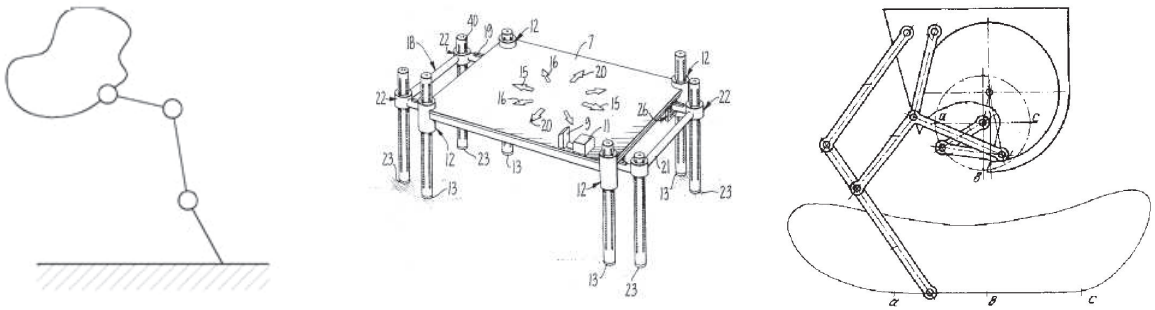
Keywords: cycle walking propeller with directing, control of walking machine, modeling of motion, equation of Lagrange.

Введение

Опыт по созданию транспортно-технологических комплексов с шагающим принципом перемещения показывает, что можно выделить следующие активно формирующиеся направления шагающей техники: экзоскелитоны, антропоморфные роботы, шагающие транспортно – технологические машины и др.

Существует несколько типов шагающих движителей, отличающихся друг от друга числом управляемых степеней подвижности: в виде разомкнутых кинематических цепей, ортогональные, цикловые и др. (рис. 1).

Для машины грунтовой проходимости типа «Восьминог» использование цикловых движителей предпочтительно. Управление цикловым движителем реализуется одним приводом, а энергозатраты на поддержание веса машины могут быть сведены к минимуму определенным законом движения корпуса [1–4].



а *б* *в*

Рис. 1. Виды шагающих движителей:
а – разомкнутая кинематическая цепь; *б* – ортогональный; *в* – цикловой

Особенности механизмов. Управление шагающей машиной при движении вдоль прямой линии

Отличительными особенностями циклового механизма Чебышева – Умнова, применяемого в шагающей машине «Восьминог», являются: отсутствие прямолинейной фазы у траектории стопы, неравномерность горизонтальной скорости движения машины и др.

В результате параметрического синтеза был получен цикловый шагающий механизм с направляющей (рис. 2) [4–6]. Механизм реализует прямолинейную опорную фазу стопы с минимальным количеством звеньев.

* Работа поддержана РФФИ (проект № 11-08-00955, 12-08-31375, 12-01-31398).

Рис. 2. Механизм Чебышева–Умнова / механизм с направляющей

В новом механизме также удалось улучшить значимые для управления шагающей машиной параметры (см. таблицу).

Сравнительный анализ механизмов

№	Критерий оценки	Механизм Чебышева – Умнова	Механизм с направляющей
1.	H/r	0,434	1,61
2.	B / r	0,75	2,16
3.	Δ / r	0,21	0
4.	$H_{г.} / r$	3,56	2
5.	M / m_1	7,94	5,57
$\omega = \text{const}\ (\omega = 1\ \text{рад/с})$			
6.	V_{max} / V_{min}	3,33	2,87

Здесь где r – радиус кривошипа; H – высота подъема стопы в процессе движения; B – клиренс шагающей машины; Δ – высота подъема центра масс корпуса робототехнического комплекса; $H_{г.}$ – вертикальный габаритный размер частей механизма, расположенных на корпусе механизма, в процессе его работы; m_1 – масса кривошипа; M – неуравновешенная масса подвижных частей механизма (без учета массы стопы и с одинаковой плотностью распределения массы по всем звеньям); ω – угловая скорость кривошипа; V_{max}, V_{min} – максимальная и минимальная горизонтальные скорости движения робототехнического комплекса за период работы механизма.

В синтезированном механизме фаза переноса стопы превосходит фазу опоры (по углу кривошипа) более чем в шесть раз. Попытаться достичь одинаковой продолжительности фазы опоры и фазы переноса по времени (отсутствия вертикальных перемещений корпуса машины) можно, как и в машине «Восьминог», сдваиванием механизмов (рис. 2) в один движитель, но при условии, что механизмы лишены кинематической связи между собой.

Решить поставленную задачу возможно установкой между полуосями кривошипов симметричного дифференциала (рис. 3) [7–9]. Продолжительность фазы опоры и фазы переноса (по углу) определяется специальным блокирующим дифференциал устройством.

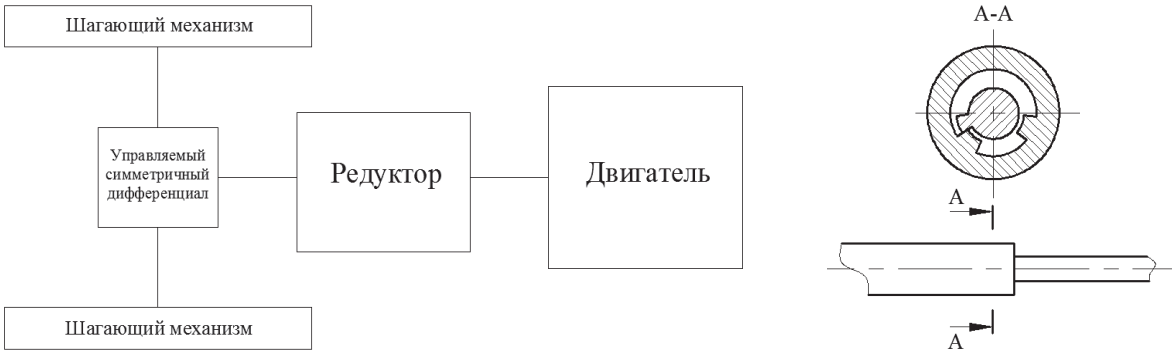


Рис. 3. Установка дифференциала / блокирующее устройство

Системы уравнений, описывающие динамику машины, принимают вид (поступательное – прямолинейное движение):

дифференциал блокирован

$$x-a-l\cdot n+F(\varphi_1)=0:\lambda,\ x_1-a-l\cdot n=0:\lambda_1,\ x_2-a-l\cdot n+F(\varphi_1)-F(\varphi_1-\Delta\varphi)=0:\lambda_2,$$
$$M\frac{d^2x}{dt^2}=-Q+\lambda,\ m\frac{d^2x_1}{dt^2}=\lambda_1=0,\ m\frac{d^2x_2}{dt^2}=\lambda_2; \qquad (1)$$

дифференциал разблокирован

$$x-a-l\cdot n+F(\varphi_2)=0:\lambda,\ x_1-a-l\cdot n+F(\varphi_2)-F(\varphi_1)=0:\lambda_1,\ x_2-a-l\cdot n=0:\lambda_2$$
$$M\frac{d^2x}{dt^2}=-Q+\lambda,\ m\frac{d^2x_1}{dt^2}=\lambda_1,\ m\frac{d^2x_2}{dt^2}=\lambda_2=0,\ 0=M_{кр.}-2\lambda_3,\ 0=-\frac{dF(\varphi_1)}{d\varphi_1}\lambda_1+\lambda_3, \qquad (2)$$
$$0=\frac{dF(\varphi_2)}{d\varphi_2}\lambda+\frac{dF(\varphi_2)}{d\varphi_2}\lambda_1+\lambda_3.$$

Условия перехода от одной группы уравнений к другой:

1) от (1) к (2) – $\varphi_1(\varphi_2)=\varphi_{K_2}+2\pi m,\ m=1,2,3,...$;

2) обратный переход – $|\varphi_1-\varphi_2|=\Delta\varphi$ *и* $\varphi_{K_1}+2\pi m\le\varphi_{оп}\le\varphi_{K_2}+2\pi m,\ m=1,\ 2,\ 3...$

Здесь M, m – масса корпуса машины и масса шагающего механизма; x, x_1, x_2 – абсолютные горизонтальные координаты корпуса машины массы M и опорных точек шагающих механизмов массы m; a, l, k, n – начальное положение опорной ноги (нога входит в опорную фазу при заблокированном дифференциале), длина шага, номера шагов; λ, λ_1, λ_2, λ_3 – неопределенные множители Лагранжа; φ, φ_1, φ_2 – обобщенная координата корпуса дифференциала и обобщенные координаты полуосей дифференциала; $\Delta\varphi$ – сдвиг фаз двух механизмов; φ_{K_1}, φ_{K_2} – углы, соответствующие точкам входа и выхода из опорной фазы; $\varphi_{оп}$ – угол, определяющий положение механизма, находящегося в опорной фазе; F – передаточная функция, определяющая голономные стационарные связи между двигателем и рассматриваемыми телами; $M_{кр}$, Q – крутящий момент, подводимый на корпус дифференциала, и сила сопротивления движению машины. Из численного моделирования движения машины следует: в процессе перемещения шагающей опоры продолжительность блокировки дифференциала (по времени) неодинакова (рис. 4). Введение дифференциала не устраняет удары, обусловленные разностью горизонтальных скоростей стоп механизмов на входе и выходе из опорной фазы.

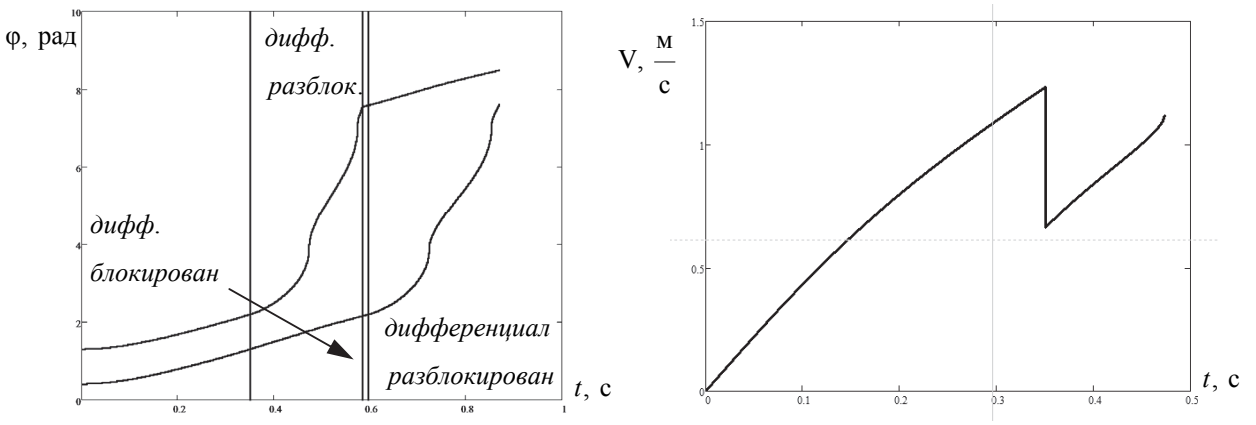


Рис. 4. Функционирование дифференциала / линейная скорость корпуса машины

Для гарантии отсутствия вертикальных колебаний корпуса и исключения неравномерности горизонтальной скорости машины необходима система управления.

С целью упрощения регулирования движителя предлагается согласованное управление механизмов (без дифференциала) двумя двигателями, установленными на полуосях кривошипов (рис. 5).

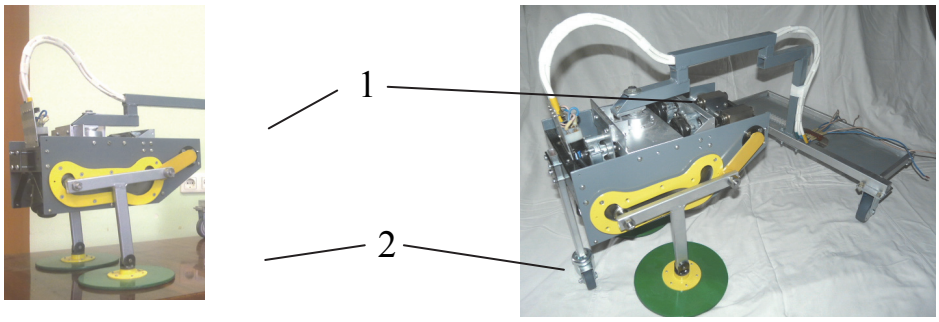


Рис. 5. Физическая модель шагающей машины с циклово-поворотным движителем:
1 – поддерживающая рама; *2* – шагающий движитель

Динамика курсового, поступательного вдоль горизонтальной оси, движения шагающей машины с циклово-поворотными движителями может быть описана системой уравнений:

$$(M+m)\ddot{x}_1 + m\ddot{x}_2 = -P + \lambda_1, m\ddot{x}_1 + m\ddot{x}_2 = $$

$$= \lambda_2, 0 = L_1 + \lambda_1 \frac{\partial \Pi_1}{\partial \alpha_1}, 0 = L_2 - \lambda_2 \frac{\partial \Pi_2}{\partial \alpha_2}. \quad (3)$$

Здесь x_1 – горизонтальная координата оси вращения кривошипа в абсолютной системе координат; x_2 – горизонтальная координата центра масс системы «шатун – стопа» относительно оси кривошипа, для переносимого механизма шагания; α_1 – угловая координата кривошипа для механизма, находящегося в опоре; α_2 – угловая координата кривошипа для механизма, находящегося в переносе; λ_j – неопределенные множители Лагранжа, $M = M_1 + 2m_1$; $m = m_2 + m_3$; M_1 – масса корпуса машины; m_1 – масса кривошипа; m_2 – масса шатуна; m_3 – масса стопы; P – сила сопротивления, приложенная к корпусу шагающей машины; L_1 – момент, развиваемый двигателем, обеспечивающим движение машины; L_2 – момент, развиваемый двигателем, обеспечивающим перенос механизма шагания; $\Pi_1(\alpha_1)$ – функции положения стопы относительно оси вращения кривошипа, $\Pi_2(\alpha_2)$ – функции положения центра масс системы «шатун – стопа» относительно оси вращения кривошипа. Программные законы, обеспечивающие отсутствие вертикальных перемещений корпуса, неравномерность горизонтальной скорости машины и минимизирующие инерционные нагрузки, представлены на рис. 6. Изменения скачком управляющих воздействий реализуемы с высокой степенью точности при современном уровне развития элементной базы цифровых систем управления.

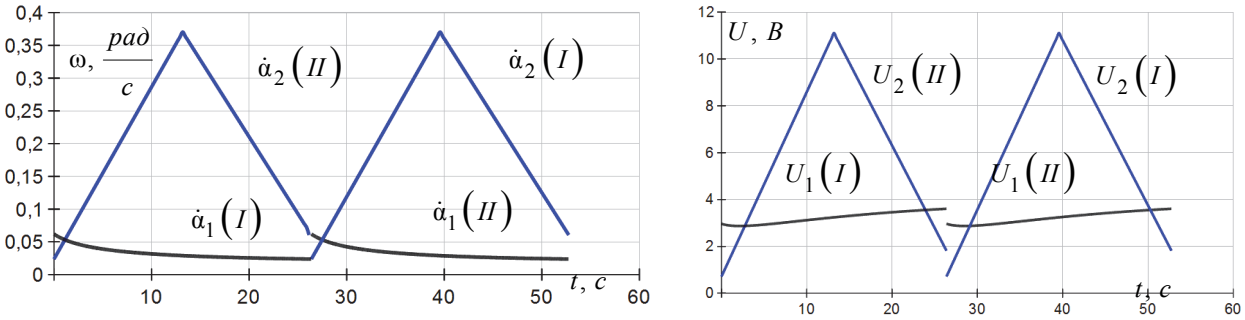
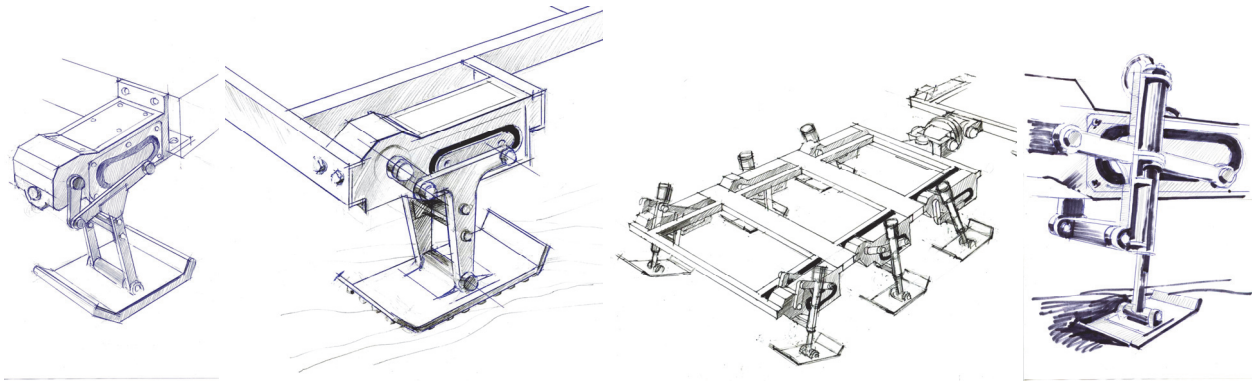


Рис. 6. Курсовое движение шагающей машины: $V_к = 0{,}007$ м; $M = 21$ кг; $m = 0{,}4$ кг; $\gamma_1 = 5{,}1$ $Н \cdot м/В$; $\gamma_2 = 153$ кг×м²/с – параметры двигателей постоянного тока; $P = 50$ Н; обозначение I, II – шагающие механизмы

Совершенствование

Для обеспечения большей жесткости конструкции (рис. 7, *а*) механизм может быть модифицирован путем дублирования звеньев и жестким соединением шатунов между собой. Установка электроцилиндра (рис. 7, *г*), шарнирно связанного со стопой, на дублированном шатуне позволит повысить адаптивные свойства движителя – проходимость шагающего транспортного средства.



а *б* *в* *г*

Рис. 7. Пути совершенствования шагающей машины:
а – увеличение жесткости; *б* – модульность; *в* – полиопорность; *г* – адаптивность

Унифицированность и модульность (рис. 7, *б*) шагающих движителей улучшает ремонтопригодность шагающей машины и дает возможность переконфигурировать расположение движителей под конкретную задачу. Применение многодвижительной схемы (рис. 7, *в*) с дублированными звеньями и электроцилиндрами на шагающем транспортно-технологическом средстве позволит преодолевать препятствия, сопоставимые с размерами машины.

Заключение

Таким образом, двухдвигательное управление шагающими механизмами цикловоповоротного движителя (рис. 5) позволяет полностью решить заду об устранении вертикальных перемещений корпуса и неравномерности горизонтальной скорости машины, при движении вдоль прямой линии. Эволюционный подход: «от простого к сложному», при создании и исследовании шагающей машины (движителя), как технической системы, дает возможность выявить значимые свойства и выбрать направление дальнейших исследований. На основе этого подхода – анализа путей совершенствования – выработана новая конструкция движителя. Конструкция представляет собой цикловоповоротный движитель с жестко закрепленными на шатунах электроцилиндрами (рис. 7, *г*).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Опыт разработки и испытаний шагающих опор дождевальной машины / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, В. В. Жога, А. В. Малолетов // Тракторы и сельхозмашины. – 2011. – № 9. – С. 27–31.

2. *Брискин, Е. С.* Об управлении движением шагающей машины с двигателем минимальной мощности / Е. С. Брискин, В. В. Жога, А. В. Малолетов // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2009. – № 6. – С. 21–30.

3. Концепция проектирования шагающих машин / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, В. В. Жога, А. В. Малолетов, Н. Г. Шаронов, Н. Е. Фролова // Наука – производству. – 2005. – № 1. – С. 33.

4. *Калинин, Я. В.* Оценка энергетической эффективности шагающих машин с цикловыми движителями / Я. В. Калинин // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 12 (60) / ВолгГТУ. – 2009. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 7). – С. 40–44.

5. *Брискин, Е. С.* Синтез циклового шагающего механизма с направляющей и критерии его оценки / Е. С. Брискин, А. В. Леонард, А. В. Малолетов // Теория Механизмов и Машин. – 2011. – № 1(17). – Т. 9. – С. 14–24.

6. Пат. 2422317 РФ, МПК B 62 D 57/032. Шагающая опора для многоопорных самоходных машин и для транспортных средств повышенной проходимости / А. В. Леонард, Е. С. Брискин. – 2011.

7. *Леонард, А. В.* Цикловый шагающий механизм с направляющей / А. В. Леонард // Известия высших учебных заведений. – М.: Машиностроение. – 2011. – № 10. – С. 18–22.

8. *Брискин, Е. С.* Дифференциальный привод цикловых шагающих движителей / Е. С. Брискин, А. В. Леонард // Прогресс транспортных средств и систем : мат-лы Междунар. науч.-практ. конф. – В 2 ч. Ч. 2 / Волгоград. гос. техн. ун-т. – С. 173–174.

9. *Брискин, Е. С.* Об управлении походкой шагающей машины «восьминог» / Е. С. Брискин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № S5. – С. 6–10.

10. О статически устойчивой походке шагающей машины с тремя сдвоенными ортогонально-поворотными движителями / Е. С. Брискин, А. В. Малолетов, А. М. Колесов, В. А. Серов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. – № 7. – С. 22–27.

УДК 629.1.03

А. В. Леонард, Е. С. Брискин

ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ ШАГАЮЩЕЙ МАШИНЫ С ПОВОРОТНЫМ ДВИЖИТЕЛЕМ, ОБРАЗОВАННЫМ СДВОЕННЫМИ МЕХАНИЗМАМИ ШАГАНИЯ*

Волгоградский государственный технический университет
Alex-Leonard@yandex.ru

Рассматривается математическая модель кинематики шагающей машины с поворотным движителем. Исследуется метод безударного движения шагающей машины. Проводится численное моделирование режимов движения машины.

Ключевые слова: шагающий циклово-поворотный движитель, шагающая машина, моделирование кинематики движения.

A. V. Leonard, E. S. Briskin

MOTIONS CHARACTERISTICS OF WALKING MACHINE WITH TURNING PROPELLER FORMED BY DUAL WALKING MECHANISMS

Volgograd State Technical University

Kinematics mathematical model of walking machine with rotating propeller has been considered. Method of non-impact movement of the walking machine has been investigated. Numerical simulation motions modes of machine has been carried.

Keywords: walking cycle-rotating propeller, walking machine, modeling kinematics.

Введение

Известны шагающие машины со сдвоенными механизмами шагания (рис. 1, 2) [1].

Отличительным свойством данных типов машин является наличие ударов в процессе их перемещения, обусловленных конструктивными особенностями шагающих движителей: один привод поворота – на пару сдвоенных механизмов шагания [2–5].

Для изучения кинематики шагающего движителя, образованного сдвоенными цикловыми механизмами с направляющей [6–9], рассматривается шагающая машина, состоящая из одного движителя, который соединен посредством привода поворота с поддерживающей рамой (рис. 2). Кинематическая схема машины представлена на рис. 3.

Рис. 1. Шагающая машина «Ортоног»

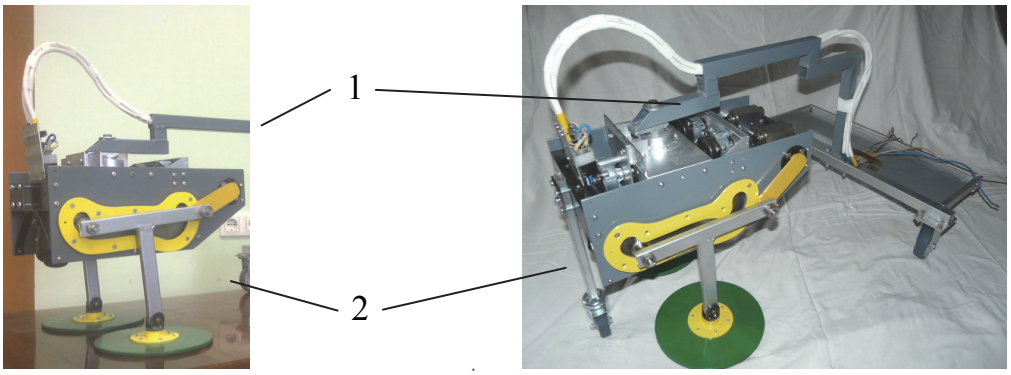


Рис. 2. Физическая модель шагающей машины с поворотно-цикловым движителем:
1 – поддерживающая рама; *2* – шагающий движитель

* Работа поддержана РФФИ (проект № 11-08-00955, 12-08-31375, 12-01-31398).

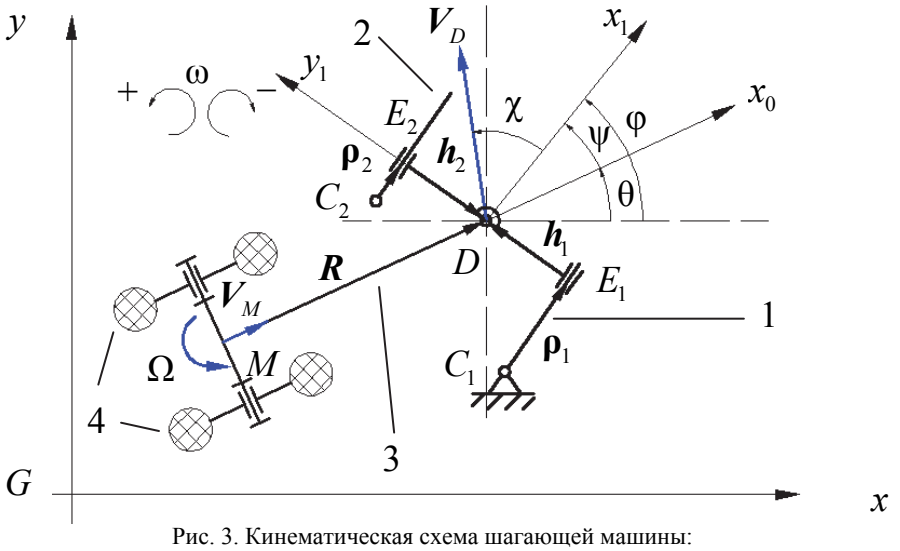


Рис. 3. Кинематическая схема шагающей машины:
1, 2 – шагающие механизмы; *3* – корпус; *4* – неуправляемые колеса

Постановка задачи

Определить управляемые законы (прямая задача) перемещения движителя $\dot{\psi}, \dot{\rho}$ для следующего способа задания движения корпуса шагающей машины (1):

$$\left\{V_M = V_M[t];\ \Omega = \Omega[t]\right. \qquad (1)$$

и выработать методы и подходы управления, минимизирующие ударные нагрузки приводов машины.

Моделирование

В соответствии с рис. 3:

$$\boldsymbol{V}_D = \boldsymbol{V}_M + \boldsymbol{\Omega} \times \boldsymbol{R}, \qquad (2)$$

где ψ – угол между осями x_0 и x_1; ρ – расстояние между точками $C_{1(2)}$ и $E_{1(2)}$; V_M – скорость точки M; Ω – угловая скорость корпуса шагающей машины; R – расстояние между точками M и D.

При осуществлении разложения (2) по базису абсолютной системы координат XYG (рис. 3), получаются следующие равенства, которые позволяют определить модуль скорости $\boldsymbol{V}_D$:

$$\left\{V_{Dx} = V_M \cos(\theta) - \Omega R \sin(\theta);\right.$$
$$V_{Dy} = V_M \sin(\theta) + \Omega R \cos(\theta), \qquad (3)$$

где θ – угол между осями x_0 и x.

Для механизмов *1*(*2*) во время нахождения одного из двух в опоре справедливо следующее векторное соотношение:

$$\boldsymbol{V}_D = \dot{\rho}\boldsymbol{e}_\rho + \dot{\boldsymbol{\varphi}} \times \boldsymbol{\rho} + \dot{\boldsymbol{\varphi}} \times \boldsymbol{h}, \qquad (4)$$

где $\boldsymbol{\varphi}$ – вектор абсолютной угловой скорости движителя относительно точки $C_{1(2)}$; $\boldsymbol{\rho}$ – вектор между точками $C_{1(2)}$ и $E_{1(2)}$; $\boldsymbol{h}$ – вектор между точками $E_{1(2)}$ и D; $\boldsymbol{e}_\rho$ – единичный вектор вектора $\boldsymbol{\rho}$.

Проецирование уравнений (4) на подвижные оси координат x_1, y_1, связанные с корпусом шагающего движителя, позволяет получить дифференциальные уравнения (5), описывающие кинематику шагающей машины, когда в опоре находится один из механизмов.

$$\begin{cases} \dot{\rho} = \sqrt{V_M^2 + \Omega^2 R^2}\cos\left(\vartheta - \psi - \int \Omega dt - \theta_0\right) \pm \Omega h \pm \dot{\psi} h; \\ \dot{\psi} = \dfrac{1}{\rho}\sqrt{V_M^2 + \Omega^2 R^2}\sin\left(\vartheta - \psi - \int \Omega dt - \theta_0\right) - \Omega, \end{cases} \qquad (5)$$

где ϑ – угол, задающий ориентацию вектора скорости $\boldsymbol{V}_D$ относительно оси x. Для определения вида функции $\vartheta = \vartheta[t]$ используется пара направляющих косинусов:

$$\cos(\vartheta) = \left[V_M \cos\left(\int \Omega dt + \theta_0\right) - \Omega R \sin\left(\int \Omega dt + \theta_0\right)\right] / \sqrt{V_M^2 + \Omega^2 R^2};$$
$$\cos(\pi/2 - \vartheta) = \left[V_M \sin\left(\int \Omega dt + \theta_0\right) + \Omega R \cos\left(\int \Omega dt + \theta_0\right)\right] / \sqrt{V_M^2 + \Omega^2 R^2}.$$

В зависимости от сочетания знаков направляющих косинусов функция ϑ может принимать четыре различные формы, отличающиеся знаком и константной частью. Переход от системы дифференциальных уравнений (5) со знаком «+» к дифференциальным уравнениям со знаком «–» и обратно осуществляется при выполнении логических условий: $\rho = \rho_{min}$ $\rho = \rho_{max}$. Начальное значение ρ на новом шаге машины определяется согласно условиям:

$$\cos(\chi) \geq 0 : \rho^0 = \rho_{min};\ \cos(\chi) < 0 : \rho^0 = \rho_{max},$$

где χ – угол между вектором $\boldsymbol{V}_D$ и осью x_1. Анализ вида уравнений (5) показывает, что в момент переступания величины $\dot{\psi}, \dot{\rho}$ изменяются скачком.

Результаты расчета

Для представленной совокупности уравнений (5) проведен расчет режима движения шагающей машины: $V_M = 0{,}05$ м/с; $\Omega = 0{,}02$ рад/с (рис. 4–6). Параметры машины: $h = 0{,}2$ м; $R = 1$ м; $\rho_{min} = 0{,}2$ м; $\rho_{max} = 0{,}6$ м.

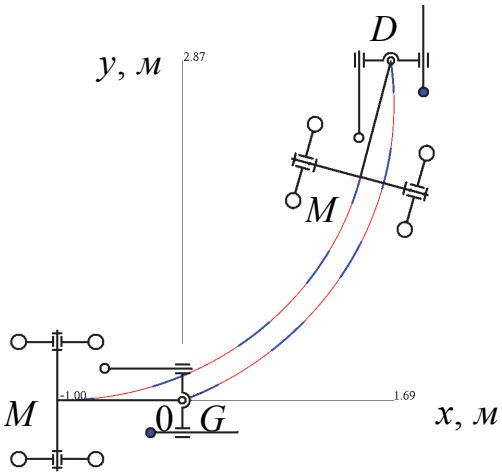


Рис. 4. Поворот шагающей машины

Чередование темных и светлых участков на графиках отражает попеременную работу шагающих механизмов *1* и *2* (см. рис. 3).

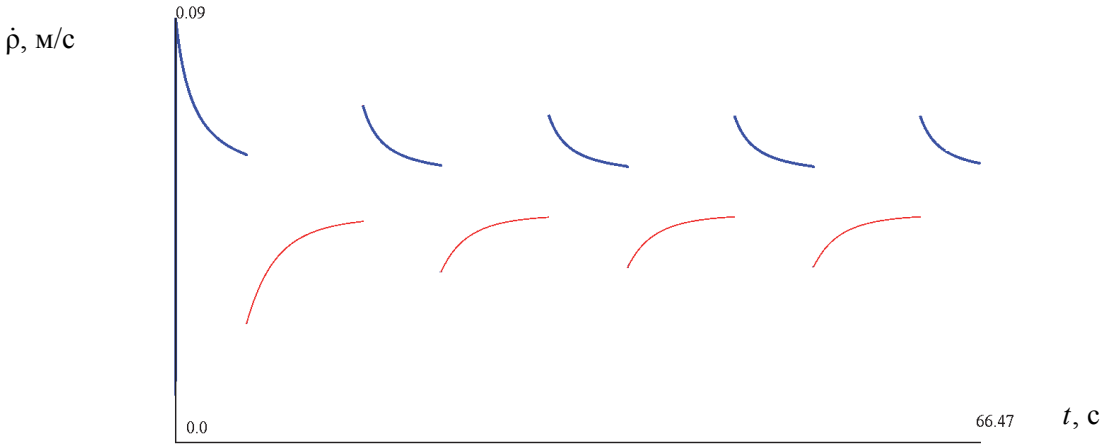


Рис. 5. График функции $\dot{\rho} = \dot{\rho}(t)$ для режима: $V_M = 0{,}05$ м/с; $\Omega = 0{,}02$ рад/с

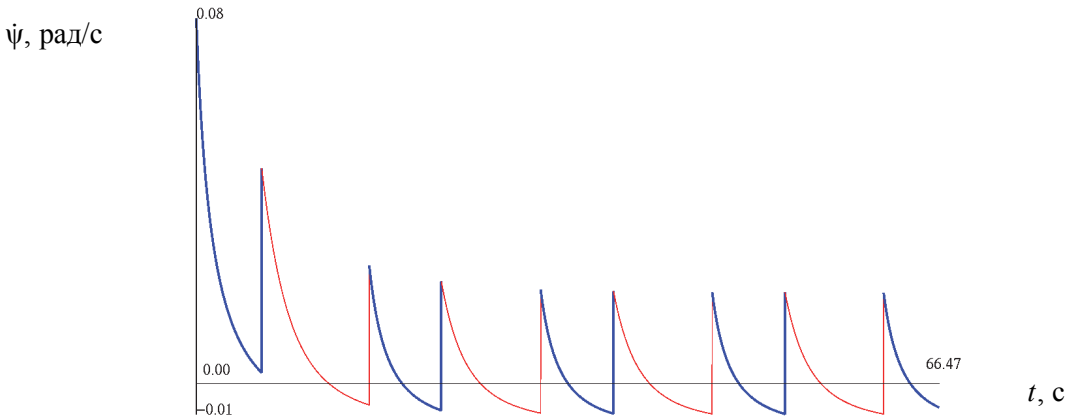


Рис. 6. График функции $\dot{\psi} = \dot{\psi}(t)$ для режима: $V_M = 0{,}05$ м/с; $\Omega = 0{,}02$ рад/с

Ограничения

В момент переступания необходимо выполнение системы равенств:

$$\begin{cases}\dot{\varphi}_1\rho_1 = \dot{\varphi}_2\rho_2, \\ \dot{\rho}_1 + \dot{\varphi}_1 h = \dot{\rho}_2 - \dot{\varphi}_2 h.\end{cases} \quad (7)$$

В противном случае возникают удары в приводах (рис. 5, 6). В момент переступания $\rho_1 \neq \rho_2$, следовательно, для соблюдения первого условия системы (7) необходимо и достаточно, что бы $\dot{\varphi}_2 = \dot{\varphi}_1\rho_2/\rho_2$ или $\dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi}_2 = 0$. На практике, при $\dot{\varphi}_1 \neq \dot{\varphi}_2$, это означает:

$$\ddot{\varphi} \to \infty \Rightarrow M \to \infty,$$

где M – момент привода поворота, что недостижимо. Попытка реализовать подобный режим работы поворотного привода приведет к возникновению в нем нагрузок ударного характера, значительных линейных и угловых ускорений корпуса шагающей машины и, как следствие, – к искажению задаваемых законов перемещения корпуса. Соответственно для безударного режима движения шагающей машины в момент переступания движитель должен совершать мгновенно поступательное движение:

$$\begin{cases}\dot{\rho}_1 = \dot{\rho}_2; \\ \dot{\varphi} = 0.\end{cases} \quad (8)$$

Обратная задача

Пусть между моментами смены опорных стоп движителя поворотный привод работает по закону, удовлетворяющему системе (8):

$$\dot{\varphi} = \begin{cases}\varepsilon t, 0 \le t \le \tau/2; \\ \omega\left(t = \tau/2\right) - \varepsilon\left(t - \tau/2\right), \tau/2 \le t \le \tau.\end{cases} \quad (9)$$

Данный вид закона изменения абсолютной угловой скорости – $\dot{\varphi}$ обеспечивает минимум энергозатрат, идущих на разгон – торможение движителя, обусловленный работой поворотного привода, где τ – время работы 1(2) механизма; ε – угловое ускорение привода поворота.

Решая обратную задачу $\boldsymbol{V}_M = \boldsymbol{V}_D - \boldsymbol{\Omega} \times \boldsymbol{R}$ (10) для режима движения шагающей машины:

$$\dot{\varphi} = \begin{cases}0{,}025t, 0 \le t \le \tau/2 \\ \omega\left(t = \tau/2\right) - 0{,}025\left(t - \tau/2\right), \tau/2 \le t \le \tau\end{cases} \text{ рад/с;}$$

$$\dot{\rho} = 0{,}05 \text{ м/с;}$$

$$\tau = \left(\rho_{max} - \rho_{min}\right)/\dot{\rho}, \text{ с,}$$

при тех же параметрах машины, получаются следующие характеристики приводов шагающей машины (рис. 7, 8):

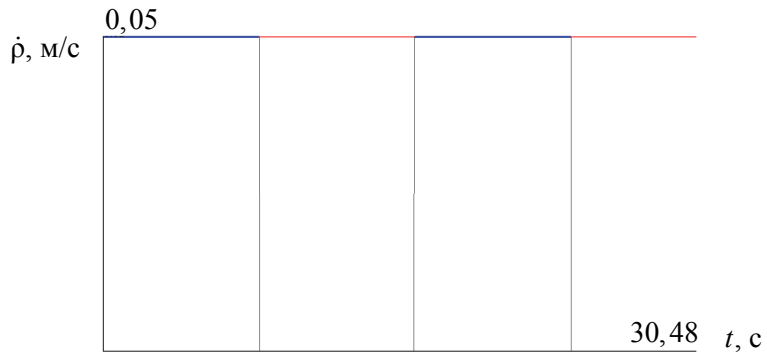


Рис. 7. График функции $\dot{\rho} = \dot{\rho}(t)$ для безударного режима движения

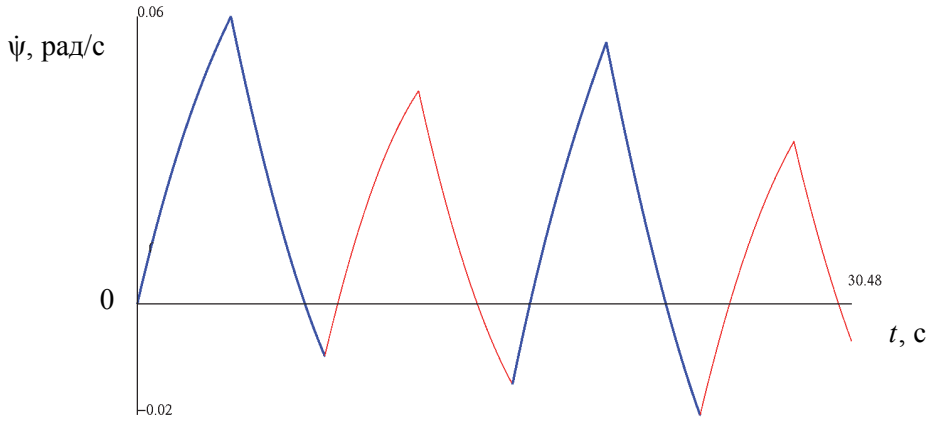


Рис. 8. График функции $\dot{\psi} = \dot{\psi}(t)$ для безударного режима движения

Траектории характерных точек шагающей машины представлены на рис. 9.

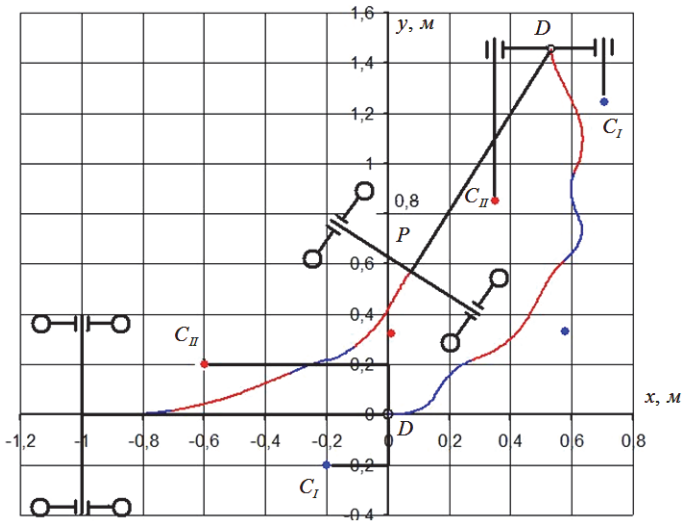


Рис. 9. Безударный поворот шагающей машины

Для безударного поворота линейная скорость точки M и угловая скорость корпуса (рис. 10, 11) изменяются с переменными по знаку ускорениями.

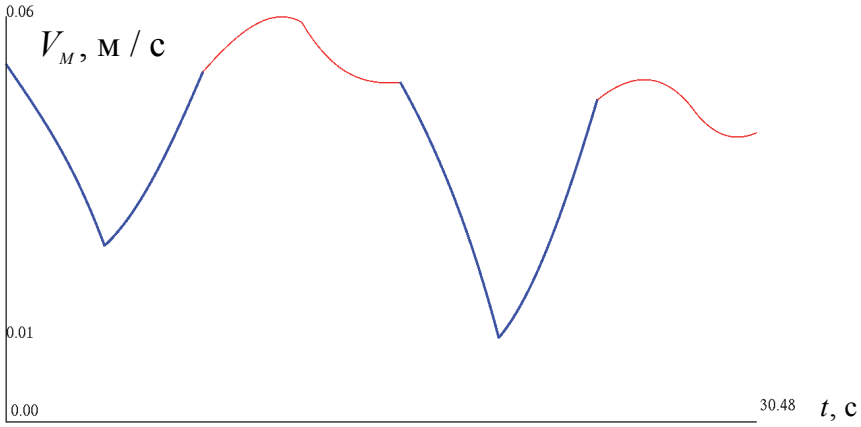


Рис. 10. График функции $V_M = V_M(t)$ для безударного режима движения

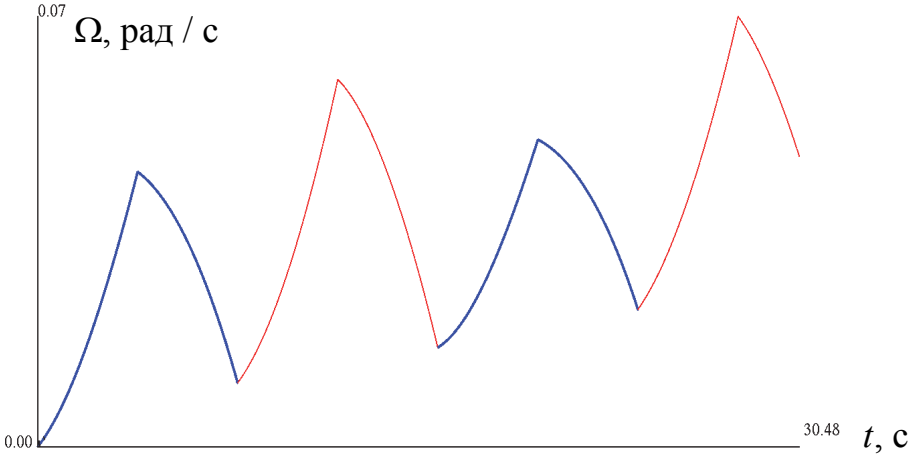


Рис. 11. График функции $\Omega = \Omega(t)$ для безударного режима движения

Заключение

Как было установлено выше, управление через задание движения характерной точки (1) приводит к противоречию условиям безударности (8). При реализации подхода (10) безударного режима движения шагающей машины (9) траектория характерной точки является формируемой (рис. 7). Соблюдение точности позиционирования машины и ее энергоэффективности потребует выработки иного управления. В частности, таким управлением может являться «дискретное»: чередование поворотов корпуса и прямолинейных перемещений характерной точки шагающей машины.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Опыт разработки и испытаний шагающих опор дождевальной машины / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, В. В. Жога, А. В. Малолетов // Тракторы и сельхозмашины. – 2011. – № 9. – С. 27–31.

2. *Брискин, Е. С.* Об управлении движением шагающей машины с двигателем минимальной мощности / Е. С. Брискин, В. В. Жога, А. В. Малолетов // Известия РАН. Механика твердого тела. – 2009. – № 6. – С. 21–30.

3. Опыт разработки и испытаний шагающих опор дождевальной машины / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, В. В. Жога, А. В. Малолетов // Тракторы и сельхозмашины. – 2011. – № 9. – С. 27–31.

4. Пат. 2063354 РФ, МПК B 62 D 57/032. Шагающая опора для транспортных средств повышенной проходимости / Е. С. Брискин, А. Е. Русаковский, А. М. Арзамасков, В. В. Чернышев.

5. Пат. 223957 РФ, МПК B 62 D 57/032. Шагающая опора для транспортных средств повышенной проходимости / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, А. В. Тельдеков. – 2003.

6. *Брискин, Е. С.* Синтез циклового шагающего механизма с направляющей и критерии его оценки / Е. С. Брискин, А. В. Леонард, А. В. Малолетов // Теория Механизмов и Машин. – 2011. – № 1(17). – Т. 9. – С. 14–24.

7. Пат. 2422317 РФ, МПК B 62 D 57/032. Шагающая опора для многоопорных самоходных машин и для транспортных средств повышенной проходимости / А. В. Леонард, Е. С. Брискин. – 2011.

8. *Леонард, А. В.* Цикловый шагающий механизм с направляющей / А. В. Леонард // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2011. – № 10. – С. 18–22.

9. *Калинин, Я. В.* Оценка энергетической эффективности шагающих машин с цикловыми движителями / Я. В. Калинин // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 12(60) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 7). – С. 40–44.

УДК: 004.4'233

Н. О. Олифер, О. А. Сычёв

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ СТРУКТУР ДАННЫХ ОТЛАЖИВАЕМЫХ ПРОГРАММ И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ ОБУЧЕНИИ РАБОТЕ С ДИНАМИЧЕСКИМИ СТРУКТУРАМИ ДАННЫХ НА ЯЗЫКЕ С++

Волгоградский государственный технический университет

onoliferon@gmail.com, oasychev@gmail.com

В статье описан визуализатор состояния программ на языке С++ и его применение в учебном процессе при изучении темы «Динамические структуры данных». Разработанная программа визуализирует структуру данных программы на языке С++, отлаживаемой в Microsoft Visual Studio. Структура данных представляется в виде графа, в котором переменные и области динамической памяти выступают узлами, а указатели и ссылки – дугами. Визуализатор использовался в учебном процессе кафедры ПОАС по дисциплине «Программирование» (направление «Программная инженерия», 2-й курс, 3-й учебный семестр).

Ключевые слова: программирование, отладка, визуализация, граф, состояние программы.

N. O. Olifer, O. A. Sychev

VISUALIZATION OF DEBUGGED PROGRAM INTERNAL DATA AND ITS APPLICATION TO TEACHING DYNAMIC DATA STRUCTURES IN C++ LANGUAGE

Volgograd State Technical University

The paper describes software for program internal data visualization and its application in teaching dynamic data structures. Developed program visualizes data structure of the program on C++ language using Microsoft Visual Studio Debugger. Data structure is visualized as a graph. In this graph variables and dynamically allocated memory areas are nodes, pointers and references are edges. The program was used by Software Engineering department of the Volgograd State Technical University in the «Programming» course (specialty «Software Engineering», second grade, third semester).

Keywords: programming, debugging, visualization, graph, program state.

При отладке программ нередко оказывает помощь отображение хода программы в более наглядной, визуальной форме.

Различные виды программных визуализаций используются на стадиях обучения программированию [1] и алгоритмизации [2]. Экс-

перименты [3] показывают, что инструменты визуализации увеличивают мотивацию студентов в процессе обучения, уменьшают количество бросающих обучение программированию. Визуализация может помочь студентам лучше понять написанную ими программу и облегчает поиск ошибок.

Существуют различные подходы к визуализации программ:

– программное управление визуальными исполнителями, выполняющими на экране заданные команды: системы КуМир (комплект учебных миров; наиболее известным исполнителем является робот, перемещающийся по лабиринту) [4]; Scratch, позволяющий управлять двумерными спрайтами [5]; Alice 3D, позволяющая управлять трехмерными графическими объектами [6] и многие другие;

– визуализация состояния (данных) программы – ddd [7], Jeliot [8] и другие – на каждом шаге выполнения программы наглядно показываются значения переменных программы и связи между ними (ссылки, указатели);

– игры, используемые в обучении программированию, также обычно предусматривают различные методы визуализации [9].

Одной из наиболее проблемных тем в курсах начального обучения программированию для студентов является изучение работы с динамическими структурами данных (связными списками, деревьями и т. д.) с использованием указателей (ссылок). При отладке программ, работающих с подобными структурами неудобно проверять корректность данных в памяти при помощи стандартного отладчика, так как для структур, связанных указателями, нужно каждый раз их разворачивать и искать нужную информацию в раскрывшемся многоуровневом дереве. На рис. 1 представлен просмотр односвязного списка из трех элементов в стандартном окне Microsoft Visual Studio (MSVS). В этом случае визуализация состояния программы может оказать значительную помощь в ее понимании и отладке.

Locals

Name	Value	Type
argc	1	int
argv	0x006d1378	wchar_t * *
list	{start=0x006d6d30 end=0x006d6dc0 size=3 }	LinkedList
start	0x006d6d30 {value=1 next=0x006d6d78 }	Node *
value	1	int
next	0x006d6d78 {value=2 next=0x006d6dc0 }	Node *
value	2	int
next	0x006d6dc0 {value=3 next=0x00000000 }	Node *
value	3	int
next	0x00000000 {value=??? next=??? }	Node *
value	CXX0030: Error: expression cannot be evaluated	
next	CXX0030: Error: expression cannot be evaluated	
end	0x006d6dc0 {value=3 next=0x00000000 }	Node *
value	3	int
next	0x00000000 {value=??? next=??? }	Node *
size	3	int

Рис. 1. Просмотр связного списка в окне MS Visual Studio

Наиболее наглядный способ – изображать структуру данных программы в виде графа, где дуги проведены от указателей к данным. Такой граф должен быть оптимально уложен, чтобы адекватно показывать типовые структуры данных, такие как связные списки и деревья.

На очном отделении ВолгГТУ при обучении программированию используется профессиональная среда программирования MS Visual Studio. Использование нескольких средств разработки на младших курсах нежелательно, так как это отвлекает студентов от изучения собственно программы на особенности среды разработки. Поэтому используемый визуализатор должен быть интегрирован со средой Visual Studio. Этого можно добиться либо путем взаимодействия с отладчиком MSVS для получения данных программы в процессе выполнения, либо самостоятельной интерпретацией программы. Поскольку разработка полноценного интерпретатора языка C++ очень сложна, то был выбран первый способ, несмотря на трудности с поиском информации о программном интерфейсе отладчика.

Подобные визуализаторы существуют для многих языков программирования (например, Jeliot [8] и jGRASP для Java), однако реализация их для языка C++ осложняется наличием в нем агрегации данных по значению, что делает возможным создание сложных типов данных путем агрегации объектов и массивов. Поскольку динамические структуры данных на языке C++ нередко агрегируют другие объекты произвольного типа, отображение вложенных элементов также является важным требованием к визуализатору.

Для языка C/C++ существует ряд визуализаторов: ddd, AnyviewC, HDPV, ни один из которых не поддерживает отладчик Microsoft Visual Studio. Визуализатор для операционной системы GNU/Linux – Data Display Debugger (ddd) [7] – обладает широким набором функций, поддерживает многократную агрегацию объектов, но имеет несколько серьезных недостатков. Дуги не проводятся к полям структур – исходящие дуги от указателей в структуре проводятся от прямоугольника всей структуры, а входящие вообще проводятся не к самому полю, а к специально создаваемым вершинам вне структуры, содержащим значение по указателю, что затрудняет интерпретацию изображения студентами. Также пользователь сам должен размещать переменные на изображении, что увеличивает количество рутинной работы пользователя при отладке.

В визуализаторе AnyviewC [10] уделяется большое внимание отображению типовых структур данных (деревья, связные списки), однако он не поддерживает многократную вложенность объектов по значению. Этот визуализатор использует собственную среду разработки (IDE) и имеет закрытый код, что не позволяет его использовать в рассматриваемом случае.

Визуализатор HDPV [11] также не поддерживает многократную агрегацию объектов по значению, не имеет какого-либо алгоритма проведения дуг и всегда проводит их прямыми линиями, что, учитывая используемый физический алгоритм укладки, часто приводит к сложно читаемому изображению, в котором линии часто пересекают объекты. HDPV также имеет закрытый код, что не позволяет его модифицировать.

Авторы работы не смогли ознакомиться с устройством и протестировать визуализаторы AnyviewC и HDPV. Были отправлены письма на электронную почту разработчиков этих программ, однако ответа не последовало.

Поскольку ни один из существующих аналогов не может быть использован напрямую, возникла необходимость в разработке нового визуализатора данных для языка C++, удовлетворяющего указанным выше требованиям.

```
struct type2
{
    int c;
    int a;
    int* arrp[5];
    int field;
    type2* pointers[3];
    int* pp;
};
struct type3
{
    int a;
    int b;
    int* p;
    type2 st;
};
```

```
void test()
{
    type3 structure;
    int* p1;
    int* p3;
    int*** p11;
    int*** p21;
    int*** p31;

    p1 = &structure.a;
    p3 = &structure.st.c;

    int* arr1[5];
    arr1[1] = &structure.a;

    p11 = new int**;
    p21 = p11;
    p31 = p11;
    *p11 = &p1;
    int** d = &arr1[2];
}
```

Рис. 2. Соответствие состояния программы и графа

Для отображения графа, представляющего структуру данных программы, с локальными переменными и областями памяти, на которые они прямо или косвенно ссылаются, необходимо решить задачу укладки графа с минимизацией пересечений. Такой граф может содержать вершины, многократно вложенные в другие вершины, и называется кластерным: т. е.

состоит из графа и рекурсивного разбиения его вершин на подмножества, называемые кластерами [12]. Пример графа, соответствующего состоянию программы со сложными внутренними данными, приведен на рис. 3, исходный код соответствующей программы – на рис. 2.

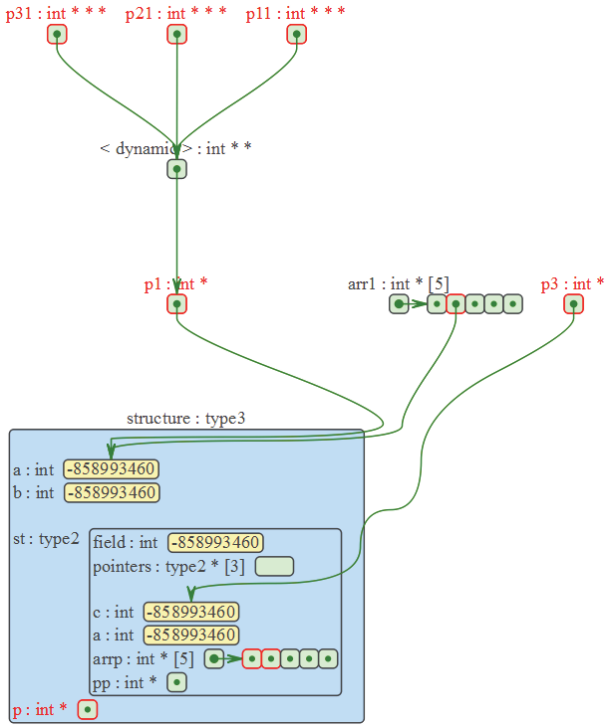


Рис. 3. Граф, построенный по состоянию программы

Получение информации о переменных и их значениях происходит через интерфейс отладчика (в настоящее время MS Visual Studio). Для этого реализован специальный поставщик данных, подключающийся к программе, отлаживаемой в MS Visual Studio, считывающий из нее все данные о состоянии, из которых можно сформировать граф. Информация об адресах и размерах динамически выделенных блоков памяти доступна через вызов специальной функции, производящей дамп памяти. Происходит связывание указателей и их значений: это делается по совокупности типа и адреса объектов. При этом такая особенность C/C++, как указатель типа void*, обрабатывается следующим образом: ищется наименее глубоко вложенный объект с адресом, совпадающим со значением указателя, и к нему проводится дуга от указателя. Другая особенность языка – шаблонные типы – не вызывает сложностей, так как все типы обрабатываются как простые строки.

Далее из данных формируется граф, и к нему применяется алгоритм поуровневой укладки. Укладка по уровням заключается в том, что каждой вершине присваивается число, указывающее уровень, на котором она располагается, так, чтобы все дуги следовали от меньшего номера к большему (рис. 4). При этом необходимо, чтобы дуги соединяли только вершины на соседних уровнях. В случае, когда дуга пересекает несколько уровней, на каждом создается специальная мнимая вершина, и исходная дуга разбивается на несколько, соединяющих эти мнимые вершины (такие вершины на рис. 4 показаны белыми квадратами). Далее вершины на уровнях сортируются для минимизации пересечений, после чего остается только соединить дугами вершины на соседних уровнях.

Алгоритм укладки модифицирован для кластерных графов с учетом различий отображения переменных разных типов. Графы выводятся в специальном окне, с возможностью сворачивания/разворачивания составных элементов (массивов, объектов), что позволяет компактно отображать сложную структуру данных.

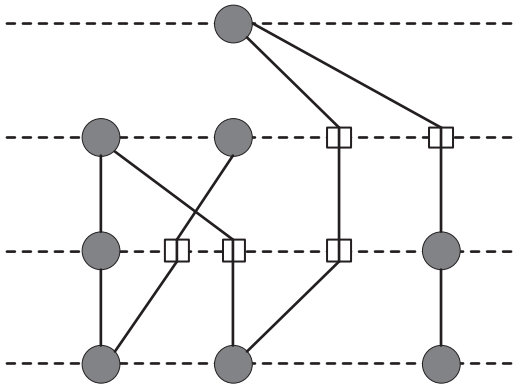


Рис. 4. Принцип поуровневой укладки графа

При укладке кластерного графа были решены следующие проблемы: сортировка вершин на уровнях укладки (с учетом того, что вершина может быть связана с вершинами на разных уровнях вложенности), а также проведение дуг в сложных вершинах, чтобы они не пересекали другие вложенные вершины и дуги.

Для сортировки вершин на уровне используется метод барицентров. Он подразумевает определение координат вершины на уровне как среднего арифметического координат инцидентных ей вершин с соседнего уровня. Однако эти вершины могут быть вложены в другие вершины и находиться в локальных координатах родителей – в данном случае применение исходного метода невозможно. Для этого вершины на всех уровнях (включая вложенные)

предварительно выстраиваются в одну линию в одной системе координат; затем к ним применяется метод барицентров, который выставляет всем вершинам координаты, в соответствии с которыми они сортируются на уровне. После этого вложенные вершины обратно укладываются в координаты родителей, но уже в новом, просчитанном, порядке.

При проведении дуг ко вложенным вершинам они не должны пересекать другие вершины. Для этого для любой вложенной вершины входящие дуги проводятся справа сверху, а исходящие – слева снизу. В этом случае неважно, насколько глубоко вложена вершина, достаточно только определить способ, как продлять дуги от вершин, находящихся внутри, например, структуры, и они будут корректно проводиться для структур на любом уровне вложенности (рис. 5).

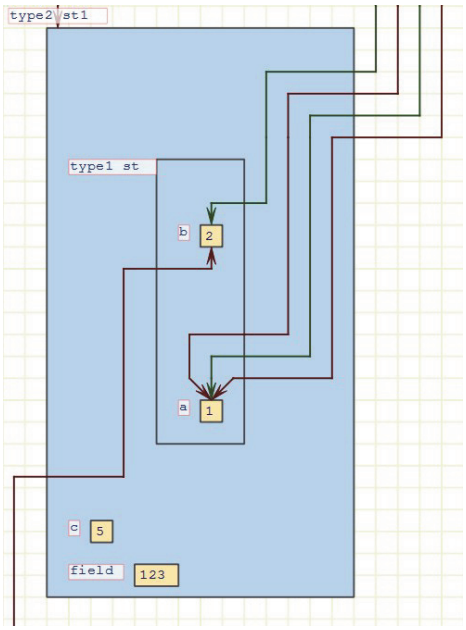
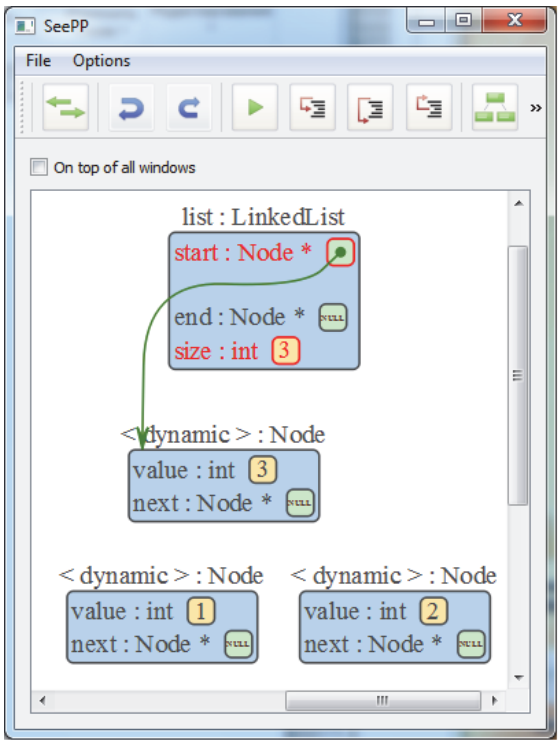


Рис. 5. Проведение дуг ко вложенным вершинам

```
class LinkedList {
private:
  Node* start;
  Node* end;
  int size;
public:
  LinkedList();
  ~LinkedList();
  void add(int value);
  void insert(int index, int value);
};
LinkedList::LinkedList() {
  start = NULL;
  end = NULL;
  size = 0;
}
void LinkedList::add(int value) {
  if(end != NULL) {
    end->setNext(new Node(value));
    end = end->getNext();
  }
  else {
    start = new Node(value);
  }
  size++;
}
int _tmain(int argc, _TCHAR* argv[]) {
  LinkedList list;
  list.add(1);
  list.add(2);
  list.add(3);
  return 0;
}
```

а



б

Рис. 6. Реализация односвязного списка:
а – реализация; *б* – изображение полученной структуры

Архитектура программы допускает различные возможности расширения. Существует абстрактный класс метода укладки графа и его наследник – для метода поуровневой укладки; возможно добавление новых методов укладки. Абстрактный класс поставщика данных позволяет добавлять разные способы получения информации о данных программы.

В настоящий момент реализован действующий прототип визуализатора, позволяющий пошагово выполнять программу, просматривать ее локальные переменные (поддерживаются простые типы, структуры с любой вложенностью, одномерные и двумерные массивы, а также динамически выделенные области памяти).

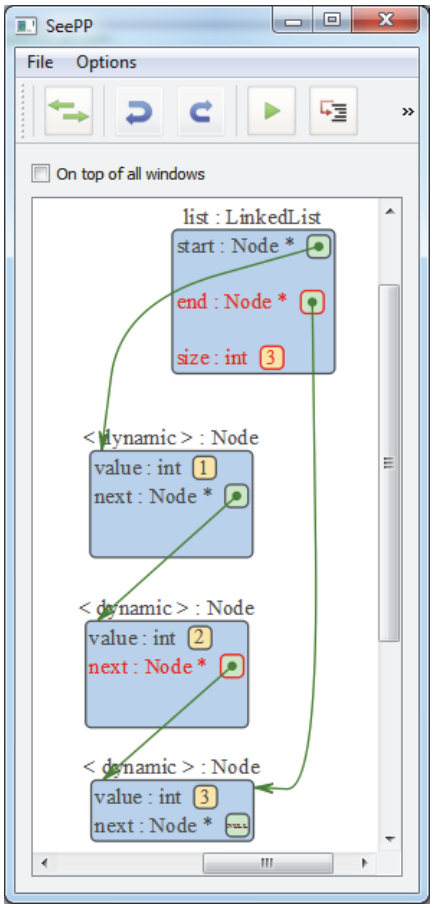
Разработанный визуализатор был внедрен в учебный процесс факультета электроники и вычислительной техники ВолгГТУ по дисциплине «Программирование» (специальность «Программная инженерия») на лабораторных работах по теме «Динамические структуры данных».

Рассмотрим пример использования визуализатора. Пусть написан простой односвязный список с функцией добавления нового элемента в конец (рис. 6, *а*). При этом реализация может содержать ошибки.

После добавления трех элементов визуализатор покажет структуру, изображенную на рис. 6, *б*.

Очевидно, что после трех добавлений элементов список сформировался неправильно, на первые два элемента вообще не осталось указателей – они стали утечкой памяти. Исправим ошибку в функции (рис. 7, *а*).

```
void LinkedList::add(int value) {
  if(end != NULL) {
    end->setNext(new Node(value));
    end = end->getNext();
  }
  else {
    start = new Node(value);
    end = start; // Добавленная строчка
  }
  size++;
}
```



а *б*

Рис. 7. Исправленный метод добавления элемента связный список:
а – исправленный фрагмент кода; *б* – изображение полученной структуры

Изображение новой структуры данных, показанной визуализатором, приведено на рис. 7, *б*.

По изображению видно, что все элементы добавились и связный список корректен.

Было проведено анкетирование студентов, использовавших программу; все опрошенные студенты отметили, что визуализатор был полезен при выполнении лабораторной работы.

87 % анкетируемых дали программе максимальную оценку (3 по шкале от –3 до 3); отрицательных оценок выставлено не было; средняя оценка: 2,875. Некоторые студенты высказывали мнение, что не смогли бы справиться с изучением динамических структур данных без помощи визуализатора. Были получены полезные пожелания и советы: более компактное отображение структур данных, интеграция с отладчиком gdb, улучшение пользовательского интерфейса.

При эксплуатации программы была выявлена необходимость модификации алгоритма укладки графа для более привычного отображения типовых структур данных, таких как деревья или связные списки. Также была поставлена на первый план необходимость более плавного отображения изменений графа в процессе выполнения программы.

У проекта много направлений улучшения и развития. Необходимо расширить поддержку сложных типов данных (таких как многомерные массивы – более двух измерений и статические поля классов). Также возможно взаимодействие с другими отладчиками. Планируется разработка различных плагинов для визуализации данных предметной области разрабатываемой программы для различных учебных задач. Помимо учебного внедрения, возможно дальнейшее применение визуализатора и в прикладном программировании. Для этого необходимо будет реализовать взаимодействие с другими средами программирования, обладающими ограниченными возможностями в представлении данных, и, возможно, другими языками.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Moreno, A*., Myller N., Sutinen E., Ben-Ari M., Visualizing programs with Jeliot 3 // Proceedings of the 8th International Working Conference on Advanced Visual Interfaces, 2004. – Pp. 373–376.

2. *Korhonen, A*., Malmi L., Saikkonen R., Matrix - concept animation and algorithm simulation system // ITiCSE ’01: Proceedings of the 6th Annual Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education(2001). – P. 180.

3. *Kehoe, C. M*., Stasko J. T. and Talor A., Rethinking the evaluation of algorithm animations as learning aids: an observational study // International Journal of Human Computer Studies 54(2001). – Pp. 265–284.

4. Новые возможности системы КуМир / А. Г. Кушниренко, А. Г. Леонов, М. А. Ройтберг, Т. Р. Джелядин, А. А. Ефремов, А. В. Карпов, Д. В. Хачко, В. В. Яковлев // Шестая конференция «Свободное программное обеспечение в высшей школе». – Переславль, 29–30 января 2011 г.

5. *Maloney J.,* Resnick M., Rusk N., Silverman B., Eastmond E. The Scratch Programming Language and Environment. // ACM Transactions on Computing Education (TOCE). – 2010. – Volume 10. – Article No. 16.

6. *Conway M.,* Audia S., Burnette T., Cosgrove D., Christiansen K. Alice: Lessons Learned from Building a 3D System for Novices // CHI '00 Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems. – 2000. – Pp. 486–493.

7. *Zeller A.,* Lutkehaus D. DDD - A Free Graphical Front-End for UNIX Debuggers. // ACM SIGPLAN Notices. – 1996. – Volume 31 – Pp. 22–27.

8. *Moreno A*., Joy M. S. Jeliot 3 in a Demanding Educational Setting // Electronic Notes in Theoretical Computer Science 178 (2007). – Pp. 51–59.

9. *Шабалина, О. А*. Обучение разработчиков программного обеспечения: применение компьютерных игр и процесса их разработки / О. А. Шабалина, А. В. Катаев, П. Н. Воробкалов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 11(71) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 9). – С. 117–124.

10. *Weimin Wu*, Yongfeng Cao, Baocai Chen, Qing Su, Kailun Li AnyviewC: A Visual Practice Platform for Data Structures Course // Computer Science and Information Engineering, 2009 WRI World Congress on. – 2009. – Volume 7. – Pp. 493–497.

11. Jaishankar Sundararaman, Godmar Back HDPV: interactive, faithful, in-vivo runtime state visualization for C/C++ and Java // SoftVis '08 Proceedings of the 4th ACM symposium on Software visualization. – 2008. – Pp. 47–56.

12. *Касьянов, В. Н*. Применение графов в программировании / В. Н. Касьянов // Поддержка супервычислений и интернет-ориентированные технологии. Серия «Конструирование и оптимизация программ». – 2001. – С. 139–168.

УДК 519.876.2:004.942:352.075.2:504.03

Д. С. Парыгин

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СТРАТЕГИЙ УПРАВЛЕНИЯ ГОРОДСКИМ РАЙОНОМ НА ОСНОВЕ СЦЕНАРНЫХ МОДЕЛЕЙ

Волгоградский государственный технический университет

dparygin@gmail.com

В статье рассмотрены вопросы прогнозирования развития внутригородской территории с применением технологии когнитивного анализа и сценарного моделирования. Предложен подход к выбору воздействий для поддержки принятия управленческих решений в развитии города.

Ключевые слова: сценарное прогнозирование, управление муниципальными образованиями, социально-экономическое развитие городов, когнитивное моделирование, поддержка принятия решений.

D. S. Parygin

ASSESSMENT THE EFFECTIVENESS MANAGEMENT STRATEGIES OF URBAN AREA BASED ON SCENARIO MODELS

Volgograd State Technical University

In article questions forecasting the development intra-urban territories with using the technology of cognitive analysis and scenario modeling. Propose an approach to the selection of impacts to support management-making in urban development.

Keywords: scenario forecasting, management municipalities, socio-economic urban development, cognitive modeling, decision support.

Введение

Городской район Волгограда является внутригородской территорией без статуса муниципального образования. В административно-управленческом плане район Волгограда – это территориальное структурное подразделение администрации Волгограда, осуществляющее свою деятельность как исполнительный орган местного самоуправления в пределах полномочий, предусмотренных Положением об администрациях районов Волгограда [1].

Основной целью деятельности администрации района Волгограда является повышение уровня благосостояния его жителей, осуществляемое посредством эффективного решения вопросов местного значения – непосредственного обеспечения жизнедеятельности населения района [1]. Практика формирования управленческих стратегий на данном этапе связана с использованием программно-целевого планирования (ПЦП).

В основе методов ПЦП лежит положение о необходимости четкого формулирования конечных целей, рассмотрения возможных вариантов взаимосвязанных и взаимозависимых действий для достижения этих целей. Для выбора конкретных действий и обоснования элементов плана необходим анализ прошлых этапов развития и возможно более точное прогнозирование будущих состояний. В связи с этим особую актуальность приобретает вопрос адекватного выбора конечных целей развития. Для определения достижимости целей, оценки требуемых ресурсов и способов их распределения, выбора наиболее эффективных комбинаций управляющих воздействий может быть использовано моделирование.

Особый исследовательский интерес в работе над моделью городского района (ГР) представляет двоякая ментальная сущность данного объекта. ГР характеризуется замкнутостью, как в восприятии населением, так и в фактическом территориально-управленческом обособлении. С другой стороны, происходящие в ГР процессы неразрывно связаны с развитием города в целом, и большая часть объектов районной среды находится под юрисдикцией властей различных уровней, от городских до федеральных.

1. Сценарное прогнозирование и когнитивный анализ

Усиление неопределенности политических, социальных и экономических событий является причиной роста популярности сценарного подхода для прогнозирования [2]. Учитывая неоднозначный характер и нелинейность траектории развития городских систем, в данном случае также оправданным является использование в процессе управления метода построения сценарных прогнозов [3].

Процесс построения сценария тесно связан с процессом прогнозирования и дает возможность оценить наиболее вероятный ход событий. Он предназначен для выделения ключевых

моментов в развитии исследуемого объекта и разработки на этой основе качественно различных вариантов его динамики, а также для всестороннего анализа и оценки каждого из полученных вариантов, изучения возможных последствий их реализации. Данные принципы являются базовыми при переходе от традиционной экстраполяционно-прогнозной логики анализа к сценарной.

Построение сценариев не ставит своей целью определение всех возможных альтернатив развития – в таком случае число вариантов становится необозримым. Выделяется несколько качественно разнородных траекторий, которые в концентрированном виде отражают весь спектр возможных направлений развития территории [2].

Процесс формирования сценариев предполагает использование результатов прогнозов, осуществляемых с помощью других методов. При разработке вариантов естественно ориентироваться на экспертные оценки. Однако для повышения качества прогнозов целесообразно их сочетание с формализованными методами. Одним из ведущих направлений исследования социально-экономических процессов в настоящее время является *имитационное моделирование*, которое дает возможность определять перспективное состояние и тенденции развития, оценивать последствия принимаемых решений.

В рассматриваемом случае для анализа, планирования и прогнозирования развития городского района применено *когнитивное моделирование* – один из классов имитационного моделирования. Анализ слабоформализованной системы выполняется на основе когнитивной структуризации происходящих процессов.

Знания о мире являются результатом работы мышления человека по переработке информации, поступающей извне. Знания упорядочиваются сознанием в когнитивные или познавательные структуры, которые могут быть помещены в память. Когнитивные структуры – это типовые схемы или модели представления знаний в уме человека, позволяющие достраивать прежде неизвестные области. Таким образом, когнитивный анализ представляет собой последовательную причинно-следственную структуризацию информации о процессах в исследуемой системе [3].

2. Структуризация информации об объекте исследования

Для определения факторов, оказывающих влияние на развитие слабоструктурированной системы, используются PEST- и SWOT-анализ (см. таблицу) – инструменты выявления совокупности факторов внешней и внутренней среды функционирования объекта соответственно [4]. Динамика внешних факторов при этом не зависит от состояния слабоструктурированной системы.

Структуризация информации о городском районе [1, 5, 6, 7], результаты моделирования

Фактор	Начальная тенденция		Фактор «Зарегистрированная преступность»
Результаты SWOT-анализа			
Сильные стороны городского района			
Развитие культуры и организация досуга	0,32	Умеренно растет	– 0,093
Развитие физкультуры и спорта	0,01	Слабо растет	– 0,082
Проведение мероприятий с участием ТОС	0,39	Умеренно растет	– 0,087
Количество действующих комитетов ТОС	0,07	Слабо растет	– 0,244
Количество действующих ТСЖ	0,08	Слабо растет	– 0,162
Количество субъектов хоз деятельности	– 0,05	Слабо падает	–
Деятельность администрации*	0,13	Слабо растет	–
Площадь территории озеленения	0,00	Не изменяется	–
Благоустроенность территории	0,00	Не изменяется	– 0,173
*Под деятельностью администрации понимается интегральный индикатор, отражающий деятельность районной администрации и ее эффективность в сфере культуры, спорта, развития социума, работ с ТОС и ТСЖ, благоустройства			
Слабые стороны городского района			
Расходные обязательства администрации	– 0,06	Слабо падает	–
Развитость автодорожной инфраструктуры	– 0,10	Слабо падает	–
Численность населения	– 0,01	Слабо падает	–

Окончание таблицы

Фактор	Начальная тенденция		Фактор «Зарегистрированная преступность»
Результаты SWOT-анализа			
Недостаточность дошкольных учреждений	– 0,10	Слабо падает	–
Социальное развитие**	0,09	Слабо растет	–
**Социальное развитие района является интегральным индикатором показателей, характеризующих социальную сферу, в числе которых демография, образование, здравоохранение, преступность			
Возможности развития городского района			
Реализация целевой программы развития	– 0,02	Слабо падает	–
Доходы от деятельности МУ	0,33	Умеренно растет	–
Дополнительное финансирование	0,20	Слабо растет	– 0,096
Оптимизация торгово-сервисной сети	0,73	Сильно растет	–
Развитие инфраструктуры туризма и рекреации	0,00	Не изменяется	– 0,083
Промышленное производство	0,00	Не изменяется	– 0,075
Капремонт муниципального жилого фонда	– 0,85	Сильно падает	– 0,096
Заявки на вывоз отходов	– 0,32	Умеренно падает	–
Ликвидация свалок	– 0,56	Существенно падает	–
Деятельность дружинников (ДНД)	0,13	Слабо растет	– 0,175
Угрозы развития городского района			
Экологическая опасность	– 0,10	Слабо падает	– 0,086
Транзитный автотранспортный поток	0,10	Слабо растет	– 0,130
Социальная напряженность***	– 0,10	Слабо падает	– 0,126
Зарегистрированные преступления	– 0,08	Слабо падает	–
***Социальная напряженность отражает состояние общества и в целом его реакцию на проблемы и угрозы нормальной жизнедеятельности в районе			
Результаты PEST-анализа			
Факторы, характеризующие политическую сферу			
Деятельность администрации города	0,10	Слабо растет	–
Деятельность администрации региона	– 0,10	Слабо падает	–
Деятельность депутатского корпуса района	0,00	Не изменяется	–
Законодательство РФ и региона	0,00	Не изменяется	–
Нормативные правовые акты города	0,00	Не изменяется	–
Факторы, характеризующие экономическую сферу			
Объем доходной части бюджета города	– 0,02	Слабо падает	–
Объем инвестиций в основной капитал****	– 0,14	Слабо падает	–
Общая площадь введенного жилья****	0,55	Существенно растет	–
****Объем инвестиций в основной капитал и общая площадь введенного жилья рассматриваются в рамках района в отношении к показателям прошлого периода			
Факторы, характеризующие социальную сферу			
Уровень жизни*****	0,00	Не изменяется	–
*****Здесь рассматривается как общий контекст развития ситуации в городе			
Факторы, характеризующие технологическую сферу			
Развитие ИТ и МФЦ	0,10	Слабо растет	–
Эколого-ориентированные и энергосберегающие технологии (ЭО и ЭСТ)	0,10	Слабо растет	–

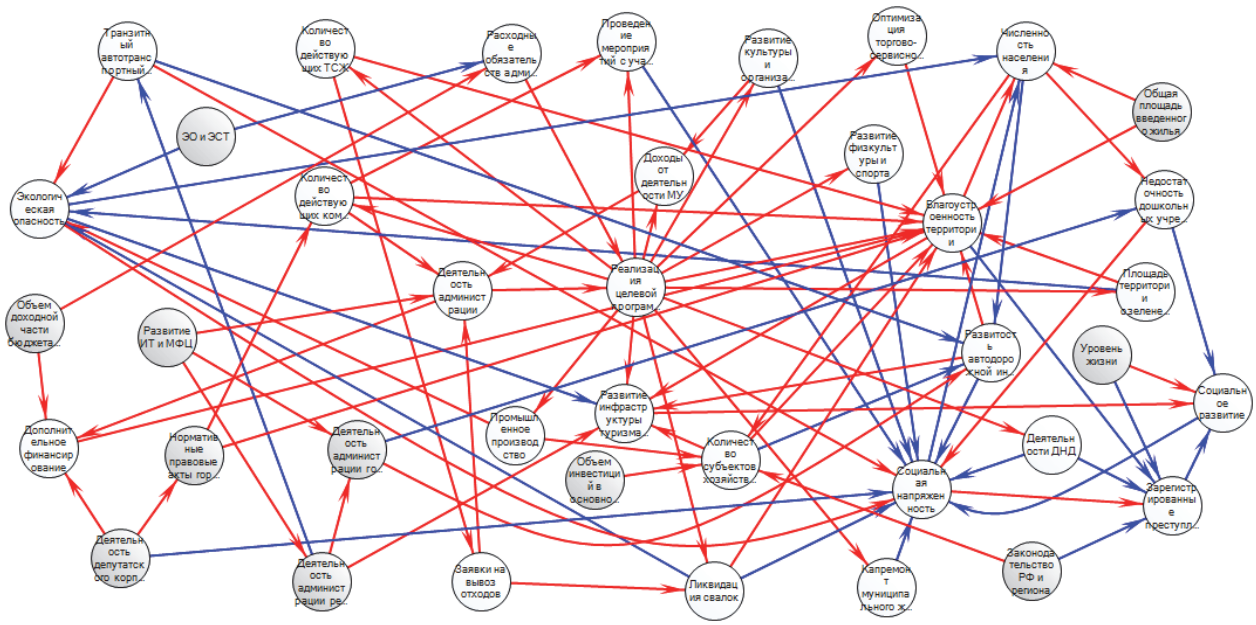


Рис. 1. Когнитивная карта объекта «Городской район»

Выявленные взаимосвязи факторов можно представить в виде когнитивной карты (рис. 1), которая является моделью исследуемой системы в виде взвешенного ориентированного графа [3].

Для моделирования динамики развития системы необходимо перейти от модели в виде графа к временным уравнениям, отразив в этих уравнениях заданные структурные свойства [8].

3. Выбор управления и моделирование сценариев развития

Проверка адекватности построенной модели проводилась на основе ретроспективных данных в условиях новой российской государственности по выбранным показателям 1993–1994 годов. Результаты моделирования саморазвития ситуации отразили картину развития района и те значения факторов, которые они приобрели к середине 2000-х годов [6]. Такой анализ является одной из необходимых составляющих использования результатов исследований для целей поддержки принятия управленческих решений. Далее изменяемыми параметрами в процессе моделирования будут только начальные тенденции факторов и управляющие воздействия, при сохранении установленных взаимовлияний и набора факторов.

Для прогнозирования развития района на перспективный период были использованы данные, относящиеся к 2010–2011 годам и характеризующие ситуацию на всех уровнях управления территорией. В целом ситуацию можно определить, как стабильную по большинству параметров. Эта стабильность наблюдается даже в негативных факторах, характеризующих неразрешенные проблемы в районе и городе (см. таблицу).

При всей монотонности сегодняшнего развития, в будущем у города открывается широкая перспектива, предоставляемая предстоящими матчами Чемпионата мира по футболу 2018 года (ЧМ2018). Но для такой сложной и связанной системы, как город, чтобы получить прогресс в какой-то конкретной сфере (например, туризм и сервис), зачастую не имеет смысла прямо влиять на нее, а стоит обратиться к первопричинам.

Ресурсный потенциал, которым располагает районная администрация, регламентируется определенными на уровне города расходными обязательствами. При этом следует учитывать возможность изыскания дополнительного финансирования и существенную ограниченность полномочий [1]. Цель управления напрямую связана с повышением качества жизни населения, и потому при выборе сценариев развития важно определить все возможные факторы, влияющие на этот показатель.

Одним из элементов нормального развития общества является низкий уровень преступности. Необходимо найти управляющие воздействия, оказывающие наибольшее влияние на сокращение числа преступлений, исходя из инструментов, имеющихся в распоряжении районных властей.

Для этого на модели начальных условий (см. таблицу) поочередно, будем задавать [9] величину каждого из управляющих факторов на уровне существенно усиливающего (0,5), при прочих равных условиях, и фиксировать реакцию системы на такое управление (см. таблицу). Символ «–» означает, что исследование не проводилось.

В рассматриваемых условиях развития городского района, наибольшее влияние на уровень регистрируемой преступности оказывают следующие факторы (см. таблицу): «Количество действующих комитетов ТОС», «Благоустроенность территории» и «Деятельность ДНД». Для проверки промежуточных выводов, развитие района моделируется [9] при задании управления («управление 2») по трем выявленным факторам на уровне умеренно усиливающего (0,3), при сохранении остальных управлений на прежнем уровне (рис. 2, 3).

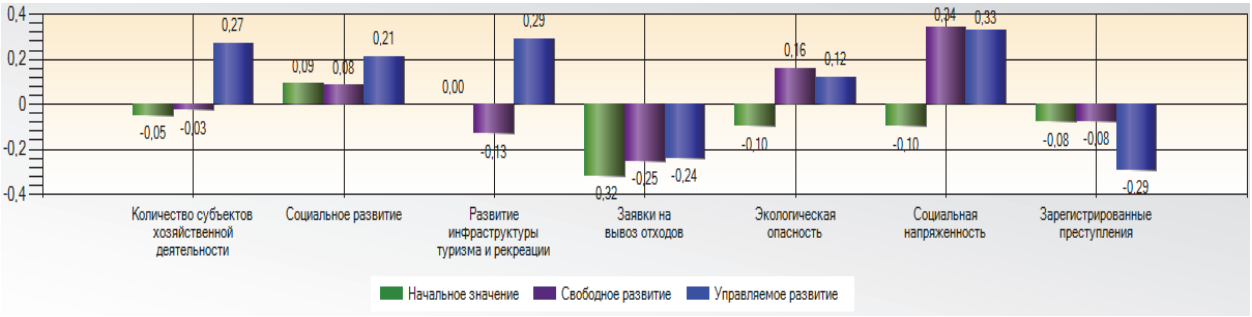


Рис. 2. Значения тенденций факторов в начале и конце моделирования по сценарию «Оптимизация управления на уровне района» с управлением 2

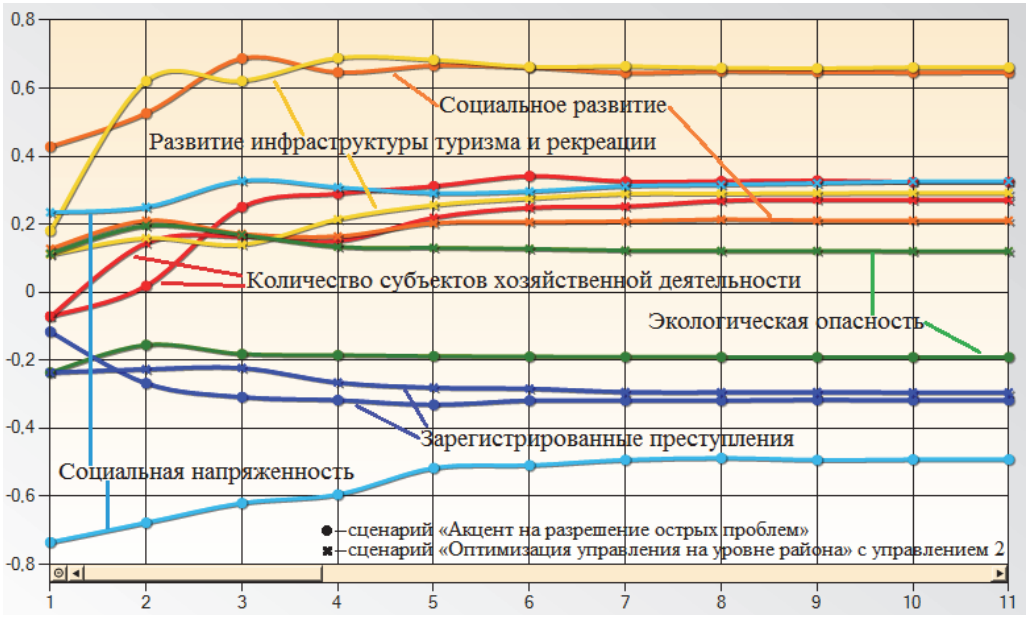


Рис. 3. Динамика факторов модели при управляемом развитии ситуации

Выводы

Без активных управленческих воздействий на всех уровнях власти тенденции значимых факторов остаются примерно на том же уровне (рис. 2). В таких условиях трудно ожидать серьезного прогресса в сфере развития местной туристической отрасли. Позитивные тенденции развития туристской инфраструктуры, которая потребуется к ЧМ2018, можно получить за счет опосредованного воздействия (рис. 2, 3).

Сравнение двух сценариев развития (рис. 3) показывает, что эффект от решения «популярных» и легко формулируемых в обществе проблем вполне сравним с результатами целенаправленных управленческих воздействий при решении комплекса повседневных вопросов обеспечения жизнедеятельности города на местах. Примененное управление за счет ресурсов и в рамках полномочий администрации района позволяет достигнуть заметного сокращения уров-

ня преступности, одновременно повышая показатели общественного развития и экономическую активность населения. Тем не менее, низкие результаты фактора социальной напряженности свидетельствуют о необходимости реализации ключевых на данном этапе потребностей населения (дороги, жилищные условия, детские сады). При этом важно отметить, что совместная работа всех уровней власти, общественного самоуправления, граждан и хозяйствующих субъектов способна дать больший эффект в кратчайшие сроки с меньшими затратами ресурсов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Об утверждении Положений об администрациях районов Волгограда : решение Волгоградской городской Думы от 24.12.2010 № 40/1252 [Электронный ресурс] / Волгоградская городская Дума. – 2010. – Режим доступа : http://www.volgsovet.ru/Act/Decisions/Default.aspx

2. *Андреева, Е. В.* Прогнозирование социально-экономического развития в системе управления регионом / Е. В. Андреева // Труды Псковского политехнического института / ПсковГУ. – Псков : Изд-во ППИ, 2006. – № 10.2. – С. 173–175.

3. *Садовникова, Н. П.* Выбор стратегий территориального развития на основе когнитивного анализа и сценарного моделирования [Электронный ресурс] / Н. П. Садовникова, Н. П. Жидкова // Интернет-вестник ВолгГАСУ : Серия «Строительная информатика». – 2012. – № 7(21). – Режим доступа : http://vestnik.vgasu.ru/?source=4&articleno=915

4. *Камаев, В. А.* Анализ социально-экономического развития муниципальных образований на примере волгоградской области с использованием моделей Data Mining / В. А. Камаев, М. В. Щербаков, А. С. Аль-Катабери // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 6(66) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 8). – С. 103–106.

5. Аналитическая записка «Мониторинг социально-экономического развития районов Волгограда и комплексная оценка эффективности деятельности территориальных структурных подразделений администрации Волгограда по итогам 2011 года» [Электронный ресурс] / Официальный ИСП Волгограда. – 2012. – Режим доступа : http://www.volgadmin.ru/ru/MPCity/StrategyPlanning/MarksAll.aspx

6. Город Волгоград в цифрах 2011 : стат. обзор. / Волгоградстат. – Волгоград, 2012. – 205 с.

7. Итоги социально-экономического развития Волгограда за I полугодие 2012 года [Электронный ресурс] / ОИСП Волгограда. – 2012. – Режим доступа : http://volgadmin.ru/ru/MPCity/Economics2012-06.aspx

8. *Максимов, В. А.* Когнитивные технологии – от незнания к пониманию / В. А. Максимов // Когнитивный анализ и управление развитием ситуации : материалы 1-й Международной конференции. – М.: ИПУ РАН, 2001. – Т. 1. – С. 4–41.

9. *Заболотский, М. А.* Аналитическая программная система «Стратег» – инструмент целеполагания и анализа сложных систем и ситуаций / М. А. Заболотский, А. В. Тихонин, И. А. Полякова // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 2(40) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 4). – С. 65–68.

УДК 519.272 : 378.1

Н. Н. Пугина, Ю. М. Брумштейн

МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ МЕЖВУЗОВСКОЙ КОНКУРЕНЦИИ ЗА АБИТУРИЕНТОВ В АСТРАХАНСКОЙ ОБЛАСТИ

Астраханский государственный университет
brum2003@mail.ru, astra1851@mail.ru

В статье рассмотрены причины и направления конкуренции за абитуриентов между вузами, способы повышения их привлекательности, особенности конкурентных процессов в Астраханской области. Показано, что Астраханские вузы конкурируют не только друг с другом, но и с вузами Москвы, Волгограда и пр. Для Астраханской области проанализирована структура учреждений высшего профессионального образования, предлагаемых ими специальностей вузовского обучения, их соответствие потребностям социально-экономического развития региона. Описаны использованные способы получения данных по вузам. Представлены некоторые методы и результаты оценок по ним для уровней конкуренции внутри региона между образовательными учреждениями.

Ключевые слова: вузы, специальности обучения, абитуриенты, конкуренция, причины, направления, методы оценки, данные для расчетов, результаты расчетов, Астраханская область, Волгоград.

N. N. Pugina, Ju. M. Brumshteyn

METHODS AND RESULTS OF INTERUNIVERSITY COMPETITION ASSESSMENTS FOR ENTRANTS IN ASTRAKHAN REGION

Astrakhan State University

In article are considered the reasons and directions of competition between universities for entrants, ways for increasing their appeal, features of competitive processes in Astrakhan region. It is shown, that Astrakhan universities compete not only with each other, but also with universities of Moscow, Volgograd and so forth. For Astrakhan region is analyzed the structure of higher education establishments, specialties of universities training, offered by them; their compliance to requirements of regional social and economic development. The ways, used for data acquisition about universities are described. Some methods and estimation results are presented for competition levels in region between educational establishments.

Keywords: universities, training specialties, entrants, competition, reasons, directions, assessment methods, data for calculations, calculation results, Astrakhan region, Volgograd.

В сфере высшего профессионального образования (ВПО) большинства регионов России конкуренция между учреждениями ВПО (УВПО) за контингенты обучающихся продолжает расти. Это делает актуальными задачи управления конкурентоспособностью УВПО, что требует объективных оценок уровней конкуренции. Однако эти вопросы в существующей литературе отражены неполно и недостаточно конкретно. Поэтому целью данной статьи был не только теоретический анализ направлений конкуренции УВПО, но и получение конкретных числовых оценок.

Конкуренция за абитуриентов в Астраханской области

Астраханская область (АО) имеет численность зарегистрированного населения ≈ 1 млн человек при количестве обучающихся в УВПО $\approx$ 41 600 человек [4]. Аналогично другим регионам УВПО сосредоточены в основном в областном центре (г. Астрахань) [1]. В условиях набора абитуриентов на основе ЕГЭ и доступности информации в Интернете межвузовская конкуренция за контингенты обучающихся носит не внутрирегиональный, а общероссийский характер. Отметим следующие факторы:

1) наиболее сильные выпускники школ Астрахани и АО имеют реальные возможности поступления на учебу в Москву и другие крупные университетские центры, которые предлагают лучшие условия бюджетного обучения и материального обеспечения чем Астраханские УВПО. Это касается более широкого выбора специальностей; высокого стипендиального обеспечения; комфорта проживания в общежитиях, условий для занятий спортом, доступа к получению грантов. Ведущие вузы России ведут в АО активную работу по привлечению на обучение в них наиболее сильных выпускников, в том числе путем проведения предметных олимпиад в Астрахани. При этом у руководства и преподавателей средних школ города и области есть «моральная» заинтересованность в поступлении выпускников в наиболее престижные вузы России;

2) для абитуриентов из северных районов АО (особенно Черноярского, Ахтубинского, ЗАТО «Знаменск») Волгоград может быть предпочтительным местом обучения в силу близости к местам их постоянного проживания;

3) в Астрахани кроме местных вузов работают филиалы и представительства иногородних вузов, которые «оттягивают» на себя определенное количество абитуриентов. Из-за более низкого уровня требований в таких УВПО нередко снижается и уровень требований в региональных бюджетных вузах [1];

4) недостаток абитуриентов астраханские вузы в ряде случаев вынуждены возмещать за счет выпускников с низкими баллами ЕГЭ, в том числе из сельских школ области;

5) в бюджетных вузах Астрахани обучаются студенты из зарубежных стран, в том числе прикаспийских – Казахстана, Азербайджана, Туркмении, Ирана (в Туркмении дипломы российских негосударственных вузов считаются «недействительными»). Есть также определенное количество студентов из Калмыкии и некоторых других областей России;

6) в силу относительно низких уровней доходов населения области, выезд из АО абитуриентов для обучения в Европу и США редок [1, 2].

В данной статье при оценках конкурентной ситуации в АО учитывались только УВПО, работающие внутри области, так как именно на них приходится основная часть выпускников школ в регионе. Анализ конкуренции за выпускников школ АО с высокими баллами ЕГЭ (по результатам их поступления в вузы) требует привлечения труднодоступных данных по итогам набора, в том числе во внерегиональных УВПО.

Основными средствами привлечения абитуриентов в астраханских вузах можно считать: формирование востребованных наборов специальностей, особенно уникальных для региона; обеспечение возможностей получения в период очного обучения дополнительного (второго) высшего образования; распределение бюджетных мест по специальностям, обеспечивающее набор полноценных учебных групп; улучшение среды обучения (учебные корпуса и аудитории, библиотеки и пр.) и отдыха (общежития, спортивные сооружения, студенческие клубы и пр.); сохранение стоимостей коммерческого обучения на конкурентоспособном уровне [1] и др. При этом руководству астраханских вузов приходится учитывать: ограниченные возможности финансирования реализуемых проектов; учебную специализацию преподавательского корпуса вузов, которая не может быть быстро изменена; материальную базу, включая расположение учебных корпусов и их площади; возможные действия (решения) других УВПО – особенно внутри региона. Поэтому принятие решений по управлению структурой специаль-

ностей в вузах/стоимостях оплаты носит «многокомпонентный» характер и должно опираться на всесторонний учет конкурентной ситуации, ее прогнозы на будущее. Методическое и информационное обеспечение таких решений сейчас оставляет желать лучшего. В более ранней работе [2] нами были рассмотрены теоретические подходы к таким оценкам. Поэтому в данной статье основной акцент был сделан на практическом применении описанных в [2] и некоторых иных методов.

Характеристика использованного фактического материала

Состав УВПО Астрахани определялся по таким источникам: сборники статистической отчетности; организации, представленные весной 2012 г. в Астрахани на выставке «Образование – инвестиции в успех»; информационно-рекламные материалы УВПО в печатных средствах массовой информации; материалы в Интернете; справочники образовательных организаций типа «Куда пойти учиться». Наиболее полную и актуальную информацию нам удалось найти в астраханском выпуске «Дубль-Гис». Затем состав специальностей УВПО уточнялся по сайтам (страничкам сайтов) организаций в Интернете. В ряде случаев пришлось использовать телефонный опрос УВПО. В данной статье мы не использовали сведения о стоимости коммерческого обучения, долях выделяемых на специальности бюджетных мест, проходных баллах по ЕГЭ в различных УВПО и пр. (эта информация во многом недоступна). Также из-за труднодоступности данных мы не смогли сравнить количества выпускников школ АО, поступивших в УВПО в пределах области и вне ее. Особый интерес представляли бы такие сведения по «высокобалльникам ЕГЭ», которые часто не возвращаются в регион после окончания обучения. Утечка их из АО отрицательно влияет на динамику ее интеллектуальных ресурсов, возможности инновационного развития, информационную безопасность [3].

Всего по Астрахани нами было выявлено 27 УВПО.

Таблица 1

Перечень УВПО в г. Астрахани на 01.02.2013 г.

Полное название	Количество специальностей
1. Астраханский государственный университет (АГУ)*	72
2. Астраханский государственный технический университет (АГТУ)*	60
3. Астраханский инженерно-строительный институт**	25
4. Астраханская государственная медицинская академия*	6
5. Астраханская государственная консерватория*	11
6. Астраханский филиал Российской академии народного хозяйства и государственной службы*	3
7. Волжская государственная академия водного транспорта*	7
8. Морская государственная академия имени адмирала Ф. Ф. Ушакова*	23
9. Астраханский филиал Московского государственного университета экономики, статистики и информатики (АФ МГУЭСИ)*	6
10. Астраханский филиал Российского государственного гуманитарного университета *	6
11. Астраханский филиал Саратовской государственной юридической академии*	5
12. Астраханский филиал Университета Российской академии образования	11
13. Астраханский филиал Института экономики и финансов	7
14. Астраханский филиал Международного института экономики и права	6
15. Астраханский филиал Международного юридического института	7
16. Астраханский филиал Современной гуманитарной академии	13
17. Южно-Российский гуманитарный институт	11
18. Астраханский филиал Института социальных и гуманитарных знаний	7
19. Астраханский филиал Московского государственного университета путей сообщения*	10
20. Астраханский филиал Московского института комплексной безопасности	5
21. Астраханский филиал Саратовского государственного аграрного университета им. Н. И. Вавилова*	4

Окончание табл. 1

Полное название	Количество специальностей
22. Астраханский филиал Московского социально-экономического института	5
23. Астраханский филиал Московского финансово-промышленного университета «СИНЕРГИЯ»	4
24. Астраханское представительство Национального института им. Екатерины Великой	6
25. Астраханское представительство Института моды, дизайна и технологий	3
26. Астраханское представительство Московского государственного индустриального университета	4
27. Астраханское представительство Самарского государственного технического университета	10

Примечание: * – государственное УВПО; ** – муниципальное; остальные – коммерческие.

Все региональные вузы имеют бюджетное финансирование: четыре УВПО – государственное и одно – муниципальное – 1 (однако в бюджетных вузах доля коммерческих студентов – порядка 50 %). В Астраханских филиалах бюджетных УВПО осуществляется в основном коммерческое обучение. Для сравнения – в Волгограде (его население ≈ 1,02 млн. чел. и ≈2,58 млн. в целом по области) работает 39 УВПО. Общее количество неповторяющихся специальностей во всех УВПО Астрахани составило 177 (они в основном совпадают со специальностями Волгоградских УВПО). Отметим: АГУ имеет филиалы в гг. Ахтубинск и ЗАТО Знаменск, а также представительства в других районах области; АГТУ имеет Дмитровский филиал ФГБОУ ВПО «АГТУ», расположенный в Астрахани. Представительства в районах АО есть у некоторых УВПО, включая АФ МГУЭСИ.

Мы разбили специальности на такие группы/направления: физико-техническое (12 специальностей); математическое и информационных технологий (14); экономическое, управленческое, юридическое (37); филологическое (6); педагогическое, социальное, психологическое (16); биологическое, геолого-географичес-кое, химическое и нефтегазовое (35); аграрное (8); градостроительное, архитектуры и дизайна (15); механико-технологическое и транспорт – водный, наземный, воздушный (17); медицинское (6); культуры и искусства (11). В целом можно считать, что набор специальностей в существующих УВПО адекватен потребностям социально-экономического развития региона – с учетом «профессиональной мобильности» выпускников. Однако количество предложений по экономическим, юридическим и некоторым иным специальностям следует считать избыточным. Уровень присутствия отдельных УВПО на региональном рынке ВПО (табл. 2) оценивался на основе количеств предлагавшихся в них специальностей обучения по формуле

$$\left\{Q_i = (100\%)\cdot c_i / N\right\}_{i=1\ldots I}, \qquad (1)$$

где ***I*** – количество УВПО в регионе; ***N*** – количество всех неповторяющихся специальностей, предлагаемых вузами региона.

Таблица 2

Оценки уровней присутствия УВПО на региональном рынке услуг ВПО по количеству специальностей, %

(*i*) № УВПО	Q_i	(*i*) № УВПО	Q_i	(*i*) № УВПО	Q_i	(*i*) № УВПО	Q_i	(*i*) № УВПО	Q_i
1	40,7	**7**	3,9	**13**	3,9	**19**	5,6	**25**	1,7
2	34	**8**	13,0	**14**	3,3	**20**	2,8	**26**	2,2
3	14,1	**9**	3,3	**15**	3,9	**21**	2,2	**27**	5,6
4	3,3	**10**	3,3	**16**	6,8	**22**	2,8		
5	6,2	**11**	2,8	**17**	6,2	**23**	2,2		
6	1,7	**12**	6,2	**18**	3,9	**24**	3,3		

Наиболее высокие «уровни присутствия» в регионе у двух вузов – АГУ и АГТУ. Сделать аналогичные оценки на основе количеств студентов в УВПО региона трудно, так как этих данных нет ни в печатных источниках, ни на сайтах большинства вузов. Доли в вузах уникальных для региона специальностей (табл. 3) определялись по формуле

$$\left\{\psi_i = U_i / K_i\right\}_{i=1\ldots I}, \qquad (2)$$

где U_i, K_i – количества специальностей в *i*-м вузе (уникальных и всех).

Таблица 3

Доли уникальных специальностей в отдельных УВПО, %

(*i*) № УВПО	ψ_i	(*i*) № УВПО	ψ_i	(*i*) № УВПО	ψ_i	(*i*) № УВПО	ψ_i	(*i*) № УВПО	ψ_i
1	68	**7**	0	**13**	0	**19**	30	**25**	0
2	25	**8**	8,7	**14**	0	**20**	0	**26**	0
3	48	**9**	0	**15**	14,3	**21**	25	**27**	70
4	100	**10**	0	**16**	14,3	**22**	0		
5	100	**11**	40	**17**	9,1	**23**	0		
6	0	**12**	0	**18**	14,3	**24**	0		

Таким образом, примерно в половине УВПО вообще нет уникальных специальностей, и лишь в четырех – их доли превышают 65 %. Отсутствие уникальных специальностей в ряде УВПО вызывает сомнения в целесообразности их деятельности с позиций интересов региона. Значительно более высокая ψ_i для АГУ по сравнению с АГТУ не может быть объяснена только большим количеством специальностей (72 по сравнению с 60).

Для оценки напряженностей межвузовской конкуренции были использованы индексы симметричной и несимметричной конкуренции [6], рассчитывавшиеся соответственно по формулам

$$\left\{\Omega_{i,j} = 100\% \cdot P_{i,j} \Big/ \left(\left(c_i + c_j\right)/2\right)\right\}_{i=1\ldots I} \qquad (3)$$

$$\left\{W_{i,j} = (100\%) \cdot P_{i,j} / c_i\right\}_{i=1\ldots I}, \qquad (4)$$

где c_i, c_j – общие количества специальностей, предлагавшихся ***i***-м и ***j***-м УВПО; $P_{i,j}$ – количество совпадающих специальностей для этой пары вузов ($0 \le \Omega_{i.j} \le 100$).

Таблица 4

Индексы симметричной конкуренции (ИСК) для УВПО региона (фрагмент матрицы 27 * 27) – нумерация столбцов и строк по табл. 1

	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**
2	37,8	–									
3	14,4	21,2	–								
4	0	0	0	–							
5	0	0	0	0	–						
6	8	6,3	7,1	0	0	–					
7	5,1	17,9	6,2	0	0	0	–				
8	25,3	36,1	16,7	0	0	23,1	0	–			
9	10,3	15,1	13,0	0	0	44,4	15,4	27,6	–		
10	9,8	15,1	6,4	0	0	44,4	15,4	27,6	33,3	–	
11	7,8	9,2	6,7	0	0	25	0	14,3	18,2	0	–
12	24,1	19,7	11,1	0	0	0	0	35,3	23,5	23,5	12,5

Среднее значение по нижнему треугольнику полной (27*27) матрицы ИСК равно «11,1».

Видно, что даже бюджетные вузы значительно конкурируют друг с другом, причем обеспечение их конкурентоспособности (в том числе за счет информационно-рекламной деятельности) осуществляется во многом за бюджетные средства. Такая конкуренция делает весьма проблематичной и создание региональных «порталов знаний» [5], хотя в инженерном и социально-экономическом отношениях эта идея вполне рациональна.

Далее нами была рассчитана матрица индексов несимметричной конкуренции (ИНК) размером 27*27 и на основе нее определены (табл. 5) средние значения по каждой строке (***S_i***), оценивающие ситуацию для каждого УВПО «в целом».

Таблица 5

Оценки для S_i по ИНК для отдельных УВПО

(*i*) № УВПО	S_i	(*i*) № УВПО	S_i	(*i*) № УВПО	S_i	(*i*) № УВПО	S_i	(*i*) № УВПО	S_i
1	56,8	**7**	11,4	**13**	24,6	**19**	9,6	**25**	7,2
2	59,7	**8**	53,4	**14**	32,2	**20**	15,7	**26**	10,9
3	21,1	**9**	28,1	**15**	23,6	**21**	7,9	**27**	3,1
4	0	**10**	20,7	**16**	35,3	**22**	16,3		
5	0	**11**	12,2	**17**	30,7	**23**	15,4		
6	14,5	**12**	30,4	**18**	24,7	**24**	25,5		

Эти результаты наглядно показывают, что АГУ и АГТУ испытывают значительную конкуренцию по специальностям обучения, в том числе за счет наличия аналогичных специальностей в филиалах других УВПО.

Индексы напряженности конкуренции (r_j) по отдельным специальностям определялись по формуле

$$\left\{r_j = V_j - 1\right\}_{j=1\ldots J}, \qquad (5)$$

где V_j – количество УВПО, осуществляющих набор по ***j***-й специальности; ***J*** – общее количество специальностей. Затем подсчитывались количества специальностей (КС) по всем УВПО региона, соответственно значениям r_j

Таблица 6

Соответствие «*r*» – «КС в регионе с таким *r*»

r	КС	***R***	КС	***r***	КС	***r***	КС	***r***	КС	***r***	КС	***R***	КС
0	116	**1**	33	**2**	13	**3**	5	**4**	2	**5**	1		
8	1	**9**	1	**11**	1	**12**	1	**13**	1	**14**	1	**17**	1

Наибольшие значения «***r***» имеют специальности: юриспруденция (13); бухгалтерский учет, анализ и аудит (14); менеджмент/ менеджмент организации (17). В то же время 116 специальностей (в том числе технические и физико-математические) предлагаются лишь в одном УВПО региона.

Интегральные оценки напряженностей конкуренции по всей совокупности специальностей для ***i***-го УВПО рассчитывались по формуле

$$\left\{\Theta_i = (100\%)\cdot\left(\sum_{j=1}^{m_i} R_{i,j}\right)\Big/ m_i\right\}_{i=1\ldots I}, \qquad (6)$$

где m_i – количество специальностей для ***i***-го УВПО; $R_{i,j}$.– значения «***r***» из $\left\{r_j\right\}_{j=1\ldots m_i}$, соответствующих набору специальностей ***i***-го УВПО.

Таблица 7

Значения Θ_i для УВПО в Астрахани

(*i*) № УВПО	Θ_i	(*i*) № УВПО	Θ_i	(*i*) № УВПО	Θ_i	(*i*) № УВПО	Θ_i	(*i*) № УВПО	Θ_i
1	1,9	**7**	4,1	**13**	7,6	**19**	1,9	**25**	7
2	2,3	**8**	4,9	**14**	11,5	**20**	8,2	**26**	9,8
3	2,1	**9**	9,3	**15**	8,6	**21**	6,2	**27**	1,1
4	0	**10**	7,7	**16**	6,2	**22**	9		
5	0	**11**	5,4	**17**	6,45	**23**	13		
6	21	**12**	6,45	**18**	9,14	**24**	11,17		

Эта таблица еще раз подтверждает, что наибольшую конкуренцию испытывают внутрирегиональные филиалы иногородних УВПО, которые предлагают набор из экономических и юридических специальностей.

Итак, сделаем в ы в о д ы . 1. Бюджетные вузы Астрахани испытывают конкуренцию за контингент обучающихся не только со стороны

внутрирегиональных филиалов иногородних УВПО, но и непосредственно с вузами Волгограда, Москвы и пр. 2. Представленные в статье методы достаточно хорошо обеспечены данными для расчетов. 3. Они позволяют адекватно оценивать «положение» УВПО на внутрирегиональном рынке услуг ВПО исходя из предлагаемых вузами наборов специальностей обучения. 4. Более «глубокий» анализ требует привлечения труднодоступных данных по отдельным специальностям, касающихся: проходных баллов по ЕГЭ; долей бюджетных мест; стоимости коммерческого обучения и пр. 5. Для систематизации данных по специальностям и автоматизации их анализа целесообразно создание специализированной информационной системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Брумштейн, Ю. М.* Анализ конкурентной среды регионального вуза / Ю.М. Брумштейн, Н. Н. Пугина // Проблемы экономики. – 2006. – № 4. – С. 197–198.

2. *Брумштейн, Ю. М*. Методы оценки межвузовской конкуренции за контингент обучающихся на региональном рынке услуг высшего профессионального образования / Ю. М. Брумштейн, Н. Н. Пугина, Н. Ф. Мангаладзе, Е. В. Смирнова // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 8(46) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – (Серия «Актуальные проблемы вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 5). – С. 86–89.

3. Анализ факторов информационной безопасности региона и влияния на нее вузов / Ю. М. Брумштейн, Т. Т. Салхенов, С. В. Чернов, А. А. Боркова // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 12(60) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 7). – С. 99–100.

4. Образование в Астраханской области : стат. сб. – Астрахань : Астраханьстат. – 2012 – 59 с.

5. *Санжапов, Б. Х.* Портал знаний: модель развития информационного образовательного пространства региона / Б. Х. Санжапов, Н. В. Буханцев, А. Н. Буханцев // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 12(60) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 7. – С. 112–115.

УДК 004.89

А. Ю. Ужва, А. М. Дворянкин, И. Г. Жукова

АЛГОРИТМ АДАПТИВНОГО ПОИСКА ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ КОЛЛЕКЦИЙ НА ОСНОВЕ РАССУЖДЕНИЙ ПО ПРЕЦЕДЕНТАМ И ОНТОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ

Волгоградский государственный технический университет

alexey@uzhva.ru, zhukova@vstu.ru

Рассматривается алгоритм адаптивного поиска образовательных коллекций на основе онтологической модели представления знаний с учетом персональных характеристик и предпочтений обучаемого. Описаны функции оценки близости для оценки прецедентов, а также компонент прецедентов.

Ключевые слова: онтологическая модель представления знаний, рассуждения по прецедентам, образовательные ресурсы, адаптивный поиск.

A. Y. Uzhva, A. M. Dvoryankin, I. G. Zhukova, M. B. Kultsova

CASE-BASED REASONING ALGORITHM FOR ADAPTIVE SEARCH OF EDUCATIONAL RESOURCES USING ONTOLOGY DOMAIN MODEL

Volgogorad State Technical University

The case-based adaptive search algorithm of educational resources on ontology-based domain model considered. The described algorithm supports adaptive search with respect to student personal characteristics and knowledge field. Similarity functions described for assessment similarity of cases and components of cases.

Keywords: adaptive search, ontology, case-based reasoning, educational resources.

Введение

Развитие электронных форм образовательных ресурсов, а также рост их количества, делает актуальной задачу поиска ресурсов в соответствии с целями обучения и характеристиками обучаемого. Показано, что электронное образование способно повысить эффективность обучения, снизив при этом стоимость образовательного процесса [3].

Среди известных методов решения данной задачи наиболее перспективными являются онтологические модели представления знаний, а также алгоритм рассуждений по прецедентам. Для интеграции данных моделей и алгоритмов разработана модель прецедента, позволяющая эффективно использовать знания онтологической модели в цикле рассуждений по прецедентам.

Рассуждения по прецедентам позволяют учесть опыт предыдущих решений, увеличить количество используемых при адаптации параметров, повысить скорость работы системы, а онтологическая модель – обеспечить соответствие создаваемой коллекции требованиям учебного процесса, задействовать не только числовые параметры, но и знания о предметной области, учебном курсе, образовательном ресурсе.

Для реализации данного подхода должен быть разработан алгоритм адаптивного поиска на основе рассуждений по прецедентам.

Постановка задачи разработки алгоритма адаптивного поиска

Основной задачей процесса рассуждений по прецедентам является выбор прецедента, наиболее близкого к заданному запросу. Входными данными для нее являются запрос q и множество прецедентов *Cases* разработанной онтологической модели предметной области; выходными данными – подмножество прецедентов $Cases(q) \subset Cases$, выбранных на основании некоторого критерия *PS*. Критерий *PS* представляет вещественную оценку R степени соответствия прецедентов *Cases* запросам Q:

$$PS: Q \times Cases \to R. \quad (1)$$

Большим значениям *Cases* соответствует большая степень соответствия прецедента запросу. Таким образом, в множество выбранных прецедентов включаются прецеденты с максимальными значениями *PS*:

$$\forall case, case \in Cases, rCase \in Cases\ (q) \to \forall\ rCase,$$
$$PS(q, rCase) > PS(q, case), case \notin Cases(q). \quad (2)$$

Основным параметром для формулировки задачи выбора прецедентов является мощность n множества $Cases(q)$. Качественно различными случаями являются $n=1$ (выбор одного наиболее соответствующего запросу прецедента) и $n>1$ (выбор нескольких прецедентов). Второй случай ведет к задачам множественной адаптации и генерации решения на основе нескольких прецедентов, наиболее близких запросу. В данной работе эта задача сформулирована как задача выбора одного прецедента ($n=1$), наиболее соответствующего запросу q. Таким образом, множество $Cases(q)$ редуцировано до одного выбранного прецедента *rCase*, имеющего с максимальное значение *PS* для запроса q.

В формальном представлении предлагаемой модели прецеденту *Case* и запросу q соответствуют связные фрагменты онтологии $O[Case]$ и $O[q]$. Следовательно, критерий *PS* может быть представлен процедурой *S*, определяющей меру сходства связанных фрагментов онтологии *ONT*:

$$S: O \times O \to R. \quad (3)$$

Тогда условием выбора прецедента является:

$$\forall case, case \in Cases, rCase \equiv Cases\ (q) \to \forall\ case,$$
$$S(ont[q], ont[rCase]) > S(ont[q], ont[case]),$$
$$case \notin Cases\ (q). \quad (4)$$

Таким образом, для предлагаемой модели необходимо решить задачу разработки алгоритма выбора прецедентов, реализующего процедуру оценки *S*.

Функция оценки близости прецедентов

Согласно разработанной онтологической модели прецедента, запрос q состоит из описания образовательной задачи *Task* и описания характеристик обучаемого *UserDescr*.

Таким образом, функция сравнения прецедентов *PS* может быть декомпозирована и приведена к виду:

$$PS(Q, CaseIndex) = k_1 * PSt(Q_{Task}, CaseIndex_{Task}) + k_2 * PSd(Q_{UserDescr}, CaseIndex_{UserDescr}), \quad (5)$$

где Q – описание запроса; *CaseIndex* – описание индекса сравниваемого с запросом прецедента; k_1 – нормировочный коэффициент, определяющий важность критерия *PSt*; k_2 – нормировочный коэффициент, определяющий важность критерия *PSd*; *PSt* – мера близости образовательных задач, содержащихся в описаниях сравниваемого запроса и индекса прецедента решения; *PSd* – мера близости свойств пользователя, содержащихся в описаниях сравниваемого запроса и индекса прецедента решения.

Образовательная задача представляет собой набор теоретических и практических навыков, которые должен получить пользователь в результате изучения генерируемой образовательной коллекции. Наиболее схожими будут те образовательные задачи, у которых все целевые навыки совпадают.

Оценка близости образовательных задач

Образовательные задачи представляют собой неупорядоченное множество:

$$Task = \{KnoweledgeItem_1, \ldots, KnoweledgeItem_n\}.$$

Если множества искомых навыков в сравниваемых задачах не равны, то для вычисления меры близости необходимо учесть как пересе-

чение множества целей, так и разность в целях сравниваемых образовательных задач. Таким образом, если $T_1 = \{I_1, I_2\}$, $T_2 = \{I_1, I_2, I_3\}$, $T_3 = \{I_1, I_2, I_3\}$, $T_3 = \{I_1, I_2, I_4\}$, то должны выполняться неравенства:

$$PSt(T_1,T_2) < PSt(T_1,T_3), \quad (6)$$

$$PSt(T_1,T_2) < PSt(T_1,T_4), \quad (7)$$

а также:

$PSt(T_1,T_3) < PSt(T_1,T_4)$, если рабочая программа отводит больше времени на получение навыка I_4, чем на получение навыка I_3, либо

$PSt(T_1,T_3) > PSt(T_1,T_4)$, если рабочая программа отводит больше времени на получение навыка I_3, чем на получение навыка I_4.

Таким образом, должна быть определена функция важности KnoweledgeWeight, характеризующая количество часов, отводимое на изучение материала KnoweledgeItem:

$$KW: KnoweledgeItem \rightarrow KnoweledgeWeight, \quad (8)$$

где $KnoweledgeWeight \in [0; \infty]$.

Тогда мера сходства образовательных задач PSt_+ может быть определена как:

$$PSt_+(Tq,Tc) = \frac{\sum_{i=0}^{|C\tilde{n}|} KW(C\tilde{n}_i)}{\sum_{j=0}^{|Tq|} KW(Tq_j)}, \quad (9)$$

где Tq – описание задачи-запроса; Tc – описание задачи-прецедента; $Cc = Tq \cap Tc$ – пересечение образовательных навыков задачи-запроса и задачи-прецедента.

Выражение $\sum_{i=0}^{|C\tilde{n}|} KW(C\tilde{n}_i)$, стоящее в числителе дроби, показывает сумму весов всех навыков, которые имеются в описаниях как новой, так и содержащийся в базе данных задач. Выражение в знаменателе $\sum_{j=0}^{|Tq|} KW(Tq_j)$ показывает сумму навыков, которые присутствуют в описании задачи.

Оценка близости поля знаний и предпочтений пользователя

Так как персональные характеристики UserDescr представляют собой кортеж описаний предпочтений обучаемого UserPreferences и его поля знаний UserKnoweledge, то имеет смысл ввести дополнительные меры близости для каждого элемента этого кортежа.

Таким образом, функция меры близости персональных характеристик обучаемого *PSd* принимает вид:

$$PSd(Q_{UserDescr}, CaseIndex_{UserDescr}) = k_{2,1} \cdot PSdd(Q_{UserPreferences}, CaseIndex_{UserPreferences}) + k_{2,2} \cdot PSdk(Q_{UserKnoweledge}, CaseIndex_{UserKnoweledge}), \quad (10)$$

где *PSdd* – мера близости персональных предпочтений обучаемых; *PSdk* – мера близости полей знаний обучаемых.

Так как обе функции PSdd и PSdk являются мерами близости, то на их значения накладываются ограничения:

$$PSdd: UserPreferences \times UserPreferences \rightarrow [0..1].$$

$$PSdk: UserKnoweledge \times UserKnoweledge \rightarrow [0..1].$$

Каждый элемент массива персональных предпочтений UserPreferences характеризуется важностью данного предпочтения PreferenceImportance.

Это позволяет нам охарактеризовать меру близости PSdd следующим образом:

$$PSdd(Q,C) = \sum_{i=0}^{n} k_{2,1,i} \cdot PSdd_i(Q_i, C_i), \quad (11)$$

где n – количество рассматриваемых персональных характеристик; Q_i – i-я персональная характеристика прецедента-запроса; C_i – i-я персональная характеристика сохраненного прецедента; $PSdd_i$ – мера близости i-й персональной характеристики обучаемого; $k_{2,1,i}$ – коэффициент важности i-й персональной характеристики пользователя.

На каждую из функцй $PSdd_i$ накладываются ограничения:

$$PSdd_i: PreferenceItem \times PreferenceItem \rightarrow [0..1].$$

Так как поле знаний обучаемого представляется аналогично описанию образовательной задачи, то целесообразно применить разработанную меру близости PSt для определения функции PSdk. При этом следует учесть, что не все знания, входящие в состав поля знаний обучаемого существенны при решении конкретной задачи.

Так, например, если требуется изучить концепт предметной области C_1, входными данными для которого является множество $R=\{C_2,C_3\}$, и при этом поля знаний двух обучаемых F_1 и F_2 выглядят следующим образом:

$$F_1 = \{C_2, C_3, C_4\}; \quad (12)$$

$$F_2 = \{C_3, C_4, C_5\}, \quad (13)$$

то при простом сравнении $PSt(F_1,F_2)$ не будет учтен тот факт, что фактически знания концеп-

тов C_4 и C_5 не является необходимым требованием для изучения C_1, что может привести к неверным выводам.

Для устранения описанного недостатка целесообразно разделить множества F на подмножества $F \cap R$ и $F \Delta R$ и провести их сравнение отдельно:

$$PSdk(F_1, F_2, R_1, R_2) = 0.8 \cdot PSt(F_1 \cap R_1, F_2 \cap R_2) + 0.2 \cdot PSt(F_1 \Delta R_1, F_2 \Delta R_2), \quad (14)$$

где F_1, F_2 – наборы концептов полей знаний обучаемых; R_1, R_2 – наборы концептов образовательных задач.

Нормировочные коэффициенты

Коэффициенты k_1 и k_2 должны быть заданы на интервале [0..1]. При этом должно быть обеспечено равенство:

$$k_1 + k_2 = 1. \quad (15)$$

Частный случай этого правила – когда один из коэффициентов k_1 или k_2 равен 0. Как следует из равенства выше, другой коэффициент при этом равен единице.

Если $k_1 = 0$, то имеет место равенство:

$PS(Q,Index) = PSd(Q_{UserDescr}, Index_{UserDescr})$, но в таком случае, сравнение прецедентов не будет учитывать разницу в образовательных задачах различных пользователей, что противоречит требованиям к системе.

Если $k_2 = 0$, то имеет место равенство: $PS(Q,Index) = PSt(Q_{Task}, Index_{Task})$, но в данном случае не будет учтена разница в знаниях студентов, что лишит систему адаптивности. В таком случае система не сможет полностью использовать преимущества адаптивного обучения, что существенно снизит качество принимаемых решений.

Таким образом, на коэффициенты k_1 и k_2 должны быть наложены дополнительные ограничения:

$$k_1 \neq 0; \quad (16)$$

$$k_2 \neq 0. \quad (17)$$

Выбор конкретных значений коэффициентов должен быть осуществлен экспериментальным путем.

Выводы

Таким образом, разработанные алгоритмы обеспечивают поддержку адаптивного поиска образовательных коллекций с учетом персональных характеристик и предпочтений обучаемого на основе онтологической модели представления знаний. Данные алгоритмы апробированы на основе онтологических моделей первой части курса «Алгоритмические языки программирования» и вводной части курса «Интеллектуальные системы».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ужва, А. Ю.* Онтологическая модель предметной области, обеспечивающая поддержку рассуждений по прецедентам для поиска образовательных ресурсов / А. Ю. Ужва, И. Г. Жукова, М. Б. Кульцова // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 11(71) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 9). – С. 110–113.

2. Интеграция онтологических моделей представления знаний и рассуждений по прецедентам для генерации персонифицированных образовательных коллекций / А. М. Дворянкин, А. Ю. Ужва, И. Г. Жукова, М. Б. Кульцова // Инновационные технологии в обучении и производстве: сб. науч. тр. Всерос. конф. – Камышин, 2009. – С. 59.

3. *Aamodt, A.* Case-Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches / A. Aamodt, E. Plaza // Communications. – 1994. – № 7. – С. 39–59.

4. *Zhou, L.* Ontology learning: state of the art and open issues // Information Technology and Management. – 2007. – Т. 8, № 3. – С. 241–252.

УДК 621.644: 658.512

И. В. Фирсов, Ю. Л. Чигиринский

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЛАНОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Волгоградский государственный технический университет
Firs0v@mail.ru, Julio-Tchigirinsky@yandex.ru

Рассмотрена возможность применения алгебраических структур и алгоритмов дискретной математики для формализованного решения задач технологического проектирования. Обоснована возможность моделирования процесса формирования качества и точности поверхности изделия в ходе механической обработки с помощью сетевых структур. Сходство логических структур вероятностных таблиц точности и матрицы смежности ориентированного графа позволило применить «алгоритм Дейкстры» для построения планов механической обработки.

Ключевые слова: план механической обработки, качество и точность обработки, дискретная математика, матрица смежности, сеть, алгоритм Дейкстры, вероятностные таблицы точности.

I .V. Firsov, Ju. L. Tchigirinsky

ALGORITHMS AND DATABASES FOR DESIGNING THE TECHNOLOGICAL ROUTE OF TREATMENT

Volgograd State Technical University

The opportunity of use of the algebraic structures and algorithms of discrete mathematics for the formal solution for the tasks of technological design. The opportunity of modeling the process of forming the quality and accuracy of the surface of the parts of machinery in the course of mechanical processing with the help of network structures. The similarity of logical structures of probability tables accuracy and adjacency matrix a directed graph allowed to apply «Dijkstra's algorithm» for designing the technological route of treatment.

Keywords: technological route of treatment, quality and accuracy of mechanical treatment, discrete mathematics, adjacency matrix, network, Dijkstra's algorithm, probability tables accuracy.

Возможность эффективного применения систем автоматизированного проектирования определяется, в первую очередь, уровнем формализации инженерных задач. Известно, что большинство задач технологического проектирования, особенно решаемых на начальных стадиях подготовки машиностроительного производства, относятся к так называемым неформализованным. Именно этим можно объяснить низкую эффективность использования технологических [1, 2, 3] САПР.

В настоящем исследовании мы рассматриваем одну из таких задач – построение планов обработки элементарных поверхностей изделий заданного качества. Здесь под *качеством изделия* подразумевается комплекс показателей, определяемый, как правило, точностью размеров (например, ширина поля допуска или номер квалитета точности *IT*); точностью взаимного расположения поверхностей; параметрами состояния поверхностного слоя (глубина слоя с измененными физико-механическими характеристиками, уровень напряжений в поверхностном слое, высотные и шаговые параметры микропрофиля поверхности). В нашем исследовании рассматриваются показатели качества, наиболее часто задаваемые на рабочих чертежах изделий машиностроения: номер квалитета точности выполняемых размеров *IT* и величина среднего арифметического отклонения профиля *Ra*. Основными факторами, определяющими низкий уровень формализации данной задачи, являются:

1) неоднородность и малая надежность [4, 5] справочной информации для четкого определения возможностей каждого метода обработки;

2) отсутствие алгоритмов поиска оптимальных маршрутов обработки с учетом требуемых параметров качества и критериев оптимизации.

Для решения первой проблемы были проведены исследования [5, 6], показавшие отсутствие структурированной информации, необходимой для проектирования технологического маршрута обработки. Авторами предложена методика [7], основанная на представлении технологического процесса в виде структурно-временной таблицы, что позволяет рассматривать процесс формирования требуемого качества изделия в виде транспортной сети (рис. 1).

Таким образом, информацию о возможностях каждого из методов обработки можно представить в виде матрицы смежности (табл. 1) которая описывает сеть (рис. 1), наглядно представляющую возможные варианты плана механической обработки поверхности требуемого качества. В качестве весовых параметров дуг сети мы предлагаем использовать, в зависимости от этапа решения задачи, следующие значения: величины изменения, в результате обработки, технологических показателей качества; величины материальных или энергетических затрат на осуществление обработки; величины

вероятности получения, в результате обработки, требуемых показателей качества.

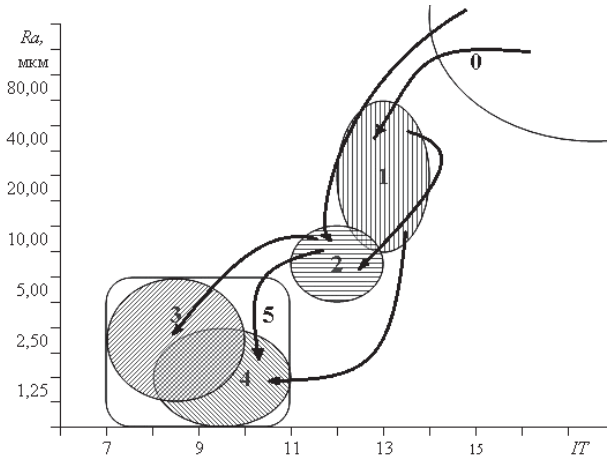


Рис. 1. Формальная схема последовательности обработки: «Облака» – области значений, рассматриваемых в работе показателей качества, достижимые в результате обработки технологическими методами: 0 – заготовка; 1 – точение черновое; 2 – точение получистовое (однократное); 3 – точение чистовое; 4 – шлифование получистовое; 5 – готовая поверхность. Стрелки – реализуемые в производстве технологические переходы

Таблица 1

Матрица смежности графа обработки

Номер метода	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
0	0	1	1	0	0	0
1	0	0	1	0	1	0
2	0	0	0	1	1	0
3	0	0	0	0	0	1
4	0	0	0	0	0	1
5	0	0	0	0	0	0

Таблица 2

«Весовая» матрица смежности графа обработки

Номер метода	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
0	0	0,93	0,89	0	0	0
1	0	0	0,99	0	0,85	0
2	0	0	0	0,99	0,87	0
3	0	0	0	0	0	0,96
4	0	0	0	0	0	1
5	0	0	0	0	0	0

В приведенном примере веса дуг сети определяются как вероятность получения необходимого результата обработки на каждом из технологических переходов. Домножив матрицу смежности на веса дуг, соединяющих узлы сети, можно получить «весовую» матрицу смежности (табл. 2), которая представляет собой «горизонтальный срез» вероятностной таблицы точности [8] – трехмерной информационной структуры, предназначенной для хранения не только справочных данных о технологических возможностях методов обработки – традиционных таблиц точности, – но и численных величин, характеризующих изменение точности и качества [7, 8] обработанной поверхности в ходе технологического процесса.

Для реализации вероятностных таблиц точности в качестве информационного обеспечения системы проектирования планов обработки разработана реляционная база данных. База данных включает следующие группы таблиц: технологические возможности методов обработки; данные, необходимые для выполнения оптимизационных расчетов; собственно вероятностные таблицы точности и результирующие таблицы. База данных построена в соответствии с правилами проектирования информационных систем и приведена к нормальным формам, что обеспечивает отсутствие избыточности информации.

В качестве основы при построении алгоритма генерации оптимального маршрута обработки выбран «алгоритм Дейкстры» [9], позволяющий производить поиск кратчайшего пути в ориентированном графе посредством нахождения расстояния от заданной вершины к вершинам, связанным с ней. Таким образом, при последовательном выполнении переходов из каждого узла сети во все смежные, определяется минимальный путь между двумя любыми заданными узлами.

Модификация «алгоритма Дейкстры» (рис. 2) для решения задачи проектирования технологического маршрута заключается в изменении условия, определяющего направление каждого следующего шага, поскольку требуется найти наиболее длинный технологический маршрут. Это связано с тем что, при использовании в качестве весов дуг графа значения вероятностей получения требуемых результатов обработки, необходимо получить маршрут обработки, обеспечивающий максимальную вероятность достижения заданного качества.

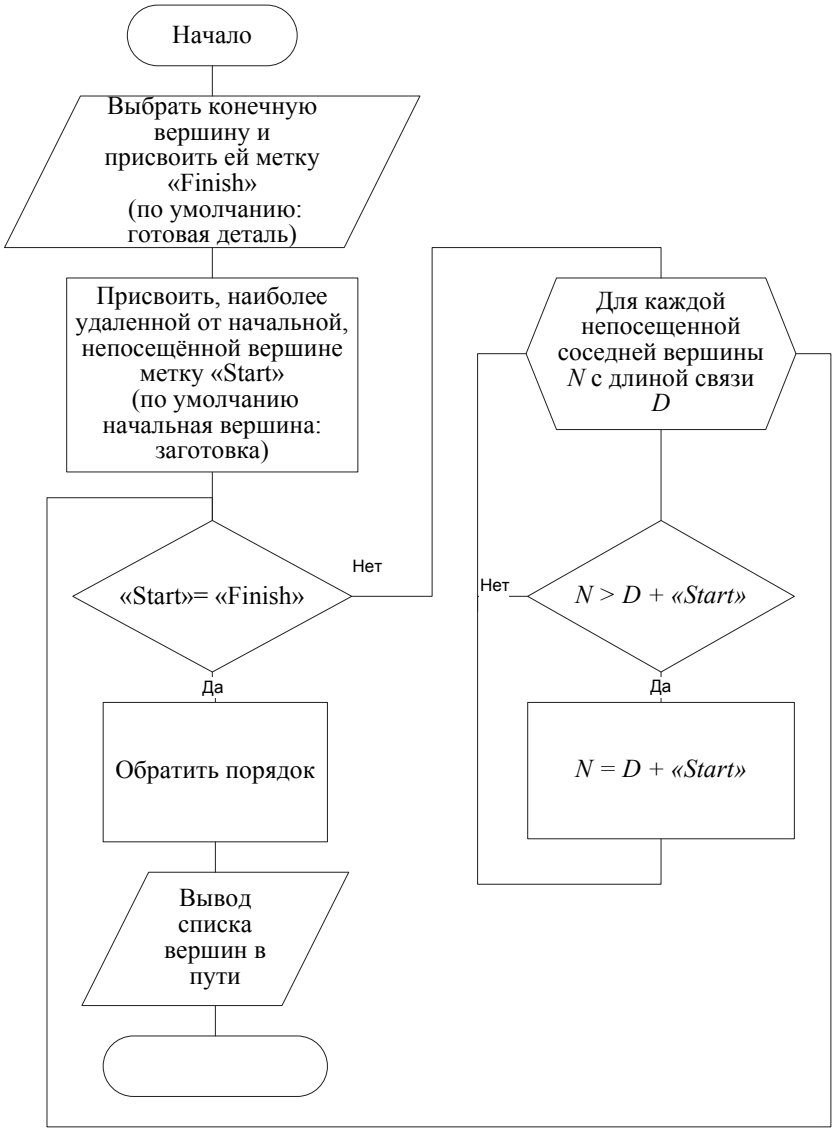


Рис. 2. Блок-схема «модифицированного» алгоритма «Дейкстры»

Выполнение алгоритма можно иллюстрировать на примере «весовой» матрицы смежности (рис. 3, 4). Использование данного алгоритма позволяет сократить время на получение требуемого результата за счет исключения функции перебора найденных маршрутов.

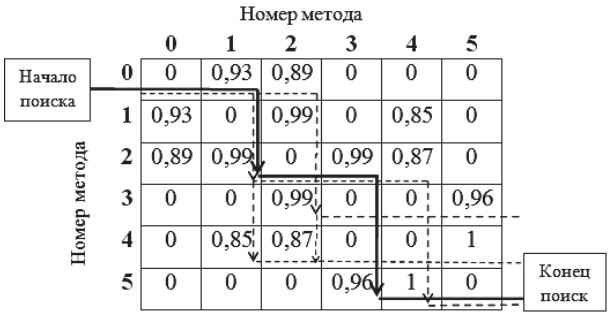


Рис. 3. Представление алгоритма «Дейкстры» на «весовой» матрице смежности

0-1-2-3-5
0-1-2-4-5
0-1-4-5
0-2-3-5
0-2-4-5

Рис. 4. Список путей в ориентированном графе обработки

Решение поставленных задач сделало возможным создание информационного модуля поддержки инженерных решений. Авторами была разработана программа поиска маршрутов обработки (рис. 5).

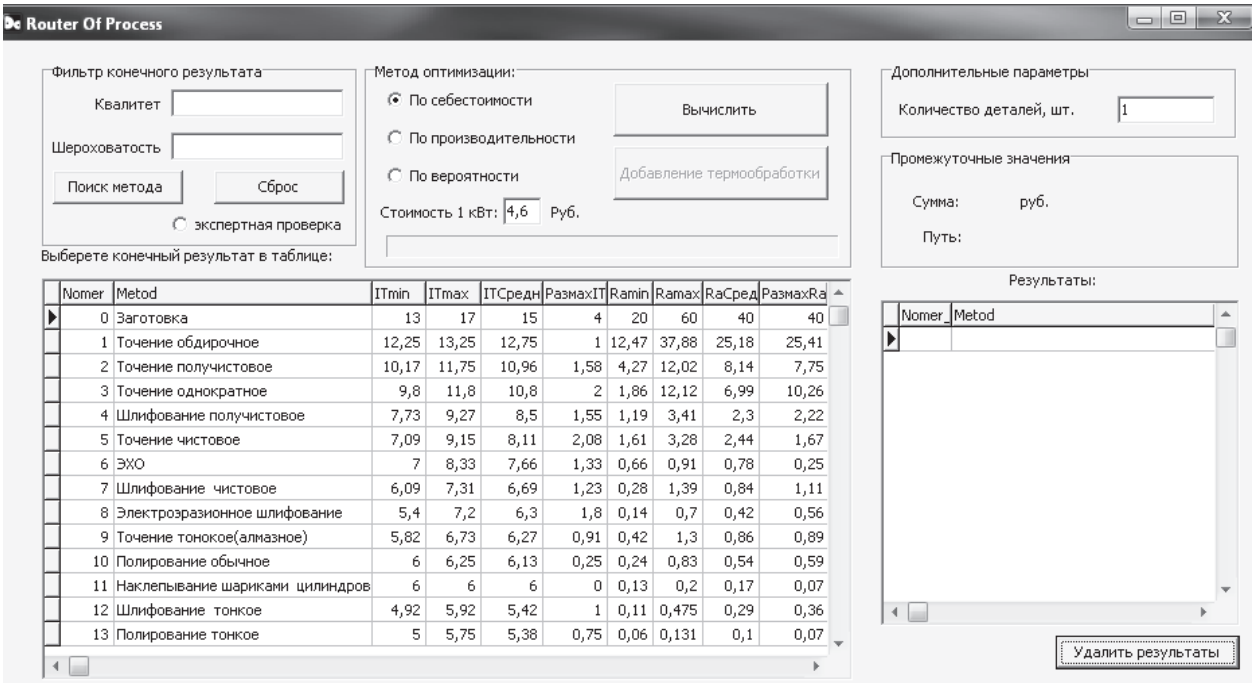
Информационная подсистема программного модуля, на данном этапе исследований, реализует вероятностные таблицы точности обработки наружных цилиндрических поверхностей.

В качестве весовых значений дуг графа в разработанном модуле реализованы следующие:

1) стоимость обработки на заданной операции, руб.;

2) время обработки на заданной операции, мин.;

3) вероятность получения заданного результата, %.



Nomer	Metod	ITmin	ITmax	ITСредн	РазмахIT	Ramin	Ramax	RaСред	РазмахRa
0	Заготовка	13	17	15	4	20	60	40	40
1	Точение обдирочное	12,25	13,25	12,75	1	12,47	37,88	25,18	25,41
2	Точение получистовое	10,17	11,75	10,96	1,58	4,27	12,02	8,14	7,75
3	Точение однократное	9,8	11,8	10,8	2	1,86	12,12	6,99	10,26
4	Шлифование получистовое	7,73	9,27	8,5	1,55	1,19	3,41	2,3	2,22
5	Точение чистовое	7,09	9,15	8,11	2,08	1,61	3,28	2,44	1,67
6	ЭХО	7	8,33	7,66	1,33	0,66	0,91	0,78	0,25
7	Шлифование чистовое	6,09	7,31	6,69	1,23	0,28	1,39	0,84	1,11
8	Электроразионное шлифование	5,4	7,2	6,3	1,8	0,14	0,7	0,42	0,56
9	Точение тонокое(алмазное)	5,82	6,73	6,27	0,91	0,42	1,3	0,86	0,89
10	Полирование обычное	6	6,25	6,13	0,25	0,24	0,83	0,54	0,59
11	Наклепывание шариками цилиндров	6	6	6	0	0,13	0,2	0,17	0,07
12	Шлифование тонкое	4,92	5,92	5,42	1	0,11	0,475	0,29	0,36
13	Полирование тонкое	5	5,75	5,38	0,75	0,06	0,131	0,1	0,07

Рис. 5. Рабочее окно программы поиска маршрута обработки

Данные параметры используются в качестве критериев оптимизации, Для поиска маршрута обработки с учетом критериев оптимизации по показателям себестоимости продукции и производительности производства используется обычный алгоритм «Дейкстры», так как наиболее оптимальным является маршрут, обладающий минимальными затратами и минимальным временем на обработку. При поиске маршрута обработки с максимальной вероятностью получения поверхности заданного качества используется «модифицированный» алгоритм «Дейкстры».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Чигиринский, Ю. Л.* Анализ задач технологической подготовки производства и выбор математических методов и средств их решения / Ю. Л. Чигиринский, Н. В. Чигиринская // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 9 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2004. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении» ; вып. 1). – С. 62–64.

2. *Чигиринский, Ю. Л.* Методы дискретной математики в технологическом проектировании / Ю. Л. Чигиринский, Н. Д. Гожева, Е. Г. Радченко // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 4 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении» ; вып. 3). – С. 112–114.

3. *Чигиринский, Ю. Л.* Возможность автоматизированного построения маршрутного технологического процесса / Ю. Л. Чигиринский // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 12 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении» ; вып. 6). – С. 65–68.

4. *Чигиринский, Ю. Л.* Методика статистического оценивания надежности процесса / Ю. Л. Чигиринский, Н. В. Чигиринская // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 8 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении» ; вып. 5). – С. 53–56.

5. *Чигиринский, Ю. Л.* Надежность справочных данных, применяемых в технологическом проектировании / Ю. Л. Чигиринский // Изв. ОрелГТУ. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – 2009. – № 2–2/274 (март–апрель). – С. 103–108.

6. *Чигиринский*, Ю. Л. Методика повышения надежности справочных данных / Ю. Л. Чигиринский // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 13 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении» ; вып. 7). – С. 55–61.

7. *Чигиринский, Ю. Л.* Формализация построения последовательности обработки наружных цилиндрических поверхностей / Ю. Л. Чигиринский, И. В. Фирсов, Ю. Н. Орлова // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 13(100) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении» ; вып. 8). – С. 92–97.

8. Прогрессивные машиностроительные технологии : монография / А. Н. Афонин [и др.]. – М.: Спектр, 2012. – Т. I. – 333 с.

9. *Левитин, А. В.* Алгоритмы: введение в разработку и анализ / А. В. Левитин. – М.: Вильямс, 2006. – 576 с.

УДК 338.2 ; 519.24

Н. В. Чигиринская

СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАТРАТ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТРУБОПРОВОДОВ

Волгоградский государственный технический университет

nvtchi@yandex.ru

Рассмотрена эффективная методика расчета затрат на инвестиционный проект по прокладке газопровода. Представлено сравнение результатов расчетов для случаев линейной и нелинейной экстраполяции. Показано, что отбор факторов для построения модели только по величине коэффициента парной корреляции дает некорректные результаты моделирования. Обосновано положение о том, что для получения корректных результатов прогнозирования затрат необходим тщательный анализ данных, используемых в качестве исходных в принятых в инвестиционном проектировании расчетных методиках.

Ключевые слова: инвестиционный проект, затратный подход, моделирование затрат, факторы регрессионных моделей, адекватность моделей.

N. V. Chigirinskaya

STATISTICAL MODELING OF COSTS FOR DESIGN OF PIPELINES

Volgograd State Technical University

Considered an effective method of calculation of cost of the investment project on laying the gas pipeline. A comparison of the calculation results for the cases of linear and non-linear extrapolation. It is shown that the selection of factors to build the model, only the largest coefficient the bivariate correlation gives incorrect results of the simulation. Grounded on the fact that in order to get correct results of forecasting the costs requires a thorough analysis of the data used as a source in the investment design of settlement methods.

Keywords: investment project, cost approach, modeling of cost factors regression models, the adequacy of the models.

Сущность, порядок расчета и особенности применения в оценочной практике показателей экономической эффективности инвестиционных проектов необходимо постоянно изучать. Это обусловлено, с одной стороны, тем, что инвестиционный проект выступает либо как самостоятельный объект оценки, либо как один из элементов собственности [1], выделяемых в затратном подходе наряду с машинами и оборудованием, интеллектуальной собственностью и т. д.

С другой стороны, если целью оценки является купля-продажа собственности, то потенциальный собственник предполагает инвестировать средства, совпадающие с итоговой величиной стоимости, определенной по совокупности трех подходов: доходного, сравнительного и затратного. Следовательно, процесс дисконтирования, осуществленный в доходном подходе, нуждается к корректировке.

Привлекательность инвестиционного проекта может быть оценена по большому числу факторов и критериев: ситуации на рынке инвестиций, состоянию финансового рынка, профессиональным интересам и навыкам инвестора, финансовой состоятельности проекта, геополитическому фактору и т. д. Однако на практике существуют универсальные методы инвестиционной привлекательности проектов, которые дают формальный ответ: выгодно или невыгодно вкладывать деньги в данный проект; какой проект предпочесть при выборе из нескольких вариантов.

Инвестирование с точки зрения владельца капитала означает отказ от сиюминутных выгод ради получения дохода в будущем. Проблема оценки инвестиционной привлекательности состоит в анализе предполагаемых вложений в проект и потока доходов от его использования. Аналитик должен оценить, насколько предполагаемые результаты отвечают требованиям инвестора по уровню доходности и сроку окупаемости.

Для принятия решения по инвестиционному проекту необходимо располагать информацией о характере полного возмещения затрат, а также о соответствии уровня дополнительного получаемого дохода, степени риска неопределенности достижения конечного результата [3, 5]. Таким образом, необходимо знание как минимум трех составляющих – полные затраты, предполагаемый доход и дисконтная ставка проекта. Обратимся к получению исходных показателей затрат.

С этой целью нами были смоделированы возможные затраты на инвестиционный проект

по прокладке газопровода. В качестве основных факторов при построении регрессионных моделей были приняты [6] следующие: диаметр трубопровода (Φ_1) и суммарные длины всех участков трубопровода, проходящих по суше (Φ_2), и всех водных (Φ_3) преград; в качестве целевой функции (R) – величина затрат на проектирование.

Корректный регрессионный анализ возможен только при соблюдении нескольких обязательных условий [2, 7, 8, 9], первым из которых обычно называют условие взаимной независимости факторов [4], которое проверяется, например, по величине коэффициента парной корреляции. Расчет (табл. 1) коэффициентов парной корреляции для каждого из выбранных факторов и целевой функции ($r_{\Phi_i R}$) показывает достаточно высокую (> 0,45) вероятность существования искомой зависимости.

В то же время малые значения вероятностей для перекрестных коэффициентов корреляции ($r_{\Phi_1\Phi_2}$, $r_{\Phi_1\Phi_3}$, $r_{\Phi_2\Phi_3}$) позволяют сделать вывод о взаимной независимости факторов и, следовательно, о возможности построения адекватной регрессионной модели, показывающей зависимость функции от выбранных факторов.

Однако для того чтобы анализ модели, с точки зрения количественной оценки влияния каждого из факторов на целевую функцию, был корректным, необходимо обеспечить «безразмерность» всех числовых величин, используемых при построении модели и единство масштабной шкалы.

Таблица 1

Парная и перекрестная корреляция факторов

	Φ_2	**Φ_3**	**Функция**
Φ_1	0,0007	0,1975	0,4605
Φ_2		0,1694	0,7305
Φ_3			0,4866

Таблица 2

Общие условия расчета

Значение в интервале варьирования	Факторы реальные			Интервал варьирования целевой функции, тыс. руб
	Φ_1, мм	Φ_2, км	Φ_3, м	
Минимальное	90,00	3,60	0,00	4,65
Максимальное	660,00	220,00	5500,00	182,10
Среднее	375,00	111,80	2750,00	93,37

Для перехода от реальных (табл. 2) значений к единой масштабной шкале и безразмерным величинам выполняется нормирование факторов и целевой функции в соответствии с правилами [7, 8], приведенными в табл. 3.

Таблица 3

Правила нормирования моделей

Спецификация и общий вид модели:		Нормирующее соотношение		Нормированный интервал
исходной	нормированной	факторы	функция	
Линейная, $R = b_0 + \sum_{i=1}^{n} b_i \cdot \Phi_i$	Линейная $Y = a_0 + \sum_{i=1}^{n} a_i \cdot X_i$	$X_i = 2 \cdot \frac{\Phi_i - \Phi_i^{\min}}{\Phi_i^{\max} - \Phi_i^{\min}} - 1$	$Y = 2 \cdot \frac{R - R^{\min}}{R^{\max} - R^{\min}} - 1$	
Показательная, $R = b_0 \cdot \prod_{i=1}^{n} b_i^{\Phi_i}$			$Y = 2 \cdot \frac{\ln\left(R / R^{\min}\right)}{\ln\left(R^{\max} / R^{\min}\right)} - 1$	
СТепенная, $R = b_0 \cdot \prod_{i=1}^{n} \Phi_i^{b_i}$		$X_i = 2 \cdot \frac{\ln\left(\Phi_i / \Phi_i^{\min}\right)}{\ln\left(\Phi_i^{\max} / \Phi_i^{\min}\right)} - 1$		

В результате нормирования общий вид исходных (табл. 3) функций сводится к обычному линейному виду, что существенно упрощает расчет и проверку значимости коэффициентов регрессии. Величины статистически значимых коэффициентов регрессии для наиболее часто рассматриваемых спецификаций (табл. 3, первый столбец) математических моделей – линейной, показательной (экспоненциальной) и степенной – приведены в табл. 4.

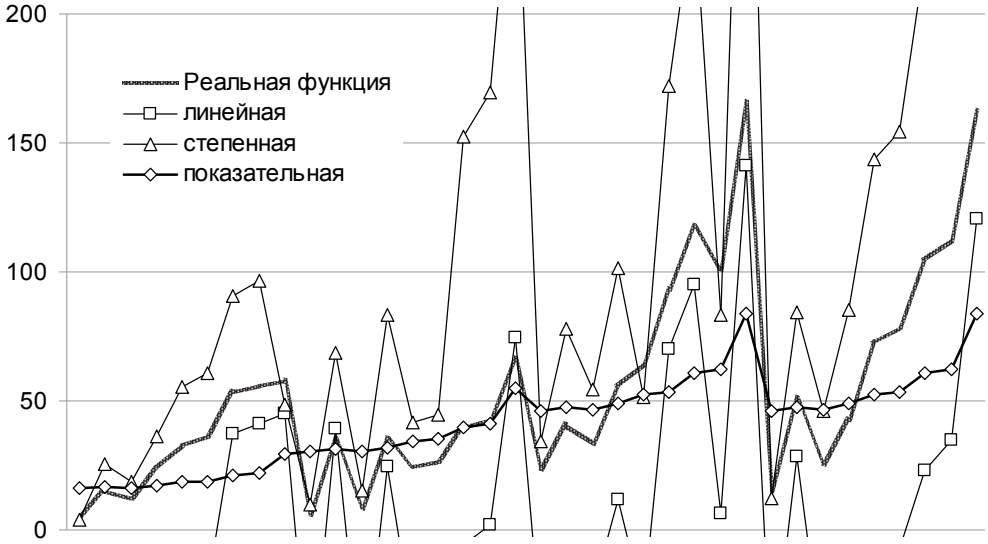
Таблица 4

Сравнение нормированных моделей

Спецификация модели	Адекватность модели	Средняя погрешность модели	Значимость факторов			
			X_0	X_1	X_2	X_3
Линейная	85 %	240 %	-0,45	0,13	0,76	0,59
Показательная	80 %	61 %	0,17	0,33	0,18	0,00
Степенная	95 %	94 %	0,17	0,29	0,70	0,31

Примечание : значимость каждого фактора оценивается величиной и знаком соответствующего коэффициента регрессии.

Уровень адекватности модели определяется по величине статистического критерия Фишера [4, 7, 8, 9], как вероятность того, что гипотеза о существенности отличия стандартной ошибки модели от стандартного отклонения совокупности значений целевой функции является достоверной. Статистическая значимость факторов оценивается по критерию Стьюдента при уровне адекватности модели.



Сравнение регрессионных моделей

Анализ результатов моделирования (табл. 4) и визуальное сравнение графиков различных моделей позволяет сделать следующие выводы:

1) наиболее точный прогноз показывает экспоненциальная модель, однако средняя погрешность прогнозирования (61 %) недопустимо велика для практического использования полученной зависимости;

2) отбор факторов для построения модели только по величине коэффициента парной корреляции дает некорректные результаты моделирования. В частности, анализ построенной модели показывает, что наиболее значимым фактором является фактор Φ_1, для которого коэффициент парной корреляции имеет минимальное значение. Наиболее значимый, по предварительной оценке ($r_{\Phi_2 R} = 0,7305$), фактор Φ_2 в показательной модели является вообще несущественным. Значимость третьего фактора сравнима с совокупным влиянием неучтенных погрешностей модели;

3) для получения корректных результатов прогнозирования затрат необходим более тщательный анализ данных, используемых в качестве исходных в принятых [6] расчетных методиках.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Дроботов, А. С.* Оценка качества инновационных проектов на основе имитационного моделирования / А. С. Дроботов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 11(71) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 9). – С. 68–71.

2. *Дыков, М. А.* Ранжирование результатов поисковых запросов в интернет-магазине на основании предпочтений покупателей / М. А. Дыков, П. Н. Воробкалов // Известия

ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 11(71) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 9). – С. 71–73.

3. *Камаев, В. А.* Анализ социально-экономического развития муниципальных образований на примере Волгоградской области с использованием моделей DATA MINING / В. А. Камаев, М. В. Щербаков, А. С. Аль-Катабери // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 6(66) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 8). – С. 103–106.

4. *Крохалев, А. В.* Использование факторного анализа для изучения структуры остаточных знаний по курсу технология материалов / А. В. Крохалев, Д. Е. Декатов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 9(35) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 3). – С. 87–88.

5. *Свинцов, В. Я.* Моделирование структуры инвестиций в воспроизводство жилищного фонда / В. Я. Свинцов, П. Н. Садчиков // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 2(40) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 1). – С. 80–83.

6. Справочник базовых цен на проектные работы для строительства [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://files.stroyinf.ru.

7. *Чигиринская, Н. В.* Математическое моделирование в экономике: учеб. пособие / Н. В. Чигиринская; ВолгГТУ. – Волгоград, 2006. – 68 с.

8. *Чигиринская, Н. В.* Экономическое прогнозирование изменения курса доллара в РФ (эконометрический подход) / Н. В. Чигиринская // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 7(94) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Актуальные проблемы реформирования российской экономики (теория, практика, перспектива)» ; вып. 13). – С. 190–195.

9. *Щербаков, М. В.* Методика выбора значимых параметров для краткосрочного прогнозирования энергопотребления / М. В. Щербаков, Н. Л. Щербакова, А. Бребельс // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 11(71) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 9). – С. 68–71.

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

УДК 004.434

Д. А. Еркин, А. А. Алимов, О. А. Шабалина

ПРИМЕНЕНИЕ ДЕКЛАРАТИВНОГО ОПИСАНИЯ ГРАФИЧЕСКОГО ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО ИНТЕРФЕЙСА ПРИ РАЗРАБОТКЕ ИГРОВЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

Волгоградский государственный технический университет

hate.cska@gmail.com, velorth@yandex.ru, o.a.shabalina@gmail.com

В данной статье рассматривается применение декларативного подхода к созданию графического пользовательского интерфейса игровой направленности. Описаны язык разметки и алгоритм реализации графического пользовательского интерфейса, которые могут быть применены при разработке компьютерных игр.

Ключевые слова: графический пользовательский интерфейс, компьютерная игра, декларативный подход, язык разметки.

D. A. Yerkin, A. A. Alimov, O. A. Shabalina

USING DECLARATIVE GRAPHICAL USER INTERFACE IN GAME APPLICATIONS DEVELOPMENT

Volgograd State Technical University

In this paper the use of declarative approach for designing of game-oriented graphical user interface is considered. The markup language and the graphical user interface realization algorithm which can be used in computer games development are described.

Keywords: graphical user interface, computer game, declarative approach, markup language.

Введение

Разработка компьютерных игр представляет собой сложный процесс, требующий привлечения высококвалифицированных специалистов. Для создания качественного игрового приложения усилий одних только программистов недостаточно. Это обусловлено тем, что к компьютерным играм применяются следующие критерии качества: увлекательность игровой составляющей, привлекательность игрового мира, сюжета и стиля игры, высокий уровень визуального и звукового оформления, удобство взаимодействия с игроком [1]. Поэтому к разработке игрового приложения часто привлекаются профессиональные дизайнеры.

Большая часть критериев, определяющих качество компьютерной игры, непосредственно относится к графическому пользовательскому интерфейсу (Graphical User Interface, GUI). Именно его созданием в первую очередь занимаются дизайнеры, привлекаемые к процессу разработки игры.

Способы реализации игрового GUI

В настоящее время практически единственным подходом к реализации GUI компьютерной игры является его описание непосредственно в коде на императивном языке программирования. Однако это приводит к смешиванию программных слоев, реализующих бизнес-логику приложения и его пользовательский интерфейс [2], что делает программный код громоздким и трудночитаемым и усложняет дальнейшее развитие компьютерной игры. Еще одним существенным недостатком такого подхода является невозможность реализации GUI непосредственно профессиональным дизайнером без привлечения программиста, так как для этого требуются навыки работы с языком программирования высокого уровня. Из-за этого процесс создания GUI может существенно затянуться по времени.

Данные проблемы можно устранить с помощью применения декларативного описания GUI. В отличие от императивного декларатив-

ный подход подразумевает описание непосредственно GUI, а не последовательности действий, в результате выполнения которых происходит реализация GUI [2]. Это позволяет изолировать описание GUI от программного кода бизнес-логики приложения, что дает возможность поручить создание GUI отдельному разработчику (или группе разработчиков).

При декларативном подходе GUI описывается не на языке программирования высокого уровня, а на языке разметки [2]. Описание GUI на таких языках сводится к объявлению элементов GUI и присваиванию нужных значений их определенным свойствам. Языки разметки обладают лаконичным синтаксисом, и для работы с ними не требуются навыки программирования.

Проблемы применения декларативного описания GUI к разработке игр

В настоящее время декларативный подход к созданию GUI весьма широко используется при создании настольных приложений, веб-приложений и сайтов. Но для разработки компьютерных игр современные технологии декларативного описания GUI практически не применимы, так как в большинстве из них языки разметки являются лишь маскировкой языков программирования высокого уровня (например, язык MXML, используемый в технологии Adobe Flex [3]). При создании GUI с применением данных технологий, происходит предварительное преобразование кода на языке разметки в эквивалентный код на высокоуровневом языке с последующей реализацией GUI. В компьютерных играх, которые потребляют большое количество ресурсов программного и аппаратного обеспечения, целесообразно генерировать GUI не при запуске, а только в определенные моменты (например, когда его присутствие необходимо в соответствии с сюжетом игры). Поэтому реализация GUI должна происходить непосредственно из описания на языке разметки без преобразования кода и последующей компиляции, так как проведение данных действий в процессе работы приложения существенно увеличит время его выполнения.

Еще одним фактором, препятствующим применению современных технологий декларативного описания GUI при разработке компьютерных игр, является использование в них в качестве языков разметки расширений языка XML, предназначенного для хранения сложно структурированной информации. Из-за того, что в данном языке используется иерархическая модель представления данных [4], описание GUI может быть достаточно громоздким (особенно при описании элементов GUI нестандартного внешнего вида), что также требует дополнительных временных затрат при реализации GUI на основе описания.

Данные препятствия устраняются путем создания языка, ориентированного на описание GUI, а также алгоритма реализации GUI на основе его описания на языке разметки без преобразования в код на языке высокого уровня, который может быть выполнен в любой момент работы игрового приложения.

Разработка предметно-ориентированного языка разметки игрового GUI

Для минимизации количества кода язык разметки должен иметь упрощенный синтаксис и реляционную модель представления данных. Структура описания элемента GUI в форме Бэкуса – Наура имеет следующий вид:

<Описание> ::= <Тип> <Имя> ["(" <Свойства> ")"] [<Родительский элемент>] "."

<Тип> ::= <Буква> [{<Буква>}] [{<Цифра>}] [{<Буква>}]

<Буква> ::= "A" | "B" | "C" | ... | "Z" | "a" | "b"| "c" | ... | "z"

<Цифра> ::= "0" | "1" | "2" | "3" | "4" | "5" | "6" | "7" | "8" | "9"

<Имя> ::= <Буква> [{<Буква>}] [{<Цифра>}] [{<Буква>}]

<Свойства> ::= <Имя свойства> "=" <Значение> | <Свойства> "," <Имя свойства> "=" <Значение>

<Имя свойства> ::= <Буква> [{<Буква>}] [{<Цифра>}] [{<Буква>}] | <Имя свойства> "."<Буква> [{<Буква>}] [{<Цифра>}] [{<Буква>}]

<Значение> ::= [{<Символ>}] | <Привязка>

<Символ> ::= <Буква> | <Цифра> | "." | "," | "?" | "+" | "-" | ... | '\"' | "\\" | " "

<Привязка> ::= "{" <Имя> "." <Имя свойства> ["," <Режим>] "}"

<Режим> ::= "TargetMode" | "SourceMode" |"UnitedMode"

<Родительский элемент> ::= "on" <Имя>

Блок «Тип» представляет собой название класса элемента GUI из используемой библиотеки. В блоке «Имя» находится имя элемента, присваиваемое разработчиком. Названия классов и имена переменных состоят из букв английского алфавита и цифр (первым символом обязательно должна быть буква).

В блоке «Свойства», заключенном в круглые скобки, через запятую происходит перечисление значений свойств (в случае отсутствия данного блока свойствам элемента присваиваются значения по умолчанию). Значения задаются последовательностью символов, что позволяет присваивать значения свойствам любого типа. Также возможна привязка свойств к данным путем задания в фигурных скобках имени источника данных и имени его свойства, к значению которого происходит привязка. Привязка может быть осуществлена в трех режимах: по умолчанию – от свойства источника к целевому свойству («TargetMode»), от целевого свойства к свойству источника («SourceMode») и в двухстороннем режиме («UnitedMode»).

В блоке «Родительский элемент» описывается принадлежность данного элемента GUI к одному из ранее описанных с помощью ключевого слова *on* (данный блок отсутствует в описании базового элемента, создаваемого GUI). Заканчивается описание элемента точкой.

Таким образом, описание GUI, представляющего собой форму белого цвета шириной 300 и высотой 150, содержащую поле для ввода текста, расположенное вверху формы, и пятиугольную кнопку с координатами вершин (50; 70), (70; 50), (90; 50), (90; 90), (70, 90) и текстом, дублирующим введенный в текстовое поле, на данном языке разметки выглядит следующим образом:

Form form1 (Width="300", Height="150", Background="#FFFFFF").
TextBox textBox1 (VerticalPosition="Top") on form1.
Button button1 (Template.Path="(50; 70), (70; 50), (90; 50), (90; 90), (70, 90)" Text="{textBox1.Text, TargetMode}") on form1.

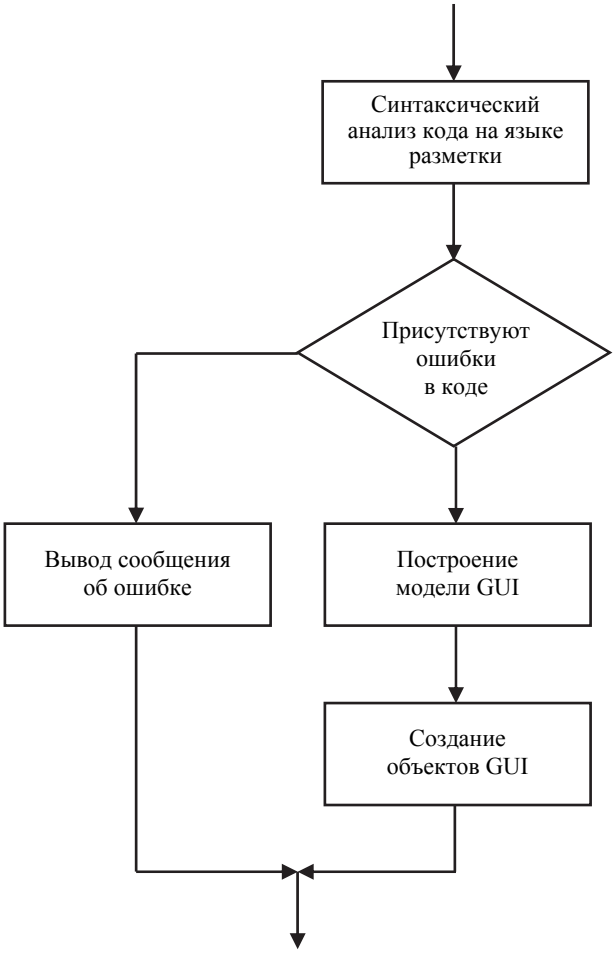
Отказ от синтаксиса XML и иерархической модели представления данных в пользу реляционной позволяет сократить количество кода, избавиться от перегрузки описания тэгами и сделать его более удобным для дизайнеров.

Алгоритм генерации GUI на основе описания на языке разметки

Алгоритм генерации GUI на основе его описания на языке разметки представляет собой последовательность действий, изображенную на рисунке.

На этапе «Синтаксический анализ кода на языке разметки» происходит проверка правильности синтаксиса кода и разбор описания GUI по отдельным элементам [2]. Наличие ошибок приведет к аварийному завершению работы алгоритма и выводу сообщений об ошибках. При отсутствии ошибок на этапе «Построение модели GUI» происходит отображение элементов GUI и отношений между ними в память. Объекты элементов GUI будут сгенерированы на этапе «Создание объектов GUI» на основе созданной модели [2].

Для генерации объектов наиболее пригодно использование механизма рефлексии [5]. Данный механизм позволяет создать объект нужного типа, точное имя которого становится известным только во время выполнения программы, и соответствующим образом его использо-



Алгоритм генерации GUI на основе кода на языке разметки

вать. В результате GUI может генерироваться в любой момент выполнения приложения без промежуточного преобразования описания на языке разметки в соответствующий код на высокоуровневом языке. Данный метод применим к объектам любого типа и любого набора свойств и поэтому не привязан к конкретной библиотеке элементов GUI. Также применение механизма рефлексии позволяет осуществить привязку данных непосредственно к свойствам элементов GUI для непосредственного и быстрого отображения состояния переменных, что является важным для компьютерных игр (например, для отображения прогресса, здоровья, скорости и т. д.).

Выводы

Применение декларативного описания графического пользовательского интерфейса при разработке игровых приложений не только возможно, но и предоставляет разработчикам некоторые преимущества перед традиционным подходом. Однако декларативный подход требует использование языка разметки, ориентированного на данную предметную область, и соответствующего алгоритм реализации GUI. Описанные в данной статье язык разметки и алгоритм успешно применялись при создании компьютерных игр в среде разработки игровых тренажеров, созданной на кафедре САПР и ПК Волгоградского государственного технического университета.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Шабалина, О. А.* Разработка обучающих игр: интеграция игровой и обучающей компоненты / О. А. Шабалина, П. Н. Воробкалов, А. В. Катаев // Открытое образование. – 2011. – № 2. – С. 290–294.

2. Creating a declarative XML UI language [Электронный ресурс]. – 2009. – Режим доступа : http://www.ibm.com/developerworks/web/library/x-decxmlui/index.html

3. About MXML [Электронный ресурс]. – [2013]. – Режим доступа : http://livedocs.adobe.com/flex/3/html/help.html?content=mxmlcomponents_2.html

4. *Кузнецов, М. А.* Машинное представление иерархических структур на основе XML и DOM / М. А. Кузнецов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1(60) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 1). – С. 97–100.

5. *Еркин, Д. А.* Разработка системы декларативного описания GUI в игровых приложениях / Д. А. Еркин // Тезисы докладов конференции-конкурса научных, конструкторских и технологических работ студентов Волгоградского государственного технического университета / ВолгГТУ ; редкол. : В. И. Лысак (отв. ред.) [и др.]. – Волгоград :, 2012. – С. 134–135.

УДК.68.5.01:658.512.2.011

Е. Е. Зинченко

ИНВАРИАНТНЫЙ АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ПАРЕТО-РАССЛОЕНИЙ ДЛЯ СТРУКТУРИРОВАНИЯ АЛЬТЕРНАТИВ В САПР

Национальный Исследовательский Университет «МЭИ», г. Москва

yunie19@mail.ru

В работе рассматривается инвариантный алгоритм Парето-расслоения для структурирования вариантов при решении задач в САПР. В формализованном и графическом виде детально приведены этапы формирования слоев, на примерах показана возможность применения алгоритма, указаны его достоинства и недостатки.

Ключевые слова: структурирование, Парето-оптимальные варианты, расслоение, ассоциативные матрицы.

E. E. Zinchenko

INVARIANT ALGORITHM FORMING PARETO STRATIFICATION for STRUCTURING ALTERNATIVES in CAD

National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow

In this paper we consider the invariant algorithm of Pareto stratification for structuring alternatives to solve problems in CAD. The stages of layers' formation are detailed in a formalized and graphic form, the examples demonstrate the possibility of applying the algorithm, and also we have noted its advantages and disadvantages.

Keywords: structuring, Pareto optimal alternatives, stratification, associative matrix.

Структурирование данных в САПР является важнейшей задачей управления информационными ресурсами. Данные всегда должны быть упорядочены в соответствии с целями решаемых задач, так как это позволяет обеспечить эффективность алгоритмов и создаваемых программ. Структурирование обычно связывают с разбиением неупорядоченных исходных

множеств на совокупность подмножеств, обладающих следующими свойствами: *пересечение подмножеств является пустым множеством, а их объединение дает в точности исходное множество.* При этом порядок на множестве должен обеспечивать максимальную эффективность решения задач, для которых проводится структурирование.

Множества альтернатив Ω можно структурировать различными *методами*. Условно они подразделяются на *критериальные* и *некритериальные. Первые* – основаны на сопоставлении альтернатив по некоторой совокупности показателей качества, отражающей цели процедуры, причем сравнение может проводиться как по метрическим, так и неметрическим критериям. *Вторые* – основаны на способности человека сравнивать альтернативы эвристически, как бы «в целом», без введения в процесс сравнения четкой логики и концептуализации.

В данной работе описывается инструментальная система декомпозиции исходного множества Ω по π-критерию, основанная на представлении Ω в виде линейного списка кортежей π_s-слоев.

Предлагаемый алгоритм инвариантен по отношению к ряду практических задач и объектов. Его использование предполагает, что все исходное множество альтернатив Ω априорно разбивается на линейно упорядоченные $\Omega_{\pi s}$-слои, которые представляют собой настроенную на *целевые устремления ЛПР*, эффективную структуру представления данных для решения задач многокритериального выбора альтернатив. Причем цели процедуры задаются через принятую ЛПР совокупность показателей качества $\{\text{ПК}_l\}$, $l = \{1, M\}$.

Использование такого алгоритма позволяет решать целый ряд практических задач САПР и ремонта, к числу которых можно отнести:

– планирование очередей на ремонт однородных типов оборудования;

– создание автоматизированных структурированных справочников по компонентам в САПР;

– выбор альтернатив в САПР в тех случаях, когда требуется адаптивный подход.

Введение π-расслоений, при решении задач выбора из электронных справочников и в задачах выбора оптимальных вариантов имеет то преимущество, что процедура выбора начинается с проверки на допустимость потенциально эффективных альтернатив из первого π-слоя. Если допустимых вариантов в $\Omega_{\pi 1}$-решениях нет, то выбор проводится на следующем слое $\Omega_{\pi 2}$ упорядоченного множества Ω; если их нет там, то переходят к третьему слою и т. д. Соответственно, к первому слою относятся все $\Omega_{\pi 1}$-оптимальные (концевые, недоминируемые) альтернативы:

$$\Omega_{\pi 1} = \max \Omega / R_{\pi}, \qquad (1)$$

найденные из условия (2)

$$R_{\pi}: \{k_l(\omega_i) \le k_l(\omega_j), i \ne j; \{\omega_i, \omega_j\} \subseteq \Omega; \forall i, j = \{1, N\}; \forall l = \{1, M\}\}, \qquad (2)$$

в котором хотя бы для одного l такое неравенство является строгим. Следующие слои: $\Omega_{\pi 2}$, $\Omega_{\pi 3}$, $\Omega_{\pi 4}$, …, $\Omega_{\pi s}$ определяются по формуле

$$\Omega_{\pi s} = \pi(\Omega \setminus \bigcup_{\xi=1}^{s-1} \Omega_{\pi \xi}). \qquad (3)$$

Результатом этой процедуры являются строго упорядоченные линейные последовательности кортежей альтернатив, представляющие собой послойную структуру, задающую π-приоритеты между π_s-слоями по принятым показателям качества $\{\text{ПК}_i\}$.

Целью данной работы *является разработка инвариантного алгоритма получения π-расслоения альтернатив в задачах структурирования вариантов.*

На первом этапе его создания необходимо выбрать рациональную модель представления данных об исходном множестве, от которой зависит эффективность достижения результата. Для машинной обработки удобным является описание данных в виде набора ассоциативных матриц $\{\text{AM}_v\}$, полученных из реляционной модели. Одна из них (AM_v) приведена в табл. 1. В таком представлении каждый элемент AM_v q_{nr} определяет наличие или отсутствие текущего значения r-го признака у n-го объекта для всех характеристик $\{p_j\}$, $j = \{1, J\}$. Размер AM_v (табл. 1) – ($N \times M$), где N – число вариантов; M – число значений характеристик с упорядоченными по возрастанию численными значениями характеристик.

Таблица 1

AM_v для описания исходных данных

ω_i	V_1	V_2	…	$V_{(M-1)}$	V_M
ω_1	q_{11}	q_{12}	…	$q_{1(M-1)}$	q_{1M}
ω_2	q_{21}	q_{22}	…	$q_{2(M-1)}$	q_{2M}
ω_3	q_{31}	q_{32}	…	$q_{3(M-1)}$	q_{3M}
…	…	…	…	…	…
ω_N	q_{N1}	q_{N2}	…	$q_{N(M-1)}$	q_{NM}

$$q_{nr} = \begin{cases} 1, \text{ если } p_{jr}(\omega_n) = V_{nj}; \\ 0, \text{ если } p_{jr}(\omega_n) \neq V_{nj}, \end{cases} \quad (4)$$

$\boldsymbol{q_{ij}}$ – вектор-столбец.

Рассмотрим в качестве исходного множества шесть однородных вариантов (табл. 2) $|\Omega| = 6$. Для него приведена графическая интерпретация (рис. 1) распределения альтернатив в пространстве двух ПК $\{k_1, k_2\}$, где $k_1 = P_1$; $k_2 = P_2$.

Таблица 2

Реляционная модель данных

ω_i	P_1	P_2	P_3
ω_1	170	2190	20
ω_2	156	3250	20
ω_3	183	2190	16
ω_4	192	3330	16
ω_5	180	3570	20
ω_6	250	4090	20

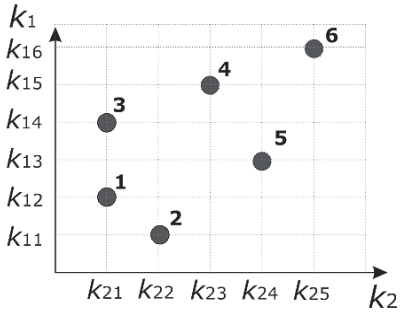


Рис. 1. Распределение альтернатив ω_i, $I = \{1, 6\}$

Ассоциативные матрицы, полученные из табл. 2, для принятых двух ПК $\{k_1, k_2\}$ могут быть представлены табл. 3 и 4.

Таблица 3

Ассоциативная модель данных для k_1

ω_i	$\boldsymbol{k_1}$					
	V_{11}	V_{12}	V_{13}	V_{14}	V_{15}	V_{16}
$\boldsymbol{\omega_1}$	0	**1**	0	0	0	0
$\boldsymbol{\omega_2}$	**1**	0	0	0	0	0
$\boldsymbol{\omega_3}$	0	0	0	**1**	0	0
$\boldsymbol{\omega_4}$	0	0	0	0	**1**	0
$\boldsymbol{\omega_5}$	0	0	**1**	0	0	0
$\boldsymbol{\omega_6}$	0	0	0	0	0	**1**

Таблица 4

Ассоциативная модель данных для k_2

ω_i	$\boldsymbol{k_2}$				
	V_{21}	V_{22}	V_{23}	V_{24}	V_{25}
$\boldsymbol{\omega_1}$	**1**	0	0	0	0
$\boldsymbol{\omega_2}$	0	**1**	0	0	0
$\boldsymbol{\omega_3}$	**1**	0	0	0	0
$\boldsymbol{\omega_4}$	0	0	**1**	0	0
$\boldsymbol{\omega_5}$	0	0	**0**	**1**	0
$\boldsymbol{\omega_6}$	0	0	0	0	**1**

На *втором этапе* реализуется пошаговый «просмотр» всех значений k_1, k_2, начиная с минимальных значений с целью поиска левой нижней границы множества Ω, которая и представляет собой первый π-слой. Запишем процедуру в виде формализованного алгоритма.

Ш а г 1: Поиск первого слоя для минимизации показателей качества

В первом цикле производится последовательный просмотр точек k_2, для которых $k_1 = \min k_1$ до получения непустого решения.

Поиск Парето оптимальных вариантов будет проводиться в общем виде так:

$$i.\, j^{\circ}.\ \boldsymbol{q}_{\text{рез}\,i,j} = \boldsymbol{q}_{2i} \wedge \boldsymbol{q}_{1j} / \boldsymbol{q}_{\text{рез}i,j} = \varnothing,$$

$$\text{то к } i.\,(j+1)^{\circ}, \quad (5)$$

иначе в память и к $(i+1).\, j^{\circ}$, для $j = \{1, (N-1)\}$.

В частности, для представленных в табл. 3 и 4 данных алгоритм примет вид:

1.1°. $\boldsymbol{q}_{\text{рез}1.1} = \boldsymbol{q}_{21} \wedge \boldsymbol{q}_{11} / \boldsymbol{q}_{\text{рез}1.1} = \varnothing$, то к 1.2°;

1.2°. $\boldsymbol{q}_{\text{рез}1.2} = \boldsymbol{q}_{21} \wedge \boldsymbol{q}_{12} / \boldsymbol{q}_{\text{рез}1.2} \neq \varnothing$, то $\omega_{\pi 1,1}$ в память и к $1.2.1^{\circ}$;

Дальнейший просмотр пространства выше значения $(k_{12} - 1)$ во всех последующих шагах не имеет смысла, так как эти значения заведомо хуже, найденного в п. 1.2°.

$1.2.1^{\circ}$. Обнулить полученный вариант в АМ.

2.1°. $\boldsymbol{q}_{\text{рез}2.1} = \boldsymbol{q}_{22} \wedge \boldsymbol{q}_{12} / \boldsymbol{q}_{\text{рез}2.1} \neq \varnothing$, то $\omega_{\pi 1,2}$ в память;

$2.1.1^{\circ}$. Обнулить полученный вариант в АМ.

Таким образом, оба варианта из первого Парето-слоя $\{\omega_{\pi 1,1}, \omega_{\pi 1,2}\}$ занесены в память и затем обнулены для возможности осуществления дальнейшего расслоения на множестве $\Omega \backslash \{\omega_{\pi 1,1}, \omega_{\pi 1,2}\}$.

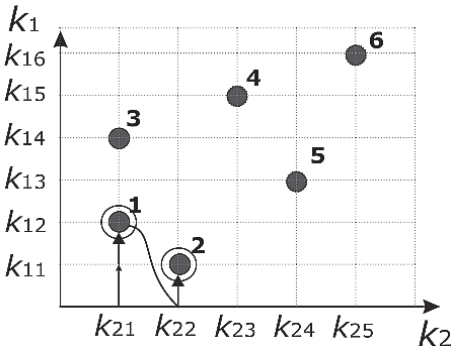


Рис. 2. Поиск первого π-слоя

Ш а г 2: Поиск второго слоя

В конце первого шага π_1-слой был обнулен, поэтому поиск π_2-слоя будет производиться из уменьшенного множества вариантов аналогично поиску первого слоя.

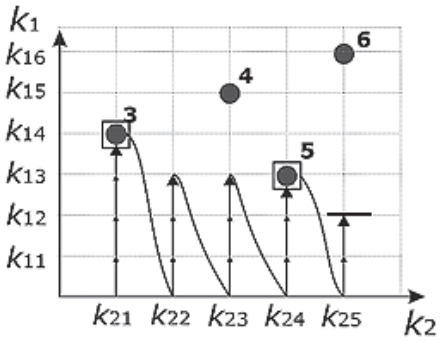


Рис. 3. Поиск π_2-слоя

1.1°. $\boldsymbol{q}_{\text{рез1.1}} = \boldsymbol{q}_{21} \wedge \boldsymbol{q}_{11} / \boldsymbol{q}_{\text{рез1.1}} = \varnothing$, то к 1.2°;

1.2°. $\boldsymbol{q}_{\text{рез1.2}} = \boldsymbol{q}_{21} \wedge \boldsymbol{q}_{12} / \boldsymbol{q}_{\text{рез1.2}} = \varnothing$, то к 1.3°;

1.3°. $\boldsymbol{q}_{\text{рез1.3}} = \boldsymbol{q}_{21} \wedge \boldsymbol{q}_{13} / \boldsymbol{q}_{\text{рез1.3}} = \varnothing$, то к 1.4°;

1.4°. $\boldsymbol{q}_{\text{рез1.4}} = \boldsymbol{q}_{21} \wedge \boldsymbol{q}_{14} / \boldsymbol{q}_{\text{рез1.4}} \neq \varnothing$, то $\omega_{\pi 2,3}$ в память и к 1.4.1°;

1.4.1°. Обнулить полученный вариант и к 2.1°;

Альтернативы со значением $k_1 \geq k_{14}$ при $k_2 \geq k_{22}$ будут хуже первого полученного варианта, поэтому при дальнейшем «просмотре» выше «линии» k_{12} (включая это значение) варианты не рассматриваются.

2.1°. $\boldsymbol{q}_{\text{рез2.1}} = \boldsymbol{q}_{22} \wedge \boldsymbol{q}_{11} / \boldsymbol{q}_{\text{рез2.1}} = \varnothing$, то к 2.2°;

Поиск проводится до тех пор, пока на

4.3°. $\boldsymbol{q}_{\text{рез4.3}} = \boldsymbol{q}_{24} \wedge \boldsymbol{q}_{13} / \boldsymbol{q}_{\text{рез4.3}} \neq \varnothing$, тогда $\omega_{\pi 2,5}$ в память и к 4.3.1°;

4.3.1°. Обнулить полученный вариант и к 5.1° до просмотра всех оставшихся столбцов матрицы.

5.1°. $\boldsymbol{q}_{\text{рез5.1}} = \boldsymbol{q}_{25} \wedge \boldsymbol{q}_{11} / \boldsymbol{q}_{\text{рез5.1}} = \varnothing$, то к 5.2°;

5.2°. $\boldsymbol{q}_{\text{рез5.2}} = \boldsymbol{q}_{25} \wedge \boldsymbol{q}_{12} / \boldsymbol{q}_{\text{рез5.2}} = \varnothing$, то в конец.

Второй слой включает в себя два π-оптимальных варианта $\{\omega_{\pi 2,3}, \omega_{\pi 2,5}\}$, которые запоминаются и затем обнуляются. Далее поиск проводится на оставшемся множестве $\Omega'' = \Omega \backslash \{\omega_{\pi 1,1}, \omega_{\pi 1,2}\} \backslash \{\omega_{\pi 2,3}, \omega_{\pi 2,5}\}$.

Ш а г 3: Поиск третьего π-слоя

1.1°. $\boldsymbol{q}_{\text{рез1.1}} = \boldsymbol{q}_{21} \wedge \boldsymbol{q}_{11} / \boldsymbol{q}_{\text{рез1.1}} = \varnothing$, то к 1.2°;

……

Поиск проводится до тех пор, пока не будет выявлен вариант, удовлетворяющий условию Парето.

3.5°. $\boldsymbol{q}_{\text{рез3.5}} = \boldsymbol{q}_{23} \wedge \boldsymbol{q}_{15} / \boldsymbol{q}_{\text{рез3.5}} \neq \varnothing$, тогда $\omega_{\pi 3,4}$ в память и к 3.5.1°;

3.5.1°. Обнулить полученный вариант $\omega_{\pi 3,4}$ и к 4.1°;

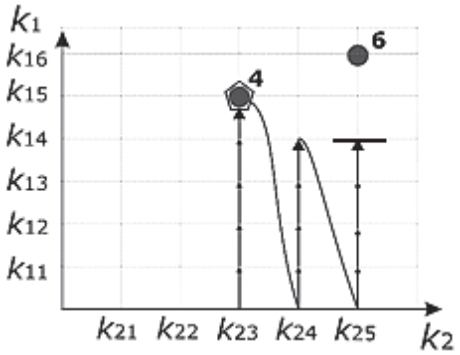


Рис. 4. Поиск π_3-слоя

Дальнейший поиск при значениях $k_1 \leq k_{14}$ π-оптимальных вариантов не выявил.

Третий слой включает в себя один π-оптимальный вариант $\omega_{\pi 3,4}$.

Ш а г 4: Поиск четвертого слоя

Проводится на оставшемся множестве $\Omega''' = \Omega \backslash \{\omega_{\pi 1,1}, \omega_{\pi 1,2}\} \backslash \{\omega_{\pi 2,3}, \omega_{\pi 2,5}\} \backslash \omega_{\pi 3,4}$.

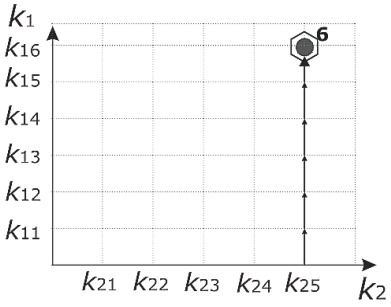


Рис. 5. Поиск π_4-слоя

1.1°. $\boldsymbol{q}_{\text{рез1.1}} = \boldsymbol{q}_{21} \wedge \boldsymbol{q}_{11} / \boldsymbol{q}_{\text{рез1.1}} = \varnothing$, то к 1.2°;

……

Поиск проводится до тех пор, пока не будет выявлен вариант, удовлетворяющий условию Парето на оставшемся множестве.

5.6^{o}. $\boldsymbol{q}_{\text{рез}5.6} = \boldsymbol{q}_{25} \wedge \boldsymbol{q}_{16} / \boldsymbol{q}_{\text{рез}5.6} \neq \varnothing$, тогда $\omega_{\pi 4,6}$ в память и, конец, так как были просмотрены все значения в исходной матрице.

Поиск элементов каждого π_s-слоя предполагает последовательную конъюнкцию столбцов АМ ПК$_i$ строго слева направо (для минимизации) до получения непустых решений. После определения π_s-слоя, он запоминается с присвоением имени очередного найденного слоя, а соответствующие ему «единичные» значения характеристик вариантов «обнуляются» для продолжения работы алгоритма на усеченном множестве. При этом, в АМ «1», отвечающие за оптимальный вариант, заменяются на «0» («1» ← «0»). Тогда при повторном поиске следующего оптимального π_{s+1}-слоя, найденный ранее π_s-слой идентифицироваться не будет. Процедура продолжается до «просмотра» всех столбцов матриц ПК$_i$ и выявления π_s-слоев, число которых соответствует максимальной цепи в графе частичного порядка на множестве Ω.

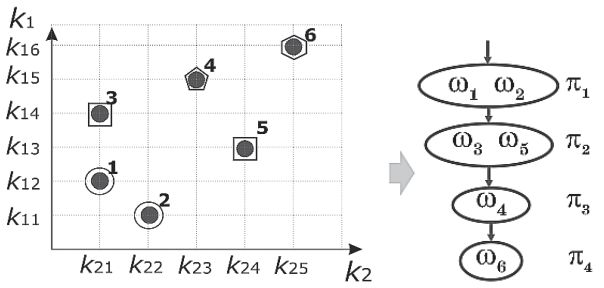


Рис. 6. Распределение альтернатив ω_i и их паретовское расслоение

Таким образом, путем анализа всех значений матрицы и проверки их на оптимальность по π-критерию можно определить и выделить Ω_π-слои.

П р и м е р . Рассмотрим реализацию данного алгоритма на примере выбора транзистора для схемы выходного каскада с максимальной граничной частотой P_4 и максимальной мощностью, рассеиваемой на коллекторе P_3. Причем по условию задачи требуется найти не просто наиболее эффективный вариант для данной проектной задачи, а необходимо установить приоритеты на множестве предложений $|\Omega| = 7$.

Таблица 5

Реляционная модель, описывающая исходное множество транзисторов

	Вариант	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14
Характеристика		Материал	Структура	Pкmax[мВт]	fгр[МГц]	Rпер-окр[С/мВт]	tокр[С]	UкэRmax[В]	Iкmax[мА]	Iкбо[мкА]	Uкэ[В]	Iэ[мА]	h21э[-]	Ск[пФ]	тк[мкс]
V1	2Т360А	Si	p-n-p	10	300	7	-60..+85	10	10	5	5	1	60..180	4	300
V2	КТ343А	Si	p-n-p	150	300	0,5	-40..+85	12	30	5	5	5	20..200	2,5	75
V3	КТ361А	Si	p-n-p	150	250	0,67	-60..+100	12	50	5	5	5	20..250	2,5	40
V4	КТ209А	Si	p-n-p	200	5	0,45	-45..+100	12	50	5	1	10	20..75	8	400
V5	КТ326А	Si	p-n-p	200	400	0,6	-60..+125	12	50	5	1	10	80..200	8	500
V6	2Т326А	Si	p-n-p	250	400	0,6	-60..+125	50	200	500	3	10	20..60	80	600
V7	КТ312А	Si	n-p-n	225	80	0,4	-60..+70	12	50	5	3	15	15..80	2,5	50

Эти приоритеты формируются в соответствии со структурированием Ω по π-слоям.

По условию задачи исходные данные представлены в табл. 5.

Формализуем задачу выбора. В качестве ПК выберем требуемые по ТЗ характеристики P_3 и P_4. Пусть: $k_1 = P_3$ – мощность ($P_{k\max}$); $k_2 = P_4$ – граничная частота ($f_{\text{гр}}$), которые необходимо *максимизировать*. В табл. 6 и 7 представлены АМ для выбранных ПК.

Найдем вначале первый Парето-оптимальный слой (рис. 7), с помощью программы, разработанной в соответствии с приведенным выше алгоритмом.

Таблица 6

Ассоциативная модель данных для k_1

ω_i	k_1				
	10	150	200	225	250
ω_1	**1**	0	0	0	0
ω_2	0	**1**	0	0	0
ω_3	0	**1**	0	0	0
ω_4	0	0	**1**	0	0
ω_5	0	0	**1**	0	0
ω_6	0	0	0	0	**1**
ω_7	0	0	0	**1**	0

Таблица 7

Ассоциативная модель данных для k_2

ω_i	k_2				
	5	80	250	300	400
ω_1	0	0	0	**1**	0
ω_2	0	0	0	**1**	0
ω_3	0	0	**1**	0	0
ω_4	**1**	0	0	0	0
ω_5	0	0	0	0	**1**
ω_6	0	0	0	0	**1**
ω_7	0	**1**	0	0	0

В π_1-оптимальный слой будет входить одна альтернатива $\Omega_{\pi 1} = \{\omega_6\}$, соответствующая транзистору с максимальными значениями мощности и граничной частоты.

Для продолжения определения расслоения исходного множества и поиска альтернатив найденному транзистору необходимо обнулить первый слой и использовать рассмотренный алгоритм на множестве $\Omega' = \Omega \setminus \Omega_{\pi 1}$ (рис. 8).

В результате получаем новый π_2-слой, в который будут входить уже две альтернативы $\Omega_{\pi 2} = \{\omega_5, \omega_7\}$. Таким образом, если *по условиям допустимости* использовать в проекте найден-

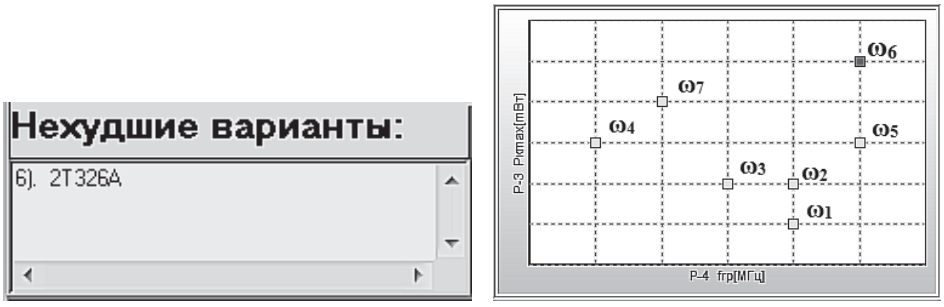


Рис. 7. Определение π_1-слоя: $\Omega_{\pi 1} = \{\omega_6\}$

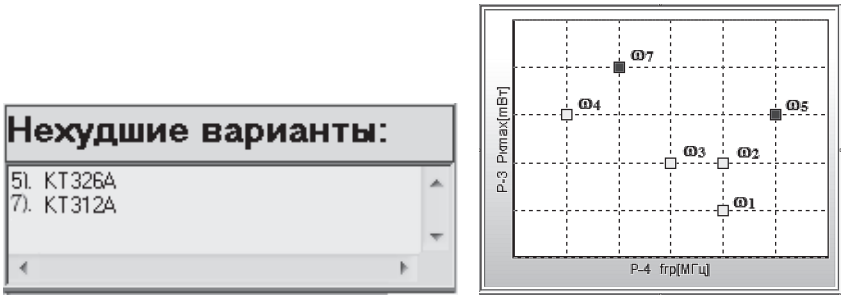
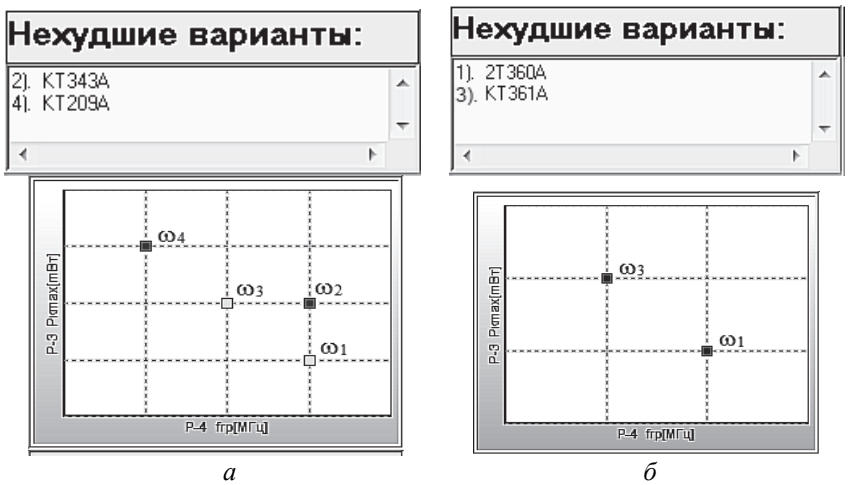


Рис. 8. Определение π_2-слоя: $\Omega_{\pi 2}=\{\omega_5, \omega_7\}$



а *б*

Рис. 9. Определение:
а – π_3-слоя: $\Omega_{\pi 3} = \{\omega_2, \omega_4\}$; *б* – π_4-слоя: $\Omega_{\pi 4} = \{\omega_1, \omega_3\}$

ный ранее транзистор нельзя, то необходимо перейти ко второму слою и выбирать из $\Omega_{\pi 2}$.

На рис. 9 представлены еще два слоя, найденные с помощью разработанной программы на основе созданного алгоритма расслоений. Для π_3-слоя: $\Omega_{\pi 3} = \{\omega_2, \omega_4\}$ (рис. 9, *а*) и π_4-слоя: $\Omega_{\pi 4} = \{\omega_1, \omega_3\}$ (рис. 9, *б*).

Рис. 10. Итоговое паретовское расслоение для данной задачи

Отметим *преимущества* послойного представления Ω:

• высокая эффективность поиска допустимых вариантов (без комбинаторики) в линейно упорядоченном разбиении исходного множества вариантов по слоям;

• быстрый поиск оптимальных альтернатив, которые являются допустимыми элементами в слоях, эффективных для принятых ПК.

Недостатком послойного представления является то, что сформированная структура не дает возможности установить нетранзитивный частичный порядок, дуги, в графе которого указывали бы на «альтернативы-заместители».

К недостатку предложенного алгоритма (при сохранении размерности матрицы) можно отнести и то, что после «обнуления» π_{si}-слоя при определении следующего необходимо «просмотреть» все предыдущие столбцы АМ, в которых содержался «обнуленный» слой.

Заключение

В работе предложен алгоритм инвариантного Парето-расслоения, основанный на использовании упорядоченных ассоциативных матриц, сформированных из реляционной модели данных. Алгоритм может найти применение в целом ряде инженерных задач в САПР, где требуется целевое упорядочивание однородных альтернатив. При этом необходимо четко понимать, что существуют ограничения на применение такого метода структурирования:

1) при очень близком распределении альтернатив в первых паретовских слоях и наличии стохастизма в показателях качества возникает проблема устойчивости π-оптимальных решений, которая требует при априорном структурировании данных преобразования неустойчивых задач в близкие к ним устойчивые;

2) структурирование альтернатив по слоям эффективно только при малом ($M \leq 3$) числе ПК, так как при увеличении M резко падает число максимальных цепей, покрывающих граф частичного порядка на множестве возможных вариантов, следовательно, большее число альтернатив попадает в первый паретовский слой, уменьшая эффективность априорного структурирования;

3) включенные в первый паретовский слой крайние точки могут быть менее эффективны при практическом решении конкретной задачи выбора при проектировании, чем точки, лежащие «в середине» слоя. Этот недостаток решается путем априорного структурирования не по слоям, а в соответствии с диаграммой Хассе (ДХ), задающей частичный порядок на все множество альтернатив. Дуги в таком графе указывают на «альтернативы-заместители». Если при наложении ограничений варианты, соответствующие концевым вершинам в структуре, выбраны не будут, то рассматриваются варианты, «привязанные» к этим дугам.

Разработанный алгоритм реализован в программе «Выбор 13», которая используется в НИР и учебном процессе на кафедре РПУ НИУ «МЭИ».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кандырин, Ю. В.* Методы и модели многокритериального выбора вариантов в САПР : учеб. пособие для вузов / Ю. В. Кандырин. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 172 с.

2. *Кандырин, Ю. В.* Методика автоматизированного многокритериального выбора припоев / Ю. В. Кандырин, Е. Е. Зинченко // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 4(91) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 13). – С. 49–54.

3. *Кандырин, Ю. В.* Автоматизированный многокритериальный выбор припоев для пайки DIP-компонентов на печатных платах в РЭС / Ю. В. Кандырин, Е. Е. Зинченко // Радиотехнические тетради. – М.: Радиотехника. – 2011. – № 47. – С. 64–70.

УДК 621.65:681.5

А. И. Исмагулова

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ В СИСТЕМАХ НЕФТЕДОБЫЧИ НА ОСНОВЕ ШТАНГОВЫХ ГЛУБИННО-НАСОСНЫХ УСТАНОВОК

Атырауский институт нефти и газа, Республика Казахстан
umd_aingl@mail.ru

В работе предлагается структурная схема автоматизированной станции управления системой электроприводов в штанговых глубинно-насосных установках с целью поддержания заданного уровня жидкости в них. Приведена функциональная схема и описана процедура работы автоматического регулирования динамического уровня жидкости; приведена блок-схема автоматического регулятора уровня.

Ключевые слова: штанговые глубинно-насосные установки, электроприводы в системах нефтедобычи, автоматизированные станции управления, автоматическое регулирование динамического уровня жидкости.

A. I. Ismagulova

THE BLOCK DIAGRAM OF AUTOMATION OF MANAGEMENT OF ELECTRIC DRIVES IN OIL PRODUCTION SYSTEMS ON THE BASIS OF SHTANGOVS OF DEEP AND PUMP INSTALLATIONS

Atyrau institute of oil and gas, The Republic of Kazakhstan

In work the block diagram of the automated station of management by system of electric drives in shtangovy deep and pump installations for the purpose of maintenance of the set level of liquid in them is offered. Are provided a function chart and procedure of work of automatic control of dynamic level of liquid is described, the block diagram of an automatic regulator of level is provided.

Keywords: shtangovy deep and pump installations, electric drives in the oil production systems, the automated stations of management, automatic control of dynamic level of liquid.

Введение

Особенности географического расположения и удаленность нефтепромысловых районов России предъявляет высокие требования надежности оборудования нефтедобычи.

Среди основного оборудования, применяемого в нефтепромыслах, значительное место занимают насосные агрегаты поршневого или плунжерного типа, турбоагрегаты центробежного типа и буровые установки (БУ). К агрегатам *первого типа* относятся штанговые глубинно-насосные установки (ШГНУ), буровые насосы (БН), насосы пластового давления, ко *вторым* – установки: электроцентробежные насосы и аппараты воздушного охлаждения газа. Буровые установки содержат в своем составе, кроме буровых насосов, спускоподъемный аппарат и механизм вращения колонны бурильных труб (в последних моделях БУ, так называемый верхний привод).

ШНГУ эксплуатируются в более чем половине всего фонда скважин России, в качестве приводного механизма для которых используются различные типы станков-качалок. Поэтому ШГНУ являются одними из наиболее важных компонентов современных систем нефтедобычи в России. Состояние глубинно-насосных установок определяет степень готовности нефтепромысла, его работоспособность, производительность и надежность, особенно в условиях интенсивной эксплуатации и связанного с этим износа оборудования. Нестабильность работы ШГНУ и, тем более, их отказ могут привести к самым серьезным последствиям для нефтепромысла. Поэтому обеспечение эффективности и надежности работы ШГНУ является одной из важнейших задач создания благоприятных условий для устойчивого, надежного и экономичного функционирования нефтепромысла, сводя до минимума возможные издержки и потери от различных рисков.

Оценка технического уровня электроприводов, применяемых в нефтедобыче, показывает, что до настоящего времени перечисленные выше агрегаты в большинстве случаев оснащаются нерегулируемым электроприводом, выполненным на базе асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, что существенно ограничивает возможности оптимизации технологического процесса. При использовании нерегулируемого привода трудно согласовать производительность насоса ШГНУ с притоком нефти, что приводит к увеличению числа отказов внутрискважинного оборудова-

ния. Поэтому для большинства скважин технология откачки нефти требует автоматического регулирования производительности установки. Наиболее эффективным способом автоматического регулирования производительности ШГНУ является применение регулируемого электропривода. Электропривод буровых установок многодвигательный и в настоящее время выполняется регулируемым на основе электродвигателей постоянного тока. Безусловно, данное решение позволяет удовлетворить самые сложные требования по реализации разнообразных технологических режимов работы буровой установки, однако в значительной степени усложняет эксплуатацию агрегата из-за наличия в системе привода коллекторной машины с присущими ей недостатками.

Из вышесказанного следует актуальность задачи повышения эффективности управления ШНГУ. Основное назначение системы управления – обеспечить такое реагирование на любые отклонения характеристик внешней среды и параметров системы от номинальных или желаемых их значений, при котором система попрежнему оказывается способной выполнять возложенные на нее задачи. Основной задачей, решаемой в работе, является повышение эффективности управления и оптимизации электроприводов в системах нефтедобычи, использующих в процессе бурения ШНГУ. Указанная задача применительно к глубинно-насосным установкам других типов ранее рассматривалась в [1, 2].

1. Структура системы автоматического управления ШНГУ

Предлагаемая в работе структурная схема автоматизированной станции управления ШГНУ, разработанная на базе электропривода системы ТПН-АД с учетом динамических нагрузок в механических звеньях, приведена на рис. 1. Опишем более детально устройство и принцип работы станции.

Станция снабжена микропроцессорной системой управления (МПСУ), содержащей в своем составе специализированный контроллер с Flash-ПЗУ, реализующий функции системы управления электроприводом (СУЭП) и технологического регулятора (ТР). Контроллер, построенный по однопроцессорной структуре, выполнен на базе однокристальной микро-ЭВМ семейства ATMEL LV52. В систему, кроме того, входят датчики фазного тока $I_ф$, напряжений сети $U_с$ и двигателя $U_д$ (ДТ, ДН1 и ДН2), а также датчики положения S балансира (ДП) и усилия F в штоке (ДУ). В качестве датчика положения может быть применен фотоэлектрический (импульсный или кодовый) или индукционный (сельсин, вращающийся трансформатор) датчик.

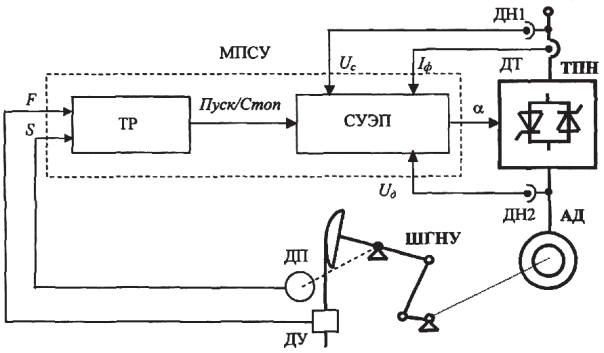


Рис. 1. Структурная схема автоматизированной станции управления ШГНУ

Блок СУЭП осуществляет формирование управляющих импульсов тиристоров в соответствии с заданием, поступающим на его вход от технологического регулятора. В этом блоке реализуются функции системы импульсно-фазового управления, задатчика интенсивности, регулятора скорости (при наличии датчика скорости), блока линеаризации и логического дискриминатора режимов, определяющих режим работы ТПН и угол открытия вентилей преобразователя. Кроме того, в блоке реализуются защиты от неправильного чередования фаз сетевого напряжения и исчезновения фазы, время-токовая защита двигателя, максимально-токовая защита преобразователя. В случаях работы без датчика скорости система управления обеспечивает функционирование тиристорного пускателя в вариантах отсечки по току, программно-временного формирователя напряжения питания двигателя при пуске и торможении или с обратной связью по сигналу от наблюдателя скорости, обеспечивая регламентированный запуск двигателя.

Блок ТР обеспечивает автоматическую работу электропривода в старт-стопном режиме с периодическим включением на расчетное (или заданное) время работы $T_р$, и отключением на расчетное (или заданное) время паузы T_0 с чередованием позиций останова в ВМТ или НМТ и проведением замеров соответствующих усилий в штоке, осуществляя автоматическое управление средней производительностью насоса. В этом блоке реализуется защита и автоматиче-

ская диагностика характерных неисправностей в работе ШГНУ, а именно: предупреждение перегрузки штанг; обнаружение обрыва штанг, обрыва шатунов, обрыва ремней, нарушения балансировки. Кроме того, блоком выполняются функции рестарта и автоматического повторного включения (АПВ), хранение истории событий, включая учет моточасов и запись динамограмм, а также поддерживается связь с системой верхнего уровня по стандартному последовательному каналу. Основными режимами работы системы автоматического управления являются:

• режим стабилизации заданного (произвольного) значения динамического уровня, определяемого на основе одного из описанных выше алгоритмов контроля значений усилий в штоке вблизи верхней и нижней мертвых точек хода полированного штока;

• режим, реализующий алгоритм стабилизации граничного динамического уровня, соответствующего началу незаполнения насоса.

Система автоматического регулирования динамического уровня построена на основе измерителя уровня с непрерывной оценкой параметров динамограмм [3].

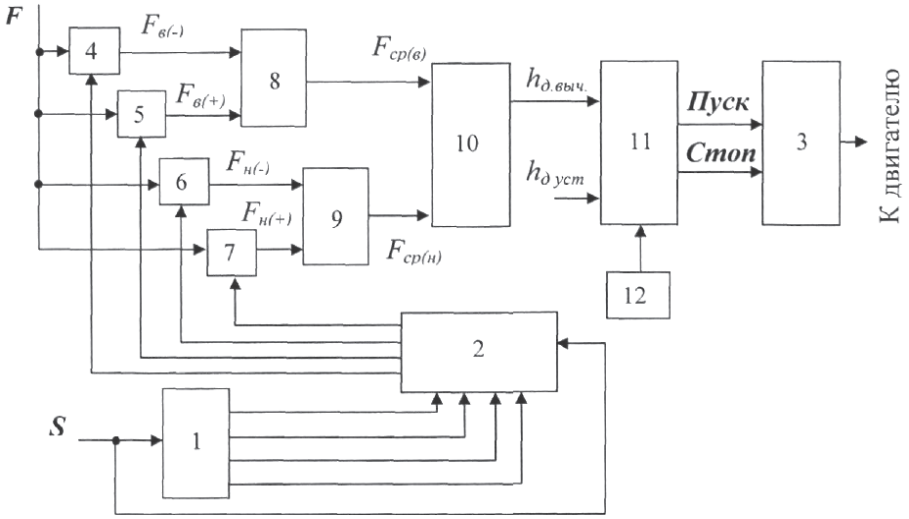


Рис. 2. Блок-схема алгоритма автоматического регулирования динамического уровня

Блок-схема раскрывает алгоритм функционирования программно-аппаратного комплекса микропроцессорной системы управления, который содержит блок слежения за положением штока *1*, блок управления фиксаторами усилий *2*, блок управления приводом 3, блоки фиксации усилий *4*, *5, 6, 7*, блоки расчета средних усилий *8* и *9*, блок расчета динамического уровня жидкости *10*, автоматический регулятор уровня *11*, таймер *12*.

Способ реализуется следующим образом. При работе глубинно-насосной установки нефтяной скважины в режиме качания блоком слежения *1* осуществляют определение крайнего верхнего и крайнего нижнего положений полированного штока по сигналу *S* от датчика положения (не показан). В моменты прохождения штоком указанных точек в блоке *1* происходит запоминание позиций соответственно $S_{в(-)}$ и $S_{Н(-)}$, а в моменты смены направления движения штока сразу после прохождения крайних точек – запоминание позиций $S_{в(+)}$ и $S_{н(+)}$. Далее в блоке управления фиксаторами усилий *2* текущее положение штока *S* сравнивается с позицией $S_{в(-)}$ и в момент их равенства подается сигнал управления на фиксатор *4*. В блоке *4* по этому сигналу происходит запоминание усилия в крайней верхней точке $F_{в(-)}$. Аналогично по достижении соответствующих позиций происходит запоминание усилий $F_{в(+)}$, $F_{Н(-)}$, $F_{н(+)}$ в фиксаторах *5, 6* и *7* соответственно.

Из блоков *4* и *5* значения усилий $F_{в(-)}$ и $F_{в(+)}$ подаются в блок расчета среднего усилия *8*, а из блоков *6* и *7* значения усилий $F_{Н(-)}$ и $F_{н(+)}$ – в блок расчета среднего усилия *9*. В данных блоках выполняется расчет средних усилий для верхней и нижней мертвых точек хода штока: $F_{ср(е)}$ и $F_{ср(н)}$ соответственно. На основе полученных значений $F_{ср(е)}$ и $F_{ср(н)}$ в блоке 10 выполняется расчет динамического уровня жидкости в скважине $h_{д.выч}$. Поэтому для реализации алгоритма необходимо иметь расчетное значение для $h_{д.выч}$.

Расчетное значение $h_{д.выч}$ поступает в автоматический регулятор *11*, где происходит его

сравнение с заданным динамическим уровнем $h_{д.уст.}$, который устанавливается таким, чтобы при его достижении исключалась возможность незаполнения насоса при его нормальной работе.

Автоматический регулятор уровня *11* работает по принципу широтно-импульсной модуляции. По разности установки заданного и расчетного значений динамического уровня регулятор определяет относительную продолжительность работы привода в цикле периодической откачки жидкости из скважины. Команда на пуск двигателя формируется регулятором по сигналу от таймера *12*, задающего цикл периодической откачки жидкости. По истечении расчетного времени работы регулятор *11* выдает сигнал на остановку в блок управления приводом *3*. Окончание паузы определяется временем цикла, по завершении которого таймер выдает в регулятор *11* сигнал на очередной запуск двигателя и начало отсчета следующего рабочего интервала.

Определение расчетного значения динамического уровня жидкости в стволе скважины выполняется, как уже отмечалось, на каждом цикле качания, что позволяет снизить влияние вычислительного запаздывания на качество работы автоматического регулятора уровня *11*. Собственно регулятор уровня выполняется по традиционной П- или ПИ-структуре.

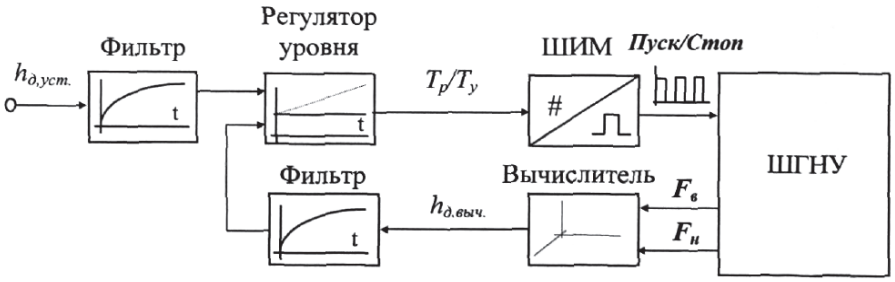


Рис. 3. Функциональная схема системы автоматического регулирования динамического уровня

В условиях, когда эксплуатация ШГНУ по состоянию оборудования и характеристикам скважины невозможна без проявлений частичного незаполнения насоса, или целесообразна работа с частичным незаполнением, необходима более универсальная система управления, допускающая такую возможность. В [4] предлагается способ оптимального управления штанговой глубинно-насосной установкой нефтяной скважины, предусматривающий предварительное обследование скважины с нахождением параметров, соответствующих максимальной производительности скважины, заключающийся в реализации алгоритма вывода ее на динамический уровень с признаком незаполнения насоса и автоматическое регулирование найденного оптимального уровня за счет периодического отключения установки с регулируемой длительностью паузы.

Основным недостатком данного способа является отсутствие постоянного упреждающего контроля и регулирования степени незаполнения насоса (только оперативное выявление признака незаполнения насоса), что при выбранном способе задания динамического уровня может привести к неэффективной работе установки. Кроме того, необходимость периодического проведения цикла тестирования скважины приводит к потерям времени и снижению общей производительности установки.

Указанных недостатков лишен модифицированный способ оптимального управления штанговой глубинно-насосной установкой нефтяной скважины [5, 6], включающий контроль изменений усилий в точке подвеса колонны насосных штанг и положения полированного штока, выявление признака незаполнения насоса и определение динамического уровня жидкости в стволе скважины по разности значений усилий в крайнем верхнем и крайнем нижнем положениях хода штока, поддержание заданного динамического уровня жидкости за счет периодического отключения установки с автоматически регулируемой длительностью паузы, в котором дополнительно после выявления признака незаполнения насоса вводят уставку на степень незаполнения C_{max} осуществляют контроль степени незаполнения С и при наличии отклонения текущего незаполнения от уставки корректируют значение заданного динамического уровня в соответствии с допустимым незаполнением.

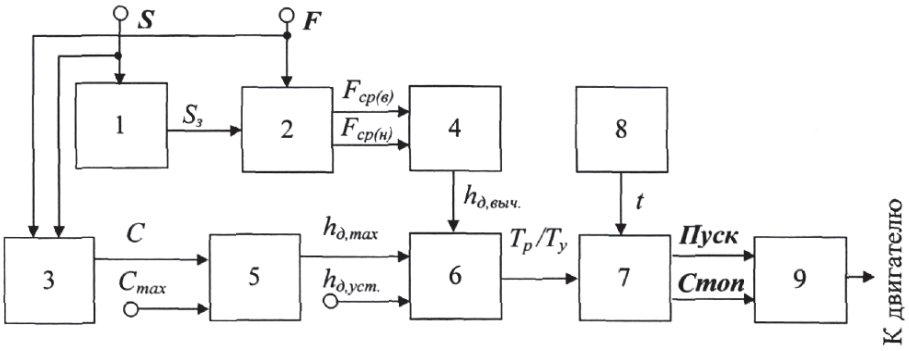


Рис. 4. Блок-схема алгоритма автоматического регулирования степени незаполнения насоса

Схема раскрывает алгоритм функционирования программно-аппаратных средств управляющего устройства, который содержит блок слежения за положением штока *1*, блок слежения за усилием в штоке *2*, блок расчета степени незаполнения насоса *3*, блок расчета динамического уровня *4*, регулятор степени незаполнения *5*, регулятор динамического уровня *6*, блок формирования цикла периодической откачки жидкости *7*, таймер *8* и блок управления двигателем *9*.

Способ реализуется следующим образом. При работе глубинно-насосной установки нефтяной скважины в режиме качания блок слежения *1* осуществляет определение крайнего верхнего и крайнего нижнего положений полированного штока по сигналу *S* от датчика положения (не показан). В моменты прохождения штоком указанных точек в блоке *1* формируется сигнал S_3 на запоминание в блоке *2* усилия *F*, измеряемого датчиком усилия (не оказан), в соответствии с описанным ранее методом контроля усилий в штоке в крайних положениях. Блок *2* формирует значения средних усилий в штоке в верхнем и нижнем положениях: $F_{ср(в)}$ и $F_{ср(Н)}$ передаваемых в блок расчета динамического уровня жидкости в скважине *4*, алгоритм функционирования которого определяется выражением (5.8). Выходом блока *4* является текущий расчетный динамический уровень $h_{д.выч}$. Сигналы от датчиков положения *S* и усилия *F* поступают также в блок расчета степени незаполнения насоса *3*. В данном блоке на основе анализа текущих положений и усилий на цикле качания формируется сигнал, характеризующий степень незаполнения насоса С, поступающий в регулятор незаполнения *5*. В регуляторе незаполнения сигнал С сравнивается с максимально допустимой степенью незаполнения насоса C_{max} и рассчитывается соответствующий максимально допустимый для обеспечения заданного незаполнения уровень жидкости $h_{д.max}$. Сигнал допустимого максимального уровня $h_{д.max}$ поступает на регулятор уровня *6*, где сравнивается с заданным уровнем $h_{д.уст}$ и вычисленным $h_{д.выч}$. В случае, если максимально допустимый уровень больше заданного, регулирование ведется по заданному уровню $h_{д.уст}$, иначе – по максимально допустимому $h_{д.max}$. Выходом регулятора уровня является сигнал T_p/T_y, определяющий относительную продолжительность времени откачки жидкости на заданном периоде, который поступает в блок формирования цикла откачки *7*. В блоке *7* по сигналу T_p/T_y и сигналу от таймера *8*, задающего продолжительность цикла управления T_y, формируются команды на пуск и останов двигателя, поступающие в блок управления двигателем *9*.

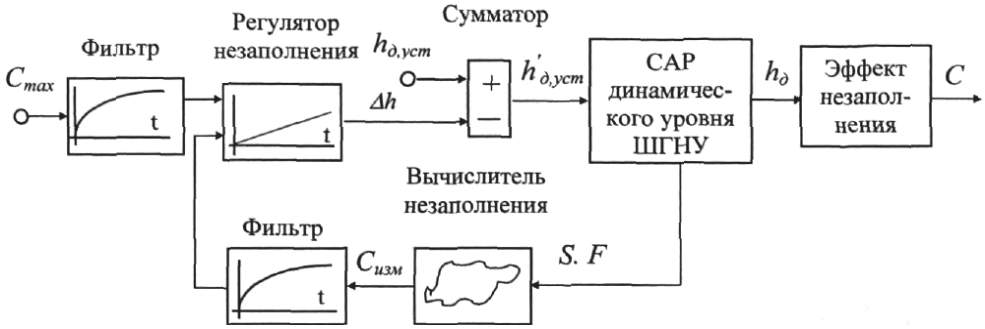


Рис. 5. Функциональная схема системы автоматического регулирования степени незаполнения

Определение расчетного незаполнения насоса и динамического уровня жидкости в стволе скважины проводят на каждом цикле качания, что позволяет снизить влияние вычислительного запаздывания на качество работы автоматического регулятора незаполнения *5* и автоматического регулятора уровня *6*. Регулятор незаполнения в этом случае принимается типа П-регулятора.

Особенностью функциональной схемы является присутствие в ней *двух* контуров регулирования, образующих систему автоматического регулирования динамического уровня подчиненного типа с внешним контуром регулирования незаполнения. Наличие сумматора на выходе регулятора незаполнения позволяет раздельно вводить задание на динамический уровень $h_{d.уст}$ и степень незаполнения C_{max}. При значении установки на динамический уровень $h_{д.уст}$, не вызывающей работы насоса с незаполнением C, превосходящим максимально допустимое C_{max}, внешний контур находится в разомкнутом состоянии и на выходе интегратора устанавливается нулевой сигнал. При обнаружении незаполнения, превосходящего заданное $C_{\max}$, интегратор выставляет смещение задания динамического уровня Δh и выводит скважину из опасного режима на скорректированный динамический уровень.

Преимущество предлагаемого способа состоит в осуществлении работы установки с динамическим уровнем, обеспечивающим оптимальную производительность скважины, при одновременном повышении надежности работы оборудования за счет постоянного упреждающего контроля и регулирования степени незаполнения насоса.

Заключение

Практическая реализация приведенных в работе схем и алгоритмов регулирования привода требует проведения достаточно затратных экспериментов, что в настоящее время сопряжено с большими трудностями. Однако внедрение предлагаемых схем позволит повысить эффективность работы ШГНУ за счет оптимизации технологического процесса откачки нефти, уменьшить число отказов внутрискважинного оборудования и тем самым повысить производительность нефтескважины. Открытыми остались вопросы получения расчетных значений для ряда используемых параметров: динамического уровня жидкости в скважине $h_{д.выч}$, степень незаполнения C_{max}, динамического уровня степени незаполнения $h_{d.уст}$, что является предметом дальнейших исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Шаньгин, Е. С.* Повышение эффективности управления штанговой глубинной насосной установкой на основе измерительно-вычислительного комплекса / Е. С. Шаньгин, С. В. Зубков // Вестник УГАТУ. Сер. «Автоматизация и управление технологическими процессами и производством». Т. 13 (2009), № 2(35). – С. 74–77.

2. *Алиев, З. З.* Повышение эффективности эксплуатации глубоких скважин штанговыми установками (на примере Ватьеганского месторождения) : дис. … канд. техн. наук / З. З. Алиев. – Уфа, Гос. унитар. предпр. «Институт проблем транспорта энергоресурсов», 2010. – 118 с.

3. *Зюзев, А. М.* Оптимизация уравновешивания штанговых глубинно-насосных установок по критерию энергопотребления / А. М. Зюзев // Проблемы и достижения в промышленной энергетике : Материалы 3-й научно-практической конференции. – Екатеринбург, 2003. – С. 87.

4. *Зюзев, А. М.* Способ управления глубинно-насосной установкой нефтяной скважины / А. М. Зюзев, А. В. Костылев, В. П. Муковозов // Заявка № 2003125811 на выдачу патента РФ на изобретение. – М.: РОСПАТЕНТ. 21.08.2003 г.

5. Способ оптимального управления штанговой глубинно-насосной установкой нефтяной скважины / А. М. Зюзев [и др.] // Заявка № 2003125832 на выдачу патента РФ на изобретение. – М.: РОСПАТЕНТ. 21.08.2003 г.

6. *Кандырин, Ю. В.* Математические модели структурирования альтернатив для решения задач выбора в САПР / Ю. В. Кандырин, Л. Т. Сазонова, Г. Л. Шкурина // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 3(76) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 10). – С. 111–115.

УДК.685.01.:658.512.2.011.56

Ю. В. Кандырин, М. Е. Кононов

АЛГОРИТМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВЫБОРА АНАЛОГОВ ПО ПРОТОТИПАМ В ЧАСТИЧНЫХ ПОРЯДКАХ

Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»

ywk@mail.ru, felxasus@gmail.com

В работе рассмотрены метод и алгоритмы автоматического выбора аналогов по прототипам посредством перехода от транзитивного графа частичного порядка к диаграмме Хассе через удаление всех транзитивных дуг, при этом на аналоги для заданного прототипа указывают ближайшие к заданному прототипу нетранзитивные дуги.

Ключевые слова: аналоги, прототипы, многокритериальный выбор аналогов, граф частичного порядка, фактор-множество.

Y. V. Kandyrin, M. E. Kononov

ALGORITHM OF THE AUTOMIZED CHOICE ANALOGUES ON THE PROTOTYPES IN THE PARTIAL ORDERS

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

This work presents the method and algorithms of the automated choice of analogues on the prototypes by means of transition from the transitive graph of the partial order to the chart of Hasse by deleting all transitive arcs, thus, the nearest arcs to the given prototype shows the analogues of the given prototype.

Keywords: analogues, prototypes, multicriteria choice selection analogs, graph of the partial order, the factor set of clones.

Выбор аналогов по прототипу – это целый класс задач поиска наиболее близких вариантов из совокупности функционально-однородных альтернатив. Такие задачи возникают при ремонте технических объектов, с заменой вышедшей из строя детали близким аналогом, или, когда потребитель ищет необходимое ему функциональное изделие, желая просмотреть несколько наиболее приемлемых близких вариантов. К этому же классу задач можно отнести и выбор вариантов аналогов при концептуальном проектировании новых изделий на этапе формирования обликов, а также ряд других. Отсюда, задача автоматизации выбора аналогов по прототипу является *актуальной и значимой.*

Формализованная постановка задачи выбора аналога по прототипу предполагает наличие правила, позволяющего сравнивать варианты из однородных множеств между собой. В простейшем случае такое правило традиционно может быть задано скалярной функцией выбора $C_{k,}$ где аргументами выступают показатели качества $\{k_m\}$: $C_k(k_1,...,k_m)$ на множестве альтернатив. Распространенное на практике решение для аналога определяется скалярной функцией $C_k(k_{1a},...,k_{ma}) = f_a$, которая отражает близость значений f_a к $f_п$ в том или ином смысле, например, по наименьшему квадрату отклонений. Чем ближе их значения (в идеале совпадают), тем ближе альтернатива к прототипу и тем выше качество замены одного варианта другим. Однако в практических задачах построение самой такой функции часто вызывает серьезные затруднения. Связано это с отсутствием информации о единых правилах сравнения характеристик с разной размерностью или заданием меры приоритета показателей качества.

Во многих ситуациях удобно рассматривать совокупность показателей качества $\{ПК_i\}$ в векторной постановке. Традиционное понятие оптимальности скалярной меры близости при этом заменяется понятием «оптимальность по Парето», а сама задача выбора аналога сводится к задаче замены прототипа *по совокупности показателей качества.* Ее основная особенность состоит в том, что решением здесь может быть, как правило, не единственный вариант-аналог, а целое множество оптимальных по Парето, или эффективных (нехудших) альтернатив.

При решении задачи выбора аналога по прототипу могут быть использованы последовательно несколько критериев с нарастающей силой, либо применяться адаптивные условные критерии, приоритет показателей качества которых устанавливается ЛПР по мере появления дополнительной информации. Заметим, что наличие нескольких ПК задает на множестве альтернатив частичное упорядочение.

Прежде чем переходить к формальному описанию предлагаемого подхода, введем понятие «*прототипа*», под которым будем понимать «исходный элемент», который может быть

заменен вариантами с близкими значениями характеристик – «аналогами». Таким образом, общая постановка задачи определяется как осуществление *выбора оптимального (в том или ином смысле) аналога по прототипу*. При этом выбор осуществляется из некоторого множества вариантов, в то время как сам прототип является *уникальным вариантом*. В общем случае, поставленная задача является разновидностью задачи выбора [1]. Однако в то время как традиционная задача выбора вариантов обычно формально представляется как *двойка* $<C, \Omega>$, где C – принцип оптимальности; Ω – исходное множество альтернатив; формализованная постановка задачи выбора аналога может быть представлена *тройкой* $<C, \Omega, \omega_{п}(\alpha_{п})>$, где C – принцип оптимальности; Ω – исходное множество вариантов; $\omega_{п}(\alpha_{п})$ – прототип, задаваемый значениями его характеристик ($\alpha_{п}$). При этом из всех допустимых вариантов оптимальным (наилучшим) аналогом считается тот вариант $\omega_{опт}$, который обладает наименьшими (в заранее установленном смысле) отличиями совокупности показателей качества $\{ПК_i\}_{а}$ от совокупности $\{ПК_i\}_{пр}$ прототипа, при одновременном выполнении требований по допустимости. Следовательно, для выбора оптимального аналога должен быть предварительно сформулирован (обоснован) критерий предпочтения (критерий оптимальности), то есть правило C_k, на основании которого одно значение показателей качества $\{ПК_i\}_{а}$ из совокупности следует считать лучшим (или худшим) по сравнению с другим его значением, при условии, что все рассматриваемые варианты допустимы.

Таким образом, задача многокритериального выбора аналога по заданному прототипу сводится к тому, чтобы среди множества $\Omega_{д}$ *допустимых по техническому заданию вариантов выбрать* $\omega_{а}(\alpha_{а})$ *аналог, удовлетворяющий принятому принципу оптимальности,* который может формулироваться по-разному и, в конечном итоге, отражает степень информированности и понимания ЛПР задачи выбора аналога.

В работе в качестве математической модели решения задачи предлагается следующая последовательность формализованных описаний и преобразований исходного множества Ω вариантов для выбора прототипа.

На первом шаге из исходного множества вариантов формируется реляционная модель представления Ω в виде отношения $REL(k_1, k_2\ldots)$, в строках которого стоят варианты $\{\omega_i\} = \Omega$, а по столбцам – значения каждого из показателей качества (ПК) для ω_i (табл. 1).

Таблица 1

Исходное множество транзисторов $\Omega_{д}$, $REL(k_1, k_2\ldots)$

Альтернативы	Характеристики альтернатив $\{P_j\}$ и их значения			
	$P_1 = P_{k\max}$, мВт	$P_2 = f_{гр}$, МГц	$P_3 = I_{k\max}$, мА	$P_4 = C_{к}$, пФ
ω_1 = 2N1300	150	25	100	12
ω_2 = ГТ310А	20	160	10	4
ω_3 = ГТ310Б	20	160	10	4
ω_4 = ГТ313А	100	350	30	2,5
ω_5 = 1Т313А	100	300	50	2,5
ω_6 = ГТ308А	150	90	50	8
ω_7 = ГТ308В	150	120	50	8
ω_8 = ГТ321А	160	60	200	80
ω_9 = ГТ320А	200	80	150	7

На втором шаге осуществляется переход от реляционной модели к совокупности ассоциативных матриц (АМ) мощности $|ПК|$ с упорядочиванием значений ПК внутри матриц (либо по возрастанию, либо по убыванию).

На третьем шаге формируются фактор-множества $\{\Phi^{T}(\Omega/k_1), \ldots, \Phi^{T}(\Omega/k_M)\}$ в ассоциативных структурах для каждого из $ПК_i$, описывающие линейные порядки через окрестности $\{\boldsymbol{O}_i(\boldsymbol{\omega_i})\}$ вариантов [1].

На четвертом шаге можно сформировать транзитивный частичный порядок необходимой размерности для любых сочетаний $ПК_{ij}$ посредством конъюнкции матриц. При этом «1»-цы в АМ отображают дуги – связи между вариантами в транзитивном графе частичного порядка $G^{T}(\Omega, U^{T})$. Рассмотрим пример построения такой АМ для результирующего фактор множества $\Phi^{T}(\Omega/\{k_1,\ldots, k_M\})$, $|\Omega| = 6$. Элементы G_{ij} матрицы $j = \{1, 6\}$, $i = \{1, 6\}$ формируются пересечением соответствующих элементов B^{t}_{ij}, $t = \{1, M\}$ фактор-множеств более низкого порядка, непосредственно построенных по значениям каждого из показателей качества k_l в соответствии с выражением $G_{ij} = B^{1}_{ij} \cap B^{2}_{ij} \cap \ldots \cap B^{M}_{ij}$, $i, j = \{1, 6\}$, где

$$B_{i,j} = \begin{cases} 0,\ \omega_j \succ \omega_i,\ \omega_{i,j} \in L(\Omega \mid k_l),\ i \neq j,\ l = \{1, M\}, \\ 0,\ i = j, \\ 1,\ \omega_j \prec \omega_i,\ \omega_{i,j} \in L(\Omega \mid k_l),\ i \neq j,\ l = \{1, M\}. \end{cases}$$

По существу, такая ассоциативная матрица $A^{T}_{рез,1,\ldots,M}$ описывает направленный граф бинарных отношений $G^{T}_{\pi}(\Omega/\{k_1,\ldots,k_M\}U^{T}_{ij})$ с транзитивными дугами.

Таблица 2

Ассоциативная матрица $A^T_{рез,1,...,M}$ фактор-множества $\Phi^T(\Omega/\{k_1,\ldots,k_M\})$

Окрестности $O_i(\omega_i)$ / Альтернативы ω_i	$O_1(\omega_1)$	$O_2(\omega_2)$	$O_3(\omega_3)$	$O_4(\omega_4)$	$O_5(\omega_5)$	$O_6(\omega_6)$
ω_1	0	G_{12}	G_{13}	G_{14}	G_{15}	G_{16}
ω_2	G_{21}	0	G_{23}	G_{24}	G_{25}	G_{26}
ω_3	G_{31}	G_{32}	0	G_{34}	G_{35}	G_{36}
ω_4	G_{41}	G_{42}	G_{43}	0	G_{45}	G_{46}
ω_5	G_{51}	G_{52}	G_{53}	G_{54}	0	G_{56}
ω_6	G_{61}	G_{62}	G_{63}	G_{64}	G_{65}	0

На пятом шаге необходимо очистить АМ от всех транзитивных дуг, формируя, тем самым граф частичного порядка или Диаграмму Хасс, так как транзитивные дуги смешивают картину *последовательного* доминирования вариантов.

Шестой шаг состоит из нескольких подэтапов. Их финальная цель – выделить дуги в графе частичного порядка, которые *входят* и *выходят* из варианта-прототипа. Именно они и связаны с искомыми аналогами. Графическая интерпретация алгоритма решения задачи представлена на рис. 1.

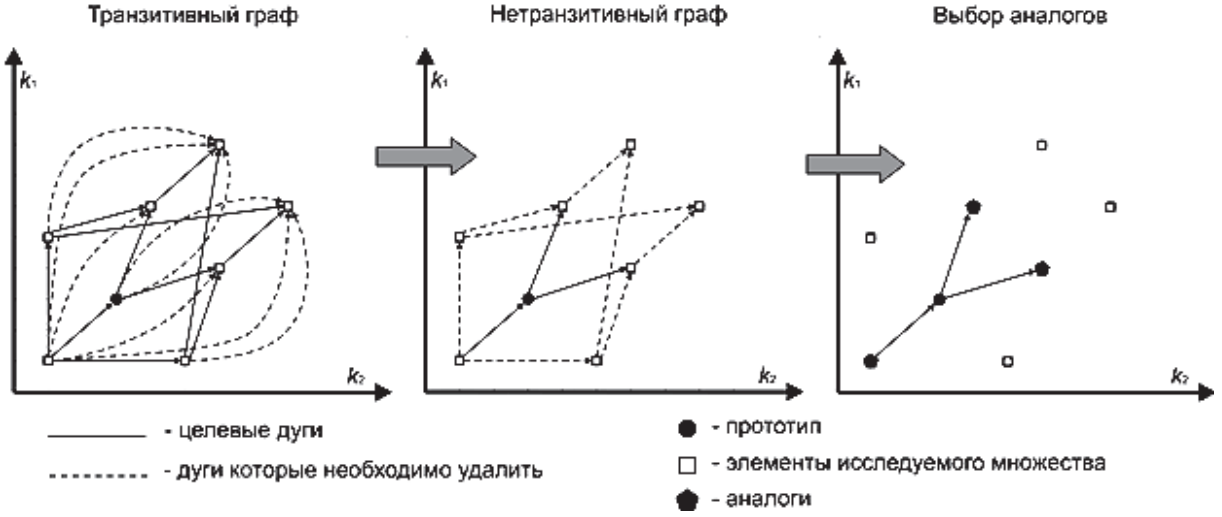


Рис. 1. Последовательность преобразования исходного графа для поиска аналогов

Окончательная проверка вариантов-претендентов на допустимость дает возможность установить, какие варианты могут быть аналогами для данного прототипа.

Учитывая изложенные предпосылки, задача работы может быть сформулирована следующим образом. *Разработать алгоритм автоматического формирования нетранзитивного графа частичного порядка из транзитивного графа частичного порядка с целью определения локальных ближайших дуг, входящих и выходящих из любой вершины, которая может являться прототипом на заданном однородном множестве.*

Пусть на *четвертом этапе* [1] из табл. 1 было сформировано транзитивное фактор-множество для ПК: $k_1 = P_1\uparrow$ и $k_2 = P_2\uparrow$ в виде АМ: $A^T_{12} = A^T_1 \bigcap_\pi A^T_2$.

Соответствующий АМ транзитивный граф частичного порядка приведен на рис. 2.

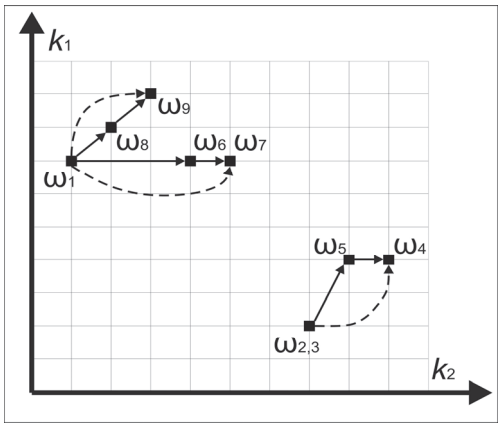


Рис. 2. Транзитивный граф $G^T(\Omega, U^T)$

Для установления закономерности идентификации транзитивных дуг в связанных «тройках» вершин, выделим их тоном (табл. 4) и приведем соответствующие им частные графы, включающие как неранзитивные, так и транзитивные дуги.

Заметим, что выделенные элементы образуют в таблице некоторый прямоугольный треугольник с транзитивно замыкающей дугой в вершине прямого угла (рис. 3 и 4), помеченной «темным» и «решеткой». Выделенные в АМ области с «1» позволяют интерпретировать матричное представление в соответствующие фрагменты графа (рис. 3 и 4).

Таблица 3

Транзитивное фактор-множество $G^T(\Omega,U^T)$ для $A_{12}^T = A_1^T \bigcap_\pi A_2^T$

	$O_1(\omega_1)$	$O_2(\omega_2)$	$O_3(\omega_3)$	$O_4(\omega_4)$	$O_5(\omega_5)$	$O_6(\omega_6)$	$O_7(\omega_7)$	$O_8(\omega_8)$	$O_9(\omega_9)$
ω_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ω_2	0	0	**1**	0	0	0	0	0	0
ω_3	0	**1**	0	0	0	0	0	0	0
ω_4	0	**1**	**1**	0	**1**	0	0	0	0
ω_5	0	**1**	**1**	0	0	0	0	0	0
ω_6	**1**	0	0	0	0	0	0	0	0
ω_7	**1**	0	0	0	0	**1**	0	0	0
ω_8	**1**	0	0	0	0	0	0	0	0
ω_9	**1**	0	0	0	0	0	0	**1**	0

Таблица 4

	$O_1(\omega_1)$	$O_2(\omega_2)$	$O_3(\omega_3)$	$O_4(\omega_4)$	$O_5(\omega_5)$	$O_6(\omega_6)$	$O_7(\omega_7)$	$O_8(\omega_8)$	$O_9(\omega_9)$
ω_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ω_2	0	0	1	0	0	0	0	0	0
ω_3	0	1	0	0	0	0	0	0	0
ω_4	0	1	1	0	1	0	0	0	0
ω_5	0	1	1	0	0	0	0	0	0
ω_6	1	0	0	0	0	0	0	0	0
ω_7	1	0	0	0	0	1	0	0	0
ω_8	1	0	0	0	0	0	0	0	0
ω_9	1	0	0	0	0	0	0	1	0

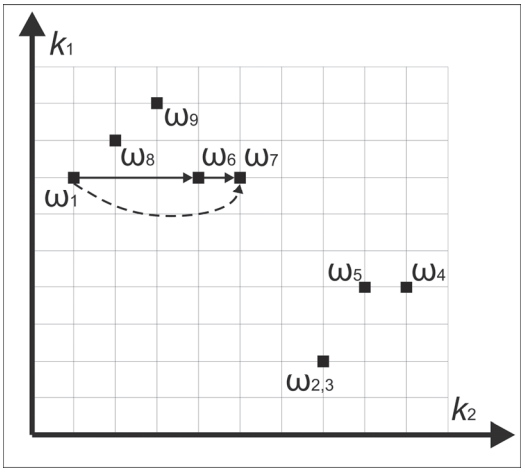


Рис. 3. Транзитивный граф для $\omega_1, \omega_6, \omega_7$

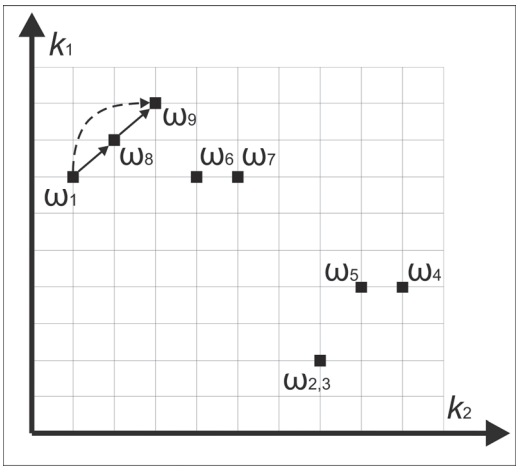


Рис. 4. Транзитивный граф для $\omega_1, \omega_8, \omega_9$

Таблица 5

Ассоциативная матрица $A_{12}^T = A_1^T \bigcap_x A_2^T$.

	$O_1(\omega_1)$	$O_2(\omega_2)$	$O_3(\omega_3)$
ω_1	a_{11}	a_{12}	a_{13}
ω_2	a_{21}	a_{22}	a_{23}
ω_3	a_{31}	a_{32}	a_{33}

Элементы $a_{21} = a_{31} = a_{32} = 1$, ***остальные - «0»***

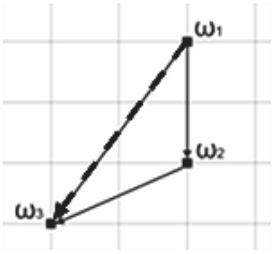


Рис. 5. Транзитивный граф, соответствующий табл. 5

Рассмотрим замеченную тенденцию более рафинировано, что поможет сформировать формальное правило на указание транзитивных дуг в ассоциативной матрице.

Опираясь на выявленные тенденции, сформируем три правила: одно – для понимания расположения указателей дуг в ассоциативной матрице, другое – для создания алгоритма поиска транзитивно замыкающих дуг, третье – о последовательности анализа строк.

Первое правило легко формулируется из свойств табл. 5.

Правило 1

Если элемент $a_{n1,m1} = 1$ *и элемент* $a_{n2,m2} = 1$, *причем* $n1 \neq n2$ *и* $m1 \neq m2$, *и если элемент, имеющий индексы у элемента* $a_{n1,m2}$, *тоже равен* «1», *то он указывает на транзитивно замыкающую дугу.*

Второе правило для ситуации, «*зеркальной*» по отношению к ***Правилу 1,*** которое позволяет проверить дугу на транзитивность.

Правило 2

Если элемент $a_{n1,m1} = 1$, *и найдутся элементы* $a_{n2,m2} = 1$, *а также элемент* $a_{m2,m1} = 1$, *то элемент* $a_{n1,m1} = 1$ *указывает на транзитивно замыкающую дугу.*

Существует одно очень важное уточнение, которое сложно заметить при простом анализе матрицы. Продемонстрируем его на примере табл. 6 и рис. 6.

Таблица 6

Ассоциативная матрица $A_{12}^T = A_1^T \bigcap_x A_2^T$.

	$O_1(\omega_1)$	$O_2(\omega_2)$	$O_3(\omega_3)$	$O_4(\omega_4)$
ω_1	$a_{11} = 0$	$a_{12} = 1$	$a_{13} = 1$	$a_{14} = 1$
ω_2	$a_{21} = 0$	$a_{22} = 0$	$a_{23} = 1$	$a_{24} = 1$
ω_3	$a_{31} = 0$	$a_{32} = 0$	$a_{33} = 0$	$a_{34} = 1$
ω_4	$a_{41} = 0$	$a_{42} = 0$	$a_{43} = 0$	$a_{44} = 0$

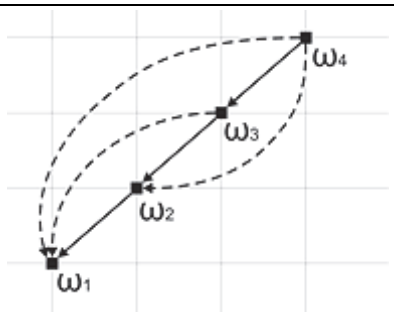


Рис. 6. Граф с «внешними» и «внутренними» транзитивными дугами

В табл. 6 разными оттенками обозначены все транзитивно замыкающие дуги. Необходимо удалить дугу, замыкающую самые дальние вершины графа, помеченную наиболее темным тоном. Проблема заключается в том, что отдельные дуги, которые она замыкает, сами являются транзитивно замыкающими. Отсюда, необходимо удалить вначале «внешние» дуги, иначе может возникнуть ситуация, когда указатель на дугу будет удален раньше ее самой. Так, например, произойдет, если удалить дугу 3–1 (элемент a_{13}) или дугу 4–2 (элемент a_{24}). Анализируя матрицу, можно установить, что «внешние» дуги располагаются в строках с б*о*льшим количеством элементов.

Правило 3. *Поиск элементов, идентифицирующих транзитивно замыкающие дуги, необходимо начинать со строки, имеющей наибольшую сумму элементов (т. е. содержащую наибольшее количество «1»-х элементов).*

Установленные правила позволяют перейти к формальной записи алгоритма.

Для начала, введем следующие формальные обозначения: *n* – строка; Σ *n* = *N*; *m* – столбец;

$\Sigma\, m = M$; $a_{n,m}$ – элемент ассоциативной матрицы размерности $N \times M$.

Описание алгоритма исключения транзитивных дуг

На этапе 1°, следуя *Правилу 3*, в матрице ищется строка с максимальным количеством ненулевых элементов (дуг). Мощность множества единичных элементов в искомой строке – $\left|\omega_{\text{рез},n_{\max}}\right|$. Выявив строку с максимальным количеством единиц, можно приступать к ее анализу. Анализ заключается в проверке каждого из «1»-х элементов найденной строки по *Правилу 2*. Проверка производится в несколько этапов, условно их можно обозначить так: «поиск проверочного элемента», «поиск опорного элемента» и «проверка контрольного элемента».

На *втором этапе* 2° алгоритм выполняет поиск «*проверочного элемента*»; если он найден, то анализ продолжается, иначе – происходит переход к следующему элементу, если такой присутствует (п. 2.1°).

$$2^\circ\ a_{n_{\max},m} = \begin{cases} 0, \text{ то к } 2.1^\circ, \ \forall m = \{1, M\}; \\ 1, \text{ то к } 3^\circ, \ m \text{ в память}. \end{cases} \quad 2.1^\circ\ (m+1), \text{если} \begin{cases} m \le M, \text{то к } 2^\circ; \\ m > M, \text{то выход}. \end{cases}$$

На *третьем этапе* 3° осуществляет поиск «*опорного элемента*». Необходимо отметить, что здесь вводится новый счетный элемент *k*, а также происходит проверка на совпадение элемента, найденного на этапе 2° и 3° в п. 3.1°. В остальном действия на этапе 3°, аналогичны этапу 2°.

$$3^\circ\ a_{n_{\max},k} = \begin{cases} 0, \text{ то к } 3.2^\circ; \\ 1, \text{ то к } 3.1^\circ. \end{cases}$$

$$3.1^\circ \text{ если} \begin{cases} k = m, \text{ то к } 3.2^\circ, \ \forall k = \{1, M\}; \\ k \ne m, \text{ то к } 4^\circ, \ k \text{ в память}. \end{cases} \quad 3.2^\circ\ (k+1), \text{если} \begin{cases} k \le M, \text{то к } 3^\circ; \\ k > M, \text{то выход}. \end{cases}$$

На *четвертом этапе* 4° реализуется проверка «*контрольного элемента*» посредством применения *Правила 2*. Таким образом, если условие выполнено, то транзитивная дуга удаляется, иначе – поиск продолжается.

$$4^\circ\ a_{k,m} = \begin{cases} 0, \text{ то к } 2.1^\circ, \ k = 1; \\ 1, \text{ то } a_{n,m} = 0, \text{ к } 2.1^\circ, \ k = 1. \end{cases}$$

Когда все элементы строки проверены, происходит переход к следующей по мощности количества «1» строке и алгоритм повторяется до окончания анализа всей матрицы. Конечным результатом процесса поиска будет построение нетранзитивной ассоциативной матрицы A_{12}, из которой удалены все элементы, указывающие на транзитивно замыкающие дуги. Графическую интерпретацию алгоритма можно представить в виде блок схемы, отраженной на рис. 7.

ПРИМЕР. Рассмотрим в качестве примера работу алгоритма выбора аналога, реализующего переход от транзитивного к нетранзитивному графу частичного порядка. Пусть исходным множеством Ω является набор транзисторов, представленный в табл. 1. и ее ассоциативном представлении для $G^T_{\pi}(\Omega/\{k_1, k_2\})$ (табл. 7).

Исходное состояние: количество исследуемых строк $N = 9$; счетчик $i = 1$;

1. Найдем номер строки, содержащей наибольшее количество единиц: $n = 4$ (табл. 7).

2. Далее необходимо перейти к подробному анализу выбранной строки в табл. 7.

3. Ищем первую единицу в строке $n = 4$ (табл. 7). Исследуемая строка здесь выделена светлым, а элемент, содержащий первую единицу – более темным тоном. Этот элемент указывает на возможную транзитивно замыкающую дугу ($a_{42} = 1$), поэтому необходимо это проверить. Переходим к следующему этапу алгоритма.

4. Так как элемент $a_{42} = 1$, то необходимо проверить элемент $a_{4,k} = 1$? Проверяем элементы по порядку. Первым элементом, который полностью удовлетворяет условиям при $k = 3$, является $a_{4,3} = 1$. В табл. 7 этот элемент выделен наклонной штриховкой.

5. На следующем этапе поиска транзитивной дуги следует проверить, существует ли третья дуга в «тройке»? Для этого необходимо рассчитать координаты третьего элемента по *Правилу 2*. В общем случае, в формализмах разработанного алгоритма, согласно *Правилу 2,* третий элемент – это элемент $a_{k,m}$, для которого

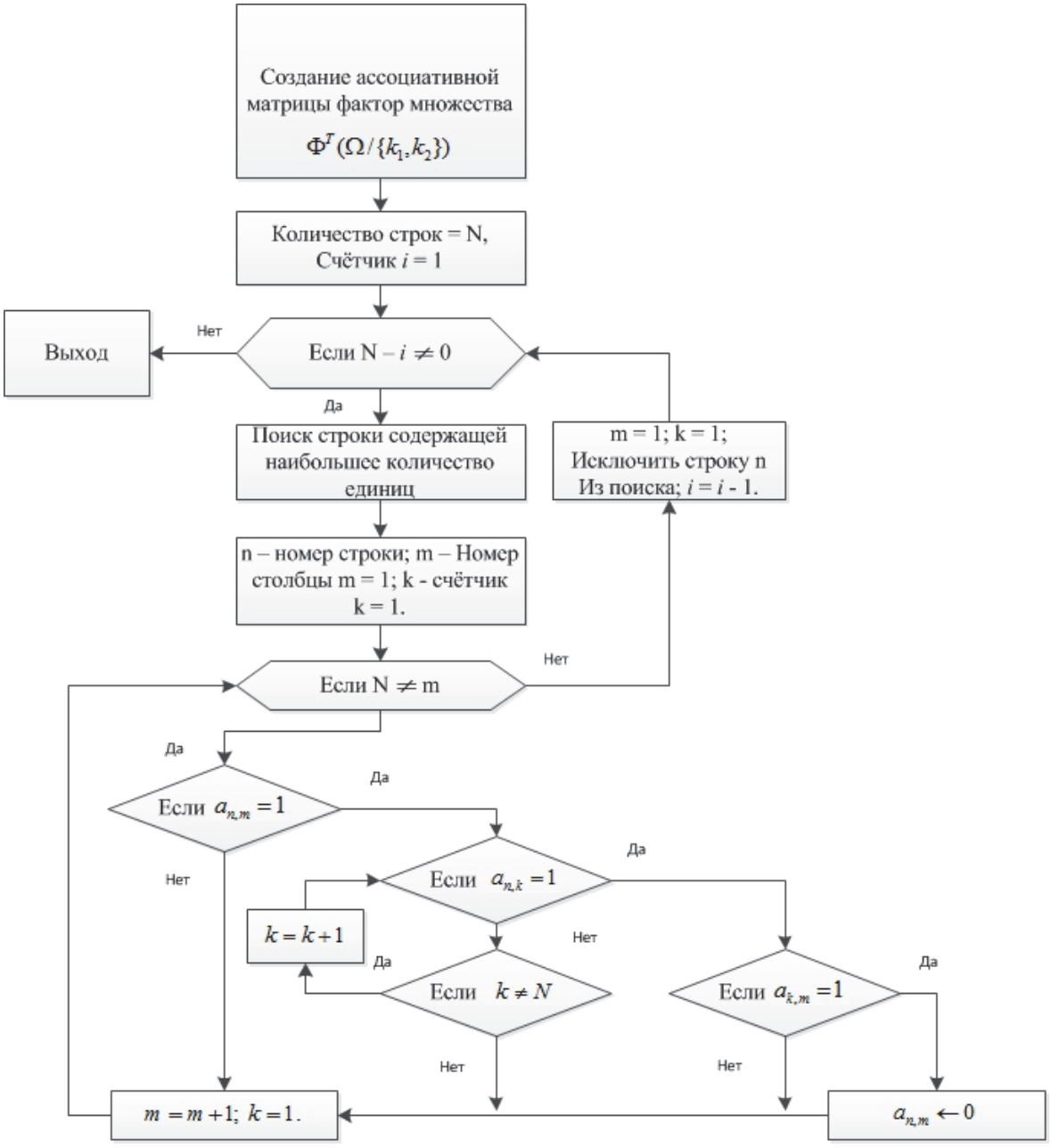


Рис. 7. Блок-схема алгоритма поиска транзитивных дуг

Таблица 7

Ассоциативная матрица $A_{12}^T = A_1^T \bigcap_x A_2^T$.

	$O_1(\omega_1)$	$O_2(\omega_2)$	$O_3(\omega_3)$	$O_4(\omega_4)$	$O_5(\omega_5)$	$O_6(\omega_6)$	$O_7(\omega_7)$	$O_8(\omega_8)$	$O_9(\omega_9)$
ω_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ω_2	0	0	1	0	0	0	0	0	0
ω_3	0	1	0	0	0	0	0	0	0
ω_4	0	1	1	0	1	0	0	0	0
ω_5	0	1	1	0	0	0	0	0	0
ω_6	1	0	0	0	0	0	0	0	0
ω_7	1	0	0	0	0	1	0	0	0
ω_8	1	0	0	0	0	0	0	0	0
ω_9	1	0	0	0	0	0	0	1	0

m = 2 и k = 3. Проверим найденный элемент $a_{3,2}$= 1→?. В табл. 7 он помечен вертикальной штриховкой; дуга, которая проверяется на транзитивность – темным тоном, а первая из найденных дуг – наклонной штриховкой. Таким образом, в процессе проверки элементов, в соответствии с разработанным алгоритмом, выделена искомая «тройка» связанных дуг, причем, согласно *Правилам 1, 2, 3* элемент $a_{4,2}$ указывает на транзитивно замыкающую дугу, которая может быть удалена из графа.

6. Обнулим элемент $a_{4,2} \leftarrow 0$, тем самым удаляя указатель на транзитивно замыкающую дугу и, как следствие, саму дугу. Повторим описанные выше этапы алгоритма (1–6) для строки 5 и остальных строк в порядке убывания мощности наличия в строке «1», устраняя тем самым все транзитивные элементы. При этом исходная табл. 7 трансформируется в табл. 8. Результатом выполнения алгоритма является установленный нетранзитивный частичный порядок, представляющий собой диаграмму Хассе.

Таблица 8

Результирующая ассоциативная матрица A_{12} для диаграммы Хассе

	$O_1(\omega_1)$	$O_2(\omega_2)$	$O_3(\omega_3)$	$O_4(\omega_4)$	$O_5(\omega_5)$	$O_6(\omega_6)$	$O_7(\omega_7)$	$O_8(\omega_8)$	$O_9(\omega_9)$
ω_1	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*
ω_2	*0*	*0*	**1**	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*
ω_3	*0*	**1**	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*
ω_4	*0*	*0*	*0*	*0*	**1**	*0*	*0*	*0*	*0*
ω_5	*0*	**1**	**1**	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*
ω_6	**1**	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*
ω_7	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	**1**	*0*	*0*	*0*
ω_8	**1**	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*
ω_9	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	*0*	**1**	*0*

Результирующий граф частичного порядка показан на рис. 8. Такое представление структурированного множества наглядно отражает отношение вариантов, приведенных в неупорядоченной таблице компонентов (табл. 1), и позволяет быстро анализировать его по заданным показателям качества для заданных прототипов. Проверить входящие и исходящие из прототипа дуги на предполагаемые аналоги остается только на допустимость.

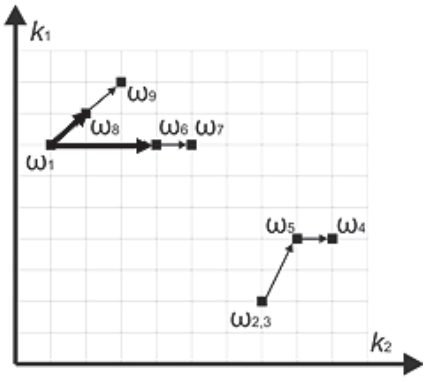


Рис. 8. Диаграмма Хассе

Так, если прототипом является импортный транзистор ω_1 = 2N1300 (табл. 1), то, судя по диаграмме Хассе в критериальном пространстве π $\{k_1, k_2\}$ его аналогами (при условии допустимости) будут варианты ω_8, ω_6. Разработанный алгоритм используется в учебном процессе на кафедре РПУ НИУ «МЭИ» и ряде предприятий.

Заключение

В работе предложен простой и надежный алгоритм *выбора аналогов для заданного прототипа*, позволяющий решать поставленную задачу с помощью неметрических безусловных критериев посредством перехода от транзитивного графа частичного порядка к диаграмме Хассе через удаление всех транзитивных дуг; при этом на аналоги для заданного прототипа указывают ближайшие к заданному прототипу нетранзитивные дуги.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кандырин, Ю. В.* Методы и модели многокритериального выбора вариантов в САПР : учеб. пособие для вузов / Ю. В. Кандырин. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 172 с.

2. *Кандырин, Ю. В*. Алгоритмы установления приоритетов объектов по техническим показателям в целях назначения оптимальной очередности их ремонтов / Ю. В. Кандырин, А. М. Кошелев // Вестник информационных и компьютерных технологий. – М.: Машиностроение, 2006. – № 7. – С. 18–26.

3. *Кандырин, Ю. В*. Принципы построения информационных систем для автоматизированного многокритериального выбора / Ю. В. Кандырин // Радиотехника. – М., 1999. – № 5. – С. 32–37.

4. *Горбатов, В. А.* Теория частично упорядоченных систем / В. А. Горбатов. – М.: Сов. радио, 1976. – 336 с.

УДК 62-272.5:681.5.512.2.011.056

Ю. В. Кандырин, А. Д. Чивилев

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ВЫБОР НЕХУДШИХ ВАРИАНТОВ ПЕРЕДАЧИ «ВИНТ-ГАЙКА» В ПРИВОДАХ ЗЕРКАЛЬНЫХ АНТЕНН

Национальный исследовательский университет «МЭИ» г. Москва

ywk@mail.ru, 4ibis-88@mail.ru

Рассматриваются способы решения задачи выбора оптимального варианта передачи винт-гайка скольжения, применительно к полноповоротным зеркальным параболическим антеннам. Приведен алгоритм выбора, необходимый для последующего создания САПР механических приводов АУ РЭС.

Ключевые слова: многокритериальный выбор, механический привод, винт-гайка, антенна, САПР, критерий Парето, частичный порядок.

Y. V. Kandyrin, A. D. Chivilyov

AUTOMATED SELECTION NOT THE WORST OPTIONTRANSFER «SCREW-NUT» IN THE DRIVE THE DISH

National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow

The methods of solving the problem of optimal variant transmission screw nut slip, with respect to full-circle mirrored parabolic antennas. The algorithm choices necessary for the subsequent creation of CAD mechanical drives AU RECs.

Keywords: multi-criteria selection, mechanical drive, screw-nut, antenna, CAD, the Pareto criterion, the partial order.

Введение

Основной задачей механических узлов антенных устройств (АУ) является перемещение зеркальной системы (ЗС) антенны в требуемом направлении. Развитие техники заставляет в настоящее время предъявлять высокие требования к точности наведения ЗС. Задачей конструктора является обеспечение требуемой точности и скорости наведения АУ с помощью механической передачи.

Одним из наиболее часто встречающихся вариантов решения задачи перемещения ЗС АУ по угломестной оси (УМ) является применение передачи винт-гайка скольжения. Ее популярность обусловлена простотой конструкции, большой несущей способностью при малых габаритных размерах, высокой точностью перемещения, а при однозаходной резьбе такие передачи обеспечивают самоторможение [3].

Габаритные размеры передачи винт-гайка скольжения стандартизированы, выбор материала передачи и ее габариты определяются по проектировочному расчету. Из-за трудоемкости расчета и ограниченных сроков выполнения задания зачастую выбираются неоптимальные варианты исполнения передачи. В качестве фактора, определяющего оптимальность выбора, выступает личный опыт лица, принимающего решение (ЛПР).

Данная работа посвящена оптимизации построения системы механического привода, относящегося к типу винт-гайка скольжения. В целом оптимизация может быть осуществлена на основе многовариантного синтеза с последующим выбором оптимального варианта структурно-параметрического построения, при котором обеспечивается наибольшая эффективность системы в принятом смысле. Под *эффективностью* обычно понимается степень соответствия системы своему назначению. Отметим, что понятие эффективности – субъективное понятие, отражающее представление проектировщика (заказчика) о качестве системы [2].

В предлагаемой работе рассматриваются задачи по созданию алгоритма, позволяющего в процессе разработки механической передачи «винт-гайка»:

– *производить расчет исходных данных по условиям, приведенным в техническом задании (ТЗ);*

– *формировать область вариантов исполнения передачи винт-гайка скольжения;*

– *накладывать ограничения шаг за шагом на полученную область;*

– *формировать область допустимых решений;*

– *производить выбор* π*-оптимальных решений.*

Такая логика решения позволяет выбрать оптимальные варианты, отвечающие требованиям ТЗ, и существенно сократить время проектирования.

Для создания алгоритма расчета и выбора оптимального механизма винт-гайка скольжения необходимо проанализировать внешние характеристики, оказывающие влияние на данный тип механической передачи и соответственно выделить основные. Набор внешних характеристик символически можно подразделить на условия, ограничения и показатели качества: {У}, {О} и {ПК}, что необходимо для поиска оптимального решения в конкретно поставленной задаче.

Основные характеристики передачи винт-гайка скольжения

На рис. 1 показана схема работы винтовой пары. Винтовую пару необходимо установить на подвеску УМ через качающееся соединение, так как траектория движения винта не прямая. Для осуществления перемещения зеркала, его необходимо соединить с винтовой парой.

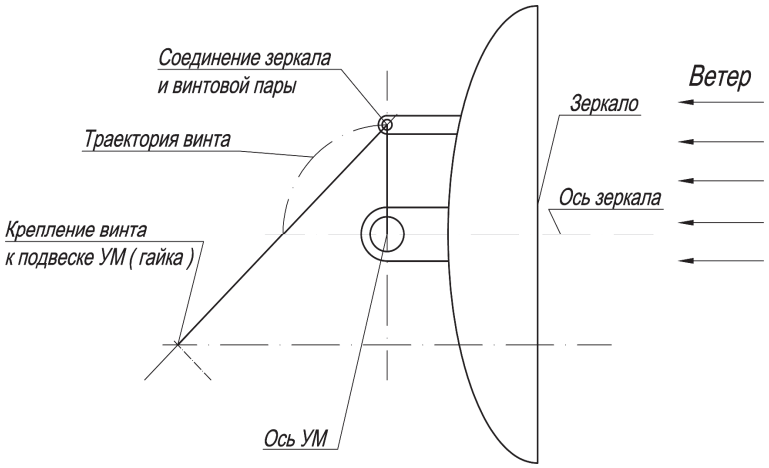


Рис. 1. Схема работы винтовой пары

Отметим важное обстоятельство. В передачах винт-гайка скольжения используется трапецеидальная резьба. В ГОСТ 24737–81 для трапецеидальной резьбы стандартизованы профиль резьбы и ее основные характеристики. Всего в стандарте представлено более 200 вариантов исполнения трапецеидальной резьбы; рассматривая варианты исполнения гайки (разъемная, цельная, сдвоенная), получим уже больше 600 вариантов исполнения передачи. Также необходим выбор материала винта и гайки, так как характеристики материалов оказывают существенное влияние на характеристики передачи. Таким образом, число вариантов становится достаточно большим, чтобы провести их полное сравнение без применения средств автоматизации вычислений. Создание эффективного алгоритма расчета требует анализа взаимосвязей, существующих между элементами исследуемого механизма. Рассмотрим эти связи подробнее.

Предварительно характеристики передачи винт-гайка скольжения определяют из соотношения:

$$d_2 = \sqrt{\frac{2P_{\text{пр}\,max}}{\pi\gamma|q|}}, \qquad (1)$$

где γ – коэффициент высоты гайки, который назначает ЛПР; $|q|$ – коэффициент, учитывающий трение стали (материал винта) по бронзе (материал гайки); $P_{\text{пр max}}$ – максимальная нагрузка, действующая вдоль оси привода.

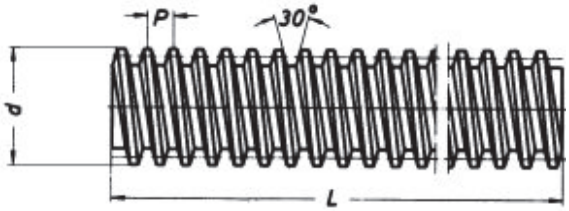


Рис. 2. Трапецеидальная резьба

Трапецеидальная резьба характеризуется: наружным $d(D)$, внутренним $d_1(D_1)$ и средним d_2 (D_2) диаметрами (d относится к винту, D – к гайке); $H_г$ – высотой гайки; шагом резьбы p; рабочей высотой профиля h'; углом профиля α; числом заходов z; ходом резьбы $p_z = p\ z$ (как

было сказано ранее, используется однозаходная резьба, следовательно $p_z = p$); углом подъема резьбы ψ.

Следовательно, для определения допустимых габаритов винтовой передачи необходимо определить нагрузку, действующую вдоль оси винта, при различном угле поворота ЗС относительно оси УМ и выявить ее максимальное значение.

Нагрузку $P_{\text{пр}}$, действующую вдоль оси привода, определим из выражения

$$P_{\text{пр}} = \frac{M_{\Sigma}}{L_{\text{пр}}}, \qquad (2)$$

где $L_{\text{пр}}$ – рабочая длина винта [мм]; M_{Σ} – суммарный момент, действующий на винтовую пару.

Значения $L_{\text{пр}}$ и M_{Σ} изменятся при изменении угла поворота ЗС. Для определения рабочей длины винта выполняют прочерчивание схемы поворота зеркала в диапазоне от 0 до 90° с шагом в 15°. Данный метод не подходит для решения задачи автоматизации расчета привода винт-гайка скольжения. Поэтому для решения поставленной задачи была разработана методика расчета, представленная ниже.

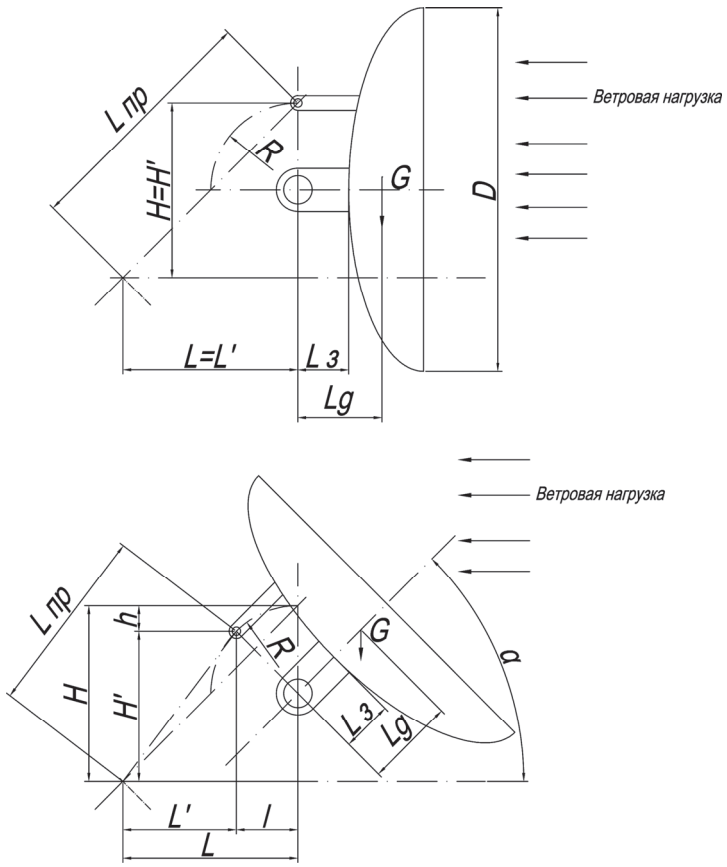


Рис. 3. Углы поворота зеркала

На рис. 3 показаны основные параметры, необходимые для расчета нагрузки на винтовой привод.

Параметры, назначаемые ЛПР: H – расстояние от точки крепления винта к зеркалу до точки установки привода на подвеску УМ, при нахождении зеркала в положении ГОРИЗОНТ (α=0°) [мм]; L – расстояние от оси поворота до точки установки привода на подвеску УМ, при нахождении зеркала в положении ГОРИЗОНТ (α=0°) [мм]; H' – расстояние от точки крепления винта к зеркалу до точки установки привода на подвеску УМ, при повороте зеркала [мм]; L' – расстояние от оси поворота до точки установки привода на подвеску УМ, при повороте зеркала [мм]; $L_З$ – расстояние от оси поворота до зеркала [мм]; R – расстояние от оси поворота до точки крепления винта к зеркалу [мм]; L_G – расстояние от оси поворота до центра тяжести зеркала [мм].

Возможна вариация вышеперечисленных параметров, если конечный результат не удовлетворяет требованиям ТЗ (например, угловая скорость поворота зеркала при полученной рабочей длине винта будет ниже требуемой по ТЗ).

Данные, указанные в ТЗ:

D – диаметр зеркала [мм];

G – вес зеркала [Н];

α – угол поворота зеркала [°] (в ТЗ указывается диапазон значений угла поворота).

Определение рабочей длины винта

Рабочую длину винта $L_{пр}$ определим из следующих соображений (см. рис. 3):

$$L_{пр} = \sqrt{L'^2 + H'^2}, \quad (3)$$

$$L' = L - l, \quad (4)$$

$$H' = H - h. \quad (5)$$

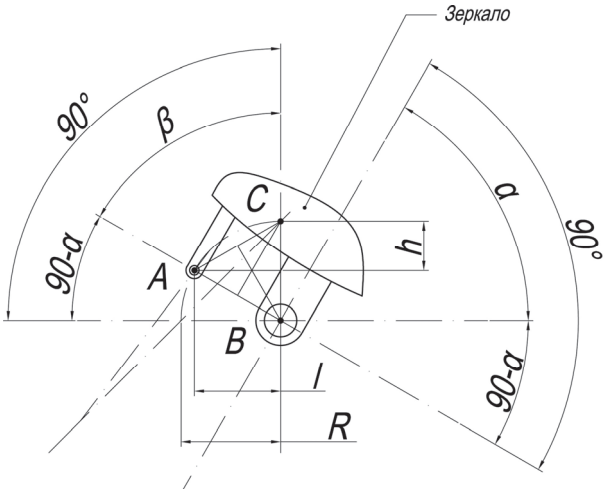


Рис. 4. Изменение рабочей длины винта

Для определения значений *l* и *h* рассмотрим увеличенное изображение, показывающее изменение рабочей длины винта (рис. 4).

Определим значение угла β – угла между осью УМ и перпендикуляром к оси зеркала. По данным рис. 4 можно утверждать, что

$$B = 90 - (90 - \alpha) = \alpha.$$

$$\beta = \alpha \quad (6)$$

Далее рассмотрим Δ *ABC*, являющийся равнобедренным. *AB*=*BC*=*R*.

Следовательно, можно утверждать, что

$$AC = 2R\sin\alpha. \quad (7)$$

Определим значение *l*:

$$l = R\sin\alpha. \quad (8)$$

Определим значение *h*:

$$h = \sqrt{AC^2 - l^2}, \quad (9)$$

$$h = \sqrt{3}R\sin\alpha. \quad (10)$$

Подставив (8) и (10) в (3), получим:

$$L_{пр} = \sqrt{(L - R\sin\alpha)^2 + (H - \sqrt{3}R\sin\alpha)^2}. \quad (11)$$

Определение суммарного момента

Суммарный момент, действующий на винтовую пару

$$M_{\Sigma} = M_{вет} + M_{вес}. \quad (12)$$

Вес зеркала создает крутящий момент $M_{вес}$ (рис. 3):

$$M_{вес} = G \cdot L_G \cos\alpha. \quad (13)$$

Крутящий момент, создаваемый ветровой нагрузкой $M_{вет}$ (рис. 3):

$$M_{вет} = w_m \cdot S \cdot \sin\alpha \cdot L_3 \cdot \cos\alpha, \quad (14)$$

где *S* – площадь зеркала; определяется по формуле

$$S = \frac{\pi D^2}{4}; \quad (15)$$

w_m – нормативное значение средней составляющей ветровой нагрузки на высоте *z* над поверхностью земли (см. СНиП 2.01.07–85 «Нагрузки и воздействия»).

$$w_m = w_0 kc. \quad (16)$$

Здесь w_0 – нормативное значение ветрового давления; *k* – коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления по высоте; *c* – аэродинамический коэффициент.

Подставив выражения (15) и (16) в (14), получим:

$$M_{вет} = w_0 kc \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \sin\alpha \cdot L_3 \cdot \cos\alpha. \quad (16)$$

Подставив (16) и (13) в (12), получим:

$$M_{\Sigma} = w_0 kc \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \sin\alpha \cdot L_3 \cdot \cos\alpha + G \cdot L_G \cos\alpha. \quad (17)$$

Определение максимальной осевой нагрузки

Окончательно формула определения осевой нагрузки на привод, в зависимости от угла поворота, выглядит следующим образом:

$$P_{пр} = \frac{w_0 kc \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \sin\alpha \cdot L_3 \cdot \cos\alpha + G \cdot L_G \cos\alpha}{\sqrt{(L - R\sin\alpha)^2 + (H - \sqrt{3}R\sin\alpha)^2}} \quad (18)$$

Далее необходимо вычислить значения Рпрmax путем сравнения значений Рпр при различных углах поворота. Для этого следует задать диапазон значений угла поворота, а также шаг (максимальное значение шага 15°).

Формирование области допустимых решений

На первом этапе по формуле (1) вычисляется совокупность значений d_2, необходимых для

формирования области возможных решений поставленной задачи. На множество вариантов исполнения винтовой передачи накладывается ограничение

$$d_2 \geq \sqrt{\frac{2P_{\text{пр}\,max}}{\pi\gamma|q|}}. \quad (19)$$

Определенные ограничения накладываются на варианты, исходя из свойств материала винта. Перечислим требования в формализованном виде [3], которым должны соответствовать допустимые варианты. Износостойкость резьбы:

$$|q| \geq \frac{2P_{\text{пр}}}{\pi\gamma d_2^2}. \quad (20)$$

Прочность витков гайки на срез

$$0{,}2\sigma_T \geq \frac{P_{\text{пр}}}{0{,}65\pi\gamma D\, d_2}, \quad (21)$$

σ_T – предел текучести материала [МПа].

Запас прочности винта

$$\frac{\frac{\pi d_1^2\sigma_{-1}}{4P_{\text{пр}}}\frac{0{,}2d_1^3\tau_{-1}}{0{,}5P_{\text{пр}}d_2 tg(arctg(pz/\pi d_2)+arctg(0{,}2\cos(\alpha/2)))}}{\sqrt{(\frac{\pi d_1^2\sigma_{-1}}{4P_{\text{пр}}})^2+(\frac{0{,}2d_1^3\tau_{-1}}{0{,}5P_{\text{пр}}d_2 tg(arctg(pz/\pi d_2)+arctg(0{,}2\cos(\alpha/2)))})^2}} \geq 1{,}5; \quad (22)$$

$\tau_к$; σ_{-1}; τ_{-1} – пределы выносливости при симметричном цикле.

Далее необходимо определить значение осевой критической силы $P_{\text{пр кр}}$ [Н]:

$$P_{\text{пр кр}} = \pi^2 E\left(\frac{\pi d_1^4}{64}\right)(0{,}4+\frac{0{,}6d}{d_1})/(L_{\text{пр}})^2; \quad (23)$$

E – модуль упругости материала винта [МПа].

Проверка на продольную устойчивость:

$$P_{\text{пр кр}} \geq 3P_{\text{пр}}. \quad (24)$$

По результатам проведенного исследования составим сводную таблицу внешних характеристик системы «винт-гайка». В таблице выделены характеристики, являющиеся показателями качества для рассматриваемой системы.

Таблица 1

Внешние характеристики передачи винт-гайка скольжения

ωi	d	d_1	D_1	$D_2=d_2$	γ	$\|q\|$	σ_T	$\tau_к$	σ_{-1}	τ_{-1}	$C_{\text{отн}}$	$P_{\text{прkр}}$

$C_{\text{отн}}$ – относительная стоимость материала винта (за «1» принята стоимость материала «Сталь 40»). В табл. 2 представлен пример области допустимых решений при выборе передачи винт-гайка скольжения для заданных ограничений.

Таблица 2

Варианты исполнения передачи винт-гайка скольжения

ω_i	d	$P_{\text{прkр}}$	$C_{\text{отн}}$
ω_1	30	54149	1,3
ω_2	32	72068	1
ω_3	36	50234	1
ω_4	38	125032	1
ω_5	38	106688	1
ω_6	38	67285	1
ω_7	30	54149	1,5

Поиск нехудших решений по критерию Парето

Для автоматизации решения задач построения критериально структурированных множеств необходимо использовать такие модели данных для хранения фактор-множеств, которые позволяли бы осуществлять логические операции, основанные на булевой алгебре, для того, чтобы алгоритмизировать процессы решения. Таким образом, методы решения задач должны быть тесно увязаны с моделями хранимых данных об альтернативах. От подобных моделей данных также требуется компактность хранения информации и оптимальные пути доступа к ней. Этим требованиям наиболее полно удовлетворяют ассоциативные структуры, модифицированные версии которых и предлагается использовать при решении задач, поставленных в диссертации. Эти структуры содержат минимально возможное количество информации, достаточное, однако, для сохранения всей информации о приоритетах между вариантами [2].

Фактор-множество произвольной размерности можно получить путем пересечения фактор-множеств окрестностей альтернатив более низкой размерности [2]:

$$\Phi(\Omega/\{k_1,\ldots,k_M\}) = \Phi(\Omega/k_1) \cap \Phi(\Omega/k_2) \cap \ldots \cap \Phi(\Omega/k_M).$$

В табл. 3 сведены фактор-множества низших размерностей и результирующее фактор-множество в трехмерном пространстве показателей качества для π-критерия.

Таблица 3

Представление результирующего фактор-множества $\Phi_\Omega/\{k_1, k_2, k_3\}$)

ω_i	Φ_Ω/ d_2	$\Phi_\Omega/ P_{\text{пркр}}$	$\Phi_\Omega/ C_{\text{отн}}$	$\Phi_\Omega/\{ d_2, P_{\text{пркр}}, C_{\text{отн}} \})$
ω_1	ω_7	$\omega_2, \omega_4, \omega_5, \omega_6, \omega_7$	$\omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5, \omega_6$	∅
ω_2	ω_1, ω_7	ω_4, ω_5	$\omega_3, \omega_4, \omega_5, \omega_6$	∅
ω_3	$\omega_1, \omega_2, \omega_7$	$\omega_1, \omega_2, \omega_4, \omega_5, \omega_6, \omega_7$	$\omega_2, \omega_4, \omega_5, \omega_6$	**ω_2**
ω_4	$\omega_1,\omega_2, \omega_3, \omega_5, \omega_6, \omega_7$	∅	$\omega_2, \omega_3, \omega_5, \omega_6$	∅
ω_5	$\omega_1,\omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_6, \omega_7$	$\omega_4,$	$\omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_6$	**ω_4**
ω_6	$\omega_1,\omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5, \omega_7$	$\omega_2, \omega_4, \omega_5$	$\omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5$	**$\omega_2, \omega_4, \omega_5$**
ω_7	ω_1	$\omega_1, \omega_2, \omega_4, \omega_5, \omega_6,$	$\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5, \omega_6$	**ω_1**

Итак, нехудшими при π-постановке π(Ω/{d_2, $P_{\text{пркр}}$, $C_{\text{отн}}$ }) являются альтернативы: {ω_1, ω_2, ω_4}. Аналогичный результат получается при определении промежуточных фактор-множеств для двоек ПК {$C_{\text{отн}}$, d_2}, {$C_{\text{отн}}$, $P_{\text{пркр}}$}, {d_2, $P_{\text{пркр}}$}, соответственно, Φ(Ω/π{$C_{\text{отн}}$, d_2}), Φ(Ω/π{$C_{\text{отн}}$, $P_{\text{пркр}}$}), Φ(Ω/π{d_2, $P_{\text{пркр}}$}). Данные множества, как и результат их пересечения $\Phi_\Omega/\{d_2, P_{\text{пркр}}, C_{\text{отн}}\}$), показаны в табл. 4.

Таблица 4

Представление результирующего фактор-множества $\Phi_\Omega/\pi\{ d_2, P_{\text{пркр}}, C_{\text{отн}}\}$)

ω_i	$\Phi_\Omega/\pi\{ C_{\text{отн}}, d_2\})$	$\Phi_\Omega/\pi\{ C_{\text{отн}}, P_{\text{пркр}} \})$	$\Phi_\Omega/\pi\{ d_2, P_{\text{пркр}} \})$	$\Phi_\Omega/\pi\{ d_2, P_{\text{пркр}}, C_{\text{отн}} \})$
ω_1	∅	**$\omega_2, \omega_4, \omega_5, \omega_6$**	**ω_7**	∅
ω_2	∅	**ω_4, ω_5**	∅	∅
ω_3	**ω_2**	**$\omega_2, \omega_4, \omega_5, \omega_6$**	**$\omega_1, \omega_2, \omega_7$**	**ω_2**
ω_4	**$\omega_2, \omega_3, \omega_5, \omega_6$**	∅	∅	∅
ω_5	**$\omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_6$**	**ω_4**	**ω_4**	**ω_4**
ω_6	**$\omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5$**	**$\omega_2, \omega_4, \omega_5$**	**$\omega_2, \omega_4, \omega_5$**	**$\omega_2, \omega_4, \omega_5$**
ω_7	**ω_1**	**$\omega_1, \omega_2, \omega_4, \omega_5, \omega_6,$**	**$\omega_1,$**	**$\omega_1,$**

Исходя из вышеуказанных рассуждений и результатов анализа табл. 4, можно говорить о том, что фактор-множества, полученные для π-критерия, обладают свойствами свободной перестановки пересекаемых элементов и транзитивности. Нехудшими для π-постановки π(Ω/{ d_2, $P_{\text{пркр}}$, $C_{\text{отн}}$ }) и в случае пересечения фактор-множеств для двоек показателей качества являются те же альтернативы {ω_1, ω_2, ω_4}.

Алгоритм поиска нехудших вариантов из множества всех возможных решений представлен на рис. 5.

Техническое задание включает исходные данные, необходимые для расчета: характеристики зеркала, требуемое климатическое исполнение привода, диапазоны углов поворота, требуемую скорость перемещения зеркала и др. На основании ТЗ ЛПР назначает предварительные габариты передачи. Проводится расчет рабочей длины винта и суммарного крутящего момента, действующего на привод. В случае, если результаты расчета не удовлетворяют требованиям ТЗ по допустимости, то ЛПР заново назначает габариты передачи.

После определения длины рабочего хода и суммарного момента становится возможным определение осевой нагрузки $P_{\text{пр0}}$, действующей на привод, при нахождении антенны в положении ГОРИЗОНТ. Далее указывается диапазон перемещения зеркала и шаг, с которым будут браться значения угла поворота для определения максимально действующей на привод нагрузки. После ее определения формируется область решений, удовлетворяющих огра-

ничению (19). Затем поочередно на полученную область накладываются ограничения (20), (21), (22) и (24), с помощью которых формируется область допустимых решений. Сформированные варианты сравниваются по показателям качества, с целью выявления нехудших вариантов. Из нехудших альтернатив ЛПР эвристически выбирает рациональный вариант по ТЗ, либо путем сравнения по другим более сильным критериям проводится дальнейшее усечение Ω_{π}.

Рис. 5. Алгоритм поиска нехудших вариантов из множества всех возможных решений

Выводы

В работе предложен метод автоматизации проектирования и выбора нехудших вариантов исполнения передачи винт-гайка скольжения, применительно к приводу зеркальной антенны. Дальнейшее развитие предложенного алгоритма расчета предполагает применение статистических методов оценки ошибок и использование методов многокритериального выбора по последовательно применяемым критериям. Сравнительный анализ систем управления антенн с различными методами исполнения передачи винт-гайка позволяет провести многокритериальную оценку для совокупности сгенерированных структур передач и найти наиболее рациональный вариант для конкретных проектных задач в заданных условиях эксплуатации. Таким образом, предлагаемая методика решает одну из задач создания инструментальных средств САПР механических приводов АУ РЭС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Диняева, Н. С.* Конструирование механизмов антенн: учеб. пособие / Н. С. Диняева. – М.: Изд-во МАИ, 2002. – 340 с.

2. *Кандырин, Ю. В.* Методы и модели многокритериального выбора вариантов в САПР. Учебное пособие для вузов / Ю. В. Кандырин. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 172 с.

3. *Жуков, К. П.* Проектирование деталей и узлов машин / К. П. Жуков, Ю. Е. Гуревич. – М.: Изд-во Станкин, 2004. – 671 с.

4. *Камаев, В. А.* Применение структурирования функции качества для изменения технических характеристик продукции на основе требований потребителей / В. А. Камаев, Ю. Ю. Андрейчиков // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч.

ст. № 1(27) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 1). – С. 59–64.

5. *Орлов, П. И.* Основы конструирования : Справочно-методическое пособие / П. И. Орлов. В 2-х кн. Кн. 1. – М.: Машиностроение, 1988. – 560 с. Кн. 2. – М.: Машиностроение, 1988. – 544 с.

6. *Кандырин, Ю. В.* Методика автоматизированного многокритериального выбора механического привода зеркальных антенн / Ю. В. Кандырин, А. Д. Чивилев // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 10(97) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 14). – С. 84–91.

УДК 05.13.12

Д. М. Коробкин, К. С. Чекашкина, С. А. Фоменков

МЕТОДИКА ИЗВЛЕЧЕНИЯ ОПИСАНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ

Волгоградский государственный технический университет

dkorobkin80@mail.ru

Данная статья посвящена проблеме извлечения структурированных физических знаний из электронных источников. Предложенная в статье методика извлечения описания физических эффектов основана на аннотировании документа с последующим семантическим анализом выделенного фрагмента. Аннотация документа формируется с помощью метода контекстно-зависимого аннотирования, и по результатам семантического анализа выделяется описание физического эффекта.

Ключевые слова: извлечение описаний физических эффектов, семантический анализ, контекстно-зависимое аннотирование.

D. M. Korobkin, K. S. Chekashkina, S. A. Fomenkov

EXTRACTION METHOD OF DESCRIPTIONS OF PHYSICAL EFFECTS

Volgograd State Technical University

This article is dedicated to the extraction of descriptions of physical effects from electronic sources. The proposed extraction method in the article describing the physical effects based on the annotation of the document followed by a semantic analysis of the selection. Abstract document is generated using the method of context-dependent annotation. And according to the description of semantic analysis is allocated physical effect.

Keywords: the extraction of descriptions of physical effects, semantic analysis, context-sensitive annotation.

На сегодняшний день извлечение структурированной физической информации из электронных источников является актуальной задачей, так как физические эффекты (ФЭ) [1] необходимы для создания новых технических систем. Соответственно необходимо обеспечить эффективное обновление и пополнение базы данных физических эффектов за счет расширения уже существующих и добавления новых описаний ФЭ. Поскольку на данный момент многие открытия в области физики, совершенные иностранными учеными, не переведены на русский язык, и английский язык является языком международным, возникает необходимость в извлечении описаний физических эффектов из англоязычных электронных первоисточников. Существуют различные методы и системы [2, 3] для решения данной проблемы, которые в той или иной степени, однако недостаточно эффективно, обеспечивают ее решение. Для реализации эффективного извлечения описаний физических эффектов была разработана следующая методика.

На первом этапе, на основе составленной ранее базы данных физических эффектов, в тексте по определенным предикатам (например, таким как depend, cause и т. д.) ищутся предложения, которые могут содержать описание физического эффекта.

Затем по запросу формируется аннотация документа. В качестве запроса будет выступать ранее найденное предложение. Для того чтобы сформировать аннотацию, необходимо применить метод контекстно-зависимого аннотирования [4]. В основе метода лежит отбор фрагментов текста, максимально удовлетворяющих запросу.

Входными параметрами для метода аннотирования являются:

1) запрос Q – множество лексем запроса q_i;

2) документ D – множество лексем документа d_i;

3) аннотация A – множество лексем аннотации a_i.

Таким образом, получается, что необходимо сформировать множество A, удовлетворяющее

введенным ограничениям и отражающее содержание документа D относительно запроса Q.

В данном случае вводится ограничение на длину аннотации. Так как средняя длина описаний физических эффектов в базе данных (поле «Сущность») составляет 150 символов, то и длина аннотации будет ограничена 150 символами:

$$\sum_{A} length(a_i) \le 150, \qquad (1)$$

где $length(a_i)$ – длина лексемы или разделителя аннотации.

Множество лексем документа разбивается на фрагменты F. Для этого используются следующие с п о с о б ы :

1) метод скользящего окна с длиной, заданной в количестве предложений. $F_i=\{P_k\}$, где P – множество предложений документа D; $k=i,i+1,..i+L-1,L$ – заданная длина скользящего окна. То есть каждое предложение является фрагментом, за исключением случаев, когда предложение не укладывается в ограничения (1). Подмножества F не пересекаются;

2) метод скользящего окна с длиной, заданной в количестве слов. $F_i=\{d_k\}$, где $k=i,i+1,..i+L-1$, где L – заданная длина скользящего окна. Данный метод применяется в том случае, если предложение не укладывается в ограничение (1). Подмножества F в этом случае пересекаются.

Для ранжирования документов были сформулированы следующие м е т р и к и :

1) мера вхождения запроса во фрагмент:

$$IFQ_i = \sum_{Q,q_j} ICLF\left(q_j, IF\left(q_j, D\right)\right), \qquad (2)$$

где $ICLF$ – обратная условная частота леммы; q_j – лемма j-го слова запроса Q; IF – внутренняя частота леммы; D – множество предложений документа.

2) мера вхождения фрагмента в запрос:

$$IQF_i = \sum_{F,f_{i,j}} ICLF\left(f_{i,j}, IF\left(f_{i,j}, D\right)\right), \qquad (3)$$

где $ICLF$ – обратная условная частота леммы; $f_{i,j}$ – лемма j-го слова фрагмента F_i; IF – внутренняя частота леммы; D – множество предложений документа; F – множество фрагментов.

Затем каждый из выделенных фрагментов оценивается по формулам:

$$FM1_i = \frac{1}{IFQ_i} + \frac{k_1}{IQF_i},$$
$$FM2_i = \frac{1}{IFQ_i} + k_2 IQF_i, \qquad (4)$$

где k_1, k_2 – коэффициенты, которые применяются для того, чтобы нормализовать значение соответствующего слагаемого в тех случаях, когда необходимо уменьшить его влияние на конечный результат.

Согласно вычисленным оценкам производится ранжирование множества фрагментов по возрастанию критериев FM_1 и FM_2, в результате чего получается множество RF_1 и RF_2. Из полученного списка путем последовательного выбора формируется аннотация до тех пор, пока выполняется ограничение (1), исключая повторное включение фрагментов текста:

$$A = \left\{RF_k \middle| \sum_{k=1}^{k} length(RF_k) \le 150\right\}. \qquad (5)$$

in the case of self-inductance, in electric circuit the magnetic field created b				
y a changing current itself induces a voltage in the same circuit				
in	–	O	O	B-AM-ADV
the	–	O	O	I-AM-ADV
case	–	O	O	I-AM-ADV
of	–	O	O	I-AM-ADV
self-	–	O	O	I-AM-ADV
inductance	–	O	O	E-AM-ADV
,	–	O	O	O
in	–	B-AM-LOC	O	B-AM-LOC
electric	–	I-AM-LOC	O	I-AM-LOC
circuit	–	E-AM-LOC	O	E-AM-LOC
the	–	B-A1	O	B-A0
magnetic	–	I-A1	O	I-A0
field	–	E-A1	O	I-A0
created	created	S-V	O	I-A0
by	–	B-A0	O	I-A0
a	–	I-A0	O	I-A0
changing	changing	I-A0	S-V	I-A0
current	–	I-A0	S-A0	I-A0
itself	–	E-A0	S-A1	E-A0
induces	induces	O	O	S-V
a	–	O	O	B-A1
voltage	–	O	O	I-A1
in	–	O	O	I-A1
the	–	O	O	I-A1
same	–	O	O	I-A1
circuit	–	O	O	E-A1

Рис. 1. Семантическое предикатно-аргументное дерево

После того как аннотация документа была сформирована, по шаблонам-предикатам определяются предложения, содержащие описание физического эффекта. Так, по предикатам «*create*» и «*induce*» найдено предложение: «*in the case of self-inductance, in electric circuit the magnetic field created by a changing current itself induces a voltage in the same circuit*». В результате семантического анализа [5, 6] найденного предложения получаем семантическое дерево с указанием ролей аргументов, как показано на рис. 1.

Затем извлекаем описание физического эффекта, выделяя вход, выход и объект. Понятия «вход», «выход» и «объект» определены и описаны в [1]. Составлено описание двух ФЭ:

ФЭ № 1. Вход «*Current*», Выход: «*Magnetic field*», Объект: «*Electric circuit*».

ФЭ № 2. Вход «*Magnetic field*», Выход: «*Voltage*», Объект: «*Electric circuit*»

Все извлеченные из аннотации описания физических эффектов формируются в единое описание (рис. 2), которое выдается пользователю.

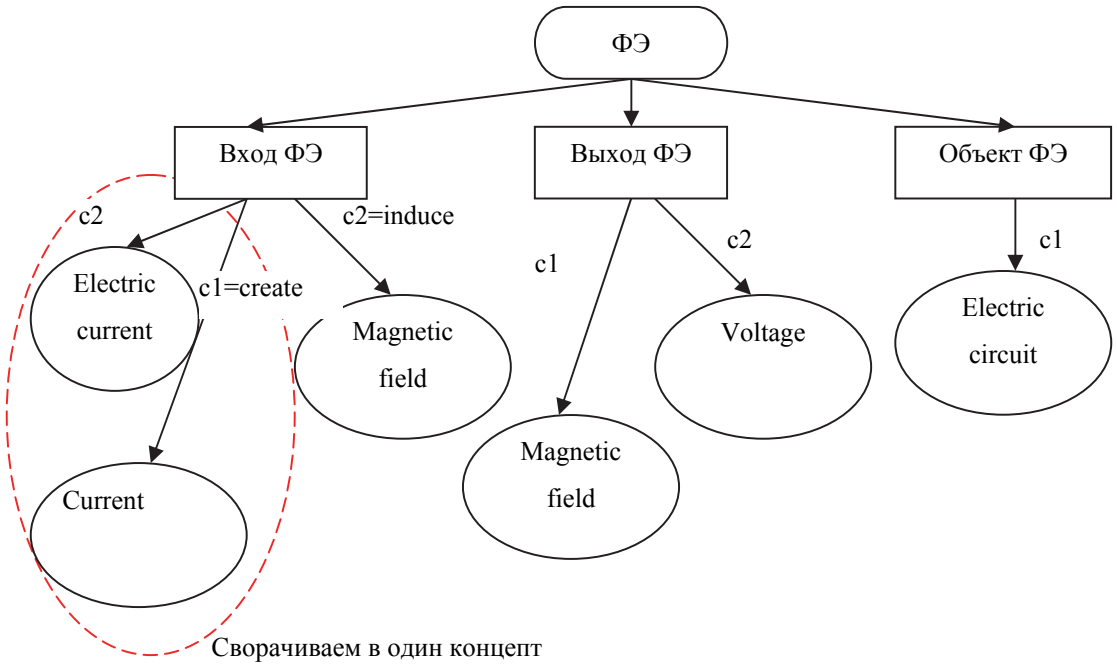


Рис. 2. Предварительное описание ФЭ

В данной статье рассмотрена методика извлечения описания физических эффектов. Преимущество описанной методики перед ранее известными [3, 5, 6] заключается в следующем: задействован метод контекстно-зависимого аннотирования [4], который обеспечивает формирование содержательной аннотации за счет использования двух методов ранжирования фрагментов документа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Фоменков, С. А.* Моделирование и автоматизированное использование структурированных физических знаний : моногр. / С. А. Фоменков, Д. А. Давыдов, В. А. Камаев. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 278 с.

2. *Коробкин, Д. М.* Автоматизация процесса формирования информационного обеспечения базы данных физических эффектов / Д. М. Коробкин, С. А. Фоменков, С. Г. Колесников // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2005. – № 3. – С. 22–25.

3. *Коробкин, Д. М.* Автоматизированная методика извлечения структурированных физических знаний в виде физических эффектов из текстов на естественном английском языке / Д. М. Коробкин, С. А. Фоменков // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 3(76) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 10. – С. 116–120.

4. *Зябрев, И.* Метод контекстно-зависимого аннотирования документов на основе спектральных оценок лексем / И. Зябрев, О. Пожарков // Труды РОМИП'2009. – СПб. : НУ ЦСИ, 2009. – С. 167–174.

5. *Попов, М. Ю.* Предметно-ориентированный анализ текстовых документов на примере системы поиска описаний физических эффектов / М. Ю. Попов, Д. М. Коробкин, С. А. Фоменков // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2005. – № 6. – С. 20–24.

6. *Попов, М. Ю.* Принципы работы и особенности реализации универсального семантико-синтаксического анализатора русского языка / М. Ю. Попов, С. А. Фоменков, А. В. Заболеева-Зотова // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2005. – № 7. – С. 37–42.

УДК 65.011.56: 621.317

В. Г. Леонтьев, А. В. Кизим

МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И СИНТЕЗ НАБОРА ОБРУДОВАНИЯ СИСТЕМ КОММЕРЧЕСКОГО УЧЕТА ПОТРЕБЛЯЕМОЙ ЭНЕРГИИ

Волгоградский государственный технический университет

leontevg@mail.ru, kizim@mail.ru

Приводятся результаты анализа предметной области, описание реализации основных функций системы автоматизированного проектирования (САПР) автоматизированной информационно-измерительной системы коммерческого учета электроэнергии (АИИС КУЭ). По результатам анализа предметной области выведены основные критерии для проведения функционально-стоимостного анализа элементов АИИС КУЭ, описан порядок проведения морфологического анализа, разработана методика морфологического синтеза АИИС КУЭ как системы и задача поддержки принятия решения для выбора ее оборудования.

Ключевые слова: автоматизированная информационно-измерительная система коммерческого учета электроэнергии (АИИС КУЭ), система автоматизированного проектирования (САПР), морфологический анализ, морфологический синтез, функционально-стоимостный анализ, поддержка принятия решений, оборудование, критерии выбора, выбор оборудования, обслуживание оборудования.

V. G. Leontiev, A. V. Kizim

COMTPUTER-AIDED DESIGN SYSTEM FOR DEVELOPING AUTOMATIC SYSTEMSFOR COMMERSIAL ACCOUNTING OF POWER CONSUMPTION

Volgograd State Technical University

This article presents the results of domain analysis, a description of the implementation of the basic functions of computer-aided design (CAD) of automated information-measuring systems for commercial metering (ASCAPC, AMR). According to the domain analysis we find basic criteria for the activity-based costing elements AMR. The procedure for the AMR morphological analysis and the methods of AMR morphological synthesis and the task of decision-making supporting to select its equipment are described.

Keywords: automated information and measuring system of commercial electricity metering, automatic system for commercial accounting of power consumption (ASCAPC), computer-aided design (CAD), morphological analysis, morphological synthesis, cost-functional analysis, decision-making support, equipment selection criteria, selection of equipment, equipment maintenance.

С каждым днем вопрос о модернизации энергетической системы России становится все более актуальным: энергетическая система проживает не лучшие времена и характеризуется высокой степенью износа. Одна из сложных задач для энергетиков – выбор оборудования при проектировании и модернизации автоматизированной информационно-измерительной системы коммерческого учета электроэнергии (АИИС КУЭ). В настоящее время наличие АИИС КУЭ в соответствии с договором о присоединении к торговой системе рынка электроэнергии является обязательным требованием для работы на рынке.

На основе опыта ОАО «Волгоградэнергосбыт» были выведены основные проблемы разработки и внедрения автоматизированных информационно-измерительных систем коммерческого учета электроэнергии (АИИС КУЭ):

1) на выбор оборудования огромное влияние оказывает человеческий фактор, что делает систему не всегда оптимальной и качественной;

2) большинство потребителей, которые начали создание систем в 2006 г., в основном ставят задачу создания АИИСКУЭ для расчетов на розничном рынке электроэнергии, без процедуры, связанной с установлением класса качества и испытаний на соответствие требованиям оптового рынка электроэнергии (ОРЭ). Однако согласно [1] технические характеристики создаваемых систем должны соответствовать техническим требованиям ОРЭ. То есть, фактически, системы создаются под требования ОРЭ, что предполагает соответствие установленным классам качества;

3) заявленные проектные и эксплуатационные характеристики оборудования имеют несоответствие;

4) с каждым годом количество выпускаемого оборудования растет, что усложняет выбор для системы и ее дальнейшую модернизацию;

5) обычно заказчики АИИС КУЭ настаивают на замене уже существующих компонентов системы, а не проектировании ее с нуля, что накладывает дополнительные требования к выбору оборудования, которое должно быть совместимым с уже имеющимся.

Отсюда следует, что для проектирования АИИС КУЭ разработчики должны, с одной стороны, произвести анализ существующего по-

стоянно обновляющегося набора оборудования, а также его опыт внедрения, а с другой стороны, проектировать такую систему, которая бы отвечала требованиям ОРЭ независимо от принадлежности системы к сегменту рынка (оптовому или розничному).

В статье [2] представляется возможный набор функций, которые должна выполнять система автоматизированного проектирования АИИС КУЭ. В него входит: генерация структурной схемы АИИС и выбор комплектующего оборудования (трансформаторы, программное обеспечение, счетчики и т. д.) под конкретного потребителя на основе входных данных предпроектного исследования, а также интеграция во всемирную сеть Интернет для обновления и пополнения данных о доступном оборудовании.

Таким образом, основной функцией САПР является структурно-параметрический анализ системы на основе входной информации предпроектного исследования. По своей сути, такая САПР реализует интегративную модель [3, 10], на первом уровне которой создается топология АИИС, на втором – происходит ее спецификация существующим оборудованием, на третьем – усечение множества сгенерированных систем, на четвертом – оценка систем по основной функции (рис. 1).

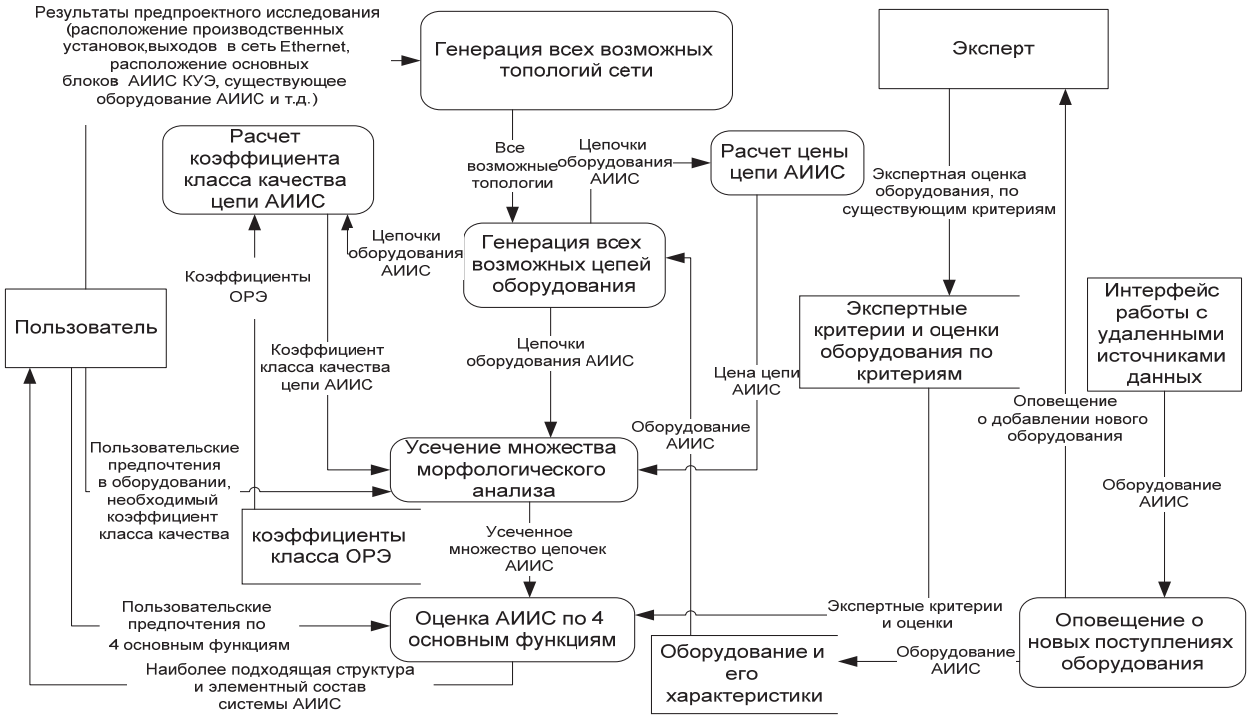


Рис. 1. Функциональная структура САПР АИИС КУЭ

По результатам структурного анализа предметной области на основании [4 и др.] АИИС КУЭ состоит из трех крупных блоков:

• информационно-измерительный комплекс (ИИК);

• информационно-вычислительный комплекс энергообъекта (ИВКЭ);

• информационно-вычислительный комплекс (ИВК).

Каждый такой блок состоит из совместимого оборудования. Совместимость между двумя связанными элементами определяется в зависимости от типов элементов. Например, если устройство сбора информации (например, POREG 2P) поддерживает интерфейс RS-485, то счетчик (основной элемент ИИК) должен иметь интерфейс для передачи выходной информации RS-485. Также нужно учитывать существующее оборудование (оно может быть устаревшим) и, соответственно, переходники с одного интерфейса на другой. Поэтому интерфейсы (каналы передачи) стоит рассматривать как отдельную сущность. Таким образом, обобщенное дерево морфологического анализа АИИС КУЭ будет выглядеть как на рис. 2.

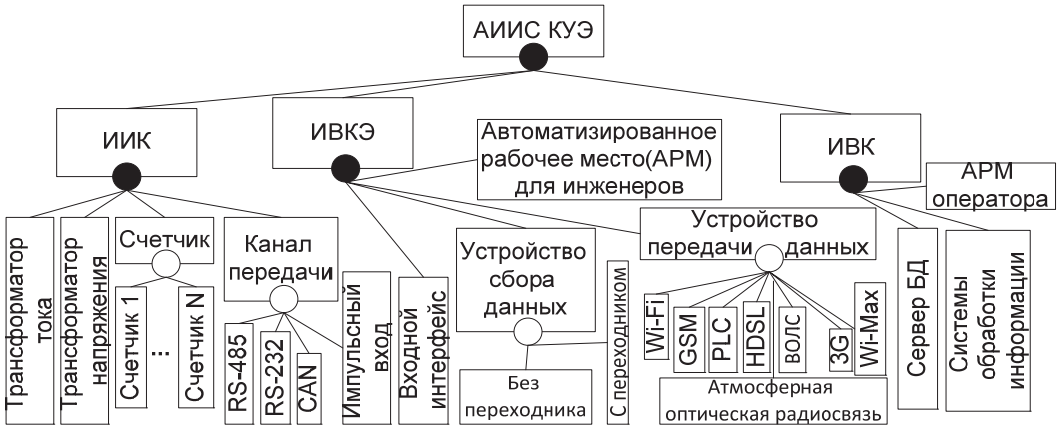


Рис. 2. Дерево морфологического анализа предметной области

Очевидно, что если дополнить данную модель спецификациями каждого элемента, мы получим огромное множество реализаций АИИС для каждой конкретной задачи, и оно тем больше, чем больше вариантов оборудования одного типа и соизмеримо с декартовым произведением всех возможных реализаций всех типов оборудования в системе.

Для усечения этого множества в первую очередь отсеем системы, возникающие в результате соединения несовместимого оборудования (по интерфейсам). Количество таких вариантов будет значительным, поскольку наличие хотя бы двух несовместимых элементов порождает множество бессмысленных вариантов реализации АИИС КУЭ. Для этого необходима таблица оборудования и типов взаимодействия по характеристикам оборудования [5]. Таким образом, если у сгенерированной модели находится пара альтернатив, не входящих в данную таблицу, то эта модель удаляется.

Генерация всех топологий сети АИИС происходит в соответствии с порядком соединения основных частей системы (ИИК, ИВКЭ и ИВК). Поскольку данный процесс тяжело формализуется, зависит от предметной области и не является универсальным, предлагается использование эвристик для отсеивания заведомо бессмысленных вариантов топологии. Данные эвристики можно выразить в следующих правилах:

• невозможно присоединить n устройств к устройству с m выходами ($n>m$);

• не имеет смысла для каждого счетчика устанавливать отдельное устройство сбора и передачи данных (УСПД);

• система должна иметь только один блок ИВК с возможностью выхода в Интернет для передачи информации АТС;

• преимущественно использовать локальную сеть предприятия для передачи информации с ИВКЭ на ИВК;

• группировать счетчики с учетом расположения измерительных каналов для соединения с одним УСПД, расстояние от самого удаленного счетчика до УСПД не должно превышать возможности канала передачи данных (предпочтительно RS-485);

• группировать блоки ИИК в зависимости от территориального расположения;

• каждый измерительный канал имеет один счетчик и два трансформатора (тока и напряжения).

Очевидно, что такое отсеивание является недостаточным, поскольку не учитывает экспертные оценки альтернатив, что может являться причиной неоправданно увеличенного времени поиска наиболее оптимальной реализации АИИС.

Для реализации четвертого уровня функциональной структуры САПР необходимо выделить обобщенный показатель качества варианта реализации системы, определяемый как функция от заданных эксплуатационных характеристик $W = F(Y) = F(Y_1,\ldots, Y_m)$. Согласно [6], введение обобщенного показателя качества позволяет свести задачу синтеза к однокритериальной задаче поиска экстремума функции $F(Y_1,\ldots, Y_m)$, обеспечивающего минимум (максимум) обобщенного показателя качества W. Очевидно, что внедрение какого-либо технического решения не имеет смысла без оценки его окупаемости, поэтому целевая функция имеет вид: «цена – техническая функция» и анализ оборудования АИИС сводится к функционально-стоимостному.

Коэффициент класса качества АИИС определяется следующими четырьмя показателями

качества: надежность, защищенность от несанкционированного доступа, функциональная полнота, степень автоматизации выполняемых функций [7]. Каждый критерий качества АИИС характеризуется набором параметров-подкритериев для каждого элемента системы, основанных на его характеристиках.

Чтобы учесть мнения экспертов, был проведен опрос разработчиков АИИС ОАО «Волгоградэнергосбыт» и выделены основные критерии по каждому типу оборудования. Эти критерии были систематизированы таким образом, чтобы заполнить пространство между основными четырьмя функциями и подкритериями ОРЭ для каждого типа оборудования в дереве критериев.

Рассмотрим использование данного подхода для выбора счетчика. В табл. 1 изображена иерархия критериев для выбора счетчика.

Таблица 1

Критерии выбора счетчиков

Основные функции	Экспертные характеристики		Критерии, отвечающие за класс качества системы.	
		Название	Критерии	Балл
Надежность (Н)	Кн1	Отказоустойчивость	Средняя наработка на отказ – не менее 35 000 ч; среднее время восстановления – не более 7 суток; межповерочный интервал – не менее 8 лет	3
	Кн2	Глубина журнала	Наличие фактов: параметрирования, пропадания напряжения, коррекции времени	3
	Кн3	Устойчивость к воздействиям	Счетчики должны обеспечивать работоспособность в диапазоне температур, определенных условиями эксплуатации	1
	Кн4	Мониторинг состояния	Возможность съема информации: автономным способом, удаленным способом, визуальным	3
Защищенность от несанкционированного доступа (З)	Кз1	Доступ к данным	Защита соответствует п. 5.5 ГОСТ Р 52320	1
	Кз2	Механическая защита	Наличие механической защиты проводников, промежуточных клемников, исп. коробки	2
	Кз3	Защита на программном уровне	Установка пароля на счетчик, возможность использования средств электронной цифровой подписи, безопасность хранения данных и программного обеспечения в соответствии с ГОСТ Р 52069.0–2003	3
Функциональна полнота (Ф)	Кф1	Профиль данных	Наличие профиля данных	1
	Кф2	Профиль качества	Наличие профиля качества электроэнергии	1
	Кф3	Класс точности	Класс точности – не хуже 0,5S	1
	Кф4	Глубина хранения профилей	Фиксация: попытки несанкционированного доступа, факты связи с изменением данных, изменение текущих значений времени и даты при синхронизации времени, отклонения тока и напряжения в измерительных цепях от заданных пределов, отсутствие напряжения при наличии тока, перерывы питания	6
Степень автоматизации выполняемых функций (А)	Ка1	Тип отчетного устройства	Автоматизация функций коррекции времени, хранения информации, синхронизации времени, расчет учетных показателей, измерений, состояний средств измерения.	6

Здесь каждому критерию присвоены баллы его важности в зависимости от количества реализованных функций, отвечающих за повышение класса качества.

Дальнейшее решение задачи произведем с помощью ФСА с использованием метода парных сравнений. Для этого определим основную функцию для оценки альтернатив по технико-экономическому критерию, как функцию четырех критериев (Н, З, Ф, А). Эксперт производит попарное сравнение всех критериев из табл. 1 (с учетом проставленных баллов) и затем проводит оценку альтернатив (см. табл. 2).

Таблица 2

Экспертная оценка альтернатив

	Относительные затраты на реализацию					Векторы приоритетов			
	Энергомера	Меркурий	Альфа	СЭТ	Wзi	Н	З	Ф	А
Энергомера	1	2	7	6	0,156	0,066	0,127	0,387	0,187
Меркурий	½	1	4	5	0,245	0,128	0,144	0,234	0,226
Альфа	1/7	1/6	1	2	0,416	0,442	0,135	0,238	0,258
СЭТ	1/6	1/5	½	1	0,183	0,364	0,594	0,141	0,329

Из данной оценки получаем интегральный вектор приоритета альтернатив $W_{\text{тЭ}}$ и вектор затрат $W_{\text{з}}$:

$$W_{\text{тЭ}} = \{0{,}066; 0{,}128; 0{,}456; 0{,}350\}^T;$$

$$W_{\text{з}} = \{0{,}088; 0{,}461; 0{,}416; 0{,}345\}^T.$$

Далее применяем модифицированный метод ФСА сопоставления затрат на функции с балльными оценками значимости функций из [6], согласно которому строится результирующий вектор из попарных отношений элементов векторов, соответственно $W_{\text{тЭ}}$ и $W_{\text{з}}$:

$$W_{\text{тЭ}_i}/W_{\text{з}_i} = \{0{,}750; 0{,}278; 1{,}100; 1{,}014\}^T.$$

В результате наиболее подходящим счетчиком является счетчик фирмы «Альфа». Данный метод может применяться для выбора остальных элементов АИИС. При переносе данного метода на всю систему АИИС, как говорилось выше, необходимо отсеивание цепочек. Коэффициент класса качества, по сути состоящий из оценок по критериям (Н, З, Ф, А), определенный пользователем, может определять границу отсечения множества вариантов. Таким образом, нам необходимо все реализации АИИС упорядочить по данным критериям, по методике [7] рассчитать коэффициент, и, в соответствии с определенным коэффициентом, отсечь все подряд идущие реализации АИИС, начиная с самой наихудшей. При этом на рассмотрение методом ФСА возможно попадание цепочки с меньшим классом качества, но с лучшими экспертными оценками. Данная задача аналогична построению «очереди» оборудования для необходимого ремонта и обслуживания с использованием методов многокритериального планирования, например, метода Парето [8, 9]. Данный подход не требует модификации под нашу задачу. Отсечение множества («очереди») будет проходить в соответствии с рассчитанным коэффициентом.

Таким образом, в статье приведены результаты анализа предметной области и описана реализация основных функций автоматизированной системы проектирования автоматизированной информационно-измерительной системы коммерческого учета электроэнергии (САПР АИИС КУЭ). По результатам анализа предметной области выведены основные критерии для проведения функционально-стоимостного анализа элементов АИИС КУЭ, описан порядок проведения морфологического анализа, разработана методика морфологического синтеза АИИС КУЭ как системы и задача поддержки принятия решения для выбора ее элементов. Полученные результаты позволяют проводить построение АИИС КУЭ масштаба региона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Коваль, Д. И.* АИИС КУЭ субъектов ОРЭ: опыт внедрения и основные проблемы [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.energosovet.ru/stat449.html.

2. *Игумнов, С. Н.* Автоматизированная система проектирования АИИС КУЭ / С. Н. Игумнов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 8(46) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 5). – С. 134–136.

3. *Акимов, С. В.* Четырехуровневая интегративная модель для автоматизации структурно-параметрического синтеза / С. В. Акимов // Труды учебных заведений связи / СПбГУТ. – СПб., 2004. – № 171. – С. 165–173.

4. Положение о порядке получения статуса субъекта оптового рынка и ведения реестра субъектов оптового рынка. Приложение 11.1. Автоматизированные информационно-измерительные системы коммерческого учета электрической энергии (мощности). Технические требования [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http:// www.np-sr.ru/ norem/marketregulation/register/registerappendix/currentedition/index.htm.

5. *Чугунов, Д. С.* Использование принципов теории принятия решения в методе морфологического синтеза / Д. С. Чугунов, Л. Н. Бутенко // Успехи современного естествознания. – 2005. – № 2. – С. 35–36.

6. *Андрейчиков, А. В.* Анализ, синтез, планирование решений в экономике / А. В. Андрейчиков, О. Н. Андрейчикова. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 368 с.

7. Положение о порядке получения статуса субъекта оптового рынка и ведения реестра субъектов оптового рынка. Приложение 11.2. Методика присвоения коэффициента класса качества АИИС коммерческого учета электрической энергии (мощности) субъекта оптового рынка [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://np-ats.par-king.ru/.

8. *Кизим, А. В*. Задачи прогнозирования и планирования для программно-информационной поддержки технического обслуживания и ремонта оборудования / А. В. Кизим, Е. В. Чиков, В. Ю. Мельник // Открытое образование. – 2011. – № 2(85). Ч. 2. – С. 224–227.

9. Программно-информационная поддержка технического обслуживания и ремонта оборудования с учетом интересов субъектов процесса / А. В. Кизим, Е. В. Чиков, В. Ю. Мельник, В. А. Камаев // Информатизация и связь. – 2011. – № 3. – С. 57–59.

10. *Кизим, А. В*. Структурно-функциональная параметрическая модель объектов проектирования как инвариант / А. В. Кизим // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2004. – № 2. – С. 45–54.

УДК 62–529

Д. Г. Ульянов

АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОДУЛЬНОГО ТИПА

Волгоградский государственный технический университет

dmitry@sweetfruit.ru

В статье рассмотрен новый вариант построения системы управления модульного типа. Предложен вариант структуры управляющего модуля и рассмотрен распространенный шинный интерфейс 1-wire. Приведен пример использования предложенной идеи в малом и среднем бизнесе.

Ключевые слова: система управления, уровень датчиков, 1-wire интерфейс.

D. G. Ulyanov

MODULE TYPE CONTROL SYSYTEMS ARCHITECTURE

Volgograd State Technical University

The article describes the main aspects of building new module type control systems. Suggest the variant of construction the control unit and considered popular bus interface 1-wire. Example of using the idea in the small and medium business is shown.

Keywords: control system, sensor level, 1-wire interface.

На протяжении долгого времени бизнес в развитых странах прикладывает усилия к разработке систем управления промышленным оборудованием для уменьшения издержек при производстве. В России автоматизация производства не является повсеместным явлением и используется лишь на крупных предприятиях. Это связано в первую очередь с высокой стоимостью внедрения автоматизированного оборудования, которое, как правило, изготавливается на заказ, либо является типовым заводским решением без возможности настройки и изменения (негибким), а также без возможности подбора устройств разных производителей (открытым).

К основным недостаткам существующих систем можно отнести следующее:

• распределенная открытая система очень дорога во внедрении из-за необходимости организации взаимодействия различных интерфейсов и протоколов [3];

• недорогие системы управления, изготовленные на заказ, негибкие и при небольших изменениях часто приходится внедрять новую систему;

• каждая система управления значительно дорабатывается под нужды заказчика на уровне микроконтроллера, что повышает ее стоимость.

Целью данной работы является разработка архитектуры гибкой, открытой и модульной системы управления с невысокой стоимостью внедрения в малом и среднем бизнесе.

Для разработки системы управления следует решить несколько задач. Для повышения гибкости системы нужно, чтобы пользователь имел возможность собрать при помощи типовых модулей систему с необходимым контрольным и исполнительным комплексом оборудования. Комплекс оборудования должен поддерживать добавление новых устройств и синхронизацию их с протоколом сети. Следует предусмотреть возможность настройки взаимодействия оборудования внутри комплекса на уровне оператора. Необходимо, чтобы информация о состоянии сети хранилась в базе данных.

При невысоком уровне требований к автоматизации производства на малых предприятиях и удобном способе задания начальных условий появляется возможность создавать адаптируемые системы управления с разумными трудозатратами. Подобные системы могут быть использованы малым бизнесом для автоматизации небольших производств.

Типовая система состоит из измерительных устройств (датчиков), устройств исполнения и управляющего устройства [2].

Управляющее устройство включает в себя уровни от микроконтроллера до программного модуля и решений оператора в реальном времени (рис. 1).

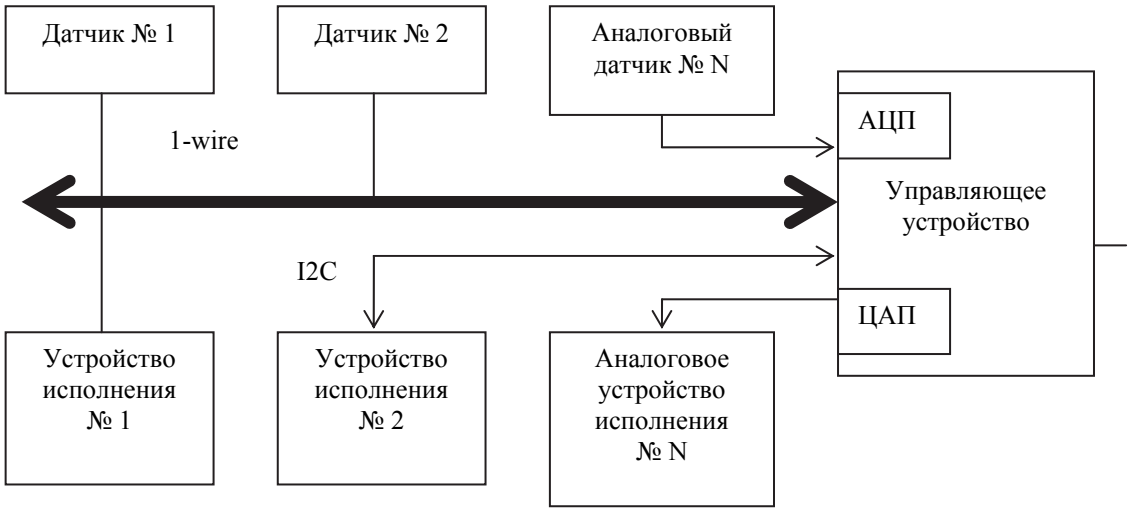


Рис. 1. Схема типовой системы управления

Подобная реализация подсети возможна, если количество датчиков невелико и система незначительно распределена в пространстве. Можно выявить следующие недостатки такой схемы:

• микроконтроллер в управляющем устройстве должен поддерживать все используемые комплексом оборудования интерфейсы, что повышает его стоимость;

• существует ограничение в выборе устройства исполнения, так как оно должно поддерживать требуемый интерфейс передачи данных;

• в программном коде микроконтроллера должна быть заложена и отлажена возможность использования определенного набора устройств.

Чтобы устранить указанные недостатки, можно использовать недорогие серийные промежуточные микроконтроллеры для каждого устройства в сети – конверторы. *Конвертор* – это устройство, которое согласует интерфейс и протокол обмена данными между используемым оборудованием в сети устройств и микроконтроллером. Конверторы и микроконтроллер

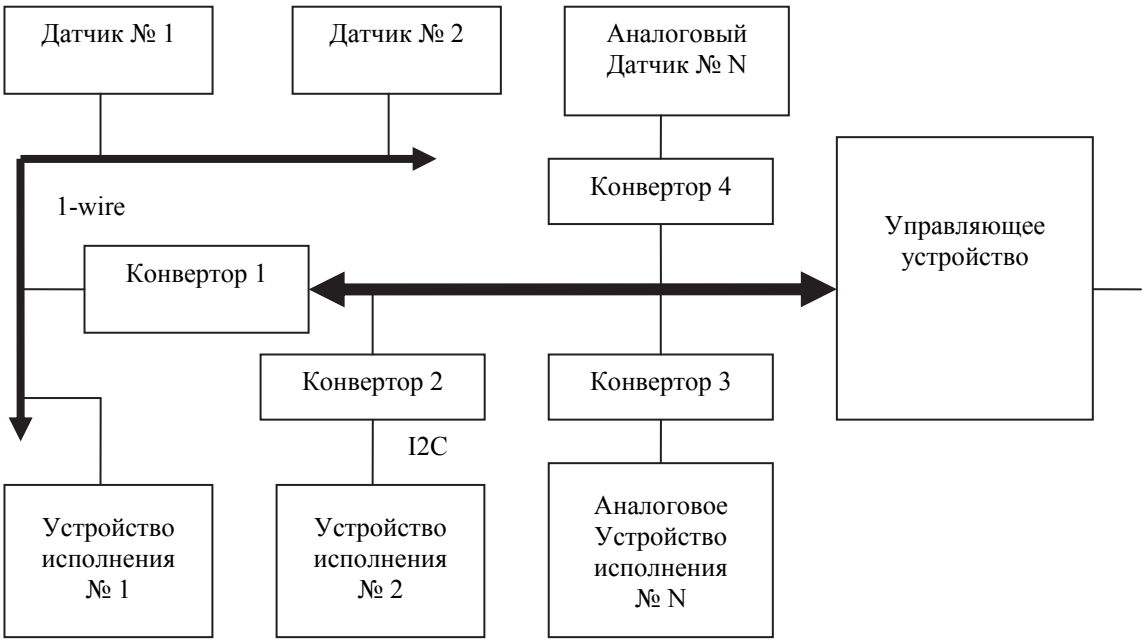


Рис. 2. Схема типовой модульной системы управления

объединены общей шиной. Для реализации подобной системы каждое устройство должно обладать уникальным кодом для идентификации на общей шине. Основная трудность в реализации системы это необходимость в унификации данных, передаваемых от разнотипных устройств, для их обработки управляющим устройством.

Как видно из рис. 2, функции каждого устройства сведены до необходимого минимума, что позволяет снизить трудозатраты на внедрение. Потребитель имеет возможность поменять неработающий модуль на новый типовой модуль по приемлемой цене, за счет модульного типа системы. Рассмотрим подробнее основные узлы системы.

Измерительные устройства (датчики)

Датчики в принципиальной схеме служат для сбора данных, необходимых для принятия решений. Это могут быть датчики контроля температура, влажности, веса, освещенности и т. д. Проблема разных серийных датчиков в том, что они используют различные интерфейсы и протоколы передачи данных, что требует индивидуального подхода к каждому виду. Для снижения стоимости системы наиболее рационально привести к единому протоколу несколько видов измерительных устройств при помощи промежуточного устройства конвертора. Это позволит иметь выбор между устройствами при проектировании типовых систем управления и получать данные с устройств по выбранному единому протоколу.

Устройство исполнения

Как правило, на малых предприятиях – это типичные устройства, получающие команду на включение и выключение. Для управления также необходимо привести стандартные команды управляющего устройства в понятные для данного устройства сигналы. Для этого можно использовать заранее разработанный для конкретного устройства конвертор, промежуточное устройство-драйвер, который преобразовывает команды от управляющего устройства в формат команд исполняющего устройства.

Конвертор

Конвертор отвечает за разделение системы на типовые модули, что делает систему более открытой. Он позволяет всей системе определять тип датчика и допустимые для него функции. Также, за счет уникального идентификационного номера, он позволяет организовать обмен данными между управляющим устройством и другими конверторами по общей шине.

Управляющее устройство

Управляющее устройство собирает информацию с конверторов, подключенных к общей шине, и в соответствии с исходными данными принимает решение об управлении устройствами исполнения. Устройство управления должно быть максимально универсально, чтобы свести к минимуму его программирование и, как следствие, стоимость внедрения и изменения системы. Кроме того, необходимо иметь возможность поэтапного внедрения частей будущей системы управления. Рассмотрим более подробно управляющее устройство.

В данной работе под термином *управляющее устройство* понимаются следующие уровни системы управления: микроконтроллер (МК), сервер внедрения и связывания объектов в управлении процессами (OPC-сервер), программный модуль, оператор. Каждый следующий уровень добавляет дополнительные возможности системе управления. Однако управляющее устройство не обязательно должно содержать все уровни иерархии, а только те, которые добавляют необходимые конечному пользователю функции. Архитектура системы управления показана на рис. 3.

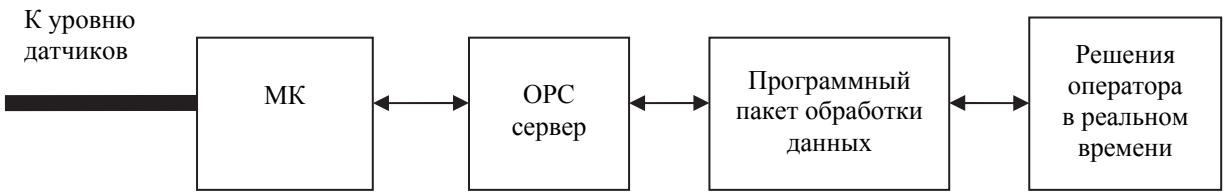


Рис. 3. Архитектура устройства управления

Рассмотрим отдельно каждый уровень и его влияние на функциональность системы управления в целом.

В системе управления, где в качестве управляющего устройства использован один микроконтроллер, есть возможность только про-

граммирования заранее известной логики работы, без возможности вмешательства и просмотра статистики. На данном уровне отличие предложенной модульной системы от обычной в том, что функции конвертора интерфейсов выведены из МК и за ним остаются лишь диспетчерские функции подсети и логика работы.

При добавлении к устройству управления OPC-сервера появляется возможность взаимодействия между собой подключенных к нему МК адаптеров, других OPC-серверов, серверов баз данных, программного пакета обработки данных. Таким образом, OPC-сервер обеспечивает согласование определенного набора интерфейсов. Как правило, на этом уровне появляется возможность доступа к сети Интернет для создания распределенных систем.

С использованием программного пакета обработки данных появляется возможность управления всей распределенной системой из одного места. Известны также программные модули, которые построены с использованием WEB-технологии, что позволяет обеспечить доступ к данным с мобильных устройств [1]. Производители программных пакетов обработки данных используют несколько стандартных интерфейсов для связи с OPC-серверами, что позволяет выбирать между подходящими продуктами [4].

К отдельному уровню в иерархии системы управления отнесены решения оператора, принимаемые в реальном времени. Это связано с тем, что только человек может экстренно вмешаться в неверную работу логики всей системы и не допустить аварии. С другой стороны, многие системы требуют указания начальных условий для верного выполнения функции, которые предоставляются человеком-экспертом.

В качестве примера модульной системы управления рассмотрим систему контроля влажности и температуры в помещении хранилища при помощи внешней среды. Для ее реализации нам необходим набор из трех элементов:

1) сеть датчиков температуры на 1-Wire интерфейсе;

2) два датчика влажности на аналоговом интерфейсе;

3) устройство исполнения в виде сервопривода управляющего заглушкой вентиляции.

Объединенная схема устройства (рис. 4) разработана в соответствии с идей модульной системы управления. В данном примере использованы 15 датчиков температуры с 1-wire интерфейсом, поэтому именно этот интерфейс был выбран для общей шины.

Данная система позволяет осуществлять круглосуточный мониторинг температуры на улице и добиваться приемлемой температуры в хранилище, в период с октября по март, без использования холодильного оборудования.

Рассмотрим 1-wire интерфейс как наиболее распространенный для построения небольших сетей из датчиков. Интерфейс подразумевает наличие ведущего устройства конвертора и ведомого, например, датчика температуры. Используются три линии: питание +5 В; земля 0 В; шина передачи данных, на которую выставляются сигналы от 0 до +5 В, по умолчанию +5 В.

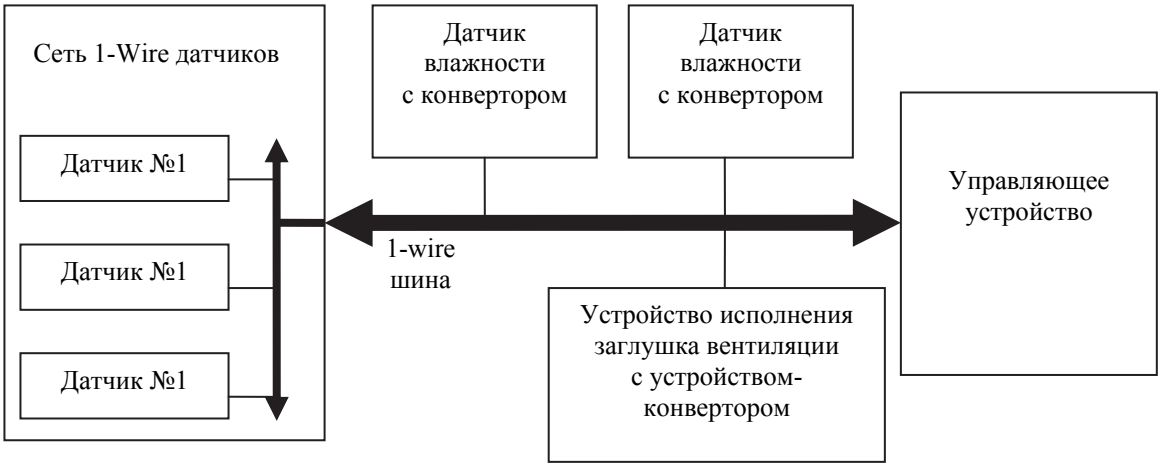


Рис. 4. Объединенная схема примера системы управления

Доступ к устройствам на шине осуществляется в следующей последовательности:

1) проведение инициализации;

2) выбор команды-функции устройства;

3) исполнение команды-функции устройства.

Проведение инициализации ведущим устройством

Работа с датчиком происходит при помощи последовательностей чтения и передач данных. Каждая из этих последовательностей начинается с процедуры инициализации [5, 6]. Далее следуют интервалы передачи и приема данных ведущим устройством.

Из примера использования видно, что предложенная архитектура модульной системы управления позволяет создавать недорогие открытые системы с невысокой стоимостью внедрения, которые доступны малому и среднему бизнесу. Себестоимость изготовления примера, с использованием типовых датчиков, в ценах 2013 года составляет около 2000 рублей. Система, разрабатываемая на заказ, требует минимум 20 часов рабочего времени специалиста по разработке программного кода для микроконтроллера, что увеличивает себестоимость системы на 10 000 рублей.

Как показала разработка системы, каждый модуль достаточно прост и может использоваться в других подобных системах. Полноценная имитация 1-wire интерфейса в устройствах-конверторах позволила реализовать микроконтроллеру функцию поиска датчиков 1-wire, благодаря чему появилась возможность определять новые устройства в системе. Использование базы данных для хранения параметров облегчило осуществление контроля над системой и отладку алгоритмов работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Быков, Д. В.* Варианты построения системы аутентификации при доступе к базам данных в сервис-ориентированных приложениях / Д. В. Быков, В. С. Лукьянов, А. В. Скакунов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 6(54) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 6). – С. 131–134.

2. *Есикадзу, Суэмацу* Микроконтроллерные системы управления. Первое знакомство / Суэмацу Есикадзу. – М.: Додэка XXI, 2009. – 276 с.

3. *Краснова, А. Е.* Цифровые системы управления в пищевой промышленности / А. Е. Краснова, Л. А. Злобин, Д. Л. Злобин. – М.: Высшая школа, 2007. – 415 с.

4. *Олссон, Г.* Цифровые системы автоматизации и управления / Г. Олссон, Д. Пиани. – СПб.: Невский Диалект, 2001. – 244 с.

5. *Филипс, Ч.* Системы управления с обратной связью / Ч. Филипс, Р. Харбор. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001. – 327 с.

6. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer [electronic recourse] // Maxim Integrated Product site. – 2008. – 22p. – Mode of access : http://www.maxim-ic.com/datasheet/index.mvp/id/2812

ПОСТРОЕНИЕ СЕТЕЙ И ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.94

В. С. Лукьянов, С. В. Гаевой, Ф. А. Х. Аль-Хадша

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СЕТЕЙ В СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ

Волгоградский государственный технический университет

luk-vs@mail.ru, gaevserge@mail.ru, alhadsha@mail.ru

В данной работе сделана попытка проанализировать систему, состоящую из двух узлов (источника и приемника) и набора промежуточных элементов. Система считается работоспособной, когда существует связь между источником и приемником. Одной из первичных целей является определение, какие элементы системы могут рассматриваться как абсолютно надежные.

Ключевые слова: сети, имитационное моделирование, показатели надежности, передача сообщений.

V. S. Lukyanov, S. V. Gaevoy, F. A. H. AL-hadsha

ASSESSMENT OF RELIABILITY OF NETWORK SYSTEMS IN STATIONARY CONDITION

Volgograd State Technical University

In this paper an attempt to analyze system containing two nodes (source and destination) and a number of intermediate nodes has been made. The system is assumed to be in operating state if there is a connection between source node and destination node. One of primary targets is to determine what system elements can be considered as absolutely reliable.

Keywords: net, network, simulation modeling, reliability indices, message transmission.

Введение

Сформулируем проблему следующим образом. Необходимо определить параметры надежности сети, состоящей из станций и соединительных линий. Одну станцию назовем *источником сигнала,* а вторую – *приемником*. Система будет считаться исправной, если существует хотя бы один исправный тракт передачи данных от источника к приемнику. Будем считать, что линии могут передавать сигнал в обоих направлениях [4, 6, 7].

Также примем, что в начальный момент времени система полностью исправна. Затем происходят отказы под действием пуассоновского потока отказов. Возможно восстановление отказавших элементов [2, 3, 5]. Необходимо определить следующие параметры стационарного режима:

– среднее время безотказной работы T_{wrk} ;

– среднее время пребывания системы в состоянии отказа T_{brk} ;

– коэффициент готовности K .

Рассмотрим систему, изображенную на рис. 1. Пуассоновские потоки отказов зададим такими: для элементов сети «Пр» и «Ус» – 0,1 отк/ч, для линий связи «Св» – 0,01 отк/ч, а для источника и приемника «А» и «В» – 0,02 отк/ч. Среднее время восстановления зададим для всех равным 2 ч. Стрелками указано направление прохождения сигнала [4].

Для получения решения воспользуемся методом имитационного моделирования, методом дискретных событий: много раз моделируем случайные исходы работы системы, а затем соберем статистику и по ней оценим требуемые параметры с достаточной степенью точности. В соответствии с Центральной предельной теоремой (ЦПТ) рассчитаем погрешность. В качестве доверительной вероятности возьмем 99,73 %, т. е. используем правило трех сигм [10, 12].

Моделирование работы системы будем проводить:

1) с экспоненциальным восстановлением (E);

2) восстановлением по закону Вейбула с параметром 3.3[1] (W);

3) детерминированным временем восстановления (C).

[1] Это делает закон близким к нормальному.

Рассмотрение системы без восстановления нецелесообразно, так как в этом случае не наблюдается стационарный режим.

Узлы восстанавливаются независимо.

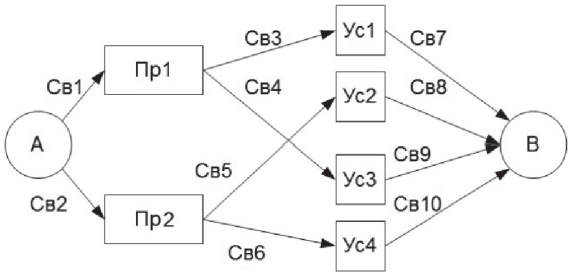


Рис. 1. Структура системы системы

Рассматриваются следующие варианты работы системы:

1) отказывают только промежуточные узлы (N);

2) отказывают промежуточные узлы и линии связи (NL);

3) отказывают все узлы и линии связи (All);

4) отказывают все узлы и линии связи, но источник и приемник имеют резервирование (AllR).

Под *резервированием* будем подразумевать нагруженное резервирование, когда существуют два источника и два приемника, работающих параллельно, и при отказе одного может продолжать работать другой.

Примеры обозначений систем: AllR-W, N-C.

Моделирование

1. Описание модели

Модель работает следующим образом. У каждого элемента есть состояние – рабочее или отказ – и время изменения состояния, отсчитанное от момента начала моделирования [8, 11]. Особым событием модели являются отказы и восстановления элементов [10]. При этом состояние элемента изменяется на противоположное.

Формализуем модель. Введем следующую терминологию. *Элементами системы* назовем линии связи и узлы (то есть A, B, Пр1, Пр2, Ус1-Ус4, Св1-Св10), а *экземпляром* – конкретный блок, который выполняет функции элемента (это может быть основной экземпляр или один из резервных). Используется нагруженный резерв: элемент функционирует, если функционирует хотя бы один его экземпляр.

Обозначим за get_time_for_work(i) процедуру получения случайного времени безотказной работы i-го экземпляра, а за get_time_for_break(i) – случайного времени пребывания его в состоянии отказа; m – число элементов системы; n – суммарное число экземпляров.

Введем матрицу состояния агрегата в начальный момент времени:

$$A = \begin{vmatrix} 1 & \text{get\_time\_for\_work(1)} \\ 1 & \text{get\_time\_for\_work(2)} \\ 1 & \text{get\_time\_for\_work(3)} \\ \dots & \dots \\ \dots & \dots \\ 1 & \text{get\_time\_for\_work(n-1)} \\ 1 & \text{get\_time\_for\_work(n)} \end{vmatrix}$$

Особые моменты будут происходить в моменты времени $A_{i,2}, i = \overline{1,n}$. Опишем цепь событий на псевдокоде:

```
if(A[i][1] == 1) {
    A[i][1] = 0;
    A[i][2] = A[i][2] + get_time_for_break(i);
}
else {
    A[i][1] = 1;
    A[i][2] = A[i][2] + get_time_for_work(i);
}
```

Единица в первом столбце будет означать исправность экземпляра, а ноль – пребывание в состоянии отказа. Для ускорения расчета времена событий можно хранить в бинарной куче.

Теперь необходимо по исправным экземплярам определить исправные элементы. Сопоставим каждому элементу счетчик, равный числу его исправных экземпляров, и будем обновлять его при каждом изменении флага экземпляра A[i] [1]. Признаком исправности будет положительное значение счетчика, а признаками отказа/восстановления, соответственно, переходы счетчика в нуль/из нуля.

Для ускорения расчета рассчитаем все пути от источника к приемнику заранее. После анализа [9], а также [1, 7] было предложено использовать рекурсивную процедуру поиска в глубину. Одна и та же вершина может включаться в разные ветви поиска, но не в одну и ту же.

Можно сохранить все возможные пути и затем проверить их каждый раз при восстановлении элемента в отказавшей системе и при отказе в функционирующей. Но есть более простой способ. Сопоставим каждый элемент со списком путей, в которые он входит. Сами пути хранить не надо. Каждый путь сопоставим с другим счетчиком – числом выпавших из него элементов. Признаком возможного пути является счетчик, равный нулю. При каждом отказе элемента будем инкрементировать счетчики

путей, в которые он входит, а при восстановлении – декрементировать их.

Признаком исправной системы в данном случае будет наличие пути с нулевым счетчиком. Заведем счетчик числа исправных *путей и будем изменять его значение при отключении/включении путей*.

Рассмотрим пример системы счетчиков. В качестве примера возьмем систему AllR, но для сокращения размеров схемы будем полагать линии связи абсолютно надежными. Результат – на рис. 2. Стрелками указываются воздействия счетчиков друг на друга.

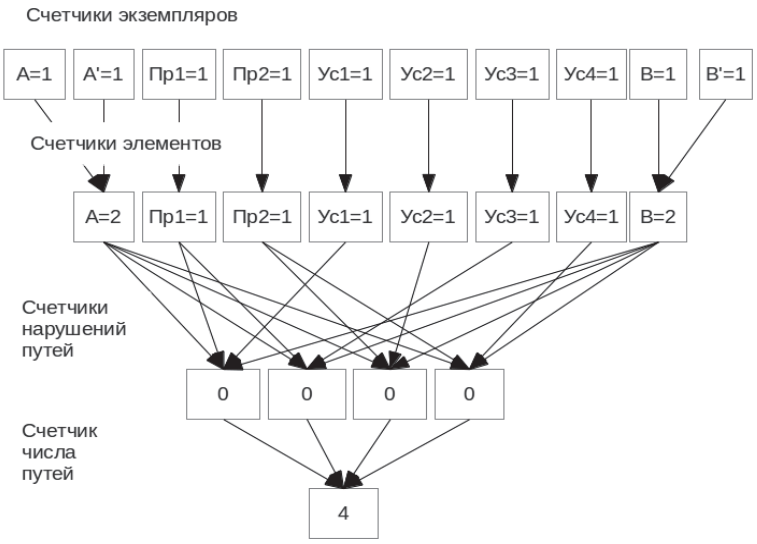


Рис. 2. Система счетчиков

В силу того, что рассматривается стационарный режим, моделирование необходимо ограничить по времени. *Число отказов* – это количество измерений времени рабочего состояния, а *число восстановлений* – времени отказа. Коэффициент готовности рассчитывается как

$$K = \frac{T_{wrk}}{T_{wrk} + T_{brk}}.$$

В данном случае моделирование можно проводить методом одного достаточно длинного испытания. Однако, чтобы легче было оценивать погрешность коэффициента готовности, проведем 30 испытаний (в литературе [3, 10, 12] рекомендуется минимум 20–40 испытаний). Это вполне достаточно, чтобы использовать ЦПТ. Время испытания в этом случае составит $3 \cdot 10^5$ ч $\approx 34{,}2$ года. Суммарное время всех испытаний $9 \cdot 10^6$ ч $\approx 1026{,}7$ лет. Это даст погрешность <1 % для временных показателей и $<0{,}1$ % для коэффициента готовности.

2. Рассмотрение политик восстановления

Сначала рассмотрим среднее время работы системы (рис. 3). Видно, что закон восстановления не играет роли.

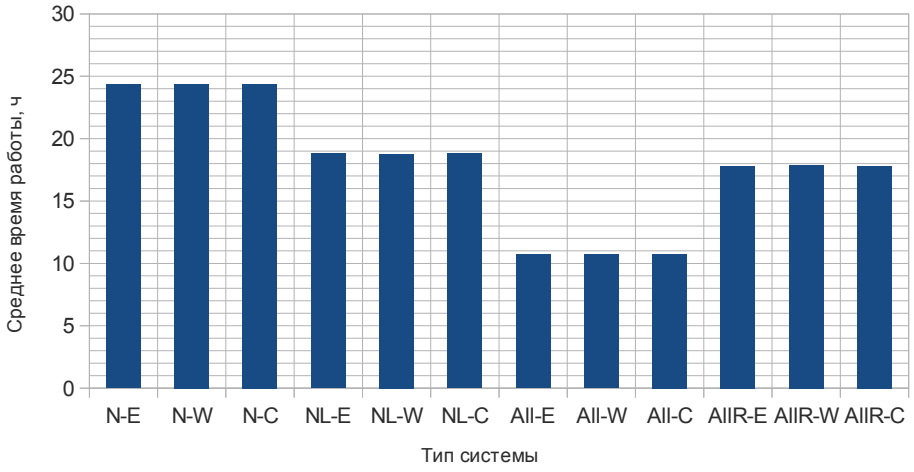


Рис. 3. Среднее время работы системы

Аналогичная картина наблюдается со средним временем отказа (рис. 4) и коэффициентом готовности (рис. 5).

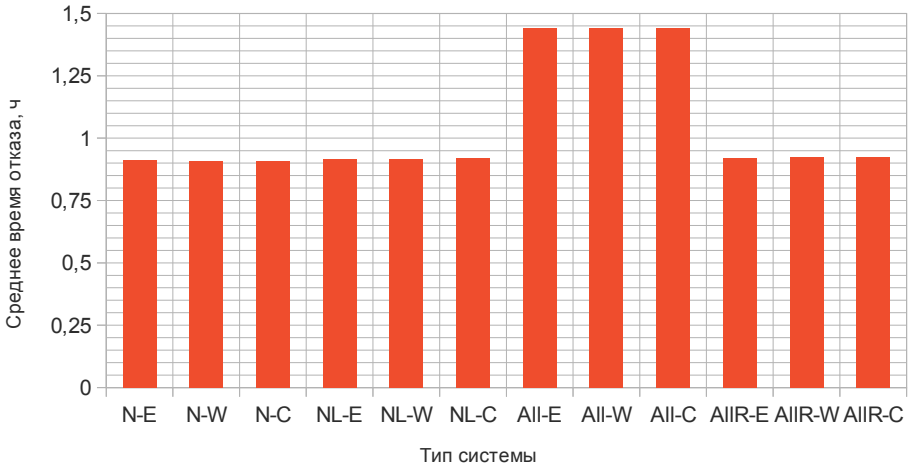


Рис. 4. Среднее время отказа

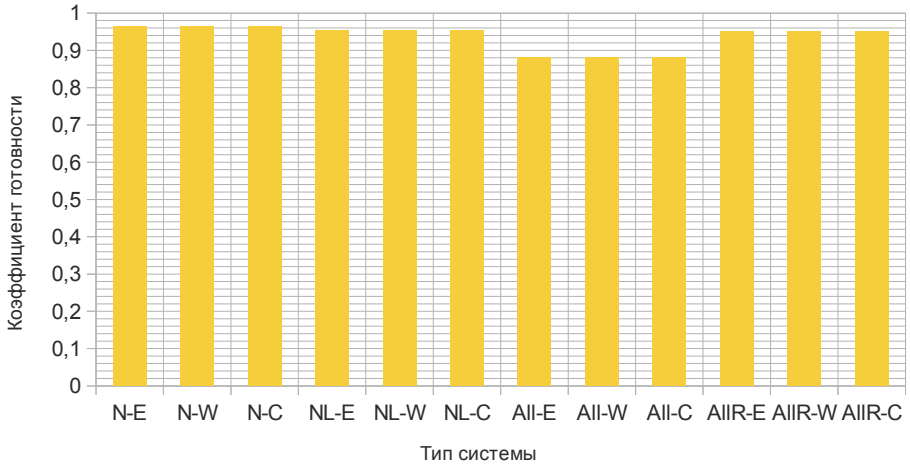


Рис. 5. Коэффициент готовности

3. Влияние допущений абсолютной надежности

Необходимо проанализировать, как допущения абсолютной надежности влияют на результат (рис. 3–5).

Очевидно, что допущение абсолютной надежности линий связи несостоятельно.

Резервирование и восстановление вместе значительно увеличивают время безотказной работы промежуточных элементов. Но в системе All источник и приемник не имеют резерва, а значит, несмотря на низкую интенсивность отказов, по сравнению с другими узлами, они являются слабым звеном. Поэтому возникает необходимость в резервировании источника и приемника. Этот вариант отражен в системе AllR. Наличие одного резервного элемента для источника и одного резервного элемента для приемника делает их работу практически абсолютно надежной по сравнению с элементами остальной системы. Без резервирования восстановление никак не влияет на работоспособность приемника и источника.

Заключение

Предложена новая имитационная модель, основанная на анализе комбинаций отказовых и рабочих состояний узлов и каналов связи.

Для конкретного варианта системы с избыточностью получены оценки различных параметров надежности – среднего времени безотказной работы, среднего времени пребывания системы в состоянии отказа и коэффициента готовности – с учетом возможности отказов каналов связи и резервированием отдельных узлов.

Наиболее уязвимыми узлами в системе являются начальный и конечный (источник и приемник) в силу отсутствия их резервирования. Были предложены меры по их резервированию. Данная картина косвенно свидетельствует о правильности построения модели.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Аль-Хадша, Ф. А. Х.* Выбор в сети k-кратчайших путей / Ф. А. Х. Аль-Хадша // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 11(84) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 12). – С. 136–137.

2. Имитационная модель гетерогенной вычислительной системы / В. С. Лукьянов, Д. Н. Жариков, С. В. Гаевой, Д. С. Попов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 9(82) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 11). – С. 85–88.

3. Имитационное моделирование грид-систем : моногр. / В. С. Лукьянов, А. Е. Андреев, Д. Н. Жариков, А. А. Островский, С. В. Гаевой ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – 215 с.

4. *Лукьянов, В. С.* Модели анализа вероятностно-временных характеристик и структур сетей передачи данных : моногр. / В. С. Лукьянов, А. В. Старовойтов, И. В. Черковский ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2006. – 184 с.

5. Моделирование отказоустойчивых GRID-систем / В. С. Лукьянов, Д. Н. Жариков, С. В. Гаевой, О. В. Шаповалов // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий : мат-лы Междунар. науч.-практ. конф. (Россия, г. Сочи, 1–10 окт. 2010 г.) / Московский гос. ин-т электроники и математики МИЭМ (ТУ) [и др.]. – М., 2010. – С. 253–254.

6. Моделирование GRID-систем / В. С. Лукьянов, Д. Н. Жариков, С. В. Гаевой, Ю. В. Шафран // Информационные технологии моделирования и управления. – 2009. – № 5. – С. 669–677.

7. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2010610693 от 20 янв. 2010 г. РФ, МПК (нет). Имитационная модель грид-системы (GridModel) / В. С. Лукьянов, Д. Н. Жариков, С. В. Гаевой, Ю. В. Шафран; ВолгГТУ. – Волгоград, 2010.

8. *Труханов, В. М.* Краткий курс теории и практики надежности сложных систем : учеб. пособие / В. М. Труханов ; ВолгГТУ. – 2-е изд., перераб. и доп. – Волгоград, 2008. – 162 с.

9. *Филлипс, Д.* Методы анализа сетей: пер. с англ / Д. Филлипс, А. Гарсиа-Диас. – М.: Мир. 1984. – 496 с., ил.

10. *Фоменков, С. А.* Моделирование систем [Электронный ресурс] / С. А. Фоменков. – Волгоград, 2004. – 1CD-ROM.

11. *Чернышов, К. В.* Показатели надежности технических систем : наработка до отказа, ресурс, срок службы : учеб. пособие / К. В. Чернышов ; Волгоград. гос. ун-т. – Волгоград : Политехник, 2007. – 80 с.

12. *Шеннон, Р.* Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Р. Шеннон ; пер. с англ. под ред. Е. К. Масловского. – М.: Мир, 1978. – 418 с.