

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 20

---

---

№ 6(133)

Межвузовский сборник научных статей  
Издается с января 2004 г.

2014

---

---



Волгоград  
2014

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»  
президент 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 физ.-мат. наук, профессор ВолгГТУ *Е. С. Брискин*

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 АИСИ *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.  
№ 6(133) / ВолгГТУ. – Волгоград : ИУНЛ ВолгГТУ, 2014. – 140 с. (Серия «Актуальные проблемы  
управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 20).

ISBN 978–5–9948–1466–6

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, робототехника.

Ил. 58. Табл. 30. Библиогр.: 244 назв.

ISBN 978–5–9948–1466–6

© Волгоградский государственный  
технический университет, 2014

## СОДЕРЖАНИЕ

---

### Часть I. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

<i>Голованчиков А. Б., Васильева Е. В.</i> Корреляционный анализ зависимости устойчивости эмульсии от концентрации ПАВ.....	5
<i>Гольцов А. С., Силаева Е. Ю.</i> Динамическая модель процесса рекуперации серы в топке котла-утилизатора.....	8
<i>Князева А. С., Кидалов Н. А., Голованчиков А. Б.</i> Корреляционный анализ экспериментальных данных по реологии водно-глинистых суспензий с добавлением углекислого реагента (УЦР)..	11
<i>Сальникова Н. А., Астафурова О. А.</i> Методы моделирования в системах автоматизированного проектирования СВЧ-устройств.....	14
<i>Ураксеев М. А., Левина Т. М.</i> Математическое моделирование оптоволоконных приборов и систем на магнитооптическом эффекте Фарадея.....	17
<i>Шурыгин В. А., Брискин Е. С.</i> Об управлении поворотом шагающих машин.....	21

### Часть II. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

<i>Боровик В. С., Боровик В. В., Прокопенко Ю. Е.</i> Модель управления внедрением в трехмерном пространстве и времени.....	24
<i>Денисов М. В., Кизим А. В., Давыдова С. В., Давыдов Д. А., Камаев В. А.</i> Использование нечетких нейронных сетей при ТОиР дорожно-строительных машин.....	29
<i>Дыков М. А., Кравец А. Г., Коробкин Д. М., Укустов С. М., Сальников М. Ю.</i> Автоматизированная система принятия решений при патентной экспертизе.....	35
<i>Ле Н. В., Камаев В. А., Панченко Д. П., Трушкина О. А.</i> Модель представления знаний при создании медицинской экспертной системы дифференциальной диагностики.....	41
<i>Ле Н. В., Камаев В. А., Панченко Д. П., Трушкина О. А.</i> Обзор подходов к проектированию медицинской системы дифференциальной диагностики.....	50
<i>Мельников М. П., Камаев В. А., Воробкалов П. Н.</i> Поиск взаимодействий препаратов как задача по обработке текстов на естественном языке.....	58
<i>Рашиевский Н. М., Дворянкин А. М.</i> Разработка процесса построения и модели виртуального тура с динамическими переходами.....	61
<i>Финогеев А. Г., Нефедова И. С., Тхай Куанг Винь</i> Проблемы безопасности беспроводной сенсорной сети в SCADA-системах АСУ ТП.....	66

### Часть III. УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

<i>Егунов В. А., Ал-Саади Х. А.</i> Управление «умным домом» с использованием беспроводного канала связи..	73
<i>Кононов М. Е.</i> Выбор аналогов по прототипу по совокупности показателей качества в программе «Структура».....	75

<i>Кукарцев В. В., Тихончук Е. О.</i>	
Многокритериальная система классификации военных кадров контрактной основы.....	84
<i>Фам Куанг Хиен, Квятковская И. Ю.</i>	
Использование медианных распределений для решения задачи оценки конкурентоспособности телекоммуникационных услуг.....	86
 Часть IV. АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ	
<i>Аверченков В. И., Шкаберин В. А., Лепих Я. И., Сантоний В. И., Будиянская Л. Н., Крышнев Ю. В.</i>	
Автоматизация процедур противопаводкового мониторинга уровня воды открытых водоемов.....	92
<i>Камаев В. А., Кандырин Ю. В.</i>	
Онтологические предпосылки проектной деятельности и САПР.....	97
<i>Коробкин Д. М., Фоменков С. А., Кобликов И. А.</i>	
Система извлечения описаний физических эффектов на основе онтологии предметной области.....	102
<i>Филатова Н. Н., Требухин А. Г.</i>	
Опыт создания и применения в САПР автоматически развивающейся базы знаний.....	109
<i>Хоменко Т. В.</i>	
Методика построения пространства знаний методов проектирования технических систем.....	114
 Часть V. ПОСТРОЕНИЕ СЕТЕЙ И ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ	
<i>Аль-Хадша Ф. А. Х., Гаевой С. В., <u>Лукьянов В. С.</u></i>	
Аналитический расчет надежности сетевой структуры в стационарном и динамическом режиме.....	119
<i>Кручинин С. В.</i>	
Математическая модель акторов телекоммуникационной сети в проектировании САПР.....	123
<i>Лахно В. А.</i>	
Обеспечение информационной безопасности корпоративных систем на железнодорожном транспорте.....	131
 Часть VI. РОБОТОТЕХНИКА	
<i>Егунов В. А., Абед О. А.</i>	
Система управления мобильными роботами с помощью речевых команд.....	137
К сведению авторов.....	140

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

УДК 541.182.42:519.237.5

*А. Б. Голованчиков, Е. В. Васильева*

## КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ УСТОЙЧИВОСТИ ЭМУЛЬСИИ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ ПАВ

Волгоградский государственный технический университет

lenokvasilyeva@gmail.com

Предложено описывать экспериментальную зависимость времени устойчивости эмульсии водно-спиртового раствора в дизельном топливе от концентрации ПАВ полиномом третьей степени. Проведен корреляционный анализ, подтверждающий воспроизводимость экспериментальных данных в параллельных опытах по критерию Кохрена, критерию Фишера и значимость коэффициентов этого уравнения по критерию Стьюдента.

*Ключевые слова:* устойчивость эмульсии, концентрация ПАВ, воспроизводимость, адекватность, значимость коэффициентов.

*A. B. Golovanchikov, E. V. Vasileva*

## THE CORRELATION ANALYSIS OF EMULSION STABILITY DEPENDING ON THE SURFACTANT CONCENTRATION

Volgograd State Technical University

It is suggested to describe experimental time dependency of the emulsion stability of water-alcohol solution in diesel fuel on the surfactant concentration like third-degree polynomial. Correlation analysis were made, confirming reproducibility of the experimental data in parallel experiments by Cochran criterion, Fisher criterion and the significance of coefficients in this equation by Student's criterion.

*Keywords:* stability of the emulsion, the surfactant concentration, reproducibility, relevance, significance of coefficients.

Экспериментальные исследования проводились на водно-спиртовой эмульсии в дизельном топливе, при этом массовая концентрация спирта в воде составляла 84 %, что обеспечивало плотность этого водно-спиртового раствора  $\rho_2 = 835 \text{ кг/м}^3$ , равную плотности дизельного топлива.

В табл. 1 приведены результаты экспери-

ментальных исследований по зависимости времени расслоения эмульсии от концентрации ПАВ. Как известно ПАВ, в том числе моноэтаноламин (МЭА) уменьшает диффузию на границе раздела фаз и способствует повышению устойчивости этой границы [1]. Мы подтвердили это при экспериментальных исследованиях.

Таблица 1

Экспериментальные зависимости времени расслоения эмульсии водно-спиртового раствора в дизельном топливе от концентрации моноэтаноламина ( $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ; плотность капель и дизельного топлива равны  $835 \text{ кг/м}^3$ ; массовая концентрация капель в дизельном топливе – 10 % массовых)

Наименование параметра	Величина							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Концентрация МЭА $\rho \cdot 100$ % объемные	0	0,96	1,4	1,9	2,4	2,8	4,8	11,25
Время до расслоения в первом опыте $\tau_1$ , мин	30	100	120	135	155	165	180	90
Время до расслоения во втором опыте $\tau_2$ , мин	25	98	120	137	150	166	186	95
Время до расслоения в третьем опыте $\tau_3$ , мин	35	90	110	138	140	170	190	85
Среднее время расслоения эмульсии для трех параллельных опытов $\tau$ , мин	30	96	116,67	136,67	148,33	167	185,33	90

Расчет ошибки опыта (дисперсии воспроизводимости) проводился по известному алгоритму [2, 3].

Сначала по формуле

$$S_j^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (\tau_i - \tau)^2 \text{ при } m = 3, \quad (1)$$

определялись построчные дисперсии параллельных опытов, а затем однородность этих дисперсий проверялась по критерию Кохрена

при сравнении его расчетного значения

$$G_{\tau_j} = \frac{s_{jn}^2}{\sum_{j=1}^n s_j^2} \text{ при } n = 8 \quad (2)$$

с табличным  $G_{\tau_j}$

В табл. 2 приведены числовые значения множителей  $(\tau_i - \tau)^2$  для построчных дисперсий в параллельных опытах для всех восьми основных опытов.

Таблица 2

Смножители для восьми основных опытов

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	$\Sigma$
Величина множителя $S_j^2$ для построчной дисперсии в основном опыте	25	28	33,3	2,3	58,3	7	25,3	25	204,33

Как видно из данных таблицы, наибольшая построчная дисперсия соответствует пятому основному опыту и равна  $S_{jn}^2 = 58,3$ .

Тогда расчетное значение критерия Кохрена согласно формуле (2):

$$G_{T_p} = 0,285,$$

а табличное для числа степеней свободы  $f = m-1 = 2$  и числе основных опытов  $f_2 = n = 8$  [2]

$$G_{T_p} = 0,5157.$$

Таким образом,  $G_{T_p} < G_{T_p}$  – условие однородности для параллельных опытов – выполняется.

Саму ошибку опыта рассчитываем по формуле

$$S_0^2 = \frac{\sum_{j=1}^n S_j^2}{n} = 25,5. \quad (3)$$

Проведем проверку значимости четырех коэффициентов полинома третьей степени

$$\tau = 30 + 7380 \cdot p - 105398 \cdot p^2 + 396062 \cdot p^3, \text{ л} \text{ при } p \leq 0,1125. \quad (4)$$

Находим дисперсию этих коэффициентов по формуле

$$S_k^2 = \frac{S_0^2}{n} = \frac{25,5}{8} = 3,19. \quad (5)$$

Расчетные значения критерия Стьюдента для каждого коэффициента находим по формуле

$$t_k = \frac{|B_k|}{S_k} = \frac{|B_k|}{1,78}. \quad (6)$$

Тогда для коэффициентов:  $B_1=30$ ;  $t_1=16,79$ ;  $B_2=7380$ ;  $t_2=4132$ ;  $B_3=105398$ ;  $t_3=59012$ ;  $B_4=396062$ ;  $t_4=221752$ ;

Табличное значение критерия Стьюдента для общего числа степеней свободы  $n(m-1)=16$  равно [2]  $t_1=2,1199$  при уровне значимости  $q=0,05$ .

Таким образом, для всех четырех коэффициентов полинома  $t_k > t_c$ , то есть все коэффициенты значимы.

Проводим проверку значимости коэффициентов регрессии по второму способу с использованием доверительного интервала

$$\Delta B_k = \pm t_1 \cdot S_k = \pm 2,1199 \cdot 1,78 = \pm 3,79. \quad (7)$$

Сравнение абсолютных значений каждого коэффициента  $B_k$  и доверительного интервала  $\Delta B_k$  по абсолютным значениям показывает, что

$$|B_k| > |\Delta B_k|, \quad (8)$$

то есть все четыре коэффициента значимы.

Проведем проверку адекватности полинома экспериментальным данным.

Рассчитываем построчно дисперсии теоретических и экспериментальных значений функции (4) по формуле

$$S_{aj}^2 = (\tau_{1j} - \tau_j)^2, \quad j = 1 + 8. \quad (9)$$

В табл. 3 приведены результаты этих расчетов и суммы  $\sum_{j=1}^n S_{aj}^2$ .

Таблица 3

Результаты расчетов построчных дисперсий теоретических и экспериментальных значений функции (4) и их суммы

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	$\Sigma$
Величина построчной дисперсии $(\tau_{1j} - \tau_j)^2$	0	18,53	0,65	0,54	14,78	4,63	0,02	0,04	39,19

Рассчитываем дисперсию адекватности по формуле

$$S_{ад}^2 = \frac{m}{n-l} \sum_{j=1}^n S_{aj}^2 = 29,39, \quad (10)$$

где n, m, l – соответственно число основных и параллельных опытов и число коэффициентов в уравнении регрессии(4)

По формуле

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S_{э}^2} = \frac{29,39}{25,54} = 1,15 \quad (11)$$

определяем расчетное значение критерия Фишера. Затем определяем по таблице [2] таблич-

ное значение критерия Фишера для  $f_{ад}=n-l=4$  и  $f_0=n(m-1)=16$  при уровне значимости  $q=0,05$ ;  $F_T=3,01$ .

Так как расчетное значения критерия Фишера меньше табличного, полином (4) адекватно описывает экспериментальные данные.

В табл. 4 приведены сравнительные результаты расчетных значений времени устойчивости эмульсии от концентрации моноэтаноламина по формуле (1) и экспериментальные данные.

Таблица 4

Сравнение экспериментальных и теоретических значений времени расслоения эмульсии от концентрации моноэтаноламина

Наименование параметра	№ опыта							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Концентрация МЭА р · 100 % объемные	0	0,96	1,4	1,9	2,4	2,8	4,8	11,25
Среднее значение устойчивости эмульсии в экспериментах, мин	30	96	116,67	136,67	148,33	167	185,3	90
Теоретическое значение времени устойчивости рассчитанное по формуле (4), мин	30	91,7	121,98	140,94	155,65	166,44	177,56	92,37
Относительное отклонение теоретического значения времени устойчивости эмульсии от экспериментального, %	0	-4,48	-0,69	-0,53	2,59	-1,29	-0,07	0,24

График уравнения 5 с экспериментальными точками приведен на рисунке.

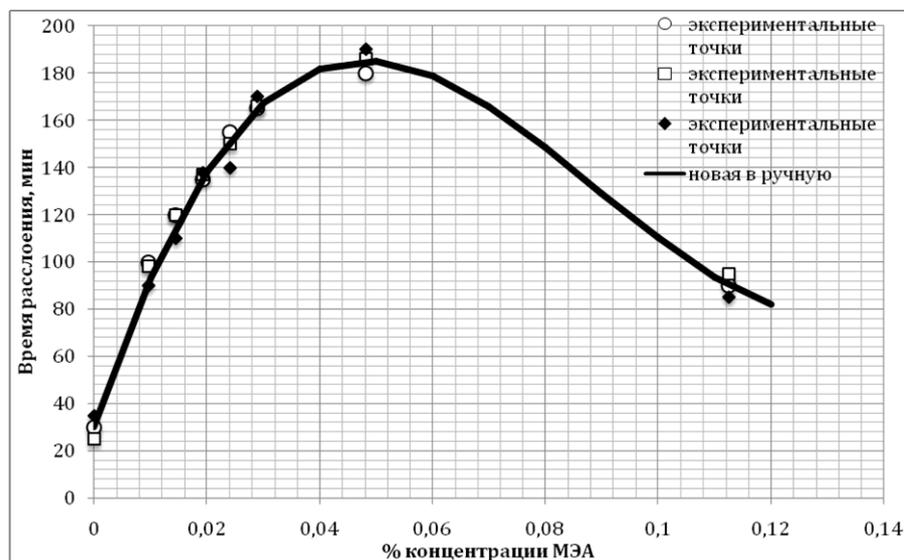


График уравнения (5) с экспериментальными точками

Как видно из табл. 4, относительные отклонения теоретических значений времени расслоения эмульсии от концентрации МЭА, рассчитанные по уравнению (4), от экспериментальных данных не превышают 5 %; при этом выполняются: условие однородности диспер-

сии воспроизводимости в параллельных опытах по критерию Кохрена, условие значимости коэффициентов по критерию Стьюдента и условие адекватности теоретических значений функции экспериментальным данным по критерию Фишера.

Как видно из материалов табл. 4, существует критическое значение концентрации ПАВ, после которого идет снижение времени устойчивости эмульсии. Это, по мнению авторов, объясняется тем, что ПАВ имеет предел растворимости (так называемую критическую концентрацию мицеллообразования), после достижения которого при добавлении ПАВ в раствор концентрация на границе раздела фаз остается постоянной, но в то же время происходит самоорганизация молекул ПАВ в объемном растворе (мицеллообразование или агрегация). Кроме того, избыточное количество молекул ПАВ на поверхности капель приводит к их коалесценции и разрыву сплошности мономолекулярной пленки ПАВ.

Таким образом, экспериментальная зависимость времени устойчивости эмульсии от концентрации ПАВ можно описать полиномом третьей степени; при этом обеспечивается адекватность теоретических значений функции экспериментальных данных, а относительные отклонения этих значений не превышают  $\pm 5\%$ .

УДК 681.54

*А. С. Гольцов, Е. Ю. Силаева*

### ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА РЕКУПЕРАЦИИ СЕРЫ В ТОПКЕ КОТЛА-УТИЛИЗАТОРА

Волжский политехнический институт (филиал)  
Волгоградского государственного технического университета

vesna\_son@mail.ru

В работе рассматривается система управления технологическим процессом рекуперации серы. В статье основное внимание уделено зависимости температуры в топке котла-утилизатора от соотношения расходов сероводорода и воздуха. Предлагается динамическая модель процесса рекуперации серы в топке котла-утилизатора.

*Ключевые слова:* система управления процессом рекуперации серы; зависимость температуры от соотношения расходов.

*A. S. Golzov, E. Y. Silaeva*

### DYNAMIC MODEL OF THE RECOVERY OF SULPHUR IN THE FURNACE WASTE HEAT RECOVERY BOILERS

Volga Polytechnic Institute (branch)  
of the Volgograd State Technical University

The paper deals with the process control system rekupe-tion of sulfur. The article focuses on the dependence of the temperature in the furnace of the recovery boiler flow ratio of hydrogen sulfide and air. Offered the dynamical model of the process for sulfur recovery in the furnace of the recovery boiler.

*Keywords:* process control system for sulfur recovery, the temperature dependence of the flow ratio.

При производстве сероуглерода на ОАО «Волжский Оргсинтез» побочным продуктом является сероводород. Для этого на предприятии организовано производство рекуперации сероводорода в жидкую серу, которая снова яв-

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Разработка нефтяных месторождений с применением поверхностно-активных веществ / Г. А. Бабалян [и др.]. – М.: Недра, 1983 г. – 216 с.
2. Бондарь, А. Г. Планирование эксперимента в химической технологии / А. Г. Бондарь, Г. А. Статюха. – Киев : Вища школа, 1976. – 184 с.
3. Бондарь, А. Г. Математическое моделирование в химической технологии / А. Г. Бондарь. – Киев : Вища школа, 1973. – 279 с.
4. Закгейм, А. Ю. Введение в моделирование химико-технологических процессов / А. Ю. Закгейм. – М. : Химия, 1982. – 288 с.
5. Аппроксимация табличных зависимостей по равновесию бинарных смесей степенным уравнением / А. Б. Голованчиков, А. А. Решетников, А. С. Остроухова, Е. Г. Фетисова // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии»; вып. 4). – С. 37–40.
6. Повышение точности при аппроксимации табличных зависимостей по равновесию бинарных смесей / А. Б. Голованчиков, Е. В. Васильева, А. С. Остроухова, А. А. Решетников // 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. 9–11.

ляется исходным сырьем для производства сероуглерода. Таким образом, процесс рекуперации серы из сероводорода является важной составной частью производственных процессов на ОАО «Волжский Оргсинтез» [1].

Как и любая система управления для химического производства, система управления переработки сероводорода в рекуперированную серу должна с высокой точностью и быстродействием задавать, измерять и поддерживать основные параметры, влияющие на качество процесса. Основным качественным показателем переработки сероводорода является минимизация концентрации производных серы (диоксид серы) в отработанных газах. Анализ состава отработанных газов показывает, сколько было не дополучено рекуперированной серы, которая необходима предприятию в качестве сырья, и сколько требуется топлива для сжигания этих газов, для недопущения возникнове-

ния экологического загрязнения. Таким образом, важно уменьшить концентрацию производных серы (диоксид серы) в отработанных газах, что позволит не только снизить угрозу экологического загрязнения, но и получить предприятию дополнительную прибыль.

В существующей штатной системе управления, структурная схема которой представлена на рис. 1, концентрацию отработанных газов измеряют два раза в сутки, и по результатам этих измерений настраивают регулятор соотношений расходов сероводорода и воздуха, что является недостатком системы управления, т. е. концентрация диоксида серы в отработанных газах не минимальна.

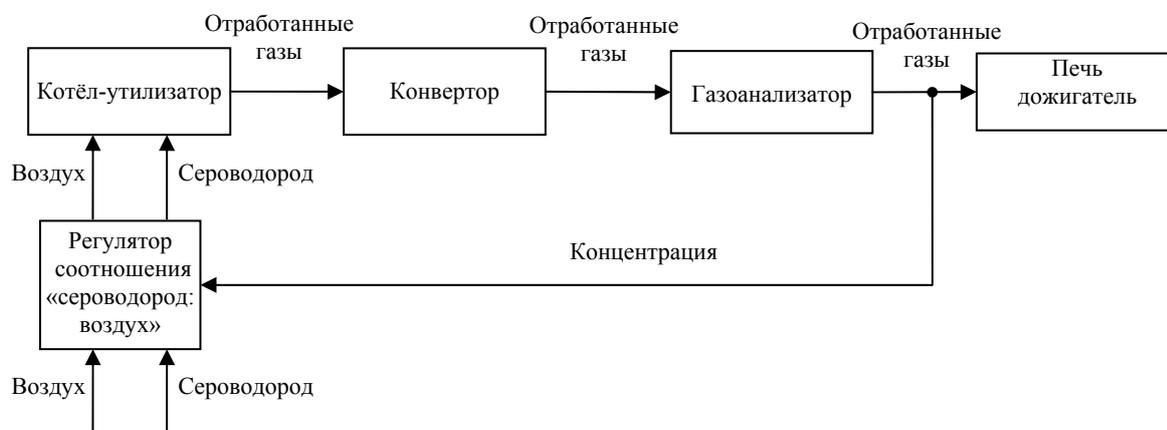


Рис. 1. Структурная схема существующей системы управления

Один из способов непрерывного анализа состава газа предложен в работе [2]. Применение данного способа предполагает включение дополнительного оборудования в состав системы управления, что приведет к ее удорожанию.

С другой стороны, известно, что для рекуперации серы на предприятии используется двухступенчатый метод Клауса, который сопровождается выделением тепла, т. е. анализ состава отработанных газов можно косвенно проводить по изменению температуры в топке котла-утилизатора [3].

Поэтому для решения поставленной задачи необходимо разработать динамическую модель процесса рекуперации серы в топке котла-утилизатора.

Теоретическое значение температуры в топке котла-утилизатора можно определить по следующей формуле:

$$\frac{dT}{dt} = A_1 \cdot F_v + A_2 \cdot F_{H_2S} + A_3 \cdot Q_v + A_4 \cdot Q_{H_2S} + W, \quad (1)$$

где  $F_v, F_{H_2S}$  – расходы воздуха и сероводорода;

$Q_v, Q_{H_2S}$  – концентрация примесей в воздухе и сероводороде;  $A_1, A_2, A_3, A_4$  – параметры подлежащие определению;  $W$  – неучтенное возмущающее воздействие.

Для определения параметров  $A_1, A_2, A_3, A_4$  при измеренных значениях температуры и соотношения расходов сероводорода и воздуха и при условии, что концентрация примесей сероводорода не изменяется, используется метод наименьших квадратов[4]:

$$A = (V^T \cdot V)^{-1} \cdot V^T \cdot T, \quad (2)$$

где  $V = \begin{bmatrix} F_v \\ F_{H_2S} \\ Q_v \\ Q_{H_2S} \end{bmatrix}$ .

Из формулы (1) видно, что изменение температуры зависит при постоянном расходе воздуха и сероводорода от состава примесей в сероводороде. Таким образом, если при неизмен-

ном соотношении расходов сероводорода и воздуха температура в топке котла-утилизатора начнет падать, то необходимо увеличить расход подаваемого воздуха при неизменном расходе сероводорода.

Формулу (1) в виде дифференциального урав-

нения можно представить в виде разностного уравнения [4]:

$$T_k = T_{k-1} + \Delta t (A_1 \cdot F_v + A_2 \cdot F_{H_2S} + A_3 \cdot Q_v + A_4 \cdot Q_{H_2S} + W). \quad (3)$$

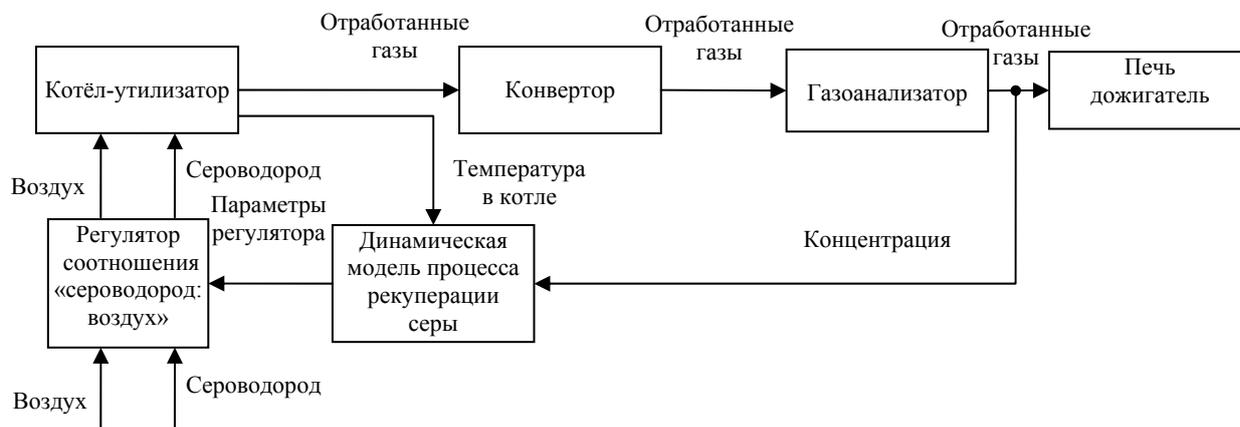


Рис. 2. Структурная схема модернизируемой системы управления

В таком виде полученную модель зависимости температуры в топке котла-утилизатора (3) можно применять в системе автоматического управления, структурная схема которой приведена на рис. 2, при производстве рекуперированной серы методом Клауса для уточнения задания регулятору соотношения расходов сероводорода и воздуха.

Таким образом, предложенная модернизируемая система управления позволяет уточнять соотношение расходов сероводорода и воздуха в период между проведениями лабораторных анализов по составу отработанных газов, что приводит к уменьшению концентрации двуокиси серы в этих газах, снижает угрозу экологического загрязнения, а также позволяет благоприятно получать дополнительную прибыль.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Постоянный технологический регламент № 31 производства рекуперированной серы. – Волжский : ОАО «Волжский Оргсинтез», 2011.
2. Качегин, Д. А. Фотометрический способ измерения избытка гидроокиси натрия в концентрированном растворе цианистого натрия / Д. А. Качегин, А. С. Гольцов, А. А. Силаев // Известия ВолгГТУ : междуз. сб. науч. ст. № 15(102) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 15). – С. 96–99.
3. Сериков, Т. П. Новые установки Атыраутского НПЗ: Установка производства серы : учеб. пособие / Т. П. Сериков, Б. Б. Оразбаева. – Алматы : Эверо, 2008. – 142 с.
4. Гольцов, А. С. Адаптивные системы автоматического управления нелинейными объектами: монография / А. С. Гольцов. – Орел : Академия ФАПСИ, 2002. – 156 с.

УДК 532.584:519.237.5

*А. С. Князева, Н. А. Кидалов, А. Б. Голованчиков*

**КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ  
ПО РЕОЛОГИИ ВОДНО-ГЛИНИСТЫХ СУСПЕНЗИЙ  
С ДОБАВЛЕНИЕМ УГЛЕЩЕЛОЧНОГО РЕАГЕНТА (УЩР)**

**Волгоградский государственный технический университет**

*anya-sn@mail.ru*

Приводятся результаты экспериментальных исследований по зависимости касательных напряжений от градиента скорости в параллельных опытах. Определяются средние значения касательных напряжений и методом наименьших квадратов находятся параметры реологического уравнения Гершеля – Балкли. Определяются расчетные значения критериев Кохрена, Фишера и Стьюдента и проводится их сравнение с табличными значениями.

*Ключевые слова:* касательные напряжения, градиенты скоростей, реологическое уравнение Гершеля – Балкли, критерии Кохрена, Фишера и Стьюдента, коэффициент корреляции.

*A. S. Knyazeva, N. A. Kidalov, A. B. Golovanchikov*

**CORRELATION ANALYSIS OF EXPERIMENTAL DATA ON THE RHEOLOGY  
WATER-CLAY SUSPENSIONS WITH ADDITION OF LIGNIN-ALKALINE REAGENT**

**Volgograd State Technical University**

The article shows the results of experimental studies on the dependence of shear stresses on the velocity gradient in parallel experiments. Determined the average values of shear stresses and are obtained the parameters of the rheological Herschel-Bulkley equation by the method of least squares. Determined the calculated values of Cochran's test, Fisher's test and Student's test and compared these with tabulated values.

*Keywords:* shear stresses, velocity gradients, rheological equation of Herschel-Bulkley, Cochran's test, Fisher's test, Student's test, correlation coefficient.

Результаты экспериментальных исследований по зависимости касательных напряжений от градиента скорости, полученные на ротаци-

онном вискозиметре Brookfield DV-II+Pro, представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Зависимости касательных напряжений от градиентов скорости  
для 10 мас.% суспензии с добавлением 4 мас.% УЩР**

№	Наименование параметра	Величина в основных опытах								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Градиент скорости $\dot{\gamma}$ , с <sup>-1</sup>	18,6	27,9	37,2	46,5	65,1	83,7	125,5	167,4	186,1
2	Касательные напряжения в первом параллельном опыте $\tau_1$ , Н/м <sup>2</sup>	1,86	2,23	2,6	2,98	3,35	3,72	4,09	4,46	4,46
3	То же во втором $\tau_2$	1,75	2,58	2,92	3,17	3,2	3,65	4,31	4,72	4,87
4	То же в третьем $\tau_3$	1,9	2,17	2,54	2,69	3,54	3,86	4,39	4,55	4,63
5	Среднее значение касательных напряжений $\tau$	1,84	2,33	2,69	2,95	3,36	3,74	4,26	4,57	4,65

Проводим аппроксимацию экспериментальной зависимости  $\tau = \tau(\dot{\gamma})$  по формуле Гершеля – Балкли методом наименьших квадратов (МНК) [1–4]

$$\tau = \tau_0 + k \cdot \dot{\gamma}^n, \tag{1}$$

предварительно линеаризуя эту формулу

$$\ln(\tau - \tau_0) = \ln k + n \cdot \ln \dot{\gamma} \tag{2}$$

и преобразуя ее к виду

$$y = b + a \cdot x, \tag{3}$$

где  $y = \ln(\tau - \tau_0)$ ;  $b = \ln k$  и  $a = n$ .

Предельное напряжение сдвига  $\tau$  при расчетах подбираем таким образом, чтобы сумма квадратов относительных отклонений теоретических значений  $\tau_t$  от экспериментальных  $\tau$

$$U = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\tau_{Ti} - \tau_i}{\tau_i} \right]^2$$

была наименьшей.

В этом случае  $\tau_0 = 0,5$ .

Проводим расчеты дисперсии воспроизводимости [2, 3].

В табл. 2 заносим результаты расчетов построчных дисперсий по формуле

$$S_{\bar{v}_i}^2 = (\tau_1 - \tau)^2 + (\tau_2 - \tau)^2 + (\tau_3 - \tau)^2$$

для всех  $n1 = 9$  основных опытов, где  $m$  – число параллельных опытов, равное 3.

Таблица 2

Результаты расчетов построчных дисперсий воспроизводимости

№ опыта	1	2	3	4*	5	6	7	8	9
$S_{\bar{v}_i}^2 \times 10^2$	1,21	9,81	8,34	11,69	5,81	2,29	4,83	3,49	8,49

Сумма дисперсий воспроизводимости для всех 9 основных опытов

$$\frac{\sum_{i=1}^{n1} S_{\bar{v}_i}^2}{m-1} = 2,8 \cdot 10^{-1}.$$

Наибольшая построчная дисперсия воспроизводимости имеет место в 4-м опыте и равна  $S_{\bar{v}_4}^2 = 11,60 \cdot 10^{-2}$  (отмечено звездочкой).

Расчетное значение критерия Кохрена рассчитываем по формуле

$$G_p = \frac{S_{\bar{v}_4}^2}{\sum_{i=1}^{n1} S_{\bar{v}_i}^2} = 0,418.$$

Табличное значение критерия Кохрена для девяти основных опытов и числа степеней свободы  $f = m - 1 = 2$  равно  $G_t = 0,4775$ .

Таким образом,  $G_p < G_t$ , то есть дисперсии параллельных опытов однородны.

Рассчитываем ошибку опыта по формуле

$$S_0^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n1} S_{\bar{v}_i}^2}{n1} = 3,11 \cdot 10^{-2}.$$

Приводим проверку значимости коэффициентов  $k = 0,3744$ ;  $n = 0,4746$ , полученных после линеаризации уравнения (1) и расчета этих коэффициентов в уравнении (3) МНК.

Сначала определяем дисперсию коэффициентов.

$$S^2 = S_k^2 = S_n^2 = \frac{S_0^2}{n1} = 3,45 \cdot 10^{-3}$$

и среднеквадратичное отклонение

$$S = S_k = S_n = \sqrt{3,45 \cdot 10^{-3}} = 0,0588.$$

Расчетную значимость коэффициентов рассчитываем по формулам

$$t_k = \frac{|k|}{S} = \frac{0,3744}{0,0588} = 6,37,$$

$$t_n = \frac{|n|}{S} = \frac{0,4746}{0,0588} = 8,07.$$

Табличное значение критерия Стьюдента [2] для уровня значимости  $q = 0,05$  и общего числа степеней свободы  $f_0 = n1 \cdot (m - 1) = 18$ .

$$t_t = 2,1.$$

Так как  $t_k > t_t$  и  $t_n > t_t$ , то оба коэффициента  $k$  и  $n$  уравнений (1)

$$\tau = 0,5 + 0,3744 \cdot r^{0,4746} \quad (4)$$

значимы.

Определяем доверительный интервал

$$\Delta t = \pm t_t \cdot S = \pm 0,122.$$

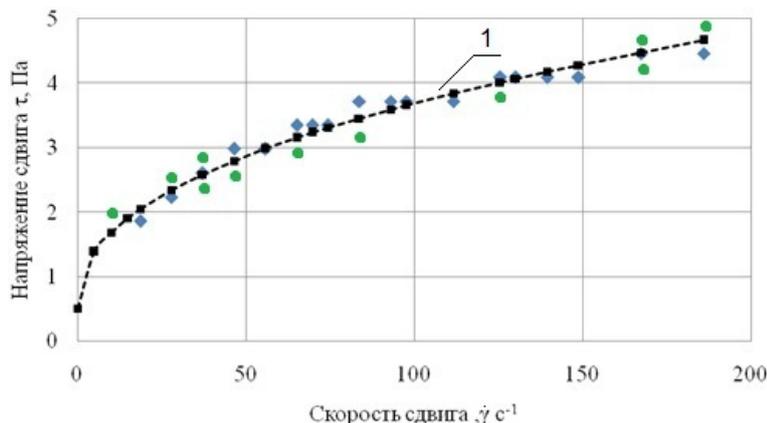
Так как оба коэффициенты  $k$  и  $n$  больше  $|\Delta t|$ , то это также подтверждает значимость обоих этих коэффициентов.

В табл. 3 представлены результаты расчетов средних значений касательных напряжений в параллельных опытах, расчетных значений касательных напряжений, определенных по формуле (4), и относительные отклонения касательных напряжений [5, 6].

Таблица 3

Сравнение средних экспериментальных и теоретических значений касательных напряжений

№	Наименование параметра	№ опыта								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Градиент скорости, $c^{-1}$	18,6	27,9	37,2	46,5	65,1	83,7	125,5	167,4	186,1
2	Среднее значение касательных напряжений в параллельных опытах, $H/m^2$	1,84	2,33	2,69	2,95	3,36	3,74	4,26	4,57	4,65
3	Теоретические значения касательных напряжений, полученные по формуле (4), $H/m^2$	2	2,32	2,58	2,82	3,22	3,56	4,21	4,75	4,97
4	Относительные отклонения теоретических значений касательных напряжений от средних экспериментальных, %	8,86	-0,38	-3,83	-4,42	-4,33	-4,85	-1,23	3,89	6,86



Зависимость касательных напряжений от градиента скорости для 10 мас.% бентонитовой водно-глинистой суспензии с добавлением 4 мас.% водного раствора УЩР:  
 1 – реологическая кривая; ■ ● ◆ – экспериментальные точки параллельных опытов

Для наглядности на рисунке приведен график уравнения (4), кривая 1 и экспериментальные точки этой реологической кривой.

Проведем проверку адекватности полученного реологического уравнения (4) по Критерию Фишера.

Построчные квадратичные отклонения теоретических значений касательных напряжений от экспериментальных приведены в табл. 4.

Построчные квадратичные отклонения теоретических значений касательных напряжений от экспериментальных приведены в табл. 4.

$$S_{адт}^2 = (\tau_{тi} - \tau_i)^2$$

Таблица 4

Построчные квадратичные отклонения теоретических значений касательных напряжений от экспериментальных значений этих напряжений

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Σ
$S_{адт}^2 \times 10^2$	2,65	$8 \cdot 10^{-3}$	1,06	1,69	2,12	3,29	2,75	3,16	10,2	0,241

Дисперсию адекватности находим по формуле

$$S_{адт}^2 = \frac{m}{n1 - l} \cdot \sum S_{адт}^2 = \frac{3}{7} \cdot 0,244 = 0,105,$$

где  $l = 2$  – число коэффициентов, а расчетное значение критерия Фишера – по формуле

$$F_p = \frac{S_{адт}^2}{S_0^2} = \frac{0,105}{0,0311} = 3,38.$$

Табличное значение критерия Фишера для общего числа степеней свободы  $f_0 = n1 \cdot (m - 1) = 18$  и  $f_{ад} = n1 - 1$ , где  $l = 2$  – число рассчитываемых коэффициентов  $F_T = 3,55$  [2].

Таким образом, экспериментальную реологическую зависимость касательных напряжений от градиентов скорости можно описать уравнением Гершеля – Балкли [1], при этом выполняются условия воспроизводимости по критерию Кохрена, значимости коэффициентов по критерию Стьюдента и адекватности по критерию Фишера с высокой корреляционной связью между касательными напряжениями и градиентами скорости. Относительные отклонения

теоретических значений касательных напряжений от экспериментальных данных: максимальное не превышает 9 %, а среднее  $\pm 4,5$  %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тябин, Н. В. Реологическая кибернетика. Ч. 1 / Н. В. Тябин. – Волгоград : Волгоградская правда, 1978. – 111 с.
2. Бондарь, А. Г. Планирование эксперимента в химической промышленности / А. Г. Бондарь, В. А. Статюха. – Киев : Вища школа, 1976. – 183 с.
3. Бондарь, А. Г. Математическое моделирование в химической технологии / А. Г. Бондарь. – Киев : Вища школа, 1973. – 211 с.
4. Заггейм, А. Ю. Введение в моделирование химико-технологических процессов / А. Ю. Заггейм. – 2-е изд., доп и перераб. – М. : Химия, 1982 – 288 с.
5. Аппроксимация табличных зависимостей по равновесию бинарных смесей степенным уравнением / А. Б. Голованчиков, А. А. Решетников, А. С. Остроухова, Е. Г. Фетисова // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии»; вып. 4). – С. 37–40.
6. Повышение точности при аппроксимации табличных зависимостей по равновесию бинарных смесей / А. Б. Голованчиков, Е. В. Васильева, А. С. Остроухова, А. А. Решетников // 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. 9–11.

УДК 681.3.00: 621.396.6

*Н. А. Сальникова, О. А. Астафурова*

## **МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СВЧ-УСТРОЙСТВ**

**Российская академия народного хозяйства и государственной службы  
Волгоградский филиал**

ns3112@mail.ru, olgast@vags.ru

В статье рассматриваются различные методы моделирования в системах автоматизированного проектирования сложных технических устройств и вопросы выбора метода моделирования для приборов сверхвысоких частот, позволяющие рассчитать характеристики сложных микроволновых структур, а также программные комплексы электромагнитного моделирования и пакеты анализа радиоэлектронных схем и систем.

*Ключевые слова:* техническое решение, техническая система, система автоматизированного проектирования, проектирование СВЧ-устройств, методы моделирования, численные методы моделирования, пакеты прикладных программ, программное обеспечение, программы проектирования радиоэлектронных систем.

*N. A. Salnikova, O. A. Astafurova*

## **MODELLING METHODS IN SYSTEMS OF THE AUTOMATED DESIGN OF ULTRAHIGH FREQUENCIES DEVICES**

**Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration,  
Volgograd branch**

In article various methods of modeling in systems of the automated design of difficult technical devices and questions of a choice of a method of modeling for devices of the ultrahigh frequencies, allowing to calculate characteristics of difficult microwave structures and as program complexes of electromagnetic modeling and packages of the analysis of radio-electronic schemes and systems locates are considered.

*Keywords:* technical solution, technical system, system of the automated design, design of ultrahigh frequency devices, modeling methods, numerical methods of modeling, packages of applied programs, the software, programs of design of radio-electronic systems.

Одна из проблем современной науки и техники – разработка и внедрение в практику проектирования новейших методов исследования характеристик сложных технических устройств. При проектировании сложных систем (подсистем) возникают многочисленные задачи, требующие оценки количественных и качественных закономерностей процессов функционирования таких систем, проведения структурного и параметрического синтеза [1–3].

Автоматизированные системы проектирования относятся к классу больших систем, этапы разработки, внедрения, эксплуатации и эволюции которых в настоящее время невозможны без использования различных видов моделирования [1, 2]. На всех этапах проектирования сложных технических устройств необходимо учитывать следующие особенности:

- сложность структуры и неопределенность связей между элементами, неоднозначность алгоритмов решения поставленной задачи;
- большое количество переменных и неполноту исходной информации;
- разнообразие воздействий факторов внешней среды.

Ограниченность возможностей экспериментального исследования больших систем делает актуальной разработку методики их моделирования, которая позволила бы в соответствующей форме представить процессы функционирования систем, описание протекания этих процессов с помощью математических моделей и получить необходимые оценки характеристик исследуемых объектов.

Метод моделирования и необходимая детализация моделей существенно зависят от этапа разработки сложной системы. На этапах обследования объекта и разработки технического задания на проектирование автоматизированной системы модели, в основном, носят описательный характер и преследуют цель в краткой и простой форме наиболее полно представить информацию об объекте, необходимую разработчику системы.

На этапах разработки технического и рабочего проектов систем, модели отдельных подсистем детализируются, и моделирование служит для решения конкретных задач проектирования, т. е. выбора оптимального по определенному критерию при заданных ограничениях

варианта из множества допустимых. Поэтому в основном на этих этапах проектирования сложных систем используются модели для целей синтеза.

Анализ технических систем в САПР основан на математическом моделировании, т. е. на исследовании проектируемых систем. В САПР инструменты анализа непосредственно связаны с инструментами синтеза. В частности, задачи синтеза часто удается свести к многократному решению соответствующих задач анализа. Применение САПР позволяет найти проектное решение.

Традиционные методы моделирования в системах автоматизированного проектирования сложных технических устройств изложены в многочисленных работах [4–7].

Машинная ориентация традиционных методов моделирования с целью применения их в САПР заключается в том, чтобы распространить их на многомерные системы высокого порядка, определять качество их проектирования не по одному, а по многим критериям, упростив при этом процедуру получения конечного результата [8].

Для всех методов проектирования сложных технических систем характерны следующие особенности:

- структуризация процесса проектирования, выделение стадий и этапов проектирования;
- итерационный характер проектирования;
- типизация и унификация проектных решений и средств проектирования.

Для автоматизированного проектирования сложных технических систем основным вопросом является формализация методов формирования математических моделей устройств и элементов систем. Именно от степени автоматизации процедур получения математического описания зависит эффективность применения САПР, а значит, и качество проектирования в целом. Следует помнить, что именно метод получения математической модели, реализованный в САПР, во многом определяет характеристики полученной модели системы в целом.

Если говорить об устройствах сверхвысоких частот (СВЧ), то это направление, в котором системы автоматизированного проектирования развиваются очень интенсивно. Ведь с развитием компьютерной техники появилась возможность применения численных методов со сложным математическим аппаратом (например, метода конечных элементов, являюще-

гося одним из прямых методов решения граничных задач). Этот метод давно привлекает разработчиков своей универсальностью, возможностью решать задачи от анализа волноводных и полосковых структур до моделирования антенн и сложных невзаимных устройств, содержащих гиротропные среды. Однако его применение сдерживалось большими временными затратами, необходимыми на дискретизацию пространства. Методики дискретизации или разбиения исследуемой области на неперекрывающиеся элементы, обычно треугольные (триангуляция) обсуждаются научным сообществом и в данный момент. Кроме того, разработка систем автоматизированного проектирования устройств СВЧ-диапазона продиктована необходимостью сокращения времени и материальных затрат на макетирование и отладочные работы. Ведь традиционный способ предполагал создание набора устройств (макетов) и проведение с их помощью многочисленных опытных исследований [9, 10]. Наибольшую сложность вызывало проектирование устройств СВЧ со сложной геометрией, имеющей значительную волновую протяженность [11]. Современные прикладные программы помогают в исследовании и таких задач [12]. На данный момент трудно представить процесс создания и исследования сложных СВЧ-устройств без применения электромагнитных симуляторов, удешевляющих и сокращающих по времени процесс разработки нового устройства.

Современным проектировщикам представлен большой выбор программных средств для моделирования пассивных и активных структур.

Основой программного обеспечения для проектирования СВЧ-устройств стали такие численные методы, как метод конечных разностей (FDM); метод конечных элементов (FEM); метод матриц линий передачи (TLM); метод интегральных уравнений; метод моментов (МоМ) и метод Галеркина, а также метод поперечного резонанса; метод обобщенной матрицы рассеяния; метод расчета в спектральной области. Данные методы рассчитывают характеристики сложных микроволновых структур.

Наибольшее распространение в серийно выпускаемых САПР получили: метод конечных элементов (FEM); метод моментов (МоМ); метод конечных разностей во временной области (FDTD).

В этих трех методах прослеживается однотипный подход к моделированию. Процесс

моделирования можно разбить на следующие этапы:

1) топология (описание геометрических параметров структуры, чаще создание физической модели с помощью средств визуализации, встроенных в программу) и задание свойств материалов;

2) установка параметров электромагнитного моделирования (описание области моделирования и граничных условий);

3) моделирование (дискретизация физической модели разбиением на ячейки; аппроксимация поля в каждой ячейке с помощью базисной функции при этом коэффициенты функции подбираются до тех пор, пока не будут удовлетворены граничные условия);

4) обработка полученных данных (расчет S-параметров, характеристик излучения в дальней зоне и так далее).

Но существуют и отличия в применимости указанных методов. Метод моментов больше подходит для планарных структур, тогда как метод конечных элементов и метод конечных разностей во временной области являются методами для расчетов в объеме. Дело в том, что при применении в САПР двух последних методов дискретизируется (разбивается на элементы, например тетраэдры) объем, а в методе моментов – только металлические части конструкции. Этого достаточно, так как неизвестной величиной в методе моментов является распределение токов на металлической поверхности, тогда как в двух других методах определяют распределение электромагнитного поля в пространстве. Выполнение полноценного трехмерного расчета электромагнитного поля зачастую является необходимым, так как не все части реального устройства можно подвергнуть декомпозиции на элементы, хранящиеся в библиотеках моделей.

Отличие метода конечных элементов от метода конечных разностей во временной области заключается в том, что в первом – уравнения Максвелла решаются косвенно через матрицы, тогда как во втором – это делается в явной форме.

В качестве примеров применения указанных методов можно назвать следующее программное обеспечение:

- метод конечных элементов – Ansoft High Frequency Structure Simulator 8 и выше, Agilent High Frequency Structure Simulator 5.6;

- метод моментов – IE3D, MWO-Microwave Office, Momentun 2.0;

- метод Галеркина – Microwave Office;

- модифицированный метод моментов – Sonnet;

- метод конечных интегралов во временной области – CST Microwave Studio;

- метод конечных-разностей во временной области – FIDELITY(фирма Zeland).

Развитие средств компьютерного моделирования привело к созданию систем, работающих с разными вычислительными методами, например, система DesignerRF&SI компании ANSYS.

Вектор развития научной мысли по созданию программ проектирования радиоэлектронных систем имеет тенденцию к интеграции различных систем проектирования в единую информационную среду, в которой имеется возможность разработки разнообразных устройств от цифровых схем обработки и формирования сигналов до СВЧ-схем и антенн. Единая информационная среда характеризуется взаимопроникновением результатов работы разных программ с целью создания проекта всей радиоэлектронной системы в целом. Конечным пользователям интересен полный анализ изделий радиоэлектронной аппаратуры, начиная с физических прототипов и заканчивая анализом всего изделия с учетом влияния на него всевозможных факторов эксплуатации.

Примером может служить единая среда фирмы Ansys – Ansys Workbench, под управлением которой могут работать как модули электромагнитного моделирования (HFSS, Q3D, Maxwell), так и программы анализа радиоэлектронных схем и систем (Designer RF&SI и Simplorer). Любой из указанных программных продуктов через среду Ansys Workbench может быть также интегрирован с инструментами механико- и газодинамического анализа, теплового анализа. Развитие средств компьютерного моделирования позволило произвести интеграцию пакетов разных вычислительных методов в системе Designer RF&SI.

Важную роль играют вопросы интеграции систем разных производителей. Например, программные продукты фирмы Cadence могут быть интегрированы со средствами моделирования. Для этого совместно был разработан интерфейс Solver on Demand, упрощающий передачу данных (то есть можно выполнить настройки для моделирования в среде Cadence Allegro и передать их в Ansys HFSS).

Поддержка библиотек от сторонних производителей радиоэлектронных компонентов по-

зволяет разработчикам проектировать системы с учетом современных технологических норм.

Успехи автоматизации проектирования в областях моделирования и анализа, параметрического и структурного синтеза служат базой дальнейшего развития информационных систем и технологий, используемых в производственных процессах.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Концептуальное проектирование. Развитие и совершенствование методов : монография / В. А. Камаев, Л. Н. Бутенко, А. М. Дворянкин, С. А. Фоменков, Д. В. Бутенко, Д. А. Давыдов, А. В. Заболевая-Зотова, И. Г. Жукова, А. В. Кизим, С. Г. Колесников, В. В. Костерин, А. В. Петрухин, М. В. Набока. – М. : Машиностроение-1, 2005. – 360 с.
2. Камаев, В. А. Автоматизированное поисковое проектирование / В. А. Камаев // Наука – производству. – 2000. – № 1. – С. 3–4.
3. Архитектура автоматизированной системы концептуального проектирования СОФИ / В. А. Камаев, С. А. Фоменков, А. В. Петрухин, Д. А. Давыдов // Программные продукты и системы. – 1999. – № 2. – С. 30–34.
4. Фоменков, С. А. Автоматизация процедур формирования информационного обеспечения для систем концептуального проектирования, использующих структурированные физические знания в форме физических эффектов / С. А. Фоменков, А. В. Петрухин, С. Г. Колесников // Качество и ИПИ (CALS)-технологии. – 2005. – № 1. – С. 26–29.
5. Яровенко, В. А. Формирование интегрированной системы обработки структурированных физических знаний с применением мультиагентного подхода / В. А. Яровенко,

С. А. Фоменков // Известия ВолгГТУ. – 2009. – Т. 12. – № 7. – С. 126–128.

6. Давыдов, Д. А. Автоматизированное проектирование линейных структур физических принципов действия технических систем / Д. А. Давыдов, С. А. Фоменков // Машиностроитель. – 2002. – № 2. – С. 33–35.

7. Фоменков, С. А. Программный комплекс представления и использования структурированных физических знаний / С. А. Фоменков, Д. М. Коробкин, А. М. Дворянкин // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2012. – № 11. – С. 24–28.

8. Сальникова, Н. А. Структурирование физических знаний в поисковом конструировании технических систем / Н. А. Сальникова // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. Т. 17. № 14(117). С. 118–122.

9. Астафурова, О. А. Антенны осевого излучения на основе реберно-диэлектрической линии передачи / О. А. Астафурова // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – Самара : Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2007. – Т. 10. – № 1. – С. 66–70.

10. Астафурова, О. А. Измерение характеристик излучения антенн, построенных на основе реберно-диэлектрической линии / О. А. Астафурова // Вестник Рязанского радиотехнического университета. – 2007. – Вып. 20. – С. 54–57.

11. Астафурова, О. А. Электродинамическое моделирование излучающих реберно-диэлектрических структур / О. А. Астафурова // Электромагнитные волны и электронные системы. – М. : Радиотехника, 2007. – Т. 12. – № 9. – С. 48–53.

12. Сальникова, Н. А. Автоматизация поискового конструирования сложных СВЧ-устройств / Н. А. Сальникова, О. А. Астафурова // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. Т. 17. № 14(117). С. 122–126.

УДК 681.51.011

*М. А. Ураксеев, Т. М. Левина*

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТОВОЛОКОННЫХ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ НА МАГНИТООПТИЧЕСКОМ ЭФФЕКТЕ ФАРАДЕЯ

Уфимский государственный авиационный технический университет,  
Филиал ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»  
в г. Салават  
tattin76@mail.ru

Приведена математическая модель, учитывающая зависимость интенсивности оптического излучения на выходе чувствительного элемента от напряженности внешнего магнитного поля проводника с электрическим током, ослабляющих свойств материала и типа оптоволоконка. Рассмотрены расчетные зависимости интенсивности излучения на выходе чувствительного элемента от параметров оптической системы.

*Ключевые слова:* оптоэлектронные приборы, эффект Фарадея, магнитооптика, математическая модель, вращение плоскости поляризации, внешнее магнитное поле, постоянная Верде, числовая апертура, интенсивность излучения.

*М. А. Urakseev, T. M. Levina*

### MATHEMATICAL MODELING OF FIBER-OPTIC DEVICES AND SYSTEMS ON THE MAGNETO-OPTICAL FARADAY EFFECT

Ufa State Aviation Technical University,  
Branch of Ufa State Petroleum Technological University in Salavat

A mathematical model that takes into account the intensity of the optical radiation at the output of the sensor to the external magnetic field of a conductor with an electric current weakening of the material properties and the type of fiber. consider calculated dependence of the intensity of radiation on the sensor output from the optical system parameters.

*Keywords:* optoelectronic devices Faraday effect, magneto-optical, mathematical model, the rotation of the polarization plane, an external magnetic field, the Verdet constant, the numerical aperture, the intensity of the radiation.

Оптоволоконные приборы и системы на магнитооптическом эффекте Фарадея представляют собой важный класс научной аппаратуры за счет особых преимуществ: очень малая инертность, пассивность чувствительных элементов (отсутствие электрического питания); помехозащищенность; миниатюризация; дистанционность измерений при высокой чувствительности и быстродействии. Они могут быть востребованными в различных отраслях современного приборостроения.

Эффект Фарадея, описывающий, что в присутствии магнитного поля  $H$  возникшее в оптоволокне круговое двулучепреломление повернет плоскость поляризации линейно поляризованного излучения на угол  $\varphi_F$  (рис. 1):

$$\varphi_F = V H_{\text{внеш}} L, \quad (1)$$

где  $V$  – удельное фарадеевское вращение (постоянная Верде);  $L$  – длина оптического волокна,  $L = 2\pi r N$  ( $r$  – радиус витка оптоволокна;  $N$  – число витков оптоволокна), фактически нашел широкое применение в начале XXI века [1]. В современных литературных источниках широкую известность подобные технологии получили в 2005 году, когда канадская корпорация NxtPhase Corporation представила один из первых рабочих вариантов оптических преобразователей тока [2]. Несмотря на относительно высокую стоимость данной технологии, она без сомнения является одним из ключевых направлений развития современных оптоволоконных приборов и систем.

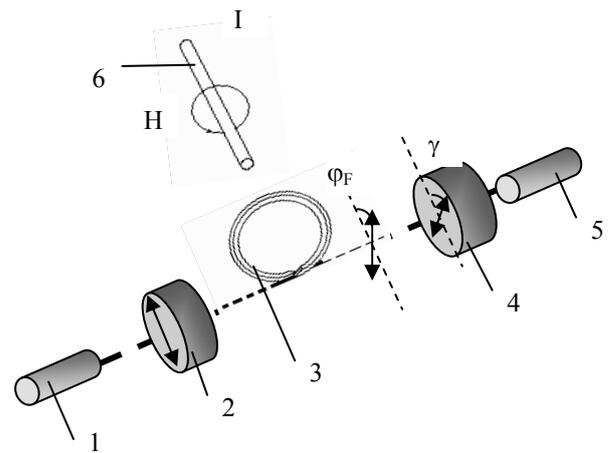


Рис. 1. Магнитооптический эффект Фарадея в оптоволокне

В свою очередь, компания АВВ считается одним из пионеров в области разработки оптоволоконных приборов и систем для измерения электрических токов и высоких напряжений на подстанциях [3].

Рассмотрим физическую модель оптоволоконного прибора на магнитооптическом эффекте Фарадея (ОПМЭФ). Его структурная схема (рис. 2) представляет собой соединение основных элементов преобразователя и отражает физические процессы, происходящие в нем при прохождении светового излучения по оптическому тракту, а напряженность внешнего магнитного поля, создаваемая проводником с электрическим током, по чувствительному элементу преобразователя, в котором происходит взаимодействие этих сигналов.

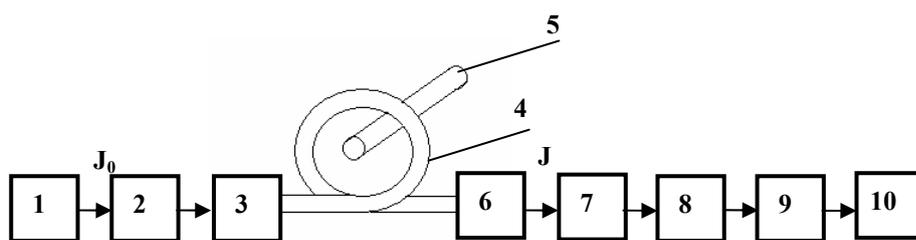


Рис. 2. Структурная схема ОПМЭФ:

1 – лазерный диод; 2 – соединительное оптоволокно; 3 – поляризатор; 4 – чувствительный элемент (виток оптоволокна); 5 – проводник с током, создающий магнитное поле; 6 – анализатор; 7 – фотодиод (ФД); 8 – операционный усилитель (ОУ); 9 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 10 – жидкокристаллический индикатор (ЖКИ)

ОПМЭФ работает следующим образом. При протекании электрического тока  $I$  по проводнику создается контролируемое магнитное поле напряженностью  $H$ . Это поле воздействует на элемент Фарадея (скрученное оптоволокно) ЭФ. Создаваемое лазерным диодом ЛД когерентное монохроматическое излучение  $J_1$  в поляризаторе  $P$  поляризуется в линейно поляризованную

световую волну  $J_2$ . В ЭФ под действием внешнего магнитного поля происходит вращение плоскости поляризации света, распространяющегося вдоль направления магнитного поля. Световой поток  $J_3$  с выхода ЭФ проходит через анализатор  $A$  и попадает на фотодиод ФД, затем на измерительный блок ИБ (рис. 2), который состоит из усилителя  $U$ , далее происходит

преобразование сигнала через аналого-цифровой преобразователь АЦП, и на жидкокристаллическом индикаторе ЖКИ получаем значение контролируемого магнитного поля. Поляризатор  $P$  и анализатор  $A$  находятся в скрещенном положении. Таким образом, существует возможность фиксировать слабое изменение интенсивности светового потока на входе в фотодиод [4].

Наиболее важным элементом в данной схеме является чувствительный ЭФ, в котором при воздействии магнитного поля на некоторые материалы в них возникает индуцированная оптическая активность. Этот эффект достигается в результате взаимодействия магнитных полей света и электронных орбиталей [5].

Современные кварцевые оптические волокна являются диамагнитным материалом, который имеет уникальную возможность использования его в качестве чувствительного элемента прибора.

В условиях, когда магнитное поле отсутствует, интенсивность светового излучения, вышедшая из анализатора:

$$J_4 = J_2 \cos^2 \gamma, \quad (2)$$

где  $J_2$  – интенсивность света за поляризатором;  $\gamma$  – угол между плоскостями поляризации поляризатора и анализатора (угол скрещивания), который устанавливается предварительно при настройке прибора в пределах от 0 до 90°.

Плоскость поляризации линейно поляризованного света в ЭФ под действием внешнего магнитного поля дополнительно поворачивается на угол формула (1). Зависимость постоянной Верде от длины волны можно определить следующим образом.

Рассмотрим действие электромагнитной волны на излучающий электрон. При исследовании ОПМЭФ необходимо в оптической системе чувствительного элемента учесть действие внешнего поля, которое во много раз больше напряженности магнитного поля электромагнитной волны.

Следовательно, необходимо использовать силу Лоренца; для получения зависимости показателя преломления какого-либо вещества от частоты падающего на него света необходимо найти вектор поляризации  $P$  этого вещества, создаваемый полем световой волны  $E$ .

Вычислим вектор электростатической индукции  $D = E + 4\pi P$  и определим  $\varepsilon = \frac{D}{E}$ . Используем основное соотношение электромаг-

нитной теории света  $n = \sqrt{\varepsilon}$ ; получим силу Лоренца, записанную в виде:

$$F_L = q \left[ E + \frac{1}{c} [v \cdot H_{\text{внеш}}] \right]. \quad (3)$$

В случае ограничения оптическим диапазоном спектра (инфракрасные, видимые и ультрафиолетовые лучи), даже при очень малой плотности вещества содержится громадное количество излучающих атомов, и можно предположить, что поляризация вещества в поле световой волны определяется соотношением

$$P = Nqr, \quad (4)$$

где  $N$  – число молекул в единице объема; произведение электрического заряда  $q$  на радиус-вектор  $r$  – электрический момент диполя.

Считаем, что «на входе» в вещество ( $z = 0$ ) имеются две волны, поляризованные по кругу:

$$E_x = E_0 \cos \omega t, \quad E_y = \pm E_0 \sin \omega t. \quad (5)$$

Влияние направления поля на распространение поляризованной волны можно рассмотреть с учетом правого и левого вращения:

$$E_x + iE_y = E_0 e^{i\omega t} \quad (\text{правое вращение}),$$

$$E_x + iE_y = E_0 e^{-i\omega t} \quad (\text{левое вращение}).$$

Используя формулу поляризации среды (4) и выражение

$$n^2 = \varepsilon = 1 + \frac{4\pi P}{E},$$

найдем

$$n_{\pm}^2 = 1 + \frac{4\pi N \cdot q^2 / m}{(\omega_0^2 - \omega^2) \pm q \cdot \omega \cdot H_{\text{внеш}} / (mc)}. \quad (6)$$

Для волны, распространяющейся в исследуемой среде, существуют два значения показателя преломления  $n_{\text{лев}}$  и  $n_{\text{пр}}$ , так как в оптически активном веществе скорость распространения волны с правым вращением отлична от скорости распространения волны с левым вращением [6]. В явном виде выражение (6) запишется как:

$$n_{\text{лев}} - n_{\text{пр}} = \frac{4\pi Nq^3}{nm^2c^2} \frac{H_{\text{внеш}}\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2}. \quad (7)$$

Используя формулу вращения плоскости поляризации, связывающую разность показателей преломления с углом поворота  $\varphi$  плоскости поляризации для волны, прошедшей путь  $l$  в исследуемой среде, находим

$$\varphi_F = \frac{\omega}{2c} (n_{\text{лев}} - n_{\text{пр}}) l = \frac{2\pi Nq^3}{nm^2c^2} \frac{\omega^2 l H_{\text{внеш}}}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2}, \quad (8)$$

где  $\frac{2\pi Nq^3}{nm^2c^2} \frac{\omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2} = V$ .

При  $\omega \ll \omega_0$  (электронные полосы поглощения лежат в ультрафиолетовой области спектра) можно пренебречь  $\omega^2$  в знаменателе последнего выражения и получаем зависимость постоянной Верде от частоты  $\rho \cong \omega^2 \cong 1/\lambda^2$ . Окончательно постоянную Верде можно найти по формуле

$$V = \frac{q}{2mc^2} \omega \frac{\partial n}{\partial \omega}. \quad (9)$$

Используя формулу (1), запишем выражение (2) в виде:

$$J = J_4 = J_2 \cos^2 \left[ \gamma + \left( \frac{q}{2mc^2} \omega \frac{\partial n}{\partial \omega} \right) \cdot H_{\text{внеш}} \cdot (2\pi rN) \right], \quad (10)$$

Формулой (10) описывается амплитудная модуляция линейно поляризованного света контролируемым магнитным полем, созданным электрическим током.

Интенсивность света, падающая на поляризатор  $J_2$  (см. рис. 2) определяется вектором Умова – Пойтинга.

Интенсивность, вышедшая из анализатора

$$J = \frac{1}{2} J_0 \cdot e^{(-\alpha l)} \times \cos^2 \left[ \gamma + \left( \frac{q}{2mc^2} \omega \frac{\partial n}{\partial \omega} \right) \cdot H_{\text{внеш}} \cdot (2\pi rN) \right], \quad (11)$$

где  $\alpha = 2\omega k/c = (4\pi/\lambda)k$  – коэффициент ослабления.

Выражение (11) дано без учета потерь интенсивности светового потока на отражение от

Следовательно, формула (11) примет вид:

$$J = \frac{1}{2} J_0 \cdot e^{(-\alpha l)} \cdot g \cdot NA \cdot \left[ \cos^2 \left[ \gamma + \left( \frac{q}{2mc^2} \omega \frac{\partial n}{\partial \omega} \right) \cdot H_{\text{внеш}} \cdot (2\pi rN) \right] \right], \quad (14)$$

и используя формулу мгновенного значения  $H$  для дальней зоны, запишем формулу (14) в виде:

$$J = \frac{1}{2} J_0 \cdot e^{(-\alpha l)} \cdot g \cdot NA \cdot \left[ \cos^2 \left[ \gamma + \left( \frac{q}{2mc^2} \omega \frac{\partial n}{\partial \omega} \right) \cdot \left( \frac{I_m dl \sin \Theta}{2R} \right) \cdot (2\pi rN) \right] \right]. \quad (15)$$

Полученное выражение (15) представляет собой математическую модель ОПМЭФ – зависимость интенсивности оптического излучения на выходе чувствительного элемента от напряженности внешнего магнитного поля проводника с электрическим током, ослабляющих свойств материала и типа.

На основании выражения (15) рассмотрим расчетные зависимости интенсивности излучения на выходе чувствительного элемента ОПМЭФ от

поверхностей оптоволоконна, а также в предположении  $\alpha = \text{const}$  на расстоянии  $l_1$  от источника света.

Для построения ОПМЭФ, предназначенного для измерения переменного тока, наиболее целесообразно выполнить систему с учетом  $\gamma = 45^\circ$ .

Потери света при отражении от поверхностей оптоволоконна при прохождении через оптическую систему ОПМЭФ и поглощение в поляризаторах неизбежны в реальной системе, поэтому, чтобы учесть эти потери света, необходимо в формулу (11) ввести коэффициент  $g$

$$g = 2\chi_{\text{отр}} + 2q_{\text{пол}}, \quad (12)$$

где  $\chi_{\text{отр}}$  – коэффициент отражения поляризатора;  $q_{\text{пол}}$  – коэффициент поглощения поляризатора.

На движение света в оптоволоконне будет влиять сердцевина или внутренняя поверхность световода, которая имеет высокий показатель преломления и определяется числовой апертурой

$$NA = n_1 \sqrt{2\Delta}; \quad (13)$$

она является еще одним важным параметром.

Оптический луч распространяется в оптоволоконне, испытывая многократное полное отражение от границы раздела сердцевины и оболочки. Однако из этого не следует, что угол может быть практически произвольным. Наоборот, угол распространения луча является особенным, характеристическим углом.

параметров оптической системы, представленные на рис. 3.

Из проведенного моделирования следует, что наибольшее влияние на величину интенсивности излучения влияют параметры оптоволоконна – числовая апертура ( $NA$ ) и число витков ( $N$ ) оптоволоконна. Поэтому существует необходимость моделирования процесса, изменения интенсивности оптического излучения при его прохождении сквозь оптическую систему преобразователя.

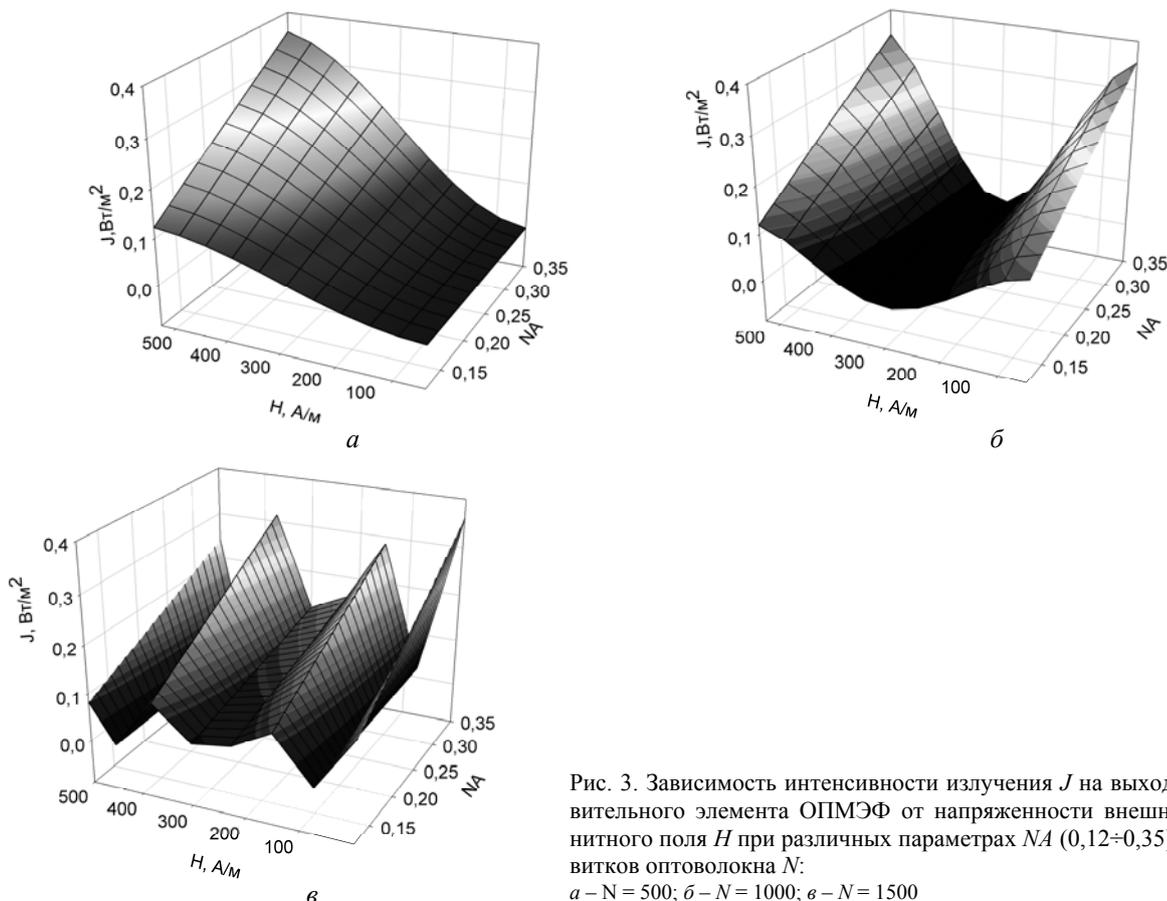


Рис. 3. Зависимость интенсивности излучения  $J$  на выходе чувствительного элемента ОПМЭФ от напряженности внешнего магнитного поля  $H$  при различных параметрах  $NA$  ( $0,12 \div 0,35$ ) и числа витков оптоволоконна  $N$ :  
 $a - N = 500$ ;  $b - N = 1000$ ;  $v - N = 1500$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Волоконно-оптические датчики : пер. с яп. / Т. Окуси, М. Оцу, Х. Нисихара, К. Хататэ ; под ред. Т. Окуси. – Л. : Энергоатомиздат. Ленигр. отд.-ние, 1991. – 255 с.  
 2. Левина, Т. М. Применение электробезопасных датчиков в системе управления технологическим процессом обессоливания нефти / Т. М. Левина, Ю. А. Жаринов, Ф. Ф. Шамаев // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии № 4. – Астрахань : Изд-во АГУ, 2012. – С. 18–23.

3. Бонерт, К. Прорыв в области измерения сильных постоянных токов / К. Бонерт, П. Гугенбах // АББ Ревю, 1/2005. – С. 6–10.  
 4. Пат. № 62712 Российская Федерация. G01R29/00. Информационно-измерительное устройство контроля электрического тока и магнитного поля.  
 5. Пат. № 2171996 Российская Федерация. G01R19/00. Датчик тока.  
 6. Левина, Т. М. Информационно-измерительная система контроля магнитного поля : монография / Т. М. Левина, М. А. Ураксеев // LAP LAMBERT, Germany, 2012.

УДК 629.369

*В. А. Шурыгин, Е. С. Брискин*

**ОБ УПРАВЛЕНИИ ПОВОРОТОМ ШАГАЮЩИХ МАШИН\***

**Волгоградский государственный технический университет**  
 dtm@vstu.ru

Рассматривается и сравнивается кинематически точный поворот и поворот с проскальзыванием и скольжением опор.

*Ключевые слова:* шагающая машина, модуль, управление движением, ортогональный механизм шагания.

*V. A. Shurygin, E. S. Briskin*

**ON THE TURN CONTROL OF WALKING MACHINES**

**Volgograd State Technical University**

Kinematically exact turn of walking machines and the turn with slipping and sliding on the ground are considered and compared.

*Keywords:* walking machine, module, motion control, orthogonal mechanism of walking.

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 14-08-01002-а, № 14-01-00655-а.

Исследования динамики поворота шагающей машины на абсолютно жестком грунте показали, что существует область эксплуатационных факторов, ограниченная скоростью центра масс машин и углами поворота плоскостей шагания управляемых сдвоенных ортогональных движителей (см. рисунок), соответствующая движению без проскальзывания и буксования опор [1, 2].

При движении шагающей машины на реальном грунте, моделируемом вязкоупругопластичной средой, всегда имеет место движение стоп относительно грунта, классифицируемое для машин с традиционными типами движителей как скольжение и буксование [3, 4]. Объясняется это тем, что преодоление сил сопротивления как при прямолинейном движении, так и при повороте, возможно только за счет сил реакций грунта, возникающих при его деформации. Максимальным значениям этих сил соответствует движение с проскальзыванием стоп по грунту, сопровождающееся потерей управляемости. Поэтому изучение динамики поворота предполагает определение зависимостей кинематических, динамических и энергетических характеристик [5, 6] движения от эксплуатационных факторов и конструктивных параметров машины в пределах упругих деформаций грунта.



Шагающая машина «Ортоног»  
с ортогонально-поворотными движителями

В качестве расчетной схемы поворота на вязкоупругопластичном грунте может быть использована схема, описываемая дифференциальными уравнениями Лагранжа совместно с уравнениями связей [7, 8]. Привлекательная рас-

четная схема позволяет рассматривать поворот как кинематически определимых, так и неопределимых машин. Основная цель исследований и последующего анализа результатов – сопоставление эксплуатационных характеристик движения при повороте в зависимости от скорости движения и углов поворота движителя. Конкретный анализ осуществлялся для четырехдвигательной машины «Ортоног» с тремя и четырьмя управляемыми движителями. Под машиной с тремя [9] управляемыми движителями понималась машина, у которой два движителя на одном из бортов (левом) связаны с управлением ориентацией движителей, передний движитель на другом борту жестко сориентирован вдоль корпуса машины, а задний свободный; у машины с четырьмя управляемыми движителями два движителя правого борта жестко сориентированы вдоль корпуса.

Анализ результатов расчетов показал, что при постоянной скорости движения  $V=1\text{ м/с}$  и в отсутствии крюковой нагрузки коэффициент буксования для машин всех типов возрастает с увеличением суммы углов поворота плоскостей шагания управляемых движителей.

Другим важным критерием, характеризующим конструктивное совершенство шагающей машины, может служить коэффициент удельной энергии [4], затрачиваемой на единицу угловой скорости  $\omega$ :

$$K_N = \frac{N_{оп}^R}{\omega GL},$$

где  $L$  – базовая длина шагающей машины, измеряемая по точкам подвеса движителей к корпусу;  $G$  – вес машины,  $N_{оп}^R$  – требуемая мощность.

Чем меньше этот коэффициент, тем меньше, при прочих равных условиях, потребляемая на поворот энергия силовой установки.

Результаты расчетов показывают, что при малых углах поворота плоскостей шагания ( $\varepsilon_i + \varepsilon_j \leq 10^\circ$ ) машины с кинематически неточным поворотом по этому показателю практически неразличимы. Если поворот происходит с меньшим радиусом, то коэффициент удельной энергии убывает только для машин с кинематически точным поворотом, а для других растет, причем тем быстрее, чем больше проскальзывание и буксование опор.

Таким образом, с точки зрения энергозатрат на поворот, следует отдавать предпочтение управлению с кинематически точным поворотом.

Важным эксплуатационным фактором, определяющим конструктивное совершенство машины, также является показатель, характеризующий усилия, возникающие в органах управления при повороте.

Анализ результатов свидетельствует о том, что рулевой момент у машины с кинематически точным поворотом в два и более раз меньше, чем у машины с кинематически неточным поворотом.

С точки зрения потери управляемости важным показателем является показатель максимальной удельной силы тяги. Грунт моделируется в этом случае как вязкоупругая среда, но, как и при движении по абсолютно жесткому грунту, максимальная удельная сила тяги определяется статистически с вероятностью 0,95. Характер полученных зависимостей и в этом случае подтверждает преимущества машины с кинематически точным поворотом. Однако для машин с кинематически неточным поворотом возможна потеря управляемости, если опора хотя бы одного из механизмов шагания не будет иметь достаточно надежного взаимодействия с грунтом.

Если машина используется в тяговом режиме, то важным показателем ее эксплуатационных свойств является тяговый коэффициент полезного действия. Обычно тяговый коэффициент полезного действия определяется в зависимости от крюковой нагрузки  $Q_{кр}$ . В среднем тяговый коэффициент полезного действия для машины с управлением, обеспечивающим кинематически точный поворот на 5 % выше, причем с ростом крюковой нагрузки эта разница убывает. Это, в частности, объясняется линейной зависимостью коэффициента буксования  $\delta$  от величины крюковой нагрузки.

Еще одна группа показателей, не употребляемая для машин с традиционными типами движителей, но специфичная для шагающей машины, совершающей поворот, связана с устойчивостью и комфортабельностью движения. Этими показателями могут являться среднеквадратичные значения касательного  $a_t$  и нормального  $a_n$  ускорения центра масс корпуса, а также и его углового ускорения  $\epsilon_\phi$ . Сам факт существования этих колебаний обусловлен дискретным взаимодействием опор с вязкоупругоупругим грунтом и периодическим переносом механизмов шагания в новое положение. Различным скоростям движения и углам

поворота плоскостей шагания управляемых движителей соответствует и свой спектр частот вынуждающих сил. Известно, что уровень колебаний, при прочих равных условиях, зависит от близости спектра частот вынуждающих сил спектру собственных частот. Поэтому анализ колебаний в плоскости движения следует проводить для каждой конкретной шагающей машины в конкретных условиях и подбирать такие параметры, которые обеспечивают допустимый уровень колебаний в заданных эксплуатационных ситуациях. Другой важный вывод, следующий из проведенного анализа, – обязательность учета реальных свойств грунта.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 11). – С. 41–44.
2. Черноусько, Ф. Л. Движение многозвенника по горизонтальной плоскости / В. А. Шурыгин // ПММ. – 2000. – Т. 64. – Вып. 1. – С. 8–18.
3. Брискин, Е. С. О позиционной зависимости тягово-цепных свойств шагающих машин с цикловыми движителями / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, Н. Е. Фролова // Тракторы и сельхозмашины. – 2009. – № 6. – С. 21–25.
4. Шагающая машина «Восьминог» / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, А. В. Малолетов, В. В. Жога, Н. Г. Шаронов, К. В. Шаров, Н. Е. Фролова, Д. Н. Покровский // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – № 5. – С. 48–49.
5. Брискин, Е. С. Энергетическая эффективность цикловых механизмов робототехнических систем / Е. С. Брискин, Я. В. Калинин, В. В. Чернышев // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – 2011. – № 4 (часть 2). – С. 69–71.
6. Выбор алгоритма управления автономным движением шагающей машины с цикловыми движителями / Е. С. Брискин, В. В. Жога, А. В. Малолетов, Д. Н. Покровский, Н. Г. Шаронов, В. А. Шурыгин // Искусственный интеллект. – 2007. – № 3. – С. 357–366.
7. Концепция проектирования шагающих машин / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, В. В. Жога, А. В. Малолетов, Н. Г. Шаронов, Н. Е. Фролова // Наука – производство. – 2005. – № 1. – С. 33–38.
8. Динамика и управление движением шагающих машин с цикловыми движителями / Е. С. Брискин [и др.]; под ред. Е. С. Брискина. – М. : Машиностроение. – 2009. – С. 191.
9. Реконфигурируемый транспортный комплекс со двояными шагающими движителями / Е. С. Брискин, Н. Г. Шаронов, С. С. Фоменко // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. Т. 19. № 24(127). С. 10–15.

## СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 519.876.2

*В. С. Боровик, В. В. Боровик, Ю. Е. Прокопенко*

### МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ВНЕДРЕНИЕМ В ТРЕХМЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ И ВРЕМЕНИ

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

borovikv@mail.ru, borovikvv70@mail.ru, pue1936@yandex.ru

Показано, что визуализация процессов, сопровождающих управление, играет важную роль не только как обладающее большой доказательной силой, но и для понимания и оценки результатов управления. В качестве исходной модели принята производственная функция. С помощью преобразований Минковского и Лоренца сделана попытка изображения управления в четырехмерном пространстве, объединяющим физическое трехмерное пространство и время.

*Ключевые слова:* управление, четырехмерное пространство, производственная функция, преобразования Лоренца и Минковского.

*V. S. Borovik, V. V. Borovik, Yu. E. Prokopenko*

### MODEL OF IMPLEMENTATION IN THREE SPACE AND TIME

Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering

Shown that visualization of the processes accompanying management plays a primary role not only as having great probative value, but also to understand and evaluate the results of management as the initial model adopted by the production function. With the help of the Lorentz transformations and Minkowski attempted image management in four-dimensional space that unites the physical three-dimensional space and time.

*Keywords:* management, four-dimensional space, the production function, and Lorentz transformations of Minkowski.

Инновационный тип развития создает предпосылки для коренного изменения структуры и содержания моделей, учитывающих взаимосвязь производственных процессов и темпов их выполнения [1]. В современных условиях время как социально-экономическая категория выступает в качестве ресурса, в значительной мере определяющего цели организационно-хозяйственных систем [2, 3, 4].

Стремление выяснить особую роль времени в развитии процессов, происходящих в организационно-хозяйственных системах в условиях инновационного развития, приводит к ряду предположений, заслуживающих серьезного внимания [5, 6]. Дж. Уитроу, отстаивая мнение о реальности и объективности времени, отмечает, что «центральной пунктом дискуссии является статус «становления», или совершающегося, а также прошлого, настоящего и будущего;

другими словами, тех черт времени, для которых не имеется пространственных аналогий» [7]. В этой связи визуализация моделирования управления в пространстве с включением параметра времени в качестве четвертого измерения является весьма актуальной задачей [8].

Четырехмерное пространство, объединяющее физическое трехмерное пространство и время, введено Г. Минковским [9, 10]. А. Б. Фашевский отмечает, что «строго говоря, считать время четвертым измерением пространства нельзя, так как по правилам математики оно должно быть одновременно перпендикулярно всем трем имеющимся координатным осям» [11]. Однако он рассматривает один из вариантов визуализации четырехмерного пространства (рис. 1), и, на наш взгляд, в качестве первого приближения эта конструкция для практики представляет определенный интерес.

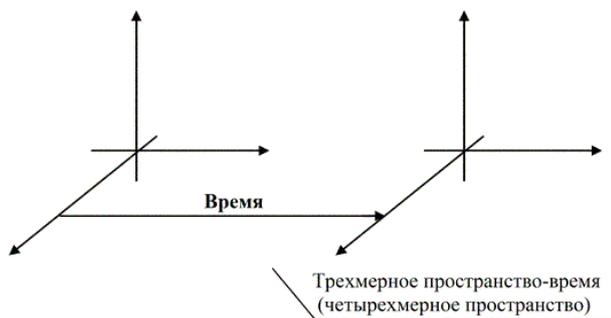


Рис. 1. Графическое изображение четырехмерного пространства

По Минковскому, положение события задается четырьмя координатами – тремя пространственными и одной временной. Обычно используются координаты:  $x_1 = x$ ;  $x_2 = y$ ;  $x_3 = z$ , где  $x, y, z$  – прямоугольные декартовы координаты события в некоторой инерциальной системе отсчета (ИСО) [Голубев, Ю. Ф. Основы теоретической механики / Ю. Ф. Голубев. – М. : МГУ, 2000. – С. 156] и  $x = ct$ , где  $t$  – время события;  $c$  – скорость света в вакууме. Геометрические свойства четырехмерного пространства определяются выражением для квадрата расстояния между двумя событиями (интервала)  $s$  :

$$s^2 = (dx^0)^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2, \quad (1)$$

где  $dx^2, dy^2, dz^2$  – разности координат событий, а  $dt$  – разность их моментов времени. Пространство с таким  $s^2$  – псевдоевклидово.

Для решения задачи управления в обобщенном четырехмерном пространстве выражение (1) может быть представлено как

$$s^2 = (dx^0)^2 - dx_1^2 - dx_2^2 - dy^2, \quad (2)$$

где  $x_1$  – труд;  $x_2$  – фонды (основные и оборотные);  $y$  – объем выполняемых работ. Тогда  $x^0 = Qt$ , где  $Q$  – условная максимальная производительность труда;  $q$  – производительность труда, характеризующая систему, в которой планируется внедрение, например, прогрессивной технологии.

При переходе от одной ИСО к другой пространственные координаты и время преобразуются друг через друга посредством преобразований Лоренца. В специальной теории относительности преобразованиям Лоренца подвергаются координаты  $(x, y, z, t)$  каждого события при переходе от одной ИСО к другой. Аналогично преобразуются координаты любого четвертого вектора [10].

С математической точки зрения преобразования Лоренца – это преобразования, сохраня-

ющие неизменной метрику Минковского. Это значит, что последняя сохраняет при них простейший вид при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой. Преобразования Лоренца – это аналог для метрики Минковского ортогональных преобразований, осуществляющих переход от одного ортонормированного базиса к другому или обобщением понятия движения в евклидовом пространстве [Гельфанд, И. М. Лекции по линейной алгебре / И. М. Гельфанд. – М. : Наука, 1971]. Общая группа преобразования состоит из комбинаций пространственных отображений во времени и преобразований, которые с физической точки зрения являются преобразованиями перехода от одной ИСО к другой [10]. Преобразования в плоскости с псевдоевклидовой метрикой являются специфической чертой преобразования, что чрезвычайно важно для нашего исследования.

Преобразования в процессе управления осуществляются при коллинеарных пространственных осях, если ИСО  $K'$  движется относительно ИСО  $K$  с постоянной скоростью. В нашей задаче под скоростью мы понимаем производительность труда –  $q$ , характерной для условного предприятия, в котором планируется внедрение и  $Q$  – максимальная производительность труда, принятая в качестве эталона, характерная для наиболее прогрессивного предприятия. Начала координат совпадают в начальный момент времени в обеих системах [10]. Тогда прямые преобразования Лоренца для решения задачи управления в трехмерном пространстве и времени примут вид:

$$x'_1 = \frac{x_1 qt}{\sqrt{1 - \frac{q^2}{Q^2}}}, \quad x'_2 = x_2, \quad y' = y, \quad t' = \frac{t - \left(\frac{q}{Q^2}\right)x_1}{\sqrt{1 - \frac{q^2}{Q^2}}}. \quad (3)$$

Рассмотрим графическую модель (рис. 2) производственной функции (ПФ) вида

$$Y = C_0 \prod_{i=1}^n x_i^{\alpha_i}, \quad (4)$$

где  $Y$  – расчетный индекс в натурально-вещественном или стоимостном выражении (например, объем работ);  $x_i, i = \overline{1, n}$  – ресурсы, влияющие на  $Y$  (в натурально-вещественном или стоимостном выражении);  $\alpha_i, i = \overline{1, n}$  – «веса» – коэффициенты эластичности факторов  $x_i$  (характеризуют вклад  $x_i$  в  $Y$ );  $C_0$  – коэффициент нейтральной эффективности (характеризует совокупное влияние факторов, не учтенных моделью).



Рассмотрим два частных варианта модели управления. Первый – идеальный. Рассмотрим перемещение вектора управления  $\overline{AB}$  во времени в пределах заданных проектных параметров. Преобразования при коллинеарных пространственных осях осуществляется при перемещении с определенной скоростью (производительность труда –  $q$ ), а начала координат совпадают в начальный момент времени в обеих системах. В результате перемещения без пространственных поворотов в заданной системе объекта  $Y = f(x_1, x_2)$  образуются гиперповерхность и плоскость  $ABA'B'$ . Тогда длина отрезка  $\overline{A'B'}$ , характеризующая проекцию век-

тора оптимального управления во времени, будет равна длине вектора, характеризующего оптимальное управление  $\overline{AB}$  в соответствии с принятым критерием оптимальности.

Второй вариант. Внесем незначительное изменение в идеальную модель. Известно, что в силу влияния различных внешних и внутренних причин в реальных условиях, в управляемой и управляющей системах допускаются отклонения в параметрах управления. Тогда, например, вектор  $\overline{CD}$  под влиянием этих причин получит отклонение и, перемещаясь в пространстве производственных отношений и во времени, преобразуется в вектор  $\overline{C'D'}$ .

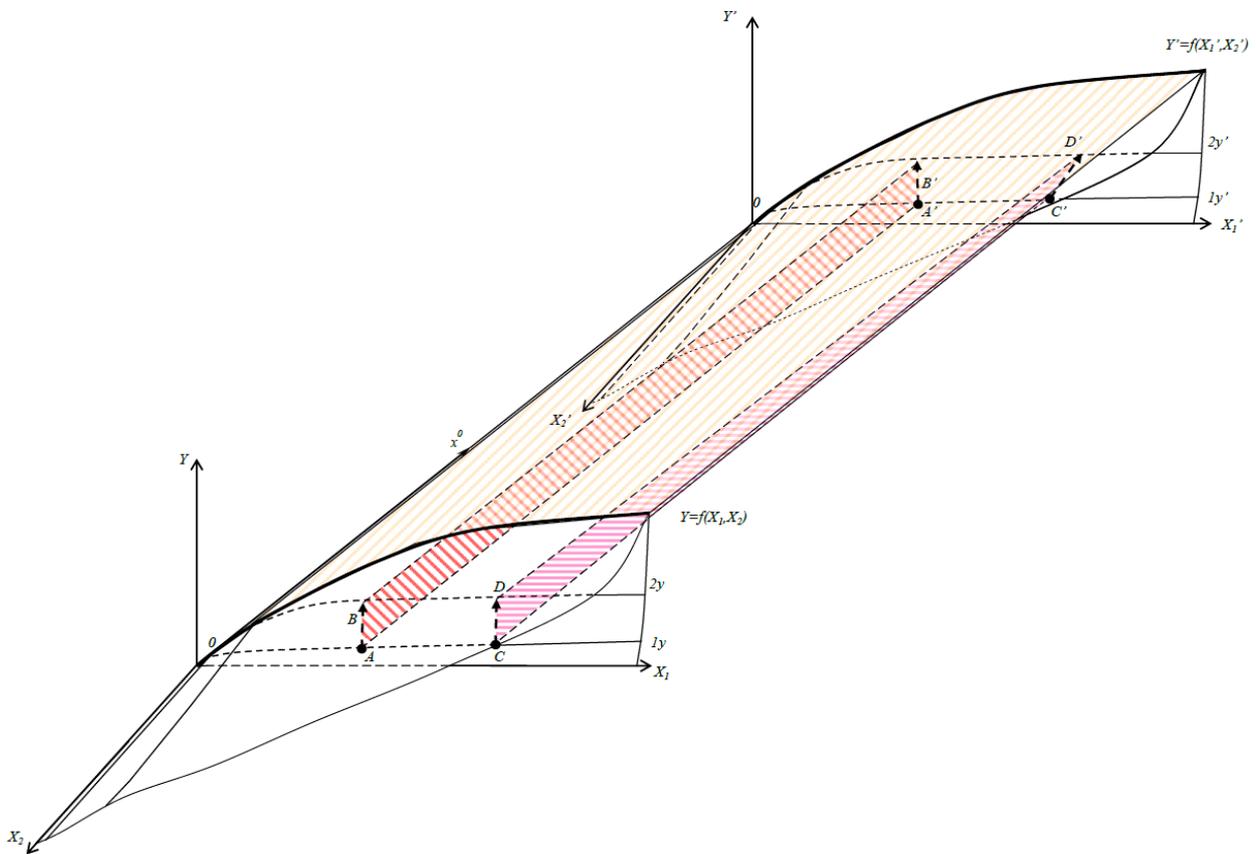


Рис. 3. Временные сечения пространства Минковского для векторов управления  $\overline{AB}$  и  $\overline{CD}$  (преобразования  $\overline{AB}$  в  $\overline{A'B'}$  и  $\overline{CD}$  в  $\overline{C'D'}$ )

Параметры вектора управления  $\overline{CD}$ , построенного по указанному выше критерию оптимальности, получают искажение и его вид может быть представлен, например, как  $\overline{C'D'}$ . Положение  $\overline{C'D'}$  не перпендикулярно  $2Y'$  и, следовательно,  $\overline{CD} \neq \overline{C'D'}$ , и положение  $\overline{C'D'}$  не соответствует принятому критерию оптимальности.

В реальных условиях перемещение вектора управления в пространстве производственных отношений во времени происходит по достаточно сложным направлениям. В силу совокупности факторов, влияющих на выполнение работ, не учтенных проектом, изменяющихся условий, запаздывания в реакции управляющей системы на изменения в процессе производства, в том числе и перерегулирование [13],

и других причин траекторию перемещения вектора управления во времени в общем виде можно представить, например, рядом последовательных синусоид.

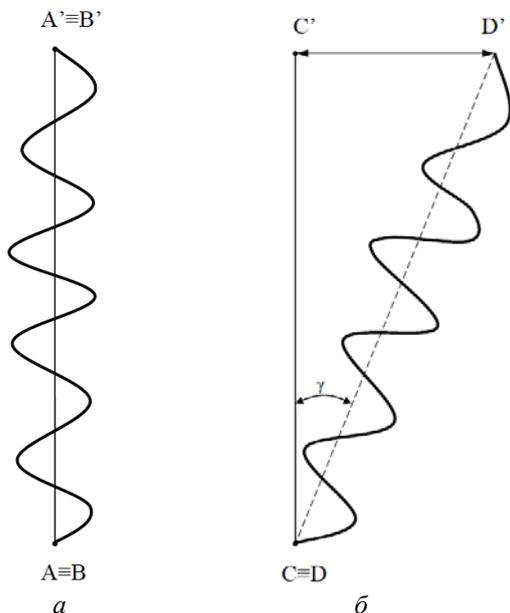


Рис. 4. Проекция траекторий перемещения векторов управления, отражающие реакцию управляющей системы на отклонения в функционировании управляемой системы:

$a$  – вектора  $\overline{AB}$ ;  $b$  – вектора  $\overline{CD}$

Например (рис. 4,  $a$ ), вектор  $\overline{AB}$  под влиянием реальных условий и реакции управляющей системы для компенсации отклонений от заданных параметров совершает колебания относительно заданного направления. Несмотря на эти процессы, управляемой системе удалось выйти на уровень  $2Y$  и  $\overline{A'B'} = \overline{AB}$ , что также видно на рис. 3.

На рис. 4,  $b$  показано, что управляющая система не обеспечила решение задачи управления, связанной с выходом на  $2Y$  по кратчайшему расстоянию в соответствии с принятым нами критерием оптимальности (см. также рис. 3). Между направлениями  $CC'$  и  $DD'$  образовался угол  $\gamma$ , характеризующий качество управления. Чем меньше угол  $\gamma$ , тем успешнее управление, что хорошо видно на рис. 3 и 4,  $b$ .

Наглядное понимание процессов, сопровождающих управление, играет важную роль не только как обладающее большой доказательной силой, но и для понимания и оценки результатов управления.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Казарян В. П. Понятие времени в структуре научного знания / В. П. Казарян. – М. : Изд-во МГУ. – 1980. – 225 с.
2. Боровик, В. С. Роль времени при прогнозировании результатов деятельности предприятия в условиях инновационного развития / В. С. Боровик, Ю. Е. Прокопенко, А. С. Седова // Повышение долговечности транспортных сооружений и безопасности дорожного движения. – Казань, 2008. – С. 53–62.
3. Боброва, Т. В. Моделирование процессов формирования и модернизации производственных структур дорожно-эксплуатационных организаций / Т. В. Боброва, М. С. Перфильев // Вестник МАДИ ГТУ. Вып. 7. – М., 2006. – С. 53–60.
4. Drucker P.F. *Entrepreneurship and innovation*. New York: Harper a. Row, 1985. IX. P. 277.
5. Ярмолинский, В. А. Повышение эффективности использования производственных ресурсов в условиях неопределенности финансирования дорожных объектов / В. А. Ярмолинский, А. М. Хакимов // Вести Тихоокеанского государственного университета. – 2011. – № 1.
6. Боровик, В. С. Прогнозирование точности расчетных параметров производственной функции при решении задач идентификации / В. С. Боровик, Е. Ю. Зайцева // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. Т. 17. № 14(117). С. 72–74.
7. Уитроу, Дж. Естественная философия времени : пер. с англ. / Дж. Уитроу. – 2-е изд., стер. – 2003. – 398 с.
8. Гильберт, Д. Наглядная геометрия / Д. Гильберт, С. Кон-Фоссен. – М. : Наука. – 1981. – С. 6.
9. Минковский, Г. Пространство и время / Г. Минковский. – В кн.: Принцип относительности. – М., 1973.
10. Федоров, В. И. Группа Лоренца / В. И. Федоров. – М. : Наука, 1970. – 384 с.
11. Фащевский, А. Б. Графическое изображение четырехмерного пространства [Электронный ресурс] / А. Б. Фащевский. – Дата обращения 30.12.14. – Режим доступа : <http://khd2.narod.ru/authors/fshvsky/spc4d.htm>
12. Терехов, Л. Л. Производственные функции. Статистика / Л. Л. Терехов. – М., 1974. – С. 53.
13. Михайлов, В. С. Теория управления / В. С. Михайлов. – Киев : Выща школа. Головное издательство, 1988. – 312 с.

УДК 004.032.26 : 658.58 : 65.011.4

*М. В. Денисов, А. В. Кизим, С. В. Давыдова, Д. А. Давыдов, В. А. Камаев*

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЧЕТКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ  
ПРИ ТОиР ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН\***

**Волгоградский государственный технический университет**

kizim@mail.ru

В работе определены проблемы и задачи организации ТОиР на примере дорожно-строительной техники (ДСТ). Проанализированы подходы к обеспечению поддержки принятия решений (ППР) при управлении ТОиР дорожной техники. Определена структура системы организации ремонта и технического обслуживания в дорожном хозяйстве с использованием мультиагентных систем на основе нечетких множеств. Описаны результаты разработки и внедрения модулей комплексной программно-организационной системы ТОиР ДСТ.

*Ключевые слова:* система поддержки, планирование, дорожно-строительная техника, производственное оборудование, техническое обслуживание и ремонт, ТОиР, организация ТОиР, программно-информационная поддержка, нечеткие множества, интеллектуальные агенты, многоагентная система.

*M. V. Denisov, A. V. Kizim, S. V. Davydova, D. A. Davydov, V. A. Kamaev*

**THE USING OF AGENTS AND FUZZY NEURAL NETWORKS FOR MAINTENANCE  
AND REPAIR ON EXAMPLE OF ROAD-BUILDING MACHINES**

**Volgograd State Technical University**

This work is defines the problems and tasks solving of organization of maintenance and repair on example of road-building equipment (RBE). The approaches to decision making support (DMS) in managing the maintenance and repair of road equipment are analyzed. The structure of repair and maintenance organization (MRO) system with the using of agent based on fuzzy sets is determined. Results of elaboration and implementation of modules of a comprehensive RBE Maintenance and repair software-organizational system are described.

Decision making support; road-building equipment; equipment; maintenance and repair; maintenance and repair organization (MRO); program and information support; fuzzy sets; fuzzy logic; intelligent agents; multi-agent system (MAS); fuzzy neural networks.

**Введение**

Модернизация дорожного хозяйства позволяет перейти к новой системе управления, ориентированной на достижение результатов и повышение эффективности функционирования отрасли. Одной из задач реформирования является совершенствование управленческих технологий, которые включают в себя лучшие современные подходы по организации технического обслуживания и ремонта техники (ТОиР) для обеспечения максимального выполнения дорожными ремонтными машинами производственной программы [1]. У многих автодорожных предприятий парк оборудования обновляется в недостаточной мере, что приводит к его износу и выработке ресурса машин. Самым очевидным решением, на первый взгляд, является обновление оборудования для замены отработавшего [2]. Однако экономическое обоснование подобных операций не всегда убедительно. Более перспективной задачей для решения является разработка аппарата для создания системы организации, планирования и поддержки принятия решений

по обслуживанию и ремонту парка дорожно-строительной техники [3].

**Решение по учету знаний**

Поскольку имеется неполная информация о состоянии оборудования, необходимо применить соответствующие методы. Учет ненадежности знаний можно выполнять с использованием разных подходов, самыми известными из которых являются: коэффициенты уверенности, нечеткие множества и нечеткая логика, вероятностный подход на основе теоремы Байеса, модифицированный байесовский подход, теория доказательства (обоснования) Демпстера – Шафера и т. д.

Коэффициент уверенности (КУ) – это неформальная оценка, которую эксперт добавляет к заключению. Формула КУ не позволяет отличить случай противоречащих свидетельств от случая недостаточной информации, что иногда бывает полезно [4, 5].

Нечеткие множества при определении и описании характеристик объектов оперируют не только количественными, но и качественными значениями. Интерпретация качественных значений носит субъективный характер, т. е. они мо-

\* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-01-00798\_а.

гут по-разному трактоваться разными людьми (субъектами). В силу нечеткости (размытости) качественных значений, при необходимости перехода от них к количественным величинам возникают определенные трудности [6–9].

Вероятностный подход на основе теоремы Байеса строится на предположении о том, что, зная частоту наступления событий, можно рассуждать о частоте возникновения последующих комбинаций событий. Априорная (безусловная) вероятность события – это вероятность, присвоенная событию (гипотезе) при отсутствии знаний, обуславливающих его наступление. Такие знания также называют свидетельствами, или основаниями. Априорная вероятность события обозначается  $P$  (событие). Таким образом, даже имея разрозненную информацию можно вычислить апостериорную вероятность.

Наиболее известными способами учета неполноты и немонотонности выводов являются: немонотонная логика Макдермотта и Доула, логика умолчания Рейтера, немонотонная логика Маккарти, системы умолчаний и переопределение атрибутов и методов во фреймовых и объектно-ориентированных моделях и др.

Остановимся кратко на каждом из видов вышеупомянутой логики. Макдермотт и Доул предложили изящный метод, позволяющий избежать заикливания при задании правил немонотонного вывода, а именно неконструктивную характеристику устойчивых множеств взаимно выполнимых формул, немонотонно выводимых из некоего набора посылок. Эти множества – суть решения некоторого уравнения, являющегося неподвижными точками и связанные с отношением выводимости, определяемым данной немонотонной системой. Соответствующая система может рассматриваться как классическая модальная аксиоматическая система, пополненная правилом вывода выполнимых утверждений. Основная ценность немонотонной логики Макдермотта заключается в методе неподвижной точки, используемой для характеристики устойчивых множеств заключений немонотонной системы, а также в применении модальной логики для формирования модифицируемых рассуждений.

Логика Рейтера отличается от модальных подходов одним важным аспектом: вместо расширения логического языка и представления умолчаний в языке, умолчания используются как дополнительные правила вывода, индусируя так называемые расширения классических логических теорий.

Логика умолчаний Рейтера является одной из версий немонотонных рассуждений. В ней немонотонность обусловлена необщезначимостью правил вывода, присущих той или иной прикладной области. Система логики умолчаний представляется теорией с умолчаниями, состоящей из некоторого множества особо выделенных формул и правил вывода. В ней содержатся формулы логики предикатов, представляющие основную информацию о прикладной системе, обрабатываемую в соответствии с имеющимися аксиомами, а также имеются правила умолчаний, отражающие исключения. Система логики умолчаний представляется теорией с умолчаниями (или, подробнее, с правилами с умолчаниями), состоящей из некоторого множества особо выделенных формул и правил вывода. В ней содержатся формулы логики предикатов, представляющие основную информацию о системе, обрабатываемую в соответствии с имеющимися аксиомами. Содержатся также правила умолчаний, отражающие различные утверждения, касающиеся исключений [10].

Джон Маккарти предложил вариант немонотонной логики (логика очерчивания – *circumscription*), которая достаточно эффективно решает задачу влияния фактов на логический вывод. Логика очерчивания используется для формализации предположений здравого смысла, которые должны действовать по отношению к сущностям реального мира, если нет других указаний. В своей первоначальной формализации в логике первого порядка очерчивание сводилось к сужению экстенционалов некоторых предикатов, сводящихся к тому, что все то, о чем нельзя сказать, что оно истинно, ложно [11].

Для организации логических выводов в интеллектуальных системах с неполными знаниями вместо традиционной дедукции применяется абдукция. Абдукцией называется процесс формирования объясняющей гипотезы на основе заданной теории и имеющихся наблюдений (фактов).

Абдуктивные рассуждения [12] составляют процесс получения наиболее вероятных объяснений известных фактов. Абдуктивная логика должна быть немонотонной, поскольку наиболее вероятные объяснения не обязательно являются правильными. Абдукция – познавательная процедура принятия гипотез. Согласно Пирсу, методология науки должна пониматься как взаимодействие абдукции, осуществляю-

щей принятие объяснительных правдоподобных гипотез; индукции, реализующей эмпирическое тестирование выдвинутых гипотез, и дедукции, посредством которой из принятых гипотез выводятся следствия. Абдуктивный вывод представляется как вид автоматизированного правдоподобного рассуждения, при котором следствие необязательно истинно для каждой интерпретации, в которой истинны посылки. Так как при описании состояния техники в основном оперируют качественными показателями, то для ТОиР техники можно применить метод на основе нечетких нейронных сетей.

Напомним, что нечеткая нейронная сеть – это многослойная нейронная сеть, в которой слои выполняют функции элементов системы нечеткого вывода. Нейроны данной сети характеризуется набором параметров, настройка которых производится в процессе обучения, как у обычных нейронных сетей.

Для численной оценки прогнозирования поломки детали разработан алгоритм, реализованный на ЭВМ. Он предусматривает выполнение расчетов с учетом параметров ДСТ. Ставится задача создать программный алгоритм, который позволял бы вычислять время отказа каждой детали ДСТ.

Возможность практической реализации представленного алгоритма может быть ограничена только отсутствием исходной информации и трудоемкостью составления исполняющей программы. В качестве инструментария может выступать Matlab Version 6.0.0.88 Release 12 со встроенным пакетом Fuzzy Logic Toolbox [13].

Сбор и подготовка исходных данных. В качестве исходной информации были использованы данные о временном отказе деталей машины на протяжении года. Входные параметры были заданы интервально, то есть для каждой из них задавались минимальные и максимальные значения (доверительный интервал). При разработке нечеткой нейронной сети для прогнозирования рассматривалось применение следующих алгоритмов нечеткого вывода: алгоритм Мамдани и алгоритм Сугено.

Реализация алгоритма Мамдани включала в себя выполнение следующих этапов: формирование базы правил систем нечеткого вывода, фаззификация входных переменных, агрегирование подусловий в нечетких правилах продукций (для нахождения степени истинности условий каждого из правил нечетких продукций использовались парные нечеткие логические опе-

рации), активизация подзаклучений в нечетких правилах, в данном случае применялся метод min-активизации:

$$\mu'(y) = \min\{c_i, \mu(y)\}, \quad (1)$$

где  $\mu(y)$  – функция принадлежности терма, который является значением выходной переменной, заданной на универсуме  $Y$ , а также аккумуляция заключений нечетких правил продукций, дефаззификация выходных переменных. В данном случае применялся метод относительно среднего центра:

$$y_c = \frac{\sum_i^M \mu(y_{ci}) y_{ci}}{\sum_i \mu(y_{ci})}, \quad (2)$$

где  $y_{ci}$  обозначает центр  $i$ -го нечеткого правила;  $\mu(y_{ci})$  – это значение функции принадлежности, соответствующей этому правилу [13].

Алгоритм Сугено [13, 14] включал в себя выполнение следующих условий: формирование базы правил систем нечеткого вывода, при этом следует заметить, что в базе правил использовались только правила нечетких продукций в виде:

**ПРАВИЛО :**

*Если  $x_1$  есть  $A_1$  и  $x_2$  есть  $A_2$ ,*

$$\text{то } w = \varepsilon_1 a_1 + \varepsilon_2 a_2, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – некоторые весовые коэффициенты.

В алгоритм Сугено также включались: фаззификация входных переменных, агрегирование подусловий в нечетких правилах продукций (для нахождения степени истинности условий всех правил нечетких продукций применялась логическая операция min-конъюнкции); активизация подзаклучений в нечетких правилах продукций осуществляется аналогично алгоритму Мамдани по формуле (2), после чего рассчитываются нечеткие значения выходных переменных каждого правила; аккумуляция заключений нечетких правил продукций, дефаззификация выходных переменных осуществляются с использованием модифицированного метода центра тяжести для одноточечных множеств:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n c_i w_i}{\sum_{i=1}^n c_i}, \quad (4)$$

где  $n$  – общее количество активных правил нечетких продукций.

Впоследствии на основе тестирования сетей, созданных с применением этих алгоритмов, была выбрана нечеткая нейронная сеть, в которой реализуется алгоритм Сугено. Это связано с тем, что нечеткая нейронная сеть с алгоритмом Сугено имеет меньшую ошибку

обучения и ошибку прогнозирования. Для прогнозирования времени отказа детали разрабатывались нечеткие нейронные сети с алгоритмом Сугено.

На рис. 1 показан алгоритм работы нечеткой нейронной сети.

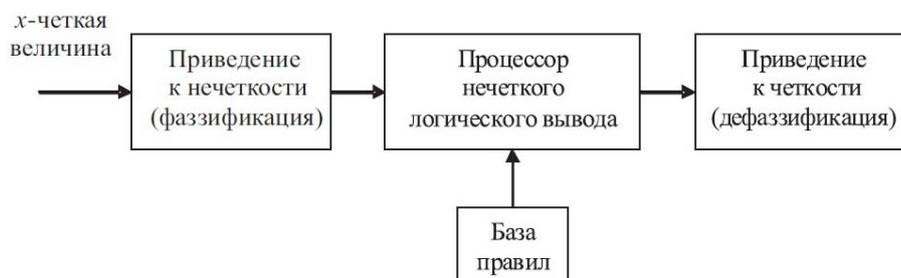


Рис. 1. Алгоритм работы нечеткой нейронной сети

### Модель многоагентной системы ТОиР дорожно-строительных машин

Для мониторинга, организации взаимодействия и упрощения процесса управления объектами схожей структуры используются агенты, объединяемые в мультиагентную систему (МАС) [15]. Модель МАС, изначально разработанная для представления процессов взаимодействия набора объектов схожей структуры, успешно применяется во множестве научных отраслей [16]. Использование этой модели в сферах робототехники и интеллектуального анализа данных привело к выработке концепта агента как объекта, наделенного правами пользователя и способного к совершению схожего спектра задач. Таким образом, агент является сложной системой, которая основана на нечетких множествах.

По причине разнородности и различного территориального расположения дорожно-строительных машин и оборудования является обоснованным применение агентных технологий для решения задач ТОиР [17]. Агенты обладают характеристиками, которые делают их незаменимыми в задачах ТОиР [18]. Способность правильно реагировать на динамически изменяющиеся условия делает многоагентные системы (МАС) гибкими для их использования при обслуживании дорожной техники, так как дорожно-ремонтная машина довольно автономна, и ситуация в ней меняется динамически. Агенты обладают свойствами гибкости, расширяемости и отказоустойчивости. В МАС задачи распределены между агентами, каждый из которых рассматривается как член группы или организации. Распределение задач предполагает назначение ролей каждому из членов груп-

пы, определение меры его ответственности и требований к опыту [19, 20].

При использовании всех методов формирования прогнозов работ по ТОиР оборудования в рамках автоматизированной системы с использованием агентов можно повысить скорость составления и качество планов проведения работ по ТОиР оборудования. В соответствии с этим предлагается следующая модель мультиагентной системы ТОиР [21, 22].

Распределенное решение задач несколькими агентами разбивается на следующие этапы:

- 1) агент-менеджер машины проводит анализ отказов внутренних узлов, а также определение приоритета их ремонта;
- 2) данные задачи распределяются между агентами-исполнителями;
- 3) каждый агент-исполнитель решает свою задачу, подчас также разделяя ее на подзадачи;
- 4) для получения общего результата производится композиция; интеграция частных результатов, соответствующих выделенным задачам;
- 5) агент-менеджер машин используется для определения приоритета ремонта дорожно-строительных машин, на основе шкалы важности, которая строится по методологии RCM [23, 24, 25].

Для агентов к настоящему времени предложено и используется много различных архитектур. Сведения о некоторых из них приведены ниже в таблице.

Для данной задачи выбрана InteRRaP-архитектура МАС. В такой архитектуре подсистема контроля агента многоуровневая, каждый вышележащий уровень работает с более абстрагированной (и агрегированной) информацией [26, 27].

Наименование	Характеристика
InteRRaP	Архитектура для управления агентами в динамической среде
Cougaar	Архитектура агентов и распределенных приложений на основе агентов
JACK	Настраиваемая архитектура агента. Коммерческая, закрытая
3APL	Архитектура для моделирования когнитивного агента
JADEX	Архитектура целенаправленного поведения
LS/TS	Настраиваемая архитектура агента. Коммерческая, закрытая

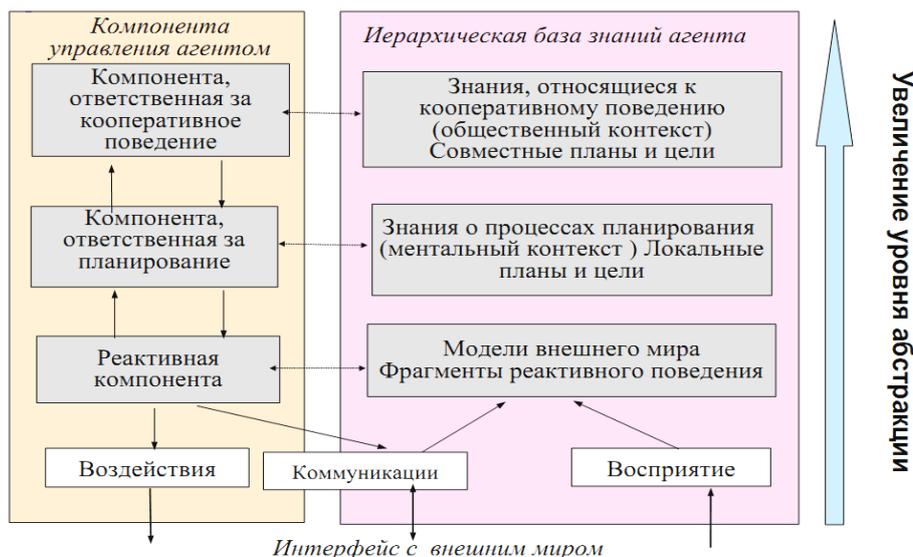


Рис. 2. Архитектура ТОиР дорожной техники на основе мультиагентов

**Выводы и результаты**

Произведен анализ проблем и постановка задач по организации ТОиР техники в дорожном хозяйстве. Определены базовые методологии ТОиР для создания системы организации ТОиР в дорожном хозяйстве (обслуживание по фактическому состоянию, планово-предупредительное обслуживание и RCM). В рамках работы предложен подход к обеспечению поддержки принятия решений (ППР) при управлении ТОиР дорожной техники на основе адаптированного и модернизированного метода RCM2. Показано, что затраты на ТОиР равны сумме эксплуатационных издержек и производственных потерь.

Определена структура системы организации ремонта и технического обслуживания в дорожном хозяйстве с использованием онтологий и мультиагентных систем. Показаны решения по применению онтологий для задачи управления знаниями по организации ТОиР. Произведено обоснование применения агентных технологий для решения задач ТОиР. Разработаны

состав агентов и модель системы планирования ТОиР на основе агентов как многоагентная система. Построена структура интеллектуальных агентов, соответствующая модели. Для задач планирования ТОиР используется метод Case-Based Reasoning для вывода на онтологии [23].

Внедрение системы идет на базе регионального государственного предприятия по строительству и ремонту дорог. Разработка и внедрение комплексной программно-организационной системы производится поэтапно. На данный момент внедрена с экономическим эффектом система автоматизированного учета дорожных работ предприятия и производится сбор информации о проведенных работах, которая учитывается в прототипе системы ИСППР.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Андрейчиков, А. В. Интеллектуальные информационные системы : учеб. / А. В. Андрейчиков, О. Н. Андрейчикова. – М. : Финансы и статистика, 2004. – 424 с.
2. Матохина, А. В. Automation of Customer Needs Forecasting / А. В. Матохина, А. В. Кизим, Ю. Ф. Воронин // World Applied Sciences Journal (WASJ). – 2013. – Vol. 24,

Spec. Issue 24 : Information Technologies in Modern Industry, Education & Society. – P. 126–132.

3. *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 технических системах»; вып. 6). – С. 118–121.
4. Экспертные системы. Принципы работы и примеры / под ред. Р. Форсайта. – М. : Мир, 1987. – 224 с.
5. *Люггер, Джордж Ф.* Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем / Джордж Ф. Люггер. – М. : Вильямс, 2004. – 864 с.
6. *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.
7. Представление и использование знаний / под ред. Х. Уэно, М. Исидзука. – М. : Мир, 1989. – 220 с.
8. Базы данных. Интеллектуальная обработка информации / В. В. Корнеев, А. Ф. Гареев, С. В. Васютин, В. В. Райх. – М. : Нолидж, 2001. – 496 с.
9. *Гаврилова, Т. А.* Базы знаний интеллектуальных систем / Т. А. Гаврилова, В. Ф. Хорошевский – СПб. : Питер, 2000. – 384 с.
10. Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах / В. Н. Вагин, Е. Ю. Головина, А. А. Загорская, М. В. Фомина. – М. : Физматлит, 2004. – 704 с.
11. *Калиниченко, Л. А.* Анализ мотивации, целей и подходов проекта унификации языков на правилах. [Электронный ресурс] / Л. А. Калиниченко, С. А. Ступников; ИПИ РАН. – Режим доступа : <http://synthesis.ipi.ac.ru/synthesis/publications/11ont-uni/11ont-uni.pdf>
12. Абдукция [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://iph.ras.ru/page54852159.htm>, Институт Философии РАН.
13. *Леоненков, А. В.* Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzy TECH / А. В. Леоненков. – СПб. : БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.
14. Прикладные нечеткие системы : пер. с яп. / под ред. М. Сугено [и др.]. – М. : Мир, 1993. – 368 с.
15. *Камаев, В. А.* Интеллектуальные системы автоматизации управления энергосбережением / В. А. Камаев, М. В. Щербаков, А. Бребельс // Открытое образование. – 2011. – № 2. – С. 227–231.
16. *Кизим, А. В.* Генерация интеллектуальных агентов для задач поддержки технического обслуживания и ремонта / А. В. Кизим, А. Д. Кравец, А. Г. Кравец // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – С. 131–134.
17. *Кизим, А. В.* Исследование и разработка методики автоматизации ремонтных работ предприятия / А. В. Кизим, Н. А. Линева // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 2(40) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – Вып. 4. – С. 43–45.
18. 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.
19. *Мельник, В. Ю.* Поддержка принятия решения при формировании очередей работ с помощью средств автоматизации планирования технического обслуживания и ремонта оборудования / В. Ю. Мельник, А. В. Кизим, В. А. Камаев // 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. 107–110.
20. *Денисов, М. В.* Поддержка принятия решений при ведении дорожных работ и мониторинге техники / М. В. Денисов, А. В. Кизим // Сборник научных трудов Sworld по материалам Международной научно-практической конференции. – 2012. – Т. 14. – № 4. – С. 56–60.
21. *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.
22. *Mangina, E. E.* (2001a). «COMMAS (Condition Monitoring Multi Agent System)» / E. E. Mangina, S. D. J. McArthur and J. R. McDonald // Journal of Autonomous Agents and Multi-agent Systems, Vol. 4, pp 279–281.
23. *Sankar, K.* Foundations of Soft Case-Based Reasoning / K. Sankar, Pal Simon, C. K. Shiu. – New Jersey: Wiley, 2004, ISBN: 978-0-471-64466-8.
24. *Denisov, M. V.* Organization of the Repair and Maintenance in Road Sector with Ontologies and Multi-agent Systems / M. V. Denisov, V. A. Kamaev, A. V. Kizim // Original Research Article Procedia Technology, Volume 9, 2013, pp 819–825.
25. *Kizim, A. V.* Establishing the Maintenance and Repair Body of Knowledge: Comprehensive Approach to Ensuring Equipment Maintenance and Repair Organization Efficiency / A. V. Kizim // Original Research Article Procedia Technology, Volume 9, 2013, pp 812–818.
26. Repair and maintenance organization with the use of ontologies and multi-agent systems on the road sector example / M. V. Denisov, A. V. Kizim, A. V. Matokhina, N. P. Sadovnikova // World Applied Sciences Journal, 2013. – 24 (24), pp. 31–36.
27. *Sadovnikova, N.* Scenario forecasting of sustainable urban development based on cognitive model / N. Sadovnikova, D. Parygin, E. Gnedkova, A. Kravets, A. Kizim, S. Ukustov // Proceedings of the IADIS International Conference ICT, Society and Human Beings 2013, Proceedings of the IADIS International Conference e-Commerce 2013, pp. 115–119.

УДК 004.891.2

*М. А. Дыков<sup>1</sup>, А. Г. Кравец<sup>1</sup>, Д. М. Коробкин<sup>1</sup>, С. М. Укустов<sup>1</sup>, М. Ю. Сальников<sup>2</sup>***АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ  
ПРИ ПАТЕНТНОЙ ЭКСПЕРТИЗЕ\***<sup>1</sup>Волгоградский государственный технический университет<sup>2</sup>Федеральный институт промышленной собственности

cad@vstu.ru

otd81ch@rupto.ru

В данной работе представлена автоматизированная система принятия решений при патентной экспертизе, предназначенная для сокращения времени на проведение поиска по уровню техники и на принятие решения об одобрении или об отказе на выдачу патента. В основе работы данной системы лежит трехступенчатая методика, состоящая из предобработки, статистического и семантического анализов. На этапе статистического анализа был применен метод, основанный на множественных моделях LDA, который дает лучшее значение recall по сравнению с существующими методами поиска по уровню техники. На этапе семантического анализа был применен метод разбиения сложного предложения на более простые, а также метод упрощения семантической сети. Применение данных методов позволило более точно определить пересечения семантических сетей при вычислении степени новизны патентной заявки. Разработанные методы были адаптированы для работы со сверхбольшими объемами текстов. В работе представлена архитектура масштабируемой автоматизированной системы. Тестирование разработанных методов показало их большую эффективность по сравнению с существующими.

*Ключевые слова:* поиск по уровню техники, патентная экспертиза, семантический анализ, тематическое моделирование, обработка естественного языка, большие данные.

*М. А. Dykov<sup>1</sup>, А. G. Kravets<sup>1</sup>, D. M. Korobkin<sup>1</sup>, S. M. Ukustov<sup>1</sup>, M. Yu. Salnikov<sup>2</sup>***AUTOMATED DECISION MAKING SYSTEM FOR THE PATENT EXAMINATION**<sup>1</sup>Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia<sup>2</sup>Federal institute of industrial property, Moscow, Russia

We developed an automated decision making system for the patent examination task, which is designed to reduce the time that an expert spends for the prior-art search and for the decision making if the patent should be granted or not. We proposed a three steps methodology to solve this task, consists of preprocessing step, statistical analysis and semantic analysis. On the step of statistical analysis we developed a method based on multiple LDA models, which allows to achieve better recall than existing approaches of the prior-art search. On the step of semantic analysis we applied a new method for the decomposition of the complex sentence into several simple sentences and a method for the semantic network simplification. Applying of these methods allowed us to increase the accuracy of semantic networks intersections detection for the task of the application novelty calculation. Developed methods were adopted to deal with large amount of text data. We proposed the architecture of the scalable automated system. The experiments of proposed methods showed that they perform better than existing.

*Keywords:* prior-art patent search, patent examination, semantic analysis, topic modeling, natural language processing, big data.

**Введение**

В настоящее время по всему миру выдано более 70 миллионов патентов. За 2012 год на экспертизу поступило 2350 тысяч заявок, и было выдано 1300 тысяч патентов, что на 9,2 % больше чем в 2011 году. В связи с ростом объема поступающих заявок на патенты возрастает и нагрузка на патентные офисы, проводящие экспертизу заявочных материалов. Иногда срок экспертизы заявок достигает нескольких лет, что вредит бизнесу. На экспертизу одной заявки эксперт порой тратит десятки часов и в ходе экспертизы просматривает тысячи существующих патентов [1]. В связи с этим возникает не-

обходимость в разработке различных систем поддержки принятия решений, которые бы ускорили процесс патентной экспертизы.

Одной из основных задач, возникающих в ходе патентной экспертизы, является задача поиска по уровню техники – поиска существующих патентов, которые могли бы потенциально опровергнуть новизну заявки.

Многие ученые занимаются вопросом автоматизации поиска по уровню техники. Были предложены методы, основанные на машинном обучении [2]; анализе синтаксических отношений [3]; анализе графов цитат и классов патентов [4]; формировании поискового запроса из заявки и использовании функции ранжирования BM25 [5]. Однако все существующие методы не отражают значительного повышения показателей recall и precision по сравнению с тра-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке со стороны Минобрнауки РФ в рамках базовой части (проект 2586 задания № 2014/16).

диционным методом, основанном на сравнении векторов TF\*IDF [6].

В настоящее время существует ряд коммерческих систем, созданных с целью помощи эксперту при патентной экспертизе: ThomsonReuters (ThomsonInnovation), Questel (Orbit), GridLogics (PatSeer), VantagePoint, STN AnalyzePlus, STN Anavist, InventionMachine (Knowlegist, Goldfire) и др. Однако все эти системы являются поисковыми системами и не реализуют функционал по определению патентоспособности заявки.

Для улучшения качества автоматизации поиска по уровню техники и автоматизации задачи принятия решения о патентоспособности заявки были разработаны собственные методы. На их основе была реализована автоматизированная система поддержки принятия решений при патентной экспертизе.

#### Методика

Для решения задачи автоматизации принятия решений при патентной экспертизе была разработана трехступенчатая методика.

Для существующих массивов патентов производится их предобработка. Существующие базы российских и американских патентов были взяты из открытых источников. В общей сложности было обработано 2 миллиона российских и 10 миллионов американских патентов.

На первом этапе предобработки производится приведение существующих баз к разработанному единообразному формату. В процессе приведения к единообразному формату производится сопоставление классификаций US и IPC, далее – выделение частей речи. Затем, на основании классов патентов, производится разбиение множества патентов на подмножества для обучения независимых моделей LDA. В ходе обучения моделей для каждого патента строится вектор(ы) его принадлежности к топикам. В завершение, производится разбиение пунктов формулы патентов на простые предложения и построение на их основе семантических сетей с последующим упрощением.

Для поступившей заявки на первом этапе производится ее предобработка по аналогии с предобработкой существующих баз патентов.

На втором этапе осуществляется выбор моделей LDA и расчет принадлежности поступившей заявки к топикам каждой из моделей. Далее производится расчет близости между за-

явкой и существующими патентами, полученными на первом этапе, на основании сходства между их распределениями по топикам. На третий этап поступает множество наиболее близких патентов.

На третьем этапе производится построение семантической сети формул заявки и ее сравнение с семантическими сетями существующих патентов из полученного множества. В результате данного сравнения производится выбор существующих патентов, которые могли бы опровергнуть заявку.

#### Предобработка существующих массивов патентов

В ходе предобработки существующих массивов для дальнейшей обработки были выделены следующие поля: номер патента, классы патента, дата публикации патента, список цитированных патентов, название, аннотация, описание и формула. Имеющиеся базы американских и российских патентов были представлены в трех различных форматах. Все они были приведены к единообразному формату. В ходе исследования существующих массивов было выявлено, что американские патенты старше 1980 года и российские старше 1990 имеют плохую грамматику, так как они приводились в электронный вид путем применения методов автоматического распознавания текстов отсканированных изображений. Большое количество грамматических ошибок значительно снижает качество статистического и семантического анализа. Чтобы решить сложившуюся проблему, были проведены исследования о целесообразности поиска по уровню техники среди старых патентов. На основании имеющихся массивов патентов был построен ориентированный граф цитирований:

$$G = (V, A)$$

где  $V$  – множество вершин графа; вершиной графа является патент;  $A$  – множество дуг графа. Наличие дуги, соединяющей вершины  $V_i$  и  $V_j$  означает цитирование патента  $j$  патентом  $i$ .

На данном графе был произведен анализ разности дат публикации между патентами и их цитатами для патентов за последние три года. Результат анализа приведен в табл. 1.

Таким образом, отказ от обработки русской базы патентов старше 1990 года и американской старше 1980 года ведет к потере 9 и 4 % потенциально релевантных патентов соответственно при поиске по уровню техники.

Таблица 1

Результаты анализа разности дат публикации

Максимальная разница между датами публикации патента и его цитаты (лет)	Процент всех цитат, удовлетворяющих максимальной разнице между датами публикации
10	59
15	77
20	86
25	91
30	94
35	96

В ходе предобработки для статистического анализа из текстов патентов были исключены 100 наиболее часто встречающихся слов и слова, которые встречались не более одного раза. В подавляющем большинстве случаев слова, которые встречаются только один раз, являются словами-ошибками. При этом они составляют 90 % всех слов в словаре. Однако в очень редких случаях среди них встречаются специфические термины. С одной стороны, их исключение ведет в некоторых случаях к невозможности найти патент, релевантный заявке. Но уменьшение пространства термов на 90 % ведет к значительному улучшению точности и времени работы статистических алгоритмов, что компенсирует данные редкие случаи.

В ходе предобработки был произведен морфологический анализ текстов патентов. Данный анализ необходим для семантического анализа, а также для выбора множества термов для статистического анализа. Для морфологического анализа были выбраны существующие программные решения: StanfordPOSTagger для английского языка и TreeTagger для русского [7, 8]. Данные инструменты относятся к свободному программному обеспечению и обладают одними из наилучших показателей точности и скорости при морфологическом анализе. В ходе морфологического анализа каждому слову в тексте патента сопоставляется его базовая форма и часть речи.

**Метод поиска по уровню техники**

Для решения задачи поиска по уровню техники было решено использовать метод Латентного Размещения Дирихле (LDA), один из методов тематического моделирования [9]. Данный метод позволяет представить документы и термы в виде распределения принадлежности к латентным кластерам – топикам:

$$D = (P_1, P_2, P_3 \dots P_k),$$

где  $D$  – документ;  $P_i$  – принадлежность документа к топику  $i$ ;  $k$  – количество топиков.

$$W = (P_1, P_2, P_3 \dots P_k),$$

где  $W$  – терм;  $P_i$  – принадлежность терма к топику  $i$ .

Применение LDA для нахождения сходства между текстовыми документами доказало свою эффективность. Однако данный метод имеет вычислительную сложность  $O(mnk)$  и требует  $O(mn)$  памяти [10]. Здесь  $m$  – количество документов;  $n$  – среднее количество термов в документе. Данная сложность не позволяет эффективно использовать LDA для полного массива патентов. Для решения данной проблемы весь массив патентов был разбит на подмножества документов по классам:

$$S = (S_{c1}, S_{c2}, S_{c3} \dots S_{cnc}),$$

где  $S$  – полный массив патентов;  $S_{ci}$  – подмножество патентов, принадлежащих  $i$  классу;  $nc$  – количество классов патентов.

Для российской базы  $nc = 141$ , для американской – 984. Таким образом, средний размер класса составляет 10 000 патентов, что позволяет эффективно обучать модели LDA. В ходе экспериментов было установлено, что наиболее эффективными параметрами обучения моделей LDA являются: 500 топиков и 2000 итераций. Обучение моделей LDA производится на всем существующем массиве патентов. Для поступившей заявки методика поиска релевантных патентов состоит из следующих шагов:

- 1) определение классов патентов, на которые может ссылаться заявка. К данным классам относятся классы заявки, а также классы, на которые могут ссылаться патенты тех же классов, что и заявка. Данный расчет производится на основании графа цитирований;
- 2) вычисление распределений по топикам текста заявки с использованием моделей LDA, относящихся к взятым классам;
- 3) вычисление схожести между распределениями заявки и распределениями существующих патентов;
- 4) ранжирование итогового списка патентов на основании схожести распределений.

В качестве фреймворка для обучения моделей LDA было решено использовать Mallet [11]. Данный фреймворк обладает высокой скоростью обучения и имеет возможность распределенного обучения LDA на больших объемах текстовых данных.

**Метод построения и вычисления степени пересечения семантических сетей**

Решение о том, принимать или отклонять поступившую заявку, выполнялось на основа-

нии степени пересечения семантических сетей заявки с другими патентами. На рис. 1 изображен пример пересечения частей семантических сетей различных патентов.

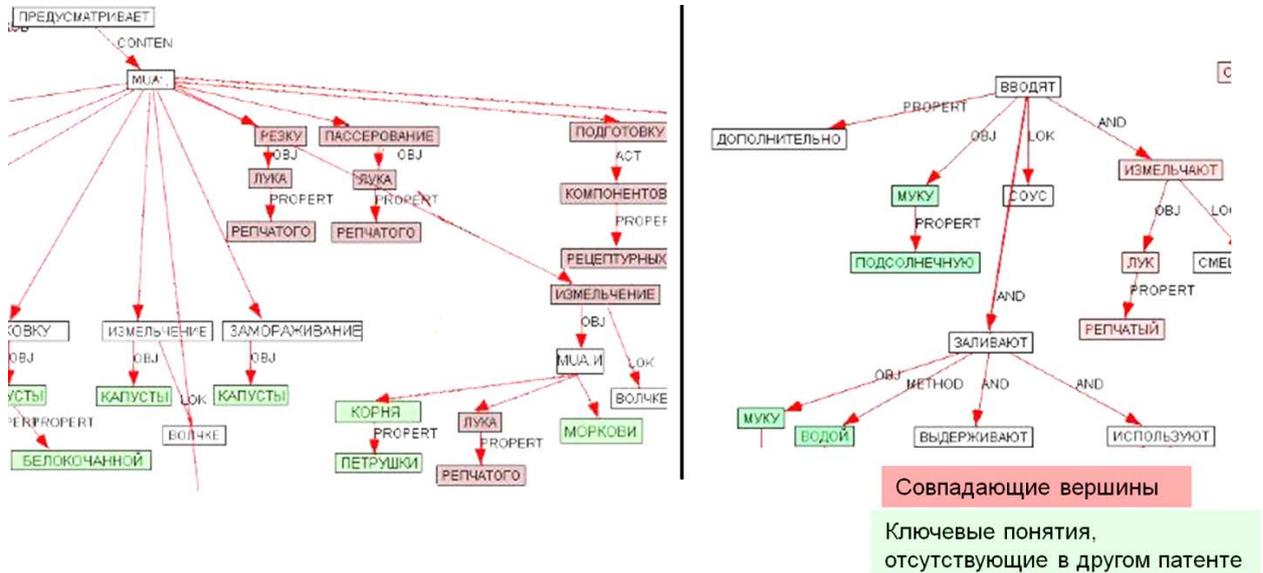


Рис. 1. Пример пересечения семантических сетей двух патентов

Семантическая сеть патента строится на основании формулы патента. Ее можно представить в виде набора семантических деревьев, по одному дереву для каждого предложения:

$$SN = \{ST_1, ST_2, ST_3 \dots ST_{ns}\},$$

где  $ST_i$  – семантическое дерево, соответствующее  $i$ -му предложению в формуле патента;  $ns$  – количество предложений в формуле патента. Семантическое дерево можно предста-

вить в виде набора вершин и связей между ними:

$$ST = (Words, Relations),$$

где *Words* – вершины, которые являются словами в предложении; *Relations* – семантические отношения, в которые вступают слова в предложении.

Введем понятия степени пересечения семантических деревьев:

$$Interaction(ST_k, ST_j) = \sum_{i=1}^{nr} IsCommon(Words_i, Relations_{ij}, Words_j);$$

$$IsCommon(Words_i, Relations_{ij}, Words_j) = \begin{cases} 1, & Relations_{ij}(Words_i, Words_j) \in ST_k \\ & Relations_{ij}(Words_i, Words_j) \in ST_j \\ 0, & x \geq 0 \end{cases}$$

где *IsCommon* – функция, определяющая, является ли триплет, состоящий из пары слов и отношения между ними, общим для обоих деревьев;  $nr$  – количество семантических отношений в дереве.

Таким образом, схожесть между патентами можно представить следующей формулой:

$$Similarity = \sum_{i=1}^{ns} \max_j interaction(ST_i, ST_j) / nr_i$$

Экспериментальным путем было выявлено, что при значении *Similarity* > 0,8 хотя бы для одного из существующих патентов заявку следует отвергнуть.

Текст пунктов патентных формул обладает одной особенностью, которая мешает эффективно применять существующие решения построения семантических сетей. Данная особенность заключается в том, что пункты формулы патента пишутся одним предложением, которое

иногда включает сотни слов. Для решения данной проблемы был разработан алгоритм разбиения сложных предложений формулы патента на простые.

Предложения разбиваются, например, по следующим словам: «перед», «после», «чей», «чья», «который», «которыми», «которая», «причем», «включающий», «предусматривающий», «обеспечивающий», «отличающийся», «путем», «но», «а» и т. д.

При выборе средств для построения семантических сетей, руководствуясь предыдущим опытом [12, 13], для этого случая выбор пал на Malt-Parser [14]. Данное решение обладает высокой точностью, является свободным программным обеспечением и имеет обученные корпуса для различных языков, в том числе и для русского.

После построения семантические сети были упрощены путем исключения из них некоторых вспомогательных семантических отношений, а также зависимых слов, которые вступают в данные отношения: aux, auxpass, cop, punct,

det, predet, cc, quantmod, tmod, prep, prt. Описание данных отношений представлено в работе Marneffe [15].

### Автоматизированная система принятия решений при патентной экспертизе

Для реализации автоматизированной системы принятия решений при патентной экспертизе было решено использовать облачные технологии. Данный выбор обусловлен следующими достоинствами облачных систем:

- возможность динамически масштабировать используемые вычислительные ресурсы в зависимости от загрузки системы;
- безопасность данных;
- возможность доступа к системе из любого места через Интернет.

В качестве облачного провайдера был выбран Amazon, так как он предоставляет требуемый функционал и обладает одними из лучших цен на рынке облачных услуг.

На рис. 2 представлена архитектура системы.

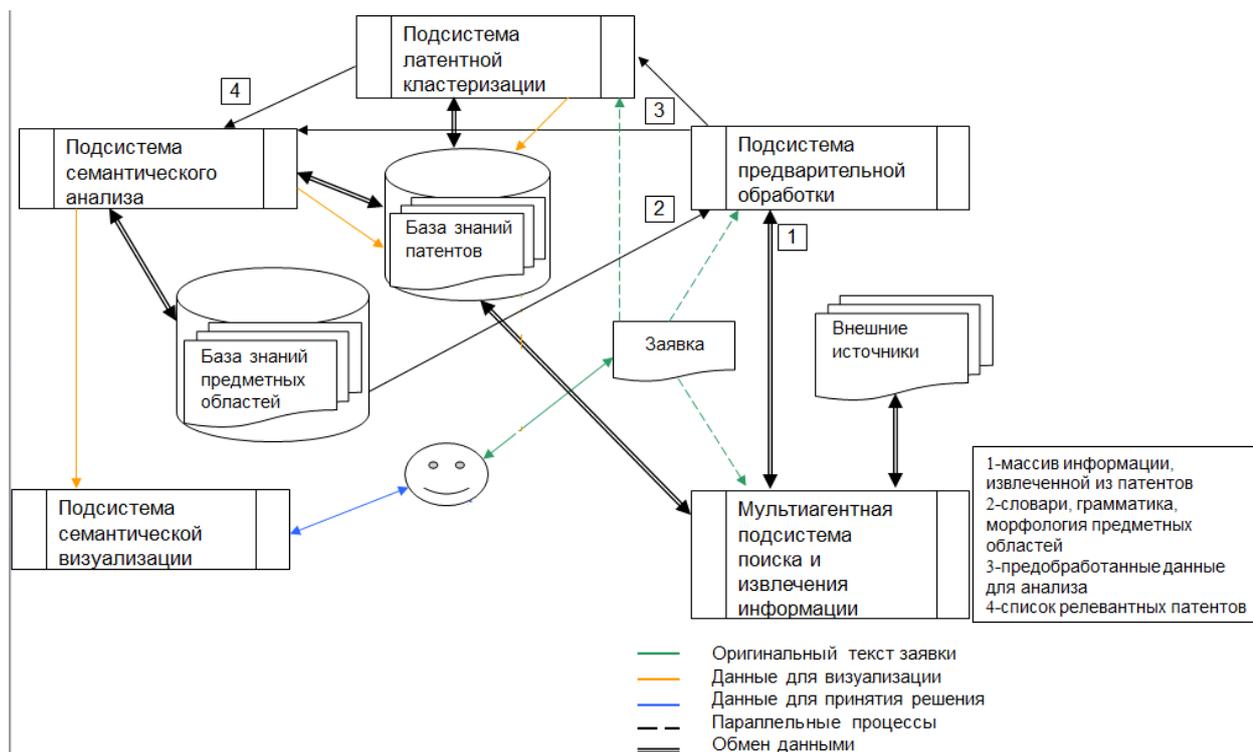


Рис. 2. Архитектура автоматизированной системы принятия решений при патентной экспертизе

В настоящее время в систему загружены базы русских и американских патентов. Мультиагентная система поиска и извлечения информации предназначена для извлечения недостающей информации о патентах, которых нет в базе, из внешних открытых источников.

### Эксперименты и заключение

Разработанная автоматизированная система принятия решения при патентной экспертизе обладает следующими характеристиками:

- доступные патенты: американские с 1980, русские с 1990 года;

- время поиска по уровню техники по введенной заявке: 3 секунды;
- время принятия системой решения о выдаче патента на основании сравнения семантических сетей: 10 секунд.

1. A fuel cell system comprising a plurality of fuel cells, in particular in the form of low temperature fuel cells, which are assembled into a stack and are adapted to permit oxygen or an oxygen containing gas to react with hydrogen or a hydrogen containing gas to generate electricity and produce first exhaust gases containing residual oxygen and second exhaust gases containing residual hydrogen, said system comprising: a cathode side with a cathode inlet for receiving said oxygen or oxygen containing gas and a cathode outlet for said first exhaust gases; an anode side with an anode inlet for receiving said hydrogen or hydrogen containing gas, an anode outlet for said second exhaust

Рис. 3. Пример визуализации пересечения текстов заявки и патента

Для оценки качества метода поиска по уровню техники было взято подмножество пищевых патентов. В качестве методики оценки качества использовалась методика, которая применяется во время ежегодных соревнований по поиску по уровню техники в рамках CLEF-IP [16]. В табл. 2 представлены показатели recall для различного количества наиболее схожих с заявкой патентов, полученных в результате применения метода. Разработанный метод показан в сравнении с методом, основанным на TF\*IDF.

Таблица 2

Сравнение точности методов поиска по уровню техники

	Recall100	Recall200	Recall500	Recall1000
Разработанный метод	61 %	68 %	77 %	86 %
TF*IDF	29 %	39 %	52 %	60 %

Как видно из таблицы, разработанный метод поиска по уровню техники показывает значительные преимущества по сравнению с базовым методом, основанным на TF\*IDF.

Разработанная система позволит значительно уменьшить время на проведение патентной экспертизы. В дальнейшем планируется улучшить метод поиска по уровню техники и модернизировать критерий принятия решения о выдаче патента.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. WIPO Economics & Statistics Series. 2013 World Intellectual Property Indicators [Электронный ресурс]. – [2013]. – Режим доступа : <http://www.wipo.int/export/sites/www/>

На рис. 3 изображен пример визуализации пересечений текстов патента и заявки, полученных в результате анализа пересечений семантических сетей.

freepublications/en/intproperty/941/wipo\_pub\_941\_2013.pdfhttp://www.wipo.int/export/sites/www/freepublications/en/intproperty/941/wipo\_pub\_941\_2013.pdf

2. Xiaobing Xueи W. Bruce Croft. Automatic query generation for patent search. Proceedings of the 18th ACM conference on Information and knowledge management: pp. 2037–2040, New York, NY, USA 2009

3. Eva D'hondt, Suzan Verberne, WouterAlink, and Roberto Cornacchia. Combining Document Representations for Prior-art Retrieval. CLEF Notebook Papers/Labs/Workshop, (2011), 2011.

4. ManishaVerma, and VasudevaVarma. Exploring Keyphrase Extraction and IPC Classification Vectors for Prior Art Search. CLEF Notebook Papers/Labs/Workshop, (2011), 2011.

5. Robertson, S. E., Walker, S., Beaulieu, M. M., Gattford, M., & Payne, A. Okapi at TREC-4. In Proceedings of the 4th Text REtrieval Conference (TREC-4): pp. 73–96, 1996.

6. Florina Piroi, Mihai Lupu, Allan Hanbury, Veronika-Zenz. CLEF-IP 2011: Retrieval in the Intellectual Property Domain. In proceeding of: CLEF 2011 Labs and Workshop, Notebook Papers: pp. 19–22, 2011, Amsterdam, The Netherlands.

7. Helmut Schmid. Improvements In Part-of-Speech Tagging With an Application To German. Proceedings of the ACL SIGDAT-Workshop, 1995.

8. Kristina Toutanova and Christopher D. Manning. Enriching the knowledge sources used in a maximum entropy part-of-speech tagger. Proceedings of the 2000 Joint SIGDAT conference on Empirical methods in natural language processing and very large corpora: held in conjunction with the 38th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. – Volume 13: pp. 63–70, Stroudsburg, PA, USA, 2000.

9. David M. Blei, Andrew Y. Ng and Michael I. Jordan. Latent Dirichlet Allocation. The Journal of Machine Learning Research – Volume 3: pp. 993–1022, 2003.

10. David Blei. The computational complexity of LDA [Электронный ресурс]. – 2008. – Режим доступа : <https://lists.cs.princeton.edu/pipermail/topic-models/2008-April/000211.html>

11. DavidMimno. Machine Learning withMALLET [Электронный ресурс]. – 2013. – Режим доступа : <http://mallet.cs.umass.edu/mallet-tutorial.pdf>

12. Mikhail A. Dykov and Pavel N. Vorobkalov. "How-to" Questions Answering Using Relations-based Summarization. *WorldAppliedSciencesJournal* 24: pp. 231–237, 2013.

13. Mikhail A. Dykov and Pavel N. Vorobkalov. Twitter Trends Detection by Identifying Grammatical Relations. *Proceedings of the Twenty-Sixth International Florida Artificial Intelligence Research Society Conference*: pp. 259–262, 2013.

14. Johan Hall. *MaltParser: An Architecture for Labeled*

*Inductive Dependency Parsing*. Licentiatethesis, VäxjöUniversity, 2006.

15. Marie-Catherine de Marneffe and Christopher D. Manning. *Stanford typed dependencies manual* [Электронный ресурс]. – 2008. – Режим доступа : [http://nlp.stanford.edu/downloads/dependencies\\_manual.pdf](http://nlp.stanford.edu/downloads/dependencies_manual.pdf)

16. CLEF-IP [Электронный ресурс]. – 2013. – Режим доступа : <http://ifs.tuwien.ac.at/~clef-ip/>

УДК: 004.82

*Н. В. Ле, В. А. Камаев, Д. П. Панченко, О. А. Трушкина*

### **МОДЕЛЬ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ ПРИ СОЗДАНИИ МЕДИЦИНСКОЙ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ\***

**Волгоградский государственный технический университет**

*nvien.vstu@gmail.com, kamaev@cad.vstu.ru, panchenkodp@gmail.com, vamp@volgograd.ru*

В данной работе рассмотрены основные модели представления знаний, выполнен анализ их достоинств и недостатков. Предложен подход к программной реализации модели представления медицинских знаний при создании медицинской экспертной системы дифференциальной диагностики.

*Ключевые слова:* база знаний, медицина, продукционные правила, фреймовое представление знаний, нечеткая логика.

*N. V. Le, V. A. Kamaev, D. P. Panchenko, O. A. Trushkina*

### **A KNOWLEDGE REPRESENTATION MODEL FOR THE DEVELOPMENT OF MEDICAL EXPERT SYSTEM ON DIFFERENTIAL DIAGNOSIS**

**Volgograd State Technical University**

This paper presents basic models of knowledge representation, their advantages and disadvantages. An approach to implementing medical knowledge representation model for the development of medical expert system on differential diagnosis is proposed.

*Keywords:* knowledge base, medical, product rule, frame-based representation, fuzzy logic.

#### **Введение**

В настоящее время необходимость применения современных информационных технологий в здравоохранении не вызывает сомнений, особенно если это касается создания системы дифференциальной медицинской диагностики. Существуют различные подходы создания медицинской системы диагностики, одним из которых является создание экспертной системы. В системах с базами знаний, в том числе и в экспертных системах, представление знаний является фундаментальным понятием, а решение о выборе метода представления знаний оказывает огромное влияние на любую их составную часть. Обычно выделяют четыре группы способов представления знаний: логическое представление; сетевое представление; иерархическое представление; процедурное представление [1].

В разделе медицинской диагностики «Симптомокомплекс» содержатся сведения о совокупности симптомов, являющихся специфичными для конкретного заболевания и их коэффициентов специфичностей [2]. Для описания симптомокомплекса обычно используется продукционное правило, в котором левая часть содержит условия для симптомов в симптомокомплексе, а правая – заключение для заболевания. Состояние области медицинской диагностики определяется результирующими оценками всех заболеваний на основе поступающих фактов проявления симптомов. При подтверждении новых симптомов срабатывают некоторые продукционные правила симптомокомплексов. Таким образом, состояние области диагностики может обновиться.

Состояния области диагностики заболеваний образуют граф состояний. В узлах графа расположены состояния области диагностики, а дуги задают продукционные правила, связывающие какое-либо заболевание с симптомами всего симптомокомплекса. Таким образом, ме-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке со стороны Минобрнауки России в рамках базовой части (проект 2586 задания № 2014/16)

дицинские знания можно разделить на два типа: статические знания о текущем состоянии области диагностики; динамические знания о переходе между состояниями [3].

*Целью работы* является обоснование построения модели представления знаний для описания состояний области диагностики при создании медицинской экспертной системы дифференциальной диагностики (МЭСДД).

### 1. Обзор представлений медицинских знаний

Обоснование продукционно-фреймового представления медицинских знаний. Логическое представление применимо в основном в исследовательских «игрушечных» системах, так как предъявляются очень высокие требования и ограничения к предметной области. При использовании сетевого представления велика вероятность возникновения большой проблемы – невозможность представления процедурных знаний. Поэтому при разработке экспертной системы обычно используются оставшиеся два представления знаний.

В [3] продукционные системы предполагают использование некоторого представления знаний для описания статической картины предметной области, а также некоторого механизма сопоставления по образцу левой части продукции с текущим состоянием. Классические продукционные системы используют в качестве состояния множество пар «атрибут – значение» или троек «объект – атрибут – значение». Для более удобного описания сложных предметных областей модели «объект – атрибут – значение» оказывается недостаточно. Одним из основных средств борьбы со сложностью является абстракция, проявление которой – построение в предметной области иерархии абстрактных понятий, связанных отношением наследования свойства.

Как отмечается в [4], наибольшей эффективностью характеризуются экспертные системы, основанные на продукционно-фреймовой модели представления знаний. При разработке МЭСДД рекомендовано такое гибридное представление, которое позволяет использование декларативных и процедурных знаний в одной базе знаний.

Для представления статических знаний о текущем состоянии области диагностики используются фреймы, которые являются абстрактным образом для представления некоего стереотипа восприятия. Понятие фрейма было

введено М. Минским в 1975 году. Фрейм рассматривается как набор слотов, под которыми понимаются структурные элементы, описывающие свойства фрейма. Слоты определяют объекты, классы и утверждения. Различают два типа фреймов: фреймы-образцы (прототипы) для описания абстрактных объектов предметной области; фреймы-экземпляры для отображения реальных фактических объектов при определении значений слотов. Значением слота может быть имя другого фрейма. Поэтому фреймы могут образовывать фреймовую иерархию, в которой фреймы нижнего уровня иерархии наследуют все свойства из фрейма верхнего уровня. Механизм управления логическими выводами реализуется тремя следующими способами: механизм управления наследованием; процедуры-методы; процедуры-демоны.

Следует отметить, что выбранная продукционно-фреймовая модель представления знаний универсальна, так как она обладает: простотой механизма управления выводом; способностью отображения концептуальной основы организации памяти человека; легкостью и модульностью, поскольку значения слотов фреймов могут быть добавлены, удалены или изменены независимо от других; эффективностью при объединении декларативных и процедурных знаний в одной базе знаний; эффективностью при обработке семантической составляющей знаний – фреймы математически представляются как ориентированные графы с помеченными вершинами и дугами; универсальностью при отображении всего многообразия знаний.

Проблема неопределенности информации диагностики в медицине и способность справляться с неопределенностью. Логический вывод называется строгими рассуждениями, поскольку он распространяется на точные факты и точные заключения, которые следуют из этих фактов. Заключение обязательно должно быть истинным, если истинны все условия из предпосылки. В медицинской практике при выводе диагностического решения часто встречается неопределенность информации диагностики. Неопределенность становится проблемой, поскольку может помешать выработке наилучшего решения и даже стать причиной того, что будет принято некачественное решение. Неопределенность может быть двух типов:

- неопределенность в истинности самой предпосылки. Врач субъективно оценивает специфичность симптома в симптомокомплексе;

• неопределенность самого правила. Врач субъективно оценивает уверенность, что если у пациента обнаружен набор симптомов, то он (или она) страдает каким-либо заболеванием.

МЭСДД диагностики должна функционировать даже при недостатке информации (т. е. неопределенности). Полученное диагностическое решение может и не быть точным, однако система не должна останавливаться из-за того, что отсутствует какая-либо часть входной информации. Таким образом, система должна научиться рассуждать в условиях неполной определенности. В системе, способной оперировать с неполной информацией, все события зависят от степени проявления определенных характеристик, поэтому всегда существует возможность активизации любых правил, если не установлено пороговое значение.

К теориям, позволяющим успешно действовать в условиях неопределенности, относятся: теория вероятностей, теория коэффициентов уверенности, теория Демпстера – Шефера, а также теория нечеткой логики. Сущность этих теорий состоит в том, что в отличие от классической, они интерпретируются не только значениями, такими как «истина/ложь», «да/нет» или «все/ничего», но и промежуточными значениями.

Теория нечеткой логики оказалась широко применимой в экспертных системах, потому что нечеткая логика лежит в основе методов работы с неопределенностью, гранулированной информацией, приближенных рассуждений и, что наиболее важно, вычислений со словами. Теория нечеткой логики была предложена Л. Заде в 1965 г., как попытка формализации человеческих знаний, описывающих не только количественные, но и качественные характеристики объектов предметной области, например, сильная боль, высокая температура и т. п. Теоретической основой нечеткой логики являются основные понятия нечеткого множества, лингвистической переменной и нечеткого правила. Подробно теория нечеткой логики и нечеткие знания описаны в [1, 5].

При создании нечеткой базы знаний требуется нечеткая формализация всех переменных, участвующих в построении медицинской экспертной системы диагностики. Известно, что нечеткие свойства представимы двумя понятиями и их свойствами: нечеткой переменной и лингвистической переменной. Симптомы и заболевания представляют собой лингвистические переменные. Например, для симптома «*Есть*

*ли у вас насморк?»* (для краткости – «*насморк*»), определяются следующие нечеткие характеристики: лингвистическая переменная «*насморк*» имеет область определения  $[0,100]$ ; терм-множество лингвистической переменной {«*не бывает*»; «*слабо*»; «*часто*»}. Для каждого элемента терм-множества, представляющего нечеткую переменную, следует построить нечеткое множество. Элементами этого множества являются возможные значения нечеткой переменной. Принадлежность этих значений множеству, определяемому семантикой лингвистического термина, задается функцией принадлежности. Функция принадлежности элемента нечеткому множеству интерпретируется как субъективная мера. Под субъективной мерой понимается определенная опросом группы экспертов-врачей степень соответствия элемента понятию, формализованному нечетким множеством. Нечеткая база знаний образуется совокупностью нечетких правил, определяющих взаимосвязь между симптомами и диагнозами. Например, нечеткое правило, оно имеет вид: «*ЕСЛИ <насморк – часто> И <кашель – много>, ТО <простуда – высокая возможность>, CF=0.8*». Здесь симптомы «*насморк*», «*кашель*» – входные переменные; заболевание «*простуда*» – выходная переменная; «*часто*», «*много*», «*высокая возможность*» – нечеткие переменные лингвистических переменных. Результатом нечеткого вывода являются количественные оценки каждого заболевания на основе знаний из базы знаний и поступающих фактов проявления симптомов. Разработан и исследован целый ряд моделей нечеткого вывода, наиболее известны среди них: Мамдани, Сугено, Ларсена, Цукамото и т.д.

Таким образом, для представления динамических знаний о переходах между различными состояниями области диагностики рекомендовано использование нечеткой базы знаний вместо продукционной базы. Такой подход позволяет представлять неопределенности информации при описании структуры симптомокомплексов.

## 2. Создание базы медицинских знаний

Ключевым понятием МЭСДД является *база знаний*. Для представления знаний в МЭСДД выбрано сочетание фреймовой и нечеткой баз знаний.

Фреймовая база знаний представлена для описания текущего состояния области диагностики, т. е. количественные оценки каж-

дого заболевания на основе знаний из базы знаний и поступающих фактов проявления симптомов. Нечеткая база знаний представлена для описания динамических знаний о переходах между состояниями области диагностики, т. е. причинно-следственное отношение, связывающее какое-либо заболевание с симптомами всего симптомокомплекса. Используя процедурные знания и наследование свойства фреймов, можно реализовать механизм управления выводом на нечеткой базе медицинских знаний МЭСДД и вводимых фактах проявления симптомов пользователем-пациентом.

### 2.1. Фреймовая база знаний

Формально база знаний может быть представлена в виде кортежа:

$$KB = \langle FC, FSM, FSD, FSS, FSC, \{FIM_i\}, \{FID_j\}, \{FIS_k\}, \{FIC_h\} \rangle,$$

где  $FC$  – фрейм-класс;  $FSM$  – фрейм-прототип специальности;  $FSD$  – фрейм-прототип заболевания;  $FSS$  – фрейм-прототип симптома;  $FSC$  – фрейм-прототип симптомокомплекса;  $\{FIM_i\}$  – множество фреймов-экземпляров специальностей;  $\{FID_j\}$  – множество фреймов-экземпляров заболеваний;  $\{FIS_k\}$  – множество фреймов-экземпляров симптомов;  $\{FIC_h\}$  – множество фреймов-симптомокомплексов.

Под *фреймом-классом* понимается фрейм верхнего уровня для представления совокупности фреймов-прототипов. Фрейм-класс определяется именем и совокупностью слотов. Формально фрейм-класс может быть представлен в виде кортежа:

$$FC = \langle NFC, \langle \{NS, TS, VS, \{PMS_i\}, \{PDS_j\} \} \rangle \rangle,$$

где  $NFC$  – имя фрейма-класса;  $NS$  – имя слота;  $TS$  – тип данных слота;  $VS$  – значение слота;  $\{PMS_i\}$  – множество процедур-методов;  $\{PDS_j\}$  – множество процедур-демонов.

Под *фреймом-прототипом* понимается фрейм для описания абстрактных объектов области диагностики заболеваний. Используются четыре типа фрейма-прототипа для специальности, заболевания, симптома и симптомокомплекса. Под *фреймом-экземпляром* понимается фрейм для отображения реальных объектов области диагностики, например, «простуда», «грипп», «кашель», «насморк» и т. д.

Формально фрейм-прототип специальности может быть представлен в виде кортежа:

$$FSM = \langle NFSM, AKO, NM, \{CD_i\} \rangle,$$

где  $NFSM$  – имя фрейма-прототипа специальности;  $AKO$  – слот, задающий имя фрейма-класса;  $NM$  – слот, задающий имя специальности;  $\{CD_i\}$  – слот, задающий набор контактов врачей по специальности.

Формально фрейм-прототип заболевания может быть представлен в виде кортежа:

$$FSD = \langle NFSD, AKO, LVOD, CVO, \{CF_i\}, SX, AE, NFIM \rangle$$

где  $NFSD$  – имя фрейма-прототипа заболевания;  $AKO$  – слот, задающий имя фрейма-класса;  $LVOD$  – слот, задающий лингвистическую выходную переменную заболевания;  $CVO$  – слот, задающий значение выходной переменной заболевания;  $\{CF_i\}$  – слот, задающий коэффициент уверенности правдоподобия заболевания;  $SX$  – слот, задающий пол пациента, который возможно страдает заболеванием;  $AE$  – слот, задающий диапазон возраста пациента;  $NFIM$  – слот, задающий имя фрейма-экземпляра специальности.

Формально фрейм-прототип симптома может быть представлен в виде кортежа:

$$FSS = \langle NFSS, AKO, LVIS, CVI, SF, SG \rangle$$

где  $NFSS$  – имя фрейма-прототипа симптома;  $AKO$  – слот, задающий имя фрейма-класса;  $LVIS$  – слот, задающий лингвистическую входную переменную симптома;  $CVI$  – слот, задающий значение входной переменной симптома;  $SF$  – слот, задающий множество коэффициентов специфичности симптома в соответствующих симптомокомплексах;  $SG$  – слот, задающий имя групп симптомов.

Формально фрейм-прототип симптомокомплекса может быть представлен в виде кортежа:

$$FSC = \langle NFSC, AKO, NFID, \{NFIS_i\}, \{FR_j\}, \{SFI_k\} \rangle,$$

где  $NFSC$  – имя фрейма-симптомокомплекса конкретного заболевания;  $AKO$  – слот, задающий имя фрейма-класса;  $NFID$  – слот, задающий имя фрейма-экземпляра заболевания;  $\{NFIS_i\}$  – слот, задающий задает множество имен фреймов-экземпляров симптомов в симптомокомплексе;  $\{FR_j\}$  – слот, задающий набор нечетких причинных правил заболевания;

$\{SFI_k\}$  – слот, задающий множество слотов фреймов-экземпляров заболевания  $NFID$  и симптомов, указанных во множестве  $\{NFIS_i\}$ .

**2.2 Нечеткая база знаний**

Формально нечеткое правило может быть представлено в виде кортежа:

$$FR = \langle NFR, \{ \langle FSMS_i, SF_i \rangle \} \rightarrow FSMD, CF \rangle,$$

где  $NFR$  – имя нечеткого правила;  $FSMS_i$  – нечеткое высказывание переменной симптома;  $SF_i$  – коэффициент специфичности симптома в симптомокомплексе;  $FSMD$  – нечеткое высказывание переменной заболевания;  $CF$  – коэффициент уверенности правдоподобия заболевания.

Формально нечеткое высказывание одной переменной может быть представлено в виде кортежа:

$$FSM = \langle LV, LT, M \rangle,$$

где  $LV$  – лингвистическая переменная;  $LT$  – лингвистический терм переменной;  $M$  – модификатор, которому соответствуют слова «очень», «более-менее», «не» и др.

Формально лингвистическая переменная может быть представлена в виде кортежа:

$$LV = \langle NLV, TSLV, ULV, GLV, MLV, TLV \rangle,$$

где  $NLV$  – имя лингвистической переменной;  $TSLV$  – терм-множество лингвистической переменной;  $ULV$  – область определения каждого элемента  $TSLV$ ;  $GLV$  – синтаксические правила, часто в виде формальной грамматики, порождающие название лингвистических термов;  $MLV$  – семантические правила, задающие функции принадлежности лингвистических термов, порожденных синтаксическими правилами  $GLV$ ;  $TLV$  – тип лингвистической переменной (симптома или заболевания).

Формально лингвистический терм переменной может быть представлен в виде кортежа:

$$LT = \langle NLT, MF \rangle,$$

где  $NLT$  – имя лингвистического терма;  $MF$  – функция принадлежности переменной лингвистическому терму. В качестве функции принадлежности используется функция следующего вида:

$$\mu_{LT}(u) = \frac{1}{1 + \left( \frac{u-b}{c} \right)^2},$$

где  $b$  и  $c$  – параметры настройки:  $b$  – координата максимума функции  $\mu_{LT}(b)=1$ ;  $c$  – коэффициент концентрации-растяжения функции.

Таким образом, нечеткая база правил представлена в табл. 1.

Таблица 1

Описание нечеткой базы правил

Номер правила	ЕСЛИ						ТО		
	$X_1$	$SF$	... $X_j$ ...	$SF$	$X_n$	$SF$	$Y$	$CF$	
[1,1]	$s_1^{1,1}$	$SF_1^1$	$s_j^{1,1}$	$SF_j^1$	$s_n^{1,1}$	$SF_n^1$	$D_1$	$d_1^1$	$CF_1^1$
[1,2]	$s_1^{1,2}$		$s_j^{1,2}$		$s_n^{1,2}$			$d_1^2$	$CF_1^2$
...	...		...		...			...	...
[1, $k_1$ ]	$s_1^{1,k_1}$		$s_j^{1,k_1}$		$s_n^{1,k_1}$			$d_1^{k_1}$	$CF_1^{k_1}$
...									
[ $i$ ,1]	$s_1^{i,1}$	$SF_1^i$	$s_j^{i,1}$	$SF_j^i$	$s_n^{i,1}$	$SF_n^i$	$D_i$	$d_i^1$	$CF_i^1$
[ $i$ ,2]	$s_1^{i,2}$		$s_j^{i,2}$		$s_n^{i,2}$			$d_i^2$	$CF_i^2$
...	...		...		...			...	...
[ $i$ , $k_i$ ]	$s_1^{i,k_i}$		$s_j^{i,k_i}$		$s_n^{i,k_i}$			$d_i^{k_i}$	$CF_i^{k_i}$
...									
[ $m$ ,1]	$s_1^{m,1}$	$SF_1^m$	$s_j^{m,1}$	$SF_j^m$	$s_n^{m,1}$	$SF_n^m$	$D_m$	$d_m^1$	$CF_m^1$
[ $m$ ,2]	$s_1^{m,2}$		$s_j^{m,2}$		$s_n^{m,2}$			$d_m^2$	$CF_m^2$
...	...		...		...			...	...
[ $m$ , $k_m$ ]	$s_1^{m,k_m}$		$s_j^{m,k_m}$		$s_n^{m,k_m}$			$d_m^{k_m}$	$CF_m^{k_m}$

где  $n$  – количество симптомов;  $m$  – количество заболеваний;  $1..k_i$  – номер правила для заболевания  $D_i$ ;  $X_j, j=1..n$  – входные переменные «симптом»;  $Y = D_i, i=1..m$  – выходная переменная «заболевание»;  $s_j^{i,k_i}$  и  $d_i^{k_i}$  – лингвистические термы с функциями принадлежности входной переменной  $X_j$  и выходной переменной  $Y = D_i$  в правиле с номером  $k_i$ ;  $SF_j^i$  – коэффициент специфичности входной переменной «симптом»  $X_j$  из симптомокомплекса выходной переменной «заболевание»  $Y = D_i$ ;  $CF_i^{k_i}$  – коэффициент уверенности правдоподобия термина выходной переменной «заболевание»  $Y = D_i$  в правиле с номером  $k_i$ .

### 2.3. Примерное описание базы медицинских знаний

Задача заключается в описании структуры базы знаний в предметной области, связанной с медицинской диагностикой. Для этого необходимо создать фреймы-прототипы, а также лингвистические переменные. Чтобы описать конкретные фреймы (т. е. фреймы-экземпляры), необходимо каждому слоту фреймов-прототипов придать кон-

кретное значение, например, таким образом:

- фрейм «простуда»: АКО – Фрейм-прототип заболевания; LVOD – <Простуда, ...>; CVO – 75;  $\{CF_i\} = \{0.8; \dots\}$ ; SX – Мужской и Женский; AE – [0, 60]; FIM – Терапевт;
- фрейм «насморк»: АКО – Фрейм-прототип симптома; LVIS – <Насморк, ...>; CVI – 75;  $\{SF_i\} = \{0.85; \dots\}$ ; SG – Нос;
- фрейм «кашель»: АКО – Фрейм-прототип симптома; LVIS – <Кашель, ...>; CVI – 100;  $\{SF_i\} = \{0.5; \dots\}$ ; SG – Горло.

Определить в качестве примера некоторые лингвистические переменные следующим образом:

- лингвистическая переменная «простуда»: TSLV – {Низкий; Средний; Высокий}; ULV – [0, 100]; TLV – Выход;
- лингвистическая переменная «насморк»: TSLV – {Низкий; Средний; Высокий}; ULV – [0, 100]; TLV – Вход;
- лингвистическая переменная «кашель»: TSLV – {Низкий; Средний; Высокий}; ULV – [0, 100]; TLV – Вход.

Графики функций принадлежности переменной нечеткому множеству для симптома «насморк» показаны на рис. 1.

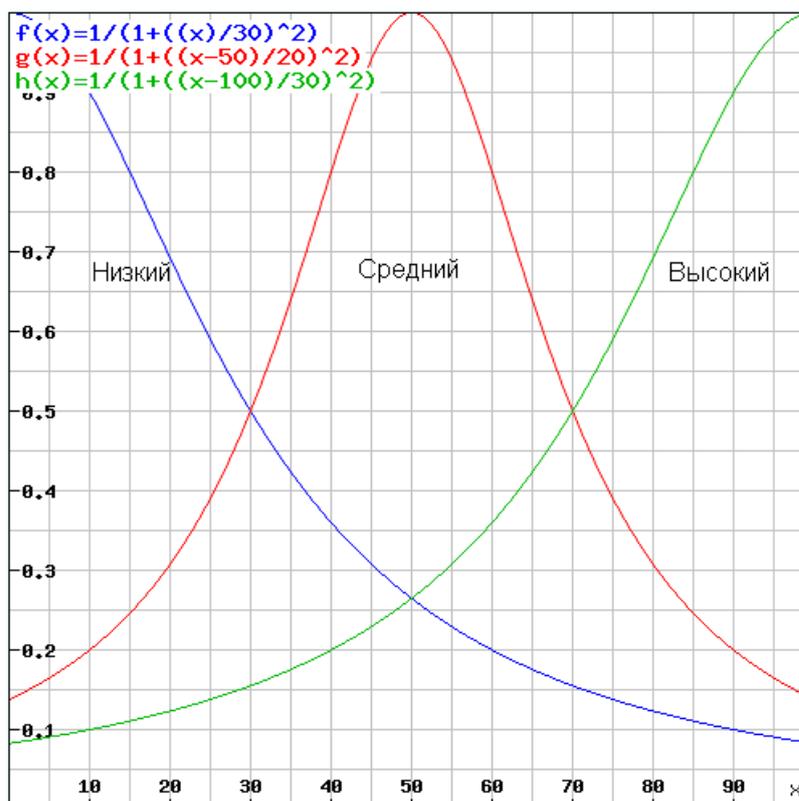


Рис. 1. Функции принадлежности переменной нечеткому множеству для симптома «насморк»

Определить в качестве примера симптомокомплекс «простуда» следующим образом:

ЕСЛИ ( $\langle X_1 = \text{"Есть\_ли\_у\_вас\_насморк?}-\text{часто"}\_c\_SF = 0.85 \rangle$  И  
 $\langle X_2 = \text{"Много\_ли\_вы\_кашляете?}-\text{много"}\_c\_SF = 0.5 \rangle$  И...)  
 ТО  $\langle Y = \text{"Простуда - высокая\_возможность"} \rangle\_c\_CF = 0.8$

Фрагмент фреймовой иерархии базы знаний представлен на рис. 2.

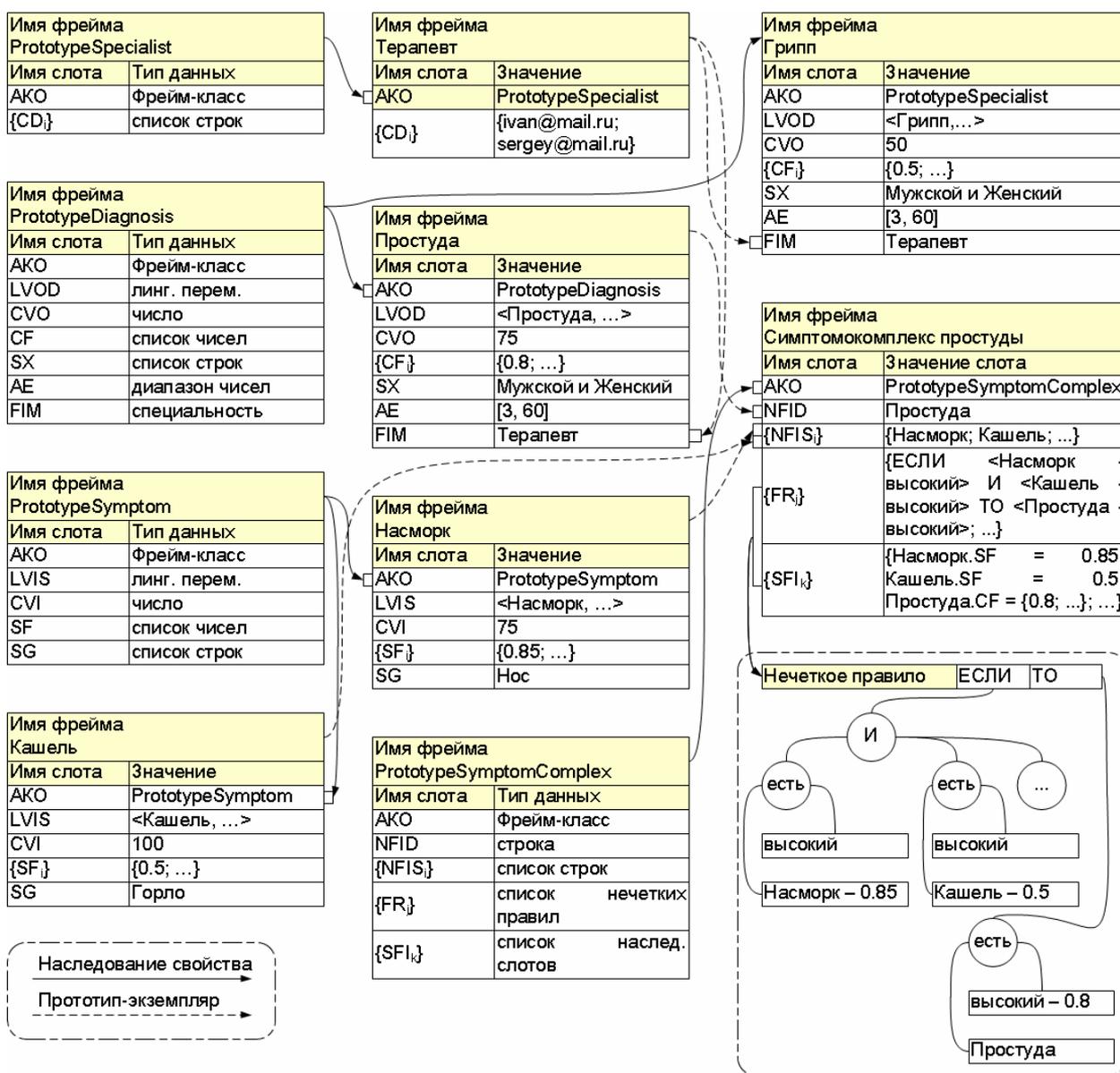


Рис. 2. Фрагмент фреймовой иерархии базы знаний

### 3. Программная реализация представления медицинских знаний

#### 3.1. Разработка диаграммы программных классов

На стадии проектирования использован унифицированный язык моделирования UML. Для реализации объектов области диагностики

заболеваний необходимо создать UML-диаграмму программных классов. Диаграмма классов представлена на рис. 3.

Разработано 19 программных классов, в числе которых класс MedicalKnowled-geBase является основным. Каждый класс состоит из атрибутов и методов.

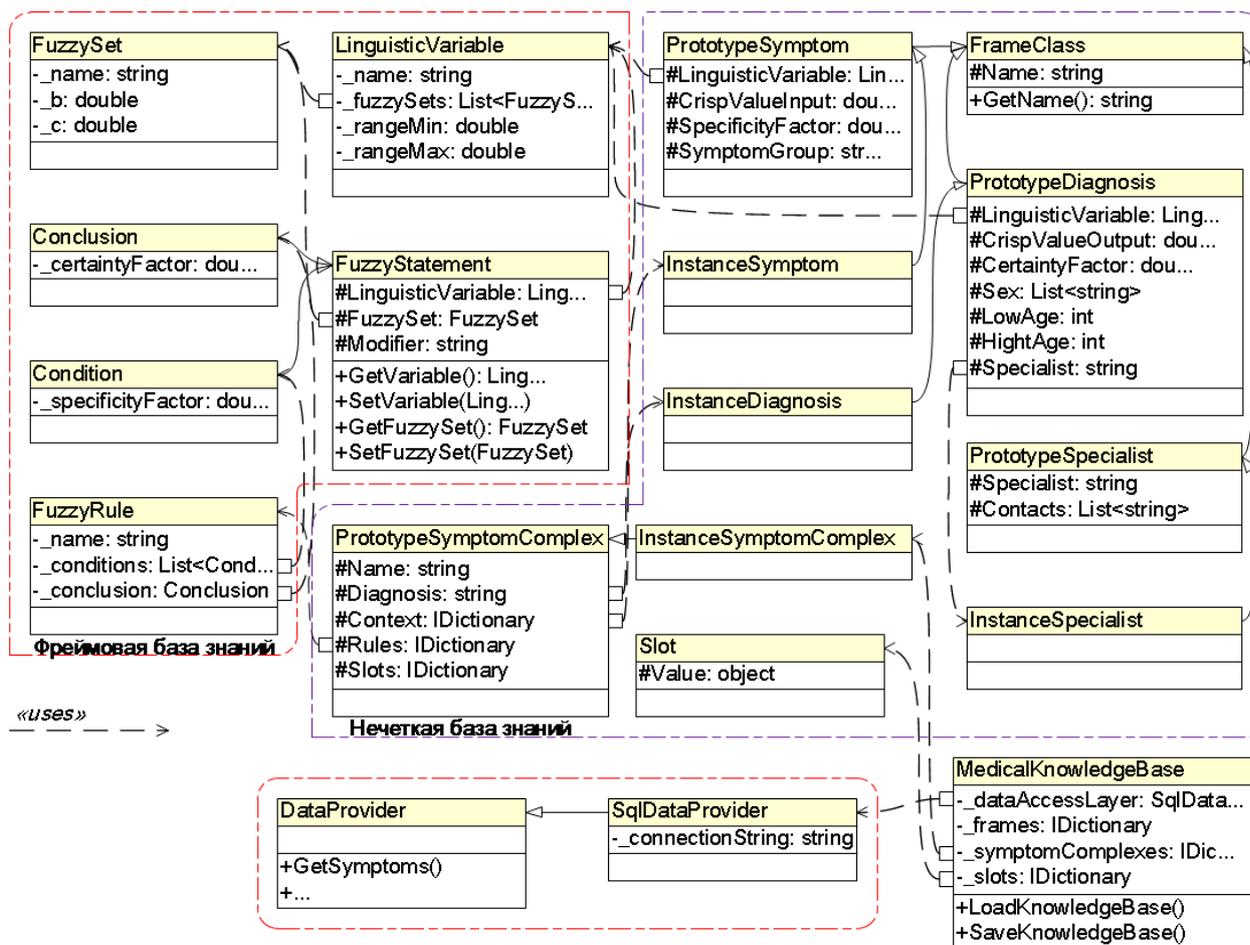


Рис. 3. UML-диаграмма программных классов

Класс `MedicalKnowledgeBase` позволяет представить базу знаний для вывода диагностического решения, а также для приобретения медицинских знаний от эксперта-врача. Кроме того, класс обеспечивает возможность сохранения и загрузки знаний в/из реляционной базы данных.

Абстрактный класс `Frame` является базовым для различных прототипов.

Классы `PrototypeSpecialist`, `PrototypeDiagnosis`, `PrototypeSymptom` и `PrototypeSymptomComplex` позволяют отобразить прототипы специальности, заболевания, симптома и симптомокомплекса соответственно.

Классы `InstanceSpecialist`, `InstanceDiagnosis`, `InstanceSymptom` и `InstanceSymptomComplex` позволяют отобразить экземпляры конкретных специальностей, заболеваний, симптомов и симптомокомплексов соответственно. Классы экземпляров наследуются от классов прототипов соответственно.

Класс `Slot` позволяет реализовать слот фреймовой системы.

Класс `SymptomComplex` позволяет реализовать симптомокомплекс, в котором должны находиться нечеткие причинно-следственные отношения, связывающие заболевание с симптомами.

Класс `LinguisticVariable` позволяет реализовать лингвистическую переменную «заболевание» или «симптом».

Класс `FuzzySet` позволяет реализовать лингвистический терм переменной «заболевание» или «симптом».

Класс `FuzzyRule` позволяет реализовать нечеткое правило из базы знаний.

Абстрактный класс `FuzzyStatement` является базовым для двух типов условия `Condition` и заключения `Conclusion`.

### 3.2. Проектирование структуры базы данных

Для хранения данных чаще всего применяются реляционные базы данных. При использовании реляционных баз данных необходимо создать контур интерфейса с базой данных для преобразования объектной формы представле-

ния информации в форму записей и их сохранения в базе данных, а также обратных операций. В качестве СУБД используется Microsoft

SQL Server, которая относится к реляционным системам. Структура базы данных приведена на рис. 4.

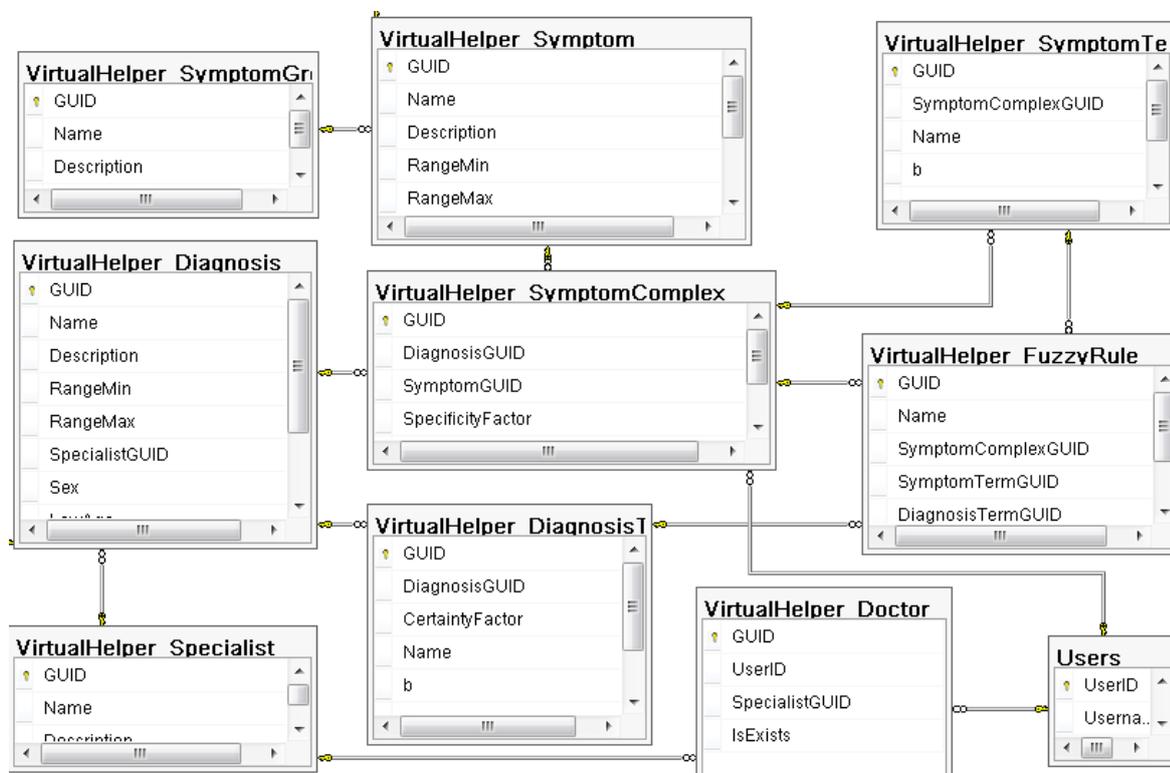


Рис. 4. Схема базы данных

Модель базы данных состоит из 10 основных таблиц:

- таблица `VirtualHelper_Specialist` хранит описание специальности (название, описание);
- таблица `Users` хранит описание врача (имя, контакт) и совместно с таблицей `VirtualHelper_Doctor` используется для определения специальности врача;
- таблица `VirtualHelper_Diagnosis` хранит описание заболевания (имя, описание, диапазон допустимых значений, специальность, пол и возраст возможного пациента);
- таблица `VirtualHelper_Symptom` хранит описание симптома (имя, описание, диапазон допустимых значений, группа симптома);
- таблица `VirtualHelper_SymptomGroup` хранит описание группы симптомов (имя, описание);
- таблица `VirtualHelper_SymptomComplex` представляет структуру симптомокомплекса: заболевание, симптом и его специфичность;
- таблица `VirtualHelper_DiagnosisTerm` представляет структуру терм-множества заболевания: заболевание, степень уверенности правдоподобия заболевания с термом, имя термина, параметры функции принадлежности к терму;

- таблица `VirtualHelper_SymptomTerm` представляет структуру терм-множества симптома в симптомокомплексе: симптомокомплекс, имя термина, параметры функции принадлежности к терму;

- таблица `VirtualHelper_FuzzyRule` представляет структуру нечеткого правила: имя правила, симптомокомплекс, терм заболевания, терм симптома.

Для манипулирования данными используются хранимые процедуры, которые создаются с помощью языка Transact-SQL в СУБД Microsoft SQL Server.

#### 4. Заключение

В результате работы предложена модель представления медицинских знаний, основанная на объединении фреймовой и нечеткой модели знаний. Фреймовая база знаний представлена для описания текущего состояния диагностики заболеваний, т. е. количественной оценки каждого заболевания на основе знаний из базы знаний и поступающих фактов проявления симптомов. Нечеткая база знаний представлена для описания динамических знаний о перехо-

дах между состояниями, т. е. причинно-следственных отношений, связывающих какое-либо заболевание с симптомами в его симптомокомплексе. Приведена диаграмма программных классов, участвующих в представлении знаний, а также модель базы данных, используемая медицинской экспертной системой дифференциальной диагностики.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гаврилова, Т. Базы знаний интеллектуальных систем / Т. Гаврилова, В. Хорошевский. – СПб.: Питер, 2001. – 584 с.
2. Дворянkin, А. М. Искусственный интеллект. Моделирование рассуждений и формальные системы : учеб. пособие / А. М. Дворянkin, М. Б. Сипливая, И. Г. Жукова ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2003. – 140 с.
3. Джарратано, Д. Экспертные системы: принципы разработки и программирование : пер. с англ. / Д. Джарратано, Г. Райли. – 4-е изд. – М. : Вильямс, 2007. – 1152 с.: ил.
4. Джексон, П. Введение в экспертные системы: пер. с англ. : учеб. пособие / П. Джексон. – М. : Вильямс, 2001.
5. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский : пер. с польск. И. Д. Рудинского. – М. : Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.: ил.
6. Искусственный интеллект. Базы знаний и экспертные системы : учеб. пособие / А. М. Дворянkin, А. В. Кизим, И. Г. Жукова, М. Б. Сипливая ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2002. – 140 с.
7. Камаев, В. А. Многомодульная система медицинской диагностики / В. А. Камаев, Б. Н. Филатов, Д. П. Панченко // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2005. – № 1. – Машиностроение. – С. 17.
8. Сошников, Д. В. Инструментарий JULIA для построения распределенных интеллектуальных систем на основе продукционно-фреймового представления знаний / Д. В. Сошников // Электронный журнал «Труды МАИ». – М. : МАИ. – 2002. – № 7.
9. Фоменков, С. А. Математическое моделирование системных объектов : учеб. пособие / С. А. Фоменков, Д. А. Давыдов, В. А. Камаев ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2006. – 180 с.

УДК: 004.891.3

*Н. В. Ле, В. А. Камаев, Д. П. Панченко, О. А. Трушкина*

#### ОБЗОР ПОДХОДОВ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ МЕДИЦИНСКОЙ СИСТЕМЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ\*

Волгоградский государственный технический университет

[nvien.vstu@gmail.com](mailto:nvien.vstu@gmail.com), [kamaev@cad.vstu.ru](mailto:kamaev@cad.vstu.ru), [panchenkodp@gmail.com](mailto:panchenkodp@gmail.com)  
[vamp@volgograd.ru](mailto:vamp@volgograd.ru)

В данной работе приведен обзор подходов к проектированию медицинской системы диагностики, выполнен анализ их достоинств и недостатков. Данная информация является полезной для разработки медицинской экспертной системы дифференциальной диагностики.

*Ключевые слова:* медицинская диагностика, математическая статистика, вероятность, экспертная система.

*N. V. Le, V. A. Kamaev, D. P. Panchenko, O. A. Trushkina*

#### A REVIEW OF THE APPROACHES TO DESIGNING MEDICAL EXPERT SYSTEM ON DIFFERENTIAL DIAGNOSIS

Volgograd State Technical University

This paper presents a review of the approaches to designing diagnosis medical systems, their advantages and disadvantages. The work provides useful information for the development of medical expert systems on differential diagnosis.

*Keywords:* medical diagnosis, mathematical statistics, probability, expert system.

#### Введение

Задача медицинской системы дифференциальной диагностики заключается в определении заболевания, которым, возможно, болен пациент, на основе данных о наблюдениях за его симптомами. При постановке диагноза используются два медицинских источника: экспериментальные данные; знания и опыт группы врачей. Экспери-

ментальные данные, как объективная информация, получают в результате экспериментальных исследований. А знания и опыт группы врачей, как субъективная информация – это закономерности области диагностики, полученные в результате практической деятельности и профессионального опыта. В зависимости от медицинских источников различают два основных подхода к медицинской диагностике: диагностика с использованием методов теории вероятностей и математической статистики; диагностика с использованием искусственного интеллекта.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке со стороны Минобрнауки России в рамках базовой части (проект 2586 задания № 2014/16).

Целью работы является обзор основных подходов к проектированию медицинской системы дифференциальной диагностики для обоснования методики разработки диагностической системы, основанной на медицинских знаниях.

### **1. Диагностика с использованием методов теории вероятностей и математической статистики**

Диагностика с использованием методов теории вероятностей и математической статистики основана на экспериментальных данных. Методы математической статистики решают следующие задачи анализа экспериментальных данных: описательная статистика; сравнение двух выборок; исследование зависимостей между переменными; снижение размерности пространства признаков; классификация. К теории классификации относятся классификация с учителем (дискриминантный анализ), классификация без учителя (кластерный анализ и группировка). В медицине дискриминантный анализ успешно применяется для диагностики заболеваний. В дискриминантном анализе обучающими выборками, для элементов которых известно, к каким классам они принадлежат, являются: больной – здоровый; легкая степень заболевания – средняя – тяжелая (и т. д.). Задача заключается в том, чтобы вновь появившийся объект отнести к одному из этих классов. Поэтому у термина «дискриминация» имеется синоним «диагностика». Если в дискриминантном анализе классы заданы, то кластеризация и группировка предназначены для выявления и выделения классов. Теория математической статистики описана в [1, 2]. А практическое применение методов в медицинской области описано в [3].

Другим методом математической статистики в задачах диагностики является формула на основе байесовской вероятности. Формула вероятностей позволяет вычислить условную вероятность заболевания при данном наборе симптомов на основании априорной вероятности заболевания и условной вероятности наблюдения симптомов. Подробно применение байесовской вероятности описано в [1, 2].

При применении этой диагностики возникает первая проблема организационной трудности при сборе, хранении и обработке большой информации. Вторая проблема заключается в том, что состояние области диагностики носит количественный характер, поэтому нельзя

решить задачи диагностики качественного характера. Кроме того, такой подход не учитывает сложность и принцип взаимодействия объектов области диагностики. Модель медицинской диагностики рассматривается в виде «черного ящика», т. е. получаемые диагностические результаты напрямую не могут быть объяснены ни врачу, ни пациенту.

### **2. Диагностика с использованием искусственного интеллекта**

При проектировании медицинской системы диагностики знания и опыт группы врачей играют важную роль. В отличие от экспериментальных данных медицинские знания обладают следующими свойствами: внутренняя интерпретируемость; структурированность; связанность; семантическая метрика; активность. Системы на основе знаний отличаются от традиционных систем обработки информации использованием знаний. Формализация описания знаний определяется как представление знаний. Представление знаний и разработка систем, основанных на знаниях, рассматривают как одно из направлений развития искусственного интеллекта. Целью искусственного интеллекта является разработка аппаратно-программных средств, позволяющих пользователю-непрограммисту ставить и решать свои, традиционно считающиеся интеллектуальными задачи, общаясь с ЭВМ на ограниченном подмножестве естественного языка. Подробно история и состояние развития искусственного интеллекта описаны в [4].

Системы, основанные на знаниях, используются в качестве синонима термина «экспертная система», хотя, строго говоря, экспертная система – это более широкое понятие. Целью экспертных систем является разработка и внедрение компьютерных программ, способных эмулировать (имитировать, воспроизводить) те области деятельности человека, которые требуют мышления, определенного мастерства и накопленного опыта. Подробно теория экспертных систем рассмотрено в [4, 5]. В медицинской экспертной системе диагностики выделяют следующие типы пользователей: пользователи-пациенты; эксперты; инженеры по знаниям. Медицинская экспертная система диагностики, как типовая экспертная система, состоит из следующих основных компонентов: рабочая память, называемая также базой данных; база знаний; приобретение знаний; управление выводом решения; объяснение; компо-

нента взаимодействия (лингвистический процессор). Экспертная система работает в двух режимах: режиме приобретения медицинских знаний и режиме медицинской консультации.

### 3. Обзор существующих медицинских экспертных систем диагностики

В истории развития медицинских экспертных систем диагностики отмечены следующие успешные системы: MYCIN (диагностирование и лечение заболеваний, вызванных бактериальными инфекциями); PUFF (диагностирование легочных заболеваний); INTERNIST/CADUCEUS (диагностирование заболеваний внутренних органов); ONCOCIN (лечение и наблюдение над пациентами, проходящими курс химиотерапии). Кроме того существуют другие системы: VM; ABEL; AI/COAG; AI/RHEUM; ANNA; BLUE; ATTENDING; GUIDON... Подробно описание этих систем приведено в источниках [4, 5, 8].

Несмотря на то, что разработан ряд медицинских экспертных систем, система диагностики не может нести никакой ответственности за полученное с ее помощью диагностическое решение; всегда считается, что система выступает только в качестве консультанта. Другими словами, задача таких систем заключается в определении возможного специалиста, к которому пациенту нужно обращаться, на основании полученных диагностических гипотез.

#### 3.1. Способы представления медицинских знаний

В системах с базами знаний, в том числе и в экспертных системах, представление знаний является фундаментальным понятием, а решение о выборе метода представления знаний оказывает огромное влияние на любую их составную часть. Обычно выделяют четыре группы способов представления знаний [4]: логическое представление; сетевое представление; иерархическое представление; процедурное представление.

Знания в системе MYCIN разделяются на факты и продукционные правила. Общее количество продукций около 400 в форме «ЕСЛИ <предпосылка>, ТО <действие>», где предпосылка – предположение о наличии некоторых свойств, которые принимают значения «истина либо ложь» с определенной степенью достоверности; действие – заключение, либо рекомендация о том, какое действие предпринять. Факты системы MYCIN представляются в виде изолированных троек «объект – атрибут – значение», снабженных коэффициентом опре-

деленности. Для хранения фактов используются таблицы знаний с записями об определенных клинических показателях и значениях, которые эти показатели имеют при разных условиях.

В системе INTERNIST/CADUCEUS знания включают два основных типа данных: болезни и их проявления (анамнез, симптомы, признаки, лабораторные данные). Каждой болезни сопоставлен ассоциативный список ее проявлений. В системе хранятся знания приблизительно о 100 000 ассоциативных связях между симптомами и болезнями. Связям между болезнями и проявлениями присвоены весовые коэффициенты (от 1 до 5). Знания представляются в виде сетей с использованием коэффициента определенности.

Как отмечается в [6], наибольшей эффективностью характеризуются экспертные системы, основанные на продукционно-фреймовой модели представления знаний. При разработке медицинской экспертной системы диагностики рекомендовано такое гибридное представление, которое позволяет использовать декларативные и процедурные знания в одной базе знаний.

#### 3.2. Механизмы вывода диагностического решения

Компонент вывода решения и управляющий компонент. В экспертных системах, основанных на продукционных правилах, для вывода знаний используется механизм логического вывода [4, 5]. Механизм логического вывода выполняет две функции, соответствующие двум компонентам: компонент вывода решения выполняет просмотр существующих фактов (из рабочей памяти) и правил (из базы знаний) и добавление (по мере возможности) в рабочую память новых фактов при срабатывании какого-нибудь правила; управляющий компонент определяет порядок просмотра и применения правил.

Процесс работы компонента вывода состоит из следующих шагов: сопоставление; разрешение конфликта; срабатывание; действие. Компонент логического вывода работает циклически. Обычно перед началом цикла в рабочую память вводится факт, соответствующий исходному состоянию проблемы.

Управляющий компонент используют стратегии управления выводом для минимизации времени и повышения эффективности поиска решения. Процесс вывода решения осуществляется от фактов проявления симптомов к диагностическим заключениям, которые основа-

ны на этих фактах (т. е. прямой логический вывод или управляемый данными), или от диагностических гипотез к фактам проявления симптомов, позволяющим обосновать гипотезы (т. е. обратный логический вывод или управляемый целями). В каждой из стратегий управления выводом могут использоваться различные стратегии управления выводом: поиск в глубину; поиск в ширину; разбиение на подзадачи.

Механизм вывода решения системы MYCIN реализуется в виде исчерпывающего поиска «обратный вывод». При поиске решения система INTERNIST/CADUCEUS комбинирует стратегию «прямой вывод» со стратегией «обратный вывод».

Механизм вывода решения управляет также процессом медицинской консультации, сохраняя для пользователя информацию о полученном заключении. Под *комбинированным логическим выводом* подразумевается такой механизм вывода, при котором поочередно применяются прямой и обратный вывод. Такой подход сочетает в себе достоинства двух основных методов вывода, а кроме того, является более универсальным, так как оставляет возможность применять как прямой и обратный вывод в чистом виде, так и их комбинацию. В этом случае обратный вывод запрашивает у пользователя дополнительные факты, когда для срабатывания очередного правила в рабочей памяти оказывается информация от пользователя в процессе вывода, в то время как прямой вывод позволяет расширить множество полученных данных за счет того, что может быть получено из уже имеющегося множества без дополнительной информации извне [7].

Проблема неопределенности информации диагностики в медицине. Экспертная система диагностики должна функционировать даже при недостатке информации (т. е. неопределенности). Полученное диагностическое решение может и не быть точным, однако система не должна останавливаться из-за того, что отсутствует какая-либо часть входной информации. Таким образом, экспертная система должна научиться рассуждать в условиях неполной определенности. В экспертной системе, способной оперировать с неполной информацией, все события зависят от степени проявления определенных характеристик, поэтому всегда существует возможность активизации любых правил, если не установлено пороговое значение.

К теориям, позволяющим успешно действовать в условиях неопределенности, относятся

теория вероятностей, теория коэффициентов уверенности, теория Демпстера – Шефера, а также теория нечеткой логики. Сущность этих теорий состоит в том, что в отличие от классической, они интерпретируются не только значениями, такими как «истина/ложь», «да/нет» или «все/ничего», но и промежуточными значениями.

Теория вероятностей. Формула Байеса является основой для использования теории вероятностей в управлении неопределенностью [1, 2, 4, 8]. Пусть имеются множество  $D$ , состоящее из  $m$  заболеваний  $\{D_1, D_2, \dots, D_m\}$ , и множество  $S$ , состоящее из  $n$  симптомов  $\{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ . У пациента часто проявляются одновременно набор симптомов  $\{S_1, S_2, \dots, S_k\}$ . Задача диагностики заключается в том, что для каждого заболевания из  $D$  нужно вычислить условную вероятность того, что у пациентов, страдающих этим заболеванием, наблюдался набор некоторых симптомов из множества  $S$ . В более общей форме правило Байеса имеет вид:

$$P(D_i|S_1 \cap S_2 \cap \dots \cap S_k) = \frac{P(S_1 \cap S_2 \cap \dots \cap S_k|D_i) * P(D_i)}{\sum_{i=1}^m P(S_1 \cap S_2 \cap \dots \cap S_k|D_i) * P(D_i)},$$

где  $P(D_i|S_1 \cap S_2 \cap \dots \cap S_k)$  – вероятность того, что пациент действительно страдает заболеванием  $D_i$ , если у него (или у нее) обнаружен набор симптомов  $\{S_1, S_2, \dots, S_k\}$ ;  $P(S_1 \cap S_2 \cap \dots \cap S_k|D_i)$  – условная вероятность того, что в отношении пациента будет обнаружен набор симптомов  $\{S_1, S_2, \dots, S_k\}$ , при условии наличия у него заболевания  $D_i$ . При наличии условной независимости симптомов можно записать соотношения:

$$P(D_i|S_1 \cap S_2 \cap \dots \cap S_k) = \frac{\prod_{j=1}^k P(S_j|D_i) * P(D_i)}{\sum_{j=1}^m \prod_{i=1}^k P(S_i|D_j) * P(D_j)}.$$

Успешная программа на Байсике разработана и описана в [8]. Другой подход на теории вероятностей позволяет вычислить апостериорные вероятности, используя шансы и отношения правдоподобия.

При применении метода вероятностей возникают основные проблемы: достоверности при субъективной оценке согласованных условных вероятностей; сложность при заполнении априорных вероятностей; трудности при

вычислении большого количества оценок вероятностей; достоверность при наличии условной независимости симптомов. Кроме того, другой проблемой метода вероятностей является несогласованность между доверием и недоверием к определенной гипотезе, поскольку эксперты соглашаются с тем, что уравнение  $P(H|E) = 1 - P(H'|E)$  истинно для правдоподобия степени доверия, а не вероятности. Проблемы подвигли Шортлиффа на исследование теории коэффициентов уверенности.

Теория коэффициентов уверенности. Теория коэффициентов уверенности была реализована в 1970 году в системе MYCIN, которая оказалась очень успешным средством медицинской диагностики [4, 5]. Коэффициент достоверности – это способ объединения двух значений, степени доверия и степени недоверия, в единственное число. Коэффициент достоверности гипотезы  $H$ , обусловленный наличием свидетельства  $E$ ,  $CF(H, E)$ , вычисляется по следующей формуле:

$$CF(H, E) = MB(H, E) - MD(H, E),$$

где  $MB(H, E)$  – мера повышения степени доверия к гипотезе  $H$  в силу наличия свидетельства  $E$ ;  $MD(H, E)$  – мера повышения степени недоверия к гипотезе  $H$  в силу наличия свидетельства  $E$ . Меры доверия и недоверия были определены в терминах вероятностей.

При определении коэффициента уверенности для правила вида « $R$ : ЕСЛИ  $A$ , ТО  $B$ » коэффициент уверенности заключения  $B$  при условии  $A$ ,  $CF(B)$ , вычисляется по следующей формуле:

$$CF(B) = CF(A) \cdot CF(R),$$

где  $CF(A)$  – коэффициент уверенности условия  $A$ , формирующего антецедент правила на основе неопределенного свидетельства;  $CF(R)$  – коэффициент уверенности заключения  $B$ , в которой предполагается, что условие  $A$  известно со всей достоверностью.

Если правила вида « $R$ : ЕСЛИ ( $A$  И  $B$ ), ТО  $C$ », то коэффициент уверенности конъюнкции,  $CF(A \cap B)$ , вычисляется по следующей формуле:

$$CF(A \cap B) = \min(CF(A), CF(B)).$$

Если правила вида « $R$ : ЕСЛИ ( $A$  ИЛИ  $B$ ), ТО  $C$ », то коэффициент уверенности дизъюнк-

ции,  $CF(A \cup B)$ , вычисляется по следующей формуле:

$$CF(A \cup B) = \max(CF(A), CF(B)).$$

Гипотеза следует из многих правил с разными коэффициентами уверенности, например, есть два следующих правила:

правило « $R1$ : ЕСЛИ  $A$ , ТО  $C$ » с коэффициентом  $CF(C) = CF_1$ ;

правило « $R2$ : ЕСЛИ  $B$ , ТО  $C$ » с коэффициентом  $CF(C) = CF_2$ .

При комбинации гипотез двух правил, из которых следует одна и та же гипотеза, итоговой коэффициент уверенности,  $CF_{Combine}(CF_1, CF_2)$ , вычисляется по следующей формуле:

$$CF_{Combine}(CF_1, CF_2) = \begin{cases} CF_1 + CF_2 \cdot (1 - CF_1), & \text{оба} > 0 \\ \frac{CF_1 + CF_2}{1 - \min(|CF_1|, |CF_2|)}, & \text{один} < 0 \\ CF_1 + CF_2 \cdot (1 + CF_1), & \text{оба} < 0 \end{cases}$$

Выбор формулы для вычисления  $CF_{Combine}$  зависит от того, являются ли отдельные коэффициенты уверенности положительными или отрицательными.

При использовании коэффициентов достоверности возникает проблема ранжирования гипотез в порядке их важности в терминах вероятных диагнозов. Возникает противоречие, если некоторое заболевание отличается более высокой условной вероятностью  $P(H|E)$ , но все равно характеризуется более низким коэффициентом уверенности,  $CF(H, E)$ . Например, если даны:  $P(H_1) = 0.8$ ,  $P(H_1|E) = 0.9$ ,  $P(H_2) = 0.2$ ,  $P(H_2|E) = 0.8$ , то получить:  $CF(H_1, E) = 0.5$  и  $CF(H_2, E) = 0.75$ .

Вторая проблема этой теории заключается в том, что коэффициент достоверности двух правил в цепи логического вывода вычисляется с использованием независимых вероятностей, т. е.  $CF(H, e) = CF(H, i) \cdot CF(i, e)$ . Приведенная формула справедлива только в том частном случае, когда статистическая совокупность со свойством  $H$  содержится в совокупности  $i$ , которая содержится в совокупности со свойством  $e$ . При попытке использовать коэффициенты уверенности в других прикладных областях, не позволяющих применять короткие цепи логического вывода и простые гипотезы, могут возникнуть реальные проблемы.

Теория Демпстера – Шефера. Теория свидетельств была введена Демпстером в 1968 году и развита Шефером в 1976 году. Теория Демпстера – Шефера предлагает средства вычисления функции доверия на множествах гипотез и правила объединения функций доверия, сформулированных на основании разных свидетельств [4, 5]. Взаимоисключающее исчерпывающее множество гипотез,  $\Theta$ , с количеством элементов  $N$  имеет точно  $2^N$  подмножеств, образующих степенное множество  $P(\Theta)$ . Подмножество  $X$ , называемое фокальным элементом, представляет собой элемент степенного множества, в котором фокусируется доступное свидетельство. Например, если  $\Theta = \{A, B, F\}$ , то

$$P(\Theta) = \{O, \{A\}, \{B\}, \{F\}, \{A, B\}, \{A, F\}, \{B, F\}, \{A, B, F\}\},$$

где  $O$  – пустое множество.

В этой теории принято рассматривать степень доверия к свидетельству как аналогичную массу физического объекта. Иными словами, масса свидетельства поддерживает степень доверия. Функция доверия к некоторому подмножеству определяется по формуле:  $m : P(\Theta) \rightarrow [0,1]$ . Под степенью отсутствия доверия к среде, выраженной в виде  $m(\Theta)$  понимается степень доверия, не присвоенная конкретному подмножеству. Степень доверия к пустому множеству обычно определяется как равная нулю, т. е.  $m(O) = 0$ . Степень доверия ко всем подмножествам  $X$  степенного множества равна 1, т. е.  $\sum_{x \in P(\Theta)} m(X) = 1$ .

В рассуждениях на основе свидетельств нижняя граница интервала называется обоснованием, а верхняя граница – правдоподобием. Обоснование, или доверительная функция,  $Bel$ , представляет собой общую степень доверия к множеству и всем его подмножествам, т. е.

$$Bel(X) = \sum_{Y \subseteq X} m(Y).$$

Степень доверия – это степень доверия к множеству, а не к какому-либо из его подмножеств. А доверительная функция, иногда называемая мерой доверия, применяется к множеству и ко всем его подмножествам. Поэтому определены такие взаимосвязи между степенью доверия и мерой доверия. Таким образом, интервал проявления свидетельства множества  $S$ ,  $EI(S)$ , может быть определен в терминах степени доверия следующим образом:

$$EI(S) = [Bel(S), 1 - Bel(S')].$$

Правдоподобие,  $Pls$ , определяется как степень, в которой свидетельство не в состоянии опровергнуть гипотезу  $X$ :

$$Pls(S) = 1 - Bel(S') = 1 - \sum_{Y \subseteq X} m(X').$$

В теории Демпстера – Шефера имеется возможность комбинировать все свидетельства, чтобы выработать лучшую оценку степени доверия к свидетельству. Полученные свидетельства можно скомбинировать с помощью следующей общей формулы комбинирования свидетельств. Такая комбинированная масса вычисляется по следующей формуле:

$$m_3(Z) = m_1 \oplus m_2(Z) = \frac{1}{1 - \kappa} \sum_{X \cap Y = Z} m_1(X) * m_2(Y).$$

Значение  $\kappa$ , являющееся величиной конфликта свидетельства, вычисляется по следующей формуле:

$$\kappa = \sum_{X \cap Y = O} m_1(X) * m_2(Y).$$

Одна из сложностей, связанных с использованием теории Демпстера – Шефера, возникает в связи с необходимостью применения нормализации, т. е. величины конфликта свидетельства. Проблема, связанная с нормализацией, состоит в том, что игнорируется степень доверия к тому, что рассматриваемый объект не существует. Л. Заде привел пример с двумя врачами, которые высказали степени доверия  $A$  и  $B$  к гипотезе о наличии у пациента определенного заболевания:

$$m_A(\text{менингит}) = 0.99;$$

$$m_A(\text{опухоль\_головного\_мозга}) = 0.01;$$

$$m_B(\text{сотрясение\_мозга}) = 0.99;$$

$$m_B(\text{опухоль\_головного\_мозга}) = 0.01.$$

Оба врача соглашаются с наличием очень небольших шансов – 0.01, что у пациента имеется опухоль головного мозга, а резульатная комбинированная степень доверия к такой же гипотезе – 1. Этот результат воспринимается как неожиданный и противоречит интуиции.

Теория нечеткой логики. Теория нечеткой логики оказалась широко применимой в экспертных системах с неопределенностью информации. При управлении выводом использование нечеткой логики естественно, так как используются многие слова, такие как «очень часто», «более-менее часто», «не часто» и т. п.

Теория нечеткой логики была предложена Л. Заде в 1965 г., как попытка формализации человеческих знаний, описывающих не только

количественные, но и качественные характеристики объектов предметной области (например, сильная боль, высокая температура и т. п.). Теоретической основой нечеткой логики являются основные понятия нечеткого множества, лингвистической переменной и нечеткого правила. Подробно теория нечеткой логики и нечеткие знания описаны в [9].

При создании нечеткой базы знаний требуется нечеткая формализация всех переменных, участвующих в построении медицинской экспертной системы диагностики. Известно, что нечеткие свойства представимы двумя понятиями и их свойствами: нечеткой переменной и лингвистической переменной. Симптомы и заболевания представляют собой лингвистические переменные. Например, для симптома «Есть ли у вас насморк?» – для краткости – «насморк», определяются следующие нечеткие характеристики: лингвистическая переменная «насморк» имеет область определения  $[0,100]$ ; терм-множество значений лингвистической переменной {«не бывает»; «слабо»; «часто»}. Для каждого компонента терм-множества, представляющего нечеткую переменную, следует построить нечеткое множество. Компонентами этого множества являются возможные значения нечеткой переменной. Принадлежность этих значений множеству, определяемому семантикой термина, задается функцией принадлежности. Функция принадлежности элемента нечеткому множеству интерпретируется как субъективная мера. Под субъективной мерой понимается определенная опросом группы экспертов-врачей степень соответствия элемента понятию, формализованному нечетким множеством. Нечеткая база знаний образуется совокупностью нечетких правил, определяющих взаимосвязь между симптомами и диагнозами. Например, нечеткое правило: «ЕСЛИ <насморк – часто> И <кашель – много>, ТО <простуда – высокая возможность>,  $CF=0.8$ ». Здесь симптомы «насморк», «кашель» – входные переменные; заболевание «простуда» – выходная переменная; «часто», «много», «высокая возможность» – нечеткие переменные лингвистических переменных. Результатом нечеткого вывода являются количественные оценки каждого заболевания на основе знаний из базы знаний и поступающих фактов проявления симптомов. Разработан и исследован целый ряд моделей нечеткого вывода, наиболее известны среди них: Мамдани, Сугено, Ларсена, Цукамото и т. д.

Таким образом, для представления динамических знаний о переходах между различными состояниями области диагностики рекомендовано использование нечеткой базы знаний вместо продукционной базы. Такой подход позволяет представлять неопределенности информации при описании структуры симптомокомплексов.

### 3.3. Средство объяснения

Средство объяснения знакомит пользователей со следующими определениями: как-объяснение, т. е. как правила используют информацию пользователя-пациента; почему-объяснение, т. е. почему использовались (не использовались) данные знания. Объяснение облегчает эксперту-врачу тестирование системы и повышает доверие пользователя-пациента к полученному диагностическому результату.

Система MYCIN, анализируя процесс получения решения, использует почему-объяснение и как-объяснение. В системе INTERNIST/CADUCEUS объяснительные способности минимальны.

Задача объяснения заключается в выделении самых активных из списка диагностических гипотез, а также их активизированных правил в данный момент диагностики. После этого диагностика переходит к уточнению диагностических гипотез. Под уточнением диагноза понимается генерация дополнительных вопросов, которые направят цепь рассуждений по наиболее перспективным путям получения диагноза.

Вывод диагностического решения зависит только от состояния рабочей памяти и от состава базы знаний. Для того что учитывать историю вывода решения, необходимо использовать протокол системы. Протокол записывает информацию о поведении системы, диагностике заболеваний на основании предшествующих симптомов. Для хранения протокола системы используется память состояний.

### 3.4. Средство приобретения медицинских знаний

Средство приобретения медицинских знаний, осуществляемое экспертом-врачом, предназначено для наполнения экспертной системы знаниями, которые позволяют экспертной системе в режиме консультации решать задачи диагностики заболеваний.

Система MYCIN обладает способностью модифицировать старые правила и приобретать новые. Для развития объяснительных способностей системы MYCIN и автоматизации при-

обретения знаний была построена инструментальная система TEIRESIAS. Система INTERNIST/CADUCEUS ориентирована на возможное расширение списка болезней, симптомов и взаимосвязей между ними.

Приобретение медицинских знаний обычно осуществляется двумя основными способами. При первом способе эксперт-врач общается с системой через посредничество инженера по знаниям. Эксперт-врач описывает область медицинской диагностики и диагностическое состояние в виде знаний. Медицинские знания могут быть статическими о текущем состоянии области диагностики (т. е. описание объектов «специалист», «заболевание», «группа симптомов», «симптом», поступающие факты проявления симптомов, результативные оценки каждого заболевания и т. п.) и динамическими о переходах между различными состояниями (т. е. симптомокомплексы). При добавлении новых знаний модификация связей осуществляется автоматически.

При втором способе эксперт-врач получает анкеты с вопросами. При режиме медицинской консультации анкета пользователя-пациента формируется, когда он не соглашается с полученным результатом экспертной системы. Эксперт-врач отвечает на необходимые вопросы и отправляет их пользователю-пациенту. Одновременно эти ответы, как и новые знания, применяются для наполнения базы знаний.

Два приведенные способа приобретения знаний выполняют автоматическое построение знаний (т. е. структурированных данных) из неструктурированных или слабоструктурированных данных. Для повышения ее уровня и структурирования используется извлечение нечетких баз знаний, под которым понимается тонкая настройка коэффициентов в нечеткой базе знаний путем ее обучения с помощью показательных примеров [10]. В качестве алгоритмов обучения используется генетический алгоритм, который основан на механизмах, напоминающих естественный отбор и размножение.

Для того чтобы убедиться в корректности и противоречивости знаний, эксперт-врач может выполнить проверку знаний на тестирующей выборке.

### 3.5. Пользовательский интерфейс

Пользовательский интерфейс ориентирован на организацию дружественного общения с пользователями, как в процессе медицинской консультации, так и в процессе приобретения ме-

дицинских знаний и объяснения полученного результата. Пользовательский интерфейс также отображает состояние рабочей памяти.

Пользовательский интерфейс системы MYCIN ведется на ограниченном английском языке. В связи с ограниченностью предметной области используется простой лингвистический процессор, поскольку оказалось достаточным понимать смысл предложений на уровне ключевых слов. Интерфейс системы INTERNIST/CADUCEUS с пользователем довольно удобен.

Пользовательский интерфейс должен выполнить распределение ролей участников диалога (пользователя и экспертной системы) и организацию их взаимодействия в определенном режиме работы [11]. От пользователя не требуется знаний в области программирования.

В настоящее время при помощи веб-технологий сконструирован и реализован универсальный способ построения сетевых информационных систем, не зависящих от платформ; использование же браузеров в качестве элемента пользовательских интерфейсов позволило унифицировать и упростить получения решения. Экспертная веб-система диагностики заболеваний позволяет связать пациентов с врачом через браузеры, которые дают возможность медицинской диагностики пациентам, не находящимся в клинике.

### Заключение

В результате работы приведен обзор существующих медицинских экспертных систем диагностики. Данные подходы различаются способами представления знаний, механизмом вывода решения, средством объяснения, средством приобретения знаний, а также пользовательским интерфейсом. Полученные результаты анализа подходов к медицинской диагностике являются базой для разработки медицинской экспертной системы дифференциальной диагностики. Предполагаются представление знаний на основе фреймовой и нечеткой баз знаний с целью повышения эффективности вывода диагностического решения при условиях неопределенности.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бейли, Н. Математика в биологии и медицине / Н. Бейли. – М.: Мир, 1970. – Гл. 11.
2. Диагностика заболеваний методами теории вероятностей / М. Л. Жмудяк, А. Н. Поваляхин, А. В. Стребуков, А. В. Гайнер, А. Л. Жмудяк, Г. Г. Устинов ; Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2006. – 168 с.

3. Поворознюк, А. И. Компьютерные системы медицинской диагностики : Лабораторный практикум. В 2 ч. Ч. 2. / А. И. Поворознюк, А. Е. Филатова, А. Н. Шеин. – Харьков : НТУ «ХШТ», 2007. – 96 с.

4. Джарратано, Джозеф. Экспертные системы принципы разработки и программирование : пер. с англ. / Джозеф Джарратано, Гари Райли. – 4-е изд. – М. : И. Д. Вильямс, 2007. – 1152 с. : ил.

5. Джексон, Питер. Введение в экспертные системы : пер. с англ. : учеб. пособие / Питер Джексон. – М. : Вильямс, 2001.

6. Алгоритм перевода коэффициентов нечеткой логики в коэффициенты уверенности при разработке экспертной системы в среде GURU / Т. В. Зайцева [и др.] ; НИУ БелГУ // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Электронная вычислительная техника (ЭВТ). – 2012. – Вып. 1. – С. 112–119.

7. Сошников, Д. В. Инструментарий JULIA для построе-

ния распределенных интеллектуальных систем на основе продукционно-фреймового представления знаний // Электронный журнал «Труды МАИ». – М. : МАИ. – 2002. – № 7.

8. Нейлор, К. Как построить свою экспертную систему / К. Нейлор. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 286 с. : ил.

9. Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковская ; пер. с польск. И. Д. Рудинского. – М. : Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с. : ил.

10. Митюшкин, Ю. И. Soft-Computing: идентификация закономерностей нечеткими базами знаний / Ю. И. Митюшкин, Б. И. Мокин, А. П. Ротштейн. – Винница : УНИВЕРСУМ-Вінниця, 2002. – 145 с.

11. Манукянц, Э. В. Архитектура автоматизированной экспертной системы диагностики технического состояния турбогенераторов / Э. В. Манукянц, Э. В. Мысловский, А. И. Власов // Инженерный вестник. – 2012. – № 9. – С. 4–10.

УДК 004.031.42:: 616-006

*М. П. Мельников, В. А. Камаев, П. Н. Воробкалов*

### **ПОИСК ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ПРЕПАРАТОВ КАК ЗАДАЧА ПО ОБРАБОТКЕ ТЕКСТОВ НА ЕСТЕСТВЕННОМ ЯЗЫКЕ\***

**Волгоградский государственный технический университет**

m.p.melnikov@gmail.com, cad@vstu.ru, pavor84@gmail.com

В статье рассмотрена проблема поиска взаимодействий препаратов в научных статьях, рассмотрены основные направления применения методов обработки естественного языка в медицине. Материалом исследования послужила выборка наиболее цитируемых научных статей из реферативной базы данных SCOPUS за 2002–2012 годы. На основе анализа статей выделены основные направления современных исследований в данной области, определено место проблемы поиска взаимодействий препаратов в научных статьях.

На основании исследования сделан вывод: проблема поиска взаимодействий препаратов в научных статьях является важной научной задачей, обладающей также большой практической значимостью. Источником информации для данного исследования являются аннотации научных статей, представленные в открытом доступе. Данную тему можно отнести к направлению анализа научных текстов.

*Ключевые слова:* взаимодействие препаратов, обработка естественного языка, машинное обучение.

*M. P. Melnikov, V. A. Kamaev, P. N. Vorobkalov*

### **DRUG INTERACTIONS SEARCH AS TASK OF NATURAL LANGUAGE PROCESSING**

**Volgograd State Technical University**

The article describes the problem of drug-drug interaction search in scientific articles; the main areas of natural language processing methods application in medicine are reviewed. The materials of the research are the most cited articles from Scopus bibliographic database. The main trends of research in this area and the role of the drug interactions search problem are determined on the basis of these articles' analysis.

The conclusion of the research is the drug interactions search being an important scientific problem with big practical significance. The main sources of texts for the research training corpus are abstracts of articles with open access. This theme can be classified as analysis of scientific texts.

*Keywords:* drug-drug interaction, natural language processing, machine learning.

Сегодня пациентам назначаются десятки тысяч препаратов, совместное применение которых может привести к их взаимодействию. При этом возможны как синергетические, так и антагонистические взаимодействия. Совместное применение препаратов, усиливающих действие друг друга, может привести к опасной передо-

зировке или усилению побочных действий препаратов. Не менее опасно совместное применение препаратов, ослабляющих действие друг друга, что может привести к недостаточному эффекту от их применения. Также известны взаимодействия препаратов, несущие положительный эффект. Не всегда выводы, сделанные по результатам лабораторных исследований взаимодействия активных веществ, согласуются с результатами клинических исследований.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке со стороны Минобрнауки России в рамках базовой части (проект 2586 задания № 2014/16).

Все это обуславливает значительное число современных научных исследований, посвященных взаимодействию препаратов между собой, с пищей и лекарственными растениями.

Огромное количество информации хранится в форме текстов на естественном языке. Этот факт часто затрудняет извлечение ценных данных, поиск и обработку хранимой таким образом информации. Постоянно растет количество научных текстов, доступных в сети Интернет. Так, крупнейшая библиографическая база статей по медицинским наукам Medline содержит свыше 12 миллионов цитат. Однако такое количество публикаций затрудняет отслеживание учеными новейших исследований по своей тематике [20].

В научных статьях постоянно появляется новая информация о взаимодействиях препаратов. В сети Интернет широкое распространение среди практикующих врачей получили веб-сервисы, собирающие информацию о взаимодействии препаратов и предоставляющие ее в удобной для быстрого доступа форме. Важным остается вопрос актуальности этой информации. Необходимо сокращение временного разрыва между публикацией научных результатов и внедрением их в повседневную врачебную практику. Идеальным конечным результатом функционирования подобной системы является система с минимальным временем между публикацией статьи с информацией о взаимодействии препаратов и внесением ее в базу данных систем. Достижение такого результата невозможно без автоматизации процесса поиска статей, содержащих информацию о взаимодействии препаратов. Для этого необходима система мониторинга статей, позволяющая автоматически выбирать научные работы, посвященные взаимодействию препаратов. Основной задачей предлагаемой системы мониторинга является задача классификации текстов, которая решается с использованием методов обработки естественного языка.

Использование методов обработки естественного языка в медицине является актуальной темой научных исследований. Так как большая часть клинической информации находится в текстовых документах, а клинические медицинские записи содержат множество информации в основном в виде текста на естественном языке, отмечается, что автоматическое извлечение этой информации будет определено выгодно для клинической практики [3], а средства

для извлечения структурированной информации из свободного текста записей являются важным предметом научных исследований [4].

Основными источниками информации для исследований обработки текстов на естественном языке в медицине являются:

- научные статьи и клинические руководства [2];

- клинические медицинские записи.

Можно выделить три основных направления исследований в данной области:

- анализ научных текстов;

- анализ клинических медицинских записей;

- решение вспомогательных задач распознавания текстов на естественном языке.

Декомпозируя перечисленные основные направления исследований, можно выделить следующие крупные подразделы.

Ряд исследований посвящен автоматизированному составлению онтологий. Так, в [7] разработана веб-ориентированная система для облегчения постепенного перевода текстов клинических руководств в выбранную целевую онтологию. Автоматизация этого процесса позволяет значительно ускорить и упростить составление онтологий, необходимых для облегчения доступа к клиническим руководствам.

Одной из проблем, успешно решаемых с помощью обработки текстов на естественном языке, является классификация документов – отнесение документа к одной из нескольких категорий на основании его содержания.

Частным случаем проблемы классификации документов является классификация диагностических отчетов, этой проблеме посвящены многие работы. Так, в [13] исследуется распознавание типа опухоли по неструктурированному заключению по результатам магнитно-резонансной томографии (МРТ). В ходе исследования была разработана система для определения состояния опухоли по неструктурированному заключению МРТ. Результатом исследования стало установление факта, что заключение МРТ содержит достаточно информации для классификации опухоли. В [21] исследуется возможность классификации заключений рентгенологов.

Автоматическая классификация используется и в других отраслях медицины. Например, в [6] классифицируются симптомы; разработана и проверена система обработки естественного языка для классификации жалоб пациентов по шести категориям. В [14] автоматизируется

процесс классификации препаратов по анатомо-терапевтическо-химической классификации Всемирной организации здравоохранения (АТХ ВОЗ). Актуальность данного направления объясняется большим количеством новых неклассифицированных препаратов, информация о которых доступна в научных статьях. Разработанная система добывает из текста научных статей ключевые слова, а подсистема машинного обучения классифицирует препараты по классификации АТХ ВОЗ.

Близкой к задаче классификации является задача определения событий характеристик заболевания в медицинских записях. Так, в [8] проведено сравнение трех алгоритмов по определению лихорадки по тексту на естественном языке; в [5] автоматически выявляются побочные действия лекарств; в [11] из медицинских записей автоматически извлекается информация о событиях течения болезни.

Также распознавание текстов на естественном языке применяется для задач поиска информации в специализированных медицинских текстах, клинических руководствах, разнородных источниках данных. В [12] исследуется возможность повышения качества поиска в медицинских записях. Разработана схема индексации, которая повышает эффективность поиска в медицинских документах на естественном языке. Данная модель использует фразы, состоящие из нескольких слов, как индексированные термины. Каждая фраза состоит из понятий унифицированного языка медицинских систем (UMLS) и основ слов, входящих в нее. Сходства между понятиями определяются их отношениями в гиперонимной иерархии, полученной из UMLS. В работе показано значительное повышение эффективности поиска по сравнению с использованием существующих методов. В [10] исследуется поиск медицинских алгоритмов. Большая часть медицинской информации представляет собой алгоритмы. Очевидна необходимость поиска алгоритмов лечения, диагностики в медицинских текстах. Главные проблемы, которые решены в работе – определение необходимости поиска сценария по поисковому запросу, наличие общие терминов в запросе.

Обработка текстов на естественном языке также актуальна и в близких к медицине отраслях знаний, таких как биология [9].

Отдельной группой являются исследования, посвященные решению вспомогательных задач обработки текстов на естественном языке, то

есть задачам, не имеющим непосредственного практического применения, но имеющих большое значение для дальнейших исследований. Такими задачами являются, например: поиск гиперонимов [15], определение отрицаний и предположений [16], устранение многозначностей [17], поиск аббревиатур и акронимов [18], анонимизация клинических текстов [19], поиск связанных понятий в текстах [20].

Обобщив изученные работы, можно сделать следующие выводы:

1) значительная часть исследований носит фундаментальный характер и их результаты на сегодняшний день не могут непосредственно использоваться в клинической практике. Также значительная часть исследований носит прикладной характер, результаты нацелены на решение конкретной научной, технической и медицинской задачи;

2) используемые на сегодня методы позволяют достичь высокой точности распознавания, классификации, поиска медицинской информации;

3) области применения методов обработки текстов на естественном языке в медицине очень разнообразны.

Проанализировав основные направления исследований по распознаванию текстов в медицине, можно определить место задачи распознавания статей, посвященных взаимодействию препаратов в контексте общей проблемы.

Исследования в данной области направлены как на фундаментальные результаты в области обработки естественных языков, так и носят прикладной характер, поскольку результаты нацелены на решение практической задачи мониторинга научных статей. Источником информации для данного исследования являются научные статьи, а точнее их аннотации, находящиеся в открытом доступе. Данную тему можно отнести к направлению анализа научных текстов.

Воспользовавшись принципом абдукции, важнейшим принципом генерации новых систем [1], можно сделать вывод, что задача поиска текстов, посвященных взаимодействию препаратов, является важным направлением дальнейшего развития данной области исследований.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Камаев, В. А. Абдукция – инструмент концептуально-го проектирования новых технических систем / В. А. Камаев // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2011. – № 2. – С. 32–36.
2. Shahar Y, Young O, Shalom E, Galperin M, Mayaffit A, Moskovitch R, Hessing A. A framework for a distributed, hy-

brid, multiple-ontology clinical-guideline library, and automated guideline-support tools. *J Biomed Inform.* 2004 Oct; 37(5):325-44. PubMed PMID: 15488747.

3. *Rafael Valencia-Garcia*, et al, A knowledge acquisition methodology to ontology construction for information retrieval from medical documents. *Expert Systems Vol. 25*, Issue 3, pp. 314–334, July 2008.

4. *Xiaohua Z*, et al. Approaches to text mining for clinical medical records, Association for Computing Machinery, 2006.

5. *Murff H*, Patel V, Hripcsak G, Bates D. Detecting adverse events for patient safety research: a review of current methodologies. *J Biomed Inform.* 2003 Feb-Apr;36(1-2):131-43. Review. PubMed PMID: 14552854..

6. *Chapman W*, Christensen L, Wagner M, Haug P, Ivanov O, Dowling J, Olszewski R. Classifying free-text triage chief complaints into syndromic categories with natural language processing. *Artif Intell Med.* 2005 Jan; 33(1):31-40. PubMed PMID: 15617980.

7. *Shahar Y*, Young O, Shalom E, Galperin M, Mayaffit A, Moskovitch R, Hessing A. A framework for a distributed, hybrid, multiple-ontology clinical-guideline library, and automated uideline-support tools. *J Biomed Inform.* 2004 Oct;37(5):325-44. PubMed PMID: 15488747.

8. *Chapman W*, Dowling J, Wagner M. Fever detection from free-text clinical records for biosurveillance. *J Biomed Inform.* 2004 Apr; 37(2):120-7. PubMed PMID: 15120658.

9. *Shah N*, Jonquet C, Chiang A, Butte A, Chen R, Musen M. Ontology-driven indexing of public datasets for translational bioinformatics. *BMC Bioinformatics.* 2009 Feb 5;10 Suppl 2:S1. doi: 10.1186/1471-2105-10-S2-S1. PubMed PMID: 19208184; PubMed Central PMCID: PMC2646250.

10. *Z. Liu and W. W. Chu*. Knowledge-based query expansion to support scenario-specific retrieval of medical free text. In SAC '05, pages 1076–1083. ACM Press, 2005.

11. *Coden A*, Savova G, Sominsky I, Tanenblatt M, Masanz J, Schuler K, Cooper J, Guan W, de Groen PC. Automatically extracting cancer disease characteristics from pathology reports into a Disease Knowledge Representation Model. *J Biomed Inform.* 2009 Oct; 42(5):937-49. doi: 10.1016/j.jbi.2008.12.005. Epub 2008 Dec 27. PubMed PMID: 19135551.

12. *Wenlei Mao*, Wesley W. Chu, The phrase-based vector space model for automatic retrieval of free-text medical

documents, *Data & Knowledge Engineering*, Volume 61, Issue 1, April 2007, Pages 76-92, ISSN 0169-023X, 10.1016/j.datak.2006.02.008.

13. *Cheng L*, Zheng J, Savova G, Erickson B. Discerning tumor status from unstructured MRI reports--completeness of information in existing reports and utility of automated natural language processing. *J Digit Imaging.* 2010 Apr;23(2):119-32. doi: 10.1007/s10278-009-9215-7. Epub 2009 May 30. Review. PubMed PMID: 19484309; PubMed Central PMCID: PMC2837158.

14. *Gurulingappa H*, Kolárik C, Hofmann-Apitius M, Fluck J. Concept-based semi-automatic classification of drugs. *J Chem Inf Model.* 2009 Aug;49(8):1986-92. doi: 10.1021/ci9000844. PubMed PMID: 19663460.

15. *Rindflesch TC*, Fiszman M. The interaction of domain knowledge and linguistic structure in natural language processing: interpreting hypernymic propositions in biomedical text. *J Biomed Inform.* 2003 Dec;36(6):462-77. PubMed PMID: 14759819.

16. *Vincze V*, Szarvas G, Farkas R, Mora G, Csirik J: The BioScope corpus:biomedical texts annotated for uncertainty, negation and their scopes. *BMC Bioinformatics* 2008, 9(11):S9.

17. *Humphrey S*, Rogers W, Kilicoglu H, et al. Word sense disambiguation by selecting the best semantic type based on journal descriptor indexing: preliminary experiment. *J Am Soc Inf Sci Technol* 2006;57:96–113.

18. *Cheng-Ju Kuo*, Maurice HT Ling, Kuan-Ting Lin, and Chun-Nan Hsu. «BIOADI: a Machine Learning Approach to Identifying Abbreviations and Definitions in Biological Literature». *BMC Bioinformatics*, 2009. <http://www.biomedcentral.com/1471-2105/10/S15/S7>.

19. *Douglass M*, Clifford G, Reisner A, et al. «Identification algorithm for free-text nursing notes», in *Computers in Cardiology*, 2005.

20. *Leroy G*, Chen H, Martinez JD. A shallow parser based on closed-class words to capture relations in biomedical text. *J Biomed Inform.* 2003 Jun;36(3):145-58. PubMed PMID: 14615225.

21. *Taira R*, Bashyam V, Kangaroo H. A field theoretical approach to medical natural language processing. *IEEE Trans Inf Technol Biomed.* 2007 Jul;11(4):364-75. PubMed PMID: 17674619.

УДК 004.946

*Н. М. Рашевский, А. М. Дворянкин*

## РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССА ПОСТРОЕНИЯ И МОДЕЛИ ВИРТУАЛЬНОГО ТУРА С ДИНАМИЧЕСКИМИ ПЕРЕХОДАМИ

Волгоградский государственный технический университет

rashevsky.n@gmail.com, dvam@vstu.ru

В статье рассмотрены способы навигации в виртуальных турах, их достоинства и недостатки. Предложен новый процесс построения динамических переходов в виртуальных турах. На основе предложенного процесса разработана модель виртуального тура с динамическими переходами, учитывающая предпочтения пользователя, а также алгоритм построения оптимального виртуального тура.

*Ключевые слова:* виртуальный тур с динамическими переходами, модель виртуального тура, предпочтения пользователя, графы, оптимальный путь.

*N. M. Rashevsky, A. M. Dvoryankin*

## DEVELOPMENT OF BUSINESS PROCESSE FOR VIRTUAL TOUR CREATION AND MODEL OF DYNAMIC VIRTUAL TOUR

Volgograd State Technical University

In this paper the navigation features of dynamic virtual tours were considered. A new business process for creating the dynamic virtual tours was proposed. On the base of proposed process a new model of dynamic virtual tour was developed, taking into account the user preferences. An algorithm for creation of optimal virtual tour was implemented.

*Keywords:* dynamic virtual tour, model of virtual tour, user preferences, graphs, optimal path.

### Введение

Быстро развивающиеся интернет-технологии заставляют владельцев сайтов применять новые разработки для увеличения наглядности сайта и повышения конкурентоспособности. Виртуальный тур как технология, объединившая в себе образное восприятие, звуковую дорожку, текстовую информацию и переход по ссылкам к другим объектам, завоевывает все большее пространство в Интернете. Использование виртуального тура – это хорошая возможность наиболее полно воздействовать на человека, дав ему право самостоятельно и в удобном для него режиме перемещаться по туру.

Одной из основных видимых проблем использования виртуальных туров с большим числом точек перехода является плохая ориентация. С ростом числа отдельных 3D-панорам в виртуальном туре навигация по нему становится сложнее, пользователю приходится тратить много времени для поиска необходимой информации. Улучшить навигацию по туру предлагается за счет использования динамических переходов.

#### Способы навигации по виртуальному туру

Виртуальный тур создает впечатление настоящего присутствия внутри объекта и позволяет пользователю самому решать, как составить свой маршрут, рассмотреть все, что его интересует, приблизившись к определенным предметам, или получить большой обзор, удаляясь при помощи визуальных кнопок. Можно сказать, что виртуальный тур – это набор переходов между отдельными 3D-панорамами. Маршрут виртуального тура представляет собой наиболее удобный путь следования, способствующий раскрытию темы. Он строится в зависимости от наиболее правильной последовательности осмотра объектов. Одна из задач маршрута – способствовать получению наиболее полного объема необходимой информации.

Рассмотрим три основных способа навигации по виртуальному туру:

1) расстановка точек переходов непосредственно на 3D-панорамах (примером такого отображения может служить тур по Лувру [1]). Этот способ прост в реализации; точки переходов на отдельных 3D-панорамах расставляются стандартными средствами. Но при перемещении по туру возникают следующие проблемы:

– пользователь не видит границ виртуального тура, ему сложно понять, сколько еще не-

обходимо времени, чтобы закончить осмотр объекта отображения;

– так как отсутствует план виртуального тура, пользователю приходится запоминать все переходы, поэтому возврат в точку начала обзора для пользователя может быть проблематичен;

– проблемы, указанные в предыдущих пунктах, приводят к тому, что пользователь теряет ся в виртуальном туре;

2) навигация осуществляется при помощи «статической карты» (примером проведения тура по карте может быть виртуальный тур по Оксфордскому университету [2]). Для статической карты справедливы следующие утверждения: карта представляет собой план объекта отображения и набор точек переходов; для всех посетителей карта выглядит одинаково; изменять маршрут (набор точек переходов) может только разработчик тура. Основным преимуществом статических карт для разработчика является простота реализации, для пользователя же важно, что ему понятны размер и план виртуального тура, в отличие от предыдущего метода. Но с увеличением числа 3D-панорам и увеличением размера карты возникают следующие проблемы:

– тур становится недостаточно понятным;

– ухудшается ориентация по туру при выборе необходимой информации; пользователю следует просмотреть все точки перехода, что занимает много времени;

– происходит наложение точек переходов в зависимости от размера карты);

– уменьшается информативность тура, под «информативностью тура» мы будем понимать получение наиболее полной информации об объекте при наименьших затратах времени;

3) комбинированный способ – это сочетание первого и второго способов. Визуально пользователь может, путешествуя по туру, определить, где находится в данный момент.

Необходимо отметить, что способ навигации по виртуальному туру закладывается разработчиком виртуального тура при его создании. Поэтому для изменения процесса навигации по туру необходимо изменить процесс создания виртуального тура.

#### Процесс построения виртуального тура с динамическим формированием точек перехода

С развитием геоинформационных систем, систем 3D-моделирования, виртуальных туров, появилась потребность строить в этих системах маршруты, ориентируясь на людей, организа-

ции и компании с определенными интересами и возможностями [5]. В зарубежных источниках [3, 4] новые технологии (модель предпочтения пользователя, многокритериальный поиск и др.) используются для систем виртуальной реальности, 3D-моделирования и геоинформационных систем. В отечественных источниках [6] отмечается, что для российских организаций больше подходят виртуальные туры, так как они проще и дешевле в реализации, при этом качество визуализации объекта отображения является достаточно высоким.

На основе реинжиниринга процесса построения виртуального тура, приведенного в [7], был предложен новый процесс построения виртуального тура, устраняющий упомянутые выше проблемы навигации. Он включает в себя следующие подпроцессы:

1) «загрузка панорам с эффектами» – в данном подпроцессе в программе генерации динамического маршрута создается новый проект. Затем набор файлов (файлы шаблонов, 2D-панорамы, звуковые дорожки и др.), полученных при генерации 3D-панорам, загружается в программу генерации динамического маршрута;

2) «формирование показателей маршрута» –

исходя из предметной области тура, разработчик выделяет набор показателей, которые будут использоваться пользователем при построении маршрута;

3) «заполнение идеальных значений показателей» – для каждой панорамы разработчик тура заполняет «идеальные» значения набора показателей;

4) «формирование анкеты для оценки тура» – критик (в нашем случае пользователь) оставляет оценку о просмотренном туре, заполняя анкету, содержащую набор вопросов, по которым оценивается удовлетворенность пользователей сгенерированным маршрутом;

5) «построение схемы тура» – программа генерации маршрута по загруженным файлам шаблонов отдельных 3D-панорам строит граф переходов между панорамами. В дальнейшем на данном графе будет осуществляться поиск оптимального маршрута;

6) «построение маршрута» – на сформированном графе строится маршрут с учетом значений показателей анкет.

Процесс построения виртуального тура с динамическими переходами приведен на рис. 1 в виде IDEF0-диаграммы.

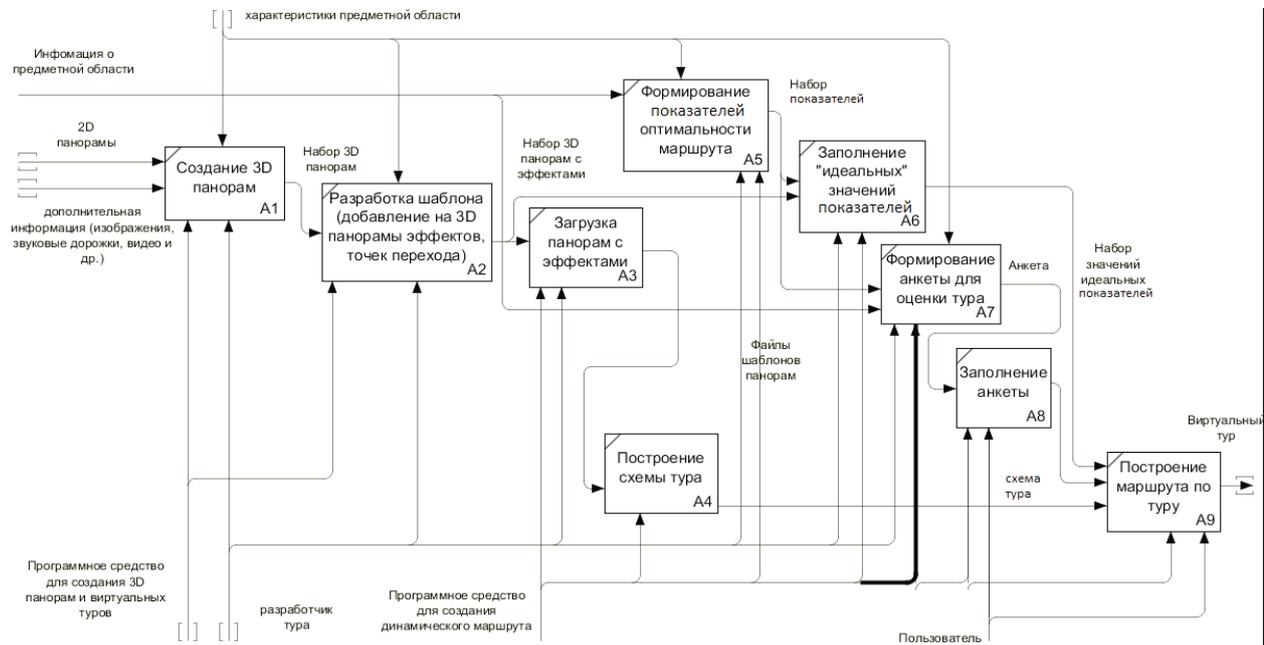


Рис. 1. IDEF0-диаграмма процесса построения виртуального тура с динамическими переходами

Также произведен реинжиниринг процесса просмотра виртуального тура, результат которого представлен на рис. 2. Процесс содержит два новых подпроцесса – «Заполнение критериев поиска» и «Заполнение анкеты». В первом подпроцессе пользователь вводит интересую-

щие его характеристики тура – предпочтения пользователя. Данные предпочтения являются основой при генерации переходов в виртуальном туре. Во втором подпроцессе пользователь по окончании просмотра виртуального тура заполняет анкету с оценкой.



Рис. 2. UML-диаграмма деятельности, отображающая процесс просмотра виртуального тура

**Модель виртуального тура с динамическими переходами**

Объектом моделирования является виртуальный тур, который состоит из множества отдельных 3D-панорам и переходов между ними.

Представим виртуальный тур  $T$  в виде кортежа:

$$T = \langle G, P, W, Q, Z \rangle,$$

где  $G = (V, E)$  – связный неориентированный граф;  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  – множество вершин графа, которым соответствуют 3D-панорамы в виртуальном туре;  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$  – множество ребер в графе, которые соответствуют возможным переходам от одной панорамы к другой;  $P = \{p^1, p^2, \dots, p^k\}$  – показатели анкеты для оценки

вершин графа, где каждый показатель имеет наименование и целочисленное значение в порядковой шкале от 0 до 5;  $W = \{w_1, w_2, \dots, w_k\}$  – весовые коэффициенты показателей ( $0 \leq w_i \leq 1$  и сумма всех коэффициентов равна 1);  $Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_n\}$  – оценки вершин графа  $G$  относительно показателей  $P, Q_i = \{p^1, p^2, \dots, p^k\}$ , где  $i$  – номер вершины графа  $G$ ;  $Z = \{z^1, z^2, \dots, z^k\}$  – предпочтения пользователя для просмотра тура (анкета для формирования маршрута).

Для каждой вершины  $i$  графа  $G$  определим степень близости  $d_i$  к предпочтениям пользователя  $Z$  для просмотра тура и назовем весом вершины  $i$ :

$$d_i = \sqrt{\sum_{j=1}^k w_j (p_i^j - z^j)^2}.$$

Полагаем, что вершина  $i$  предпочтительнее вершины  $j$ , если  $d_i < d_j$ .

Отметим, что компоненты  $G, P, W, Q$  строятся экспертом – разработчиком тура, а компонента  $Z$  задается пользователем.

Рассмотрим пример модели виртуального тура  $T$  по музею Волгоградского государственного технического университета (ВолгГТУ) [8]. Граф  $G = (V, E)$  представлен на рис. 3, а. Наименования показателей  $P$  анкеты для оценки вершин графа приведены в колонке 2 табл. 1. Шкала значений показателей  $P$  приведена в табл. 2. Весовые коэффициенты  $w$  показателей:  $w_i = 0.1$  для всех  $i = 1, \dots, k$ . Оценки  $Q$  вершин графа  $G$  относительно показателей  $P$  приведены в колонке 3 табл. 1. Предпочтения пользователя  $Z$  для просмотра тура приведены в колонке 4 табл. 1.

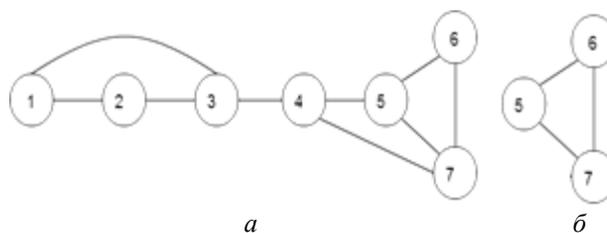


Рис. 3. Графы виртуальных туров по музею ВолгГТУ: а – граф  $G$  виртуального тура  $T$ ; б – граф  $G_0$  виртуального тура  $T_0$

Таблица 1

**Значения показателей  $P$  на вершинах графа  $G$**

Показатель	Оценки вершин графа							Предпочтения пользователя
	1	2	3	4	5	6	7	
1. История университета	5	5	4	2	0	0	0	1
2. Общественная деятельность	1	0	5	0	0	0	0	1
3. Награды и подарки	4	2	2	4	0	1	1	2
4. Организация процесса образования	0	0	4	4	4	4	4	1

Окончание табл. 1

Показатель	Оценки вершин графа							Предпочтения пользователя
	1	2	3	4	5	6	7	
5. Достижения прикладной науки	0	0	1	5	4	5	4	5
6. Теоретические исследования	0	0	1	4	4	5	4	5
7. Информация о людях	5	5	4	3	3	4	3	3
8. Информация о технике и технических изделиях	0	0	0	2	4	5	5	4
9. Наличие интерактивных эффектов на панораме	2	3	4	5	4	4	3	2
10. Насыщенность экспонатами	4	5	5	5	5	5	3	4

Таблица 2

**Шкала значений показателей Р**

Значение	Наименование
0	Отсутствие информации
1	Небольшое наполнение информацией
2	Наполнение информацией ниже среднего
3	Среднее наполнение информацией
4	Наполнение информацией выше среднего
5	Большое наполнение информацией

Для данного примера значения весов вершин равны:  $d_1=3.02$ ;  $d_2=3.0$ ;  $d_3=2.97$ ;  $d_4=1.73$ ;  $d_5=1.48$ ;  $d_6=1.38$ ;  $d_7=1.3$ .

**Постановка задачи**

Пусть задан виртуальный тур  $T=<G,P,W,Q,Z>$ . Вычислим вес  $d_i$  для каждой вершины графа. Для формулировки задачи построения нового тура зададим число  $h$  – количество вершин в графе  $G_0$ . Полагаем, что  $h < n$ .

Необходимо найти новый тур  $T_0 = <G_0,P,W,Q,Z>$ , в котором граф  $G_0$  содержит  $h$  наиболее предпочтительных вершин графа  $G$ , а ребра графа  $G_0$  строятся по правилам ниже приведенного алгоритма. Назовем эту задачу задачей построения оптимального виртуального тура, где критерий оптимальности – подмножество  $V_0 \subset V$  такое,  $|V_0| = h$ .

**Алгоритм построения оптимального виртуального тура**

Алгоритм построения оптимального виртуального тура  $T_0$  выглядит следующим образом:

Шаг 1. Вершины упорядочиваются по возрастанию веса  $d_i$ .

Шаг 2. В  $V_0$  заносятся первые  $h$  вершин из  $V$ .

Шаг 3. Строится связный граф  $G_0$  по правилам:

если ребро  $(i,j) \in E$  и  $i, j \in V_0$ , то оно входит в  $E_0$ ;

иначе ищем путь в графе  $G$  из  $i$  в  $j$ , в котором только  $i$  и  $j$  принадлежат  $V_0$  (такой путь существует, т. к. граф  $G$  связный) и строим ребро  $(i,j)$  в графе  $G_0$ ; если таких путей несколько, то рассматриваем только один (строим только одно ребро  $(i,j) \in E_0$ ).

Результат работы данного алгоритма для виртуального тура по музею истории и науки ВолгГТУ с параметрами, рассмотренными выше, и  $h=3$  приведен на рис. 3, б.

**Выводы**

Применение предложенных процессов и модели позволяет устранить проблемы с навигацией по виртуальному туру, а также использовать при реализации инструментальные средства построения виртуальных туров. Отметим, что проект веб-сервиса «Технология построения виртуальных туров по социально-значимым и туристическо-значимым объектам города Волгограда», использующего предложенные процессы и модель, получил диплом второй степени в конкурсе «Лучшие инновации – жителям Волгограда 2013», организованный администрацией города Волгограда.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Online Tours [Electronic resource] / Musee du Louvre. – [2013]. – Access of mode : <http://www.louvre.fr/en/visites-en-ligne>.
2. Virtual Tour of Oxford [Electronic resource] / University of Oxford. – [2013]. – Access of mode : <http://www.chem.ox.ac.uk/oxfordtour/>.
3. Yiakoumettis, Christos Active learning of user’s preferences estimation towards a personalized 3D navigation of geo-referenced scenes [Electronic resource] / Christos Yiakoumettis, Nikolaos Doulami, Georgios Miaoulis, Djamchid Ghazanfarpour. – 2013. – Mode of access: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10707-013-0176-0>.
4. Jason, G. Su Designing a route planner to facilitate and promote cycling in Metro Vancouver, Canada [Electronic resource] / Jason G. Su, Meghan Winters, Melissa Nunes, Michael Brauer. – 2010. – Mode of access: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856410000546>.

5. Афонасенков, Е. В. Задачи о кратчайшем пути с фиксированными платежами / Е. В. Афонасенков, И. А. Степаненко // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 15(102) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 15). – С. 5–8.

6. Виртуальные музеи: используемые технологии и анализ передового опыта разработки [Электронный ресурс] / Д. В. Земляков, А. М. Коротков, А. В. Никитин,

А. В. Штыров. – 2013. – Режим доступа : <http://elibrary.ru/download/87880380.pdf>.

7. Зайцева, М. А. Технология создания виртуальных интерактивных туров RUBIUS 3DTourKit [Электронный ресурс] / М. А. Зайцева, А. П. Лысак. – 2010. – Режим доступа : <http://elibrary.ru/item.asp?id=15515060>.

8. Виртуальный тур – Музей истории и науки ВолгГТУ [Электронный ресурс] / ВолгГТУ. – [2013]. – Accessofmode : [http://museum.vstu.ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=6&Itemid=12](http://museum.vstu.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=6&Itemid=12).

УДК 621.391

*А. Г. Финогеев<sup>1</sup>, И. С. Нефедова<sup>1</sup>, Тхай Куанг Винь<sup>2</sup>*

### ПРОБЛЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ В SCADA-СИСТЕМАХ АСУ ТП

<sup>1</sup>Пензенский государственный университет

<sup>2</sup>Институт информационной технологии (Ханой, Вьетнам)

[alexeyfinogeev@gmail.com](mailto:alexeyfinogeev@gmail.com), [tqvinh@ioit.ac.vn](mailto:tqvinh@ioit.ac.vn)

В статье рассмотрены проблемы обеспечения безопасности SCADA-систем на базе беспроводных сенсорных сетей. Анализ и оценка уязвимостей транспортной среды и программно-аппаратных компонент позволяет определить перечень мероприятий для снижения угроз и рисков безопасности и снижения возможного ущерба после атак. Приведена классификация основных уязвимостей в SCADA-системах с беспроводными сенсорными сетями. Предложена методика оценки уязвимостей. Проанализированы основные причины невысокой эффективности традиционных механизмов защиты данных в таких системах. Рассмотрены основные методы решения проблем безопасности беспроводных сенсорных сетей SCADA-систем.

*Ключевые слова:* информационная безопасность, SCADA-система, беспроводная сенсорная сеть, уязвимость, эксплуат, обнаружение и предотвращение вторжений, аутентификация, идентификация, пентестинг, шифрование.

*A. G. Finogeev, I. S. Nefedova, Thai Quang Vinh*

### THE PROBLEMS OF SECURITY WIRELESS SENSOR NETWORKS IN SCADA SYSTEMS APCS

**Penza State University, Institute of Information Technology in Hanoi, Vietnam**

This article discusses the problems of security of SCADA systems based on wireless sensor networks. Analysis and vulnerability assessment of the transport network and hardware-software component allows a list of measures to reduce security threats and risks and reduce possible damage after the attacks. A classification of the major vulnerabilities in SCADA systems with wireless sensor networks is considered. A method for the assessment of vulnerabilities is offered. Analyzes the main reasons for the low efficiency of traditional data protection mechanisms in such systems. The basic methods of addressing security of wireless sensor networks SCADA systems are considered.

*Keywords:* Information Security, SCADA system, wireless sensor network, Vulnerability, Exploit, Intrusion Detection and Prevention, Authentication, Identification, Pentesting, Encryption.

#### Введение

Понимание и оценка понимания актуальных угроз информационной безопасности – это основа для реализации практически любого IT-проекта, в том числе и проектов по созданию, внедрению и эксплуатации систем диспетчерского контроля и сбора данных (SCADA – supervisory control and data acquisition) АСУ технологических процессов (ТП). Интерес к обеспечению информационной безопасности систем АСУ ТП резко возрос после серии атак посредством компьютерного вируса Stuxnet в 2010 году. На сегодняшний день все антивирусные программы позволяют найти и удалить

червь Stuxnet. Компания Microsoft устранила критические уязвимости, которые использовал червь для распространения, а SIEMENS выпустил «заплатку» для своей системы WinCC.

Однако только за два последних года было обнаружено более 150 новых уязвимостей в популярных продуктах (например, в системах Siemens SIMATIC, Schneider Electric, Broadwin/Advantech), что больше, чем за все предыдущие годы. Несмотря на то, что производители стараются оперативно устранить их, примерно 20 % проблем остаются не закрытыми более месяца с момента обнаружения, причем более половины из них имеют критическую

степень риска. Интересы хакеров направлены на такие составляющие АСУ ТП, как системы SCADA и подсистемы человеко-машинного интерфейса (HMI). Однако и в программируемых логических контроллерах различных производителей также есть уязвимости. Тренд в области разработки систем защиты информации все более смещается в сторону промышленных SCADA-систем, что также связано с широким внедрением беспроводных технологий для сбора и передачи телеметрических данных и команд управления, когда в качестве транспортной среды используется беспроводная сенсорная сеть (БСС). Еще одним фактором является тенденция подключения промышленных SCADA-систем к сети Интернет для обеспечения возможности работы персонала предприятия через Web-интерфейс с использованием технологий удаленного доступа и мобильных средств связи.

Производители SCADA-систем обращают все большее внимание на обеспечение информационной безопасности своих продуктов. Например, одна из ведущих компаний Siemens сформировала специальное подразделение Siemens Product CERT (<http://www.siemens.com/corporate-technology/en/research-areas/siemens-cert-security-advisories.htm>), деятельность которого связана с обнаружением и устранением проблем безопасности в своих системах, и каталогизацией обнаруженных уязвимостей в соответствующих базах данных (как, например, Siemens Product CERT, ICS-CERT, OSVDB, NVD, Bugtraq, exploit-db, Mitre Oval Repositories и т. п.).

Удаленное и географически распределенное расположение датчиков, промышленных контроллеров, приборов автоматики в SCADA-системах [1], автономность их функционирования увеличивает риск сторонних вторжений и атак. При использовании беспроводной транспортной среды для передачи данных и команд достаточно просто перехватить и подменить кадры, передаваемые по сети, на кадры с вредоносным содержимым. Можно организовать генерацию и рассылку большого числа сторонних кадров в БСС, чтобы вызвать «отказ в обслуживании» (denial-of-service – DoS-атаку) промышленного оборудования или сетевого узла. И, наконец, нарушить работу радиопередающих сетевых устройств можно путем генерации мощного электромагнитного излучения в частотном диапазоне БСС импульсного характера

или сигнала типа «белый шум» (jamming attack).

### 1. Обнаружение и оценка уязвимостей в системах управления технологическими процессами

Термин «уязвимость» означает существование такой проблемы безопасности, которая позволяет нарушить целостность и конфиденциальность системы. Уязвимости проявляются при использовании слабой парольной аутентификации, неправильной конфигурации аппаратного обеспечения и компонент операционной системы (ОС), ошибок в программных приложениях, при вирусных или хакерских атаках и т. п. Уязвимость системы определяет риски безопасности в том случае, если с ее помощью можно осуществить атаку на информационную систему. В АСУ ТП уязвимости, которые могут привести к нарушению ее работы и несанкционированного доступа к информации, обнаруживаются:

- в системах диспетчерского управления и сбора данных (SCADA);
- интерфейсах управления объектами автоматизации;
- компонентах транспортной системы сбора и передачи данных;
- приложениях аналитической обработки данных;
- подсистемах управления производством.

Далее рассматриваются вопросы уязвимостей SCADA-систем, так как здесь никакие меры обеспечения безопасности не гарантируют 100 %-ю защиту от рисков и угроз. Потенциальная опасность возрастает при упрощении процедур беспроводного удаленного доступа пользователей к сетевым ресурсам. Анализ и оценка уязвимостей наряду с реагированием на обнаруженные проблемы безопасности применяется для обнаружения недостатков информационных систем и разработки мероприятий для снижения угроз и рисков.

Использование традиционных информационных технологий в SCADA-системах является одной из причин низкого уровня их защищенности и позволяет злоумышленнику применять известные методики поиска и эксплуатации уязвимостей. Другим фактором, облегчающим действия злоумышленника при обнаружении и эксплуатации уязвимостей, является доступность сведений о них в сети Интернет. В настоящий момент более 40 % всех уязвимостей

имеют доступный функциональный код, включенный в состав свободно распространяемых программных пакетов для анализа уязвимостей при проведении тестов на проникновение (пентестинга). Хотя пентестинг включает в себя оценку уязвимости, но, прежде всего, это метод оценки безопасности всей компьютерной системы или сети посредством моделирования атак злоумышленника. Если в сети Интернет есть информация или эксплоиты для пентестинга, то вероятность атаки на компоненты системы SCADA резко возрастает. Эксплоит (exploit) – это программа, скрипт, фрагмент кода или последовательность команд, использующие уязвимости в ПО и ОС, для проведения атак на систему или сеть с целью ее компроментации, захвата контроля либо нарушения функционирования (DoS-атака). Подобные утилиты выпущены почти для половины обнаруженных уязвимостей АСУ ТП и входят в состав программных пакетов для проведения тестов на проникновение, либо описаны в уведомлениях об уязвимости.

Оценка уязвимости SCADA системы – это процесс выявления, анализа, классификации уязвимостей [2] с оценкой рисков безопасности и возможного ущерба при ее эксплуатации злоумышленниками или вредоносными программами. Основной проблемой при проведении пентестинга для выявления уязвимостей является тот факт, что SCADA-система часто находится в производственном процессе, и ее работа не должна нарушаться эксплоитами.

Для описания и оценки уязвимостей используются специальные метрики, которые можно разделить:

- 1) на базовые метрики, описывающие основные свойства уязвимости;
- 2) временные метрики, описывающие характеристики, меняющиеся со временем;
- 3) метрики среды – свойства уязвимости, характерные для определенной среды.

Возможный ущерб, который может быть нанесен при эксплуатации уязвимости можно разбить на три уровня:

- 1) низкий уровень ущерба – незначительные, ограниченные или предотвратимые последствия, которые могут привести к сбоям в работе системы;
- 2) средний уровень ущерба – существенные негативные последствия, которые приводят к отказам системы;
- 3) высокий уровень ущерба – катастрофические негативные последствия, которые при-

водят к полному коллапсу системы.

Основные этапы оценки уязвимостей:

- 1) оценка ресурсов и производительности SCADA системы;
- 2) ранжирование ресурсов и компонент системы в соответствии со степенью важности и критичности их безопасности;
- 3) выявление уязвимостей и возможных угроз при их использовании с ранжированием по степени важности;
- 4) моделирование атак для тестирования уязвимостей для каждой компоненты и ресурса по методу сценарного анализа;
- 5) прогнозирование и оценка возможного ущерба при эксплуатации уязвимостей;
- 6) составление отчетов об обнаруженных уязвимостях, извещение администрации предприятия и производителей компонент системы о выявленных проблемах;
- 7) разработка мероприятий по устранению уязвимостей и решению проблем с потенциальными рисками и угрозами безопасности.

Выделим распространенные типы уязвимостей SCADA системы:

- 1) уязвимости аутентификации узлов и данных посредством «слабой» парольной защиты (Authentication). Большая доля таких уязвимостей связана с использованием стандартных инженерных паролей, установленных производителями на приборах промышленной автоматике. Кроме того, пользователи системы часто используют простые легко запоминаемые пароли, которые могут быть легко определены или, наоборот, сложные для запоминания пароли с их открытым хранением;
- 2) уязвимости шифрования из-за использования «слабых» криптографических алгоритмов и систем управления ключами (Key Management);
- 3) уязвимости из-за ошибок конфигурации SCADA-системы (ошибки настройки сетевого оборудования и сетевых служб ОС, ошибки при разграничении прав доступа и полномочий, ошибки при задании разрешений на доступ к ресурсам, применение стандартных шаблонов безопасности и т. п.). Часто производитель системы навязывает неоптимальные политики безопасности, либо по умолчанию устанавливает административные права доступа;
- 4) уязвимости, вызванные отсутствием обновлений безопасности для различных версий SCADA-систем, либо несвоевременностью их установки;

5) уязвимости программно-аппаратных компонент, позволяющие использовать DoS-атаки для автоматического выполнения протоколов аварийных или нештатных ситуаций, завершения или «зависания» программ, эксплуатации в системе вредоносного кода. Как правило, такие уязвимости связаны с ошибками программистов производителей SCADA. Ошибка в программе может позволить злоумышленнику использовать открытые порты для запуска вредоносного кода в системе, проведения DoS-атаки для переполнения размера буферов данных и т. п.

В качестве утилит для пентестинга и оценки уязвимостей можно отметить:

1) эксплоит Nessus (Tenable), который включает такие программы, как Modicon PLC (Использование паролей по умолчанию), Sisco OSI (Отказ в обслуживании), Netbiter (Неавторизованное исполнение кода). Инструмент для оценки уязвимости имеет более 45 000 плагинов с возможностями удаленной и локальной (с аутентификацией) проверки безопасности, встроенным языком для написания скриптов и плагинов исследования сети;

2) эксплоит PLCScan с открытым кодом, который позволяет обнаружить в сети устройства, взаимодействующие по протоколам S7comm или Modbus, а затем пытается получить информацию о производителе, типе устройства, установленных модулях и т. п.;

3) эксплоит Metasploit WinCC Harvester, который может быть использован после получения доступа к SCADA WinCC для сбора информации о проекте, пользователях и подключенных к системе контроллерах;

4) GFI LANguard: коммерческий сканер безопасности сети сканирует для IP-сетей Windows; определяет работающие узлы; пробует распознать ОС; собирает информацию об установленных на Windows пакетах обновлений, отсутствующих патчах безопасности, беспроводных точках доступа, USB-устройствах, открытых ресурсах, портах, активных приложениях, записях в реестре, слабых паролях, пользователей и группах и т. д. Результаты сканирования сохраняются в HTML-отчете;

5) MaxPatrol. Сетевой сканер безопасности на Microsoft Windows, оптимизированный для эффективного использования компаниями любого размера (обслуживающий от нескольких до десятков тысяч узлов). Поддерживает проверку на уязвимости для серверов с нестандартными конфигурациями, интеллектуальное

распознавание уязвимости в известных (и пользовательских) сценариях сервера сети, идентификация RPC-сервисов и многое другое;

6) Core Impact. Автоматический продукт для сканирования уязвимостей с регулярно обновляемой базой профессиональных эксплоитов; имеет возможность эксплуатации одной из механизмов с последующей установкой зашифрованного туннеля, к которому можно подключиться и эксплуатировать другие системы;

7) X-scan. Многопоточный сканер с поддержкой плагинов содержит множество возможностей, включая поддержку скриптового языка описания атак Nessus, определение типа сервисов, удаленное определение типа ОС, слабых паролей и другое;

8) комплекс «SCADA-Аудитор» – российский сканер анализа защищенности технологических сетей SCADA систем.

Также доступны другие сборники эксплоитов: VulnDisco Exploit Pack Immunity Canvas, D2 Exploit Pack, Agora Pack, Agora SCADA+, SAINTexploit, White Phosphorus exploit pack, Metasploit Project, Wonderware Suitelink 2.0, GE Fanuc Real Time Information Portal 2.6, Automated Solutions Modbus TCP Slave, Livedata, Takebishi Electric DeviceXPlorer OPC Server, Icons DlgWrapper, TF3400 и т. д.

## **2. Проблемы обеспечения безопасности в SCADA-системах с беспроводными сенсорными сетями**

Несмотря на то, что на сегодняшний день есть различные варианты защиты SCADA-систем от атак злоумышленников, многие из них предъявляют достаточно высокие требования к аппаратным, вычислительным и энергетическим ресурсам, что не подходит для беспроводных сенсорных сетей.

В частности, особенностью сенсорных узлов является низкое энергопотребление, что связано с использованием «спящего» режима. Это позволяет узлам работать от автономных источников питания, но ограниченные энергоресурсы и небольшая вычислительная мощность не дают возможность применять для защиты сложные протоколы и алгоритмы. Сенсорные узлы могут включаться в общую инфраструктуру автоматически и спонтанно и размещаться на удаленных неохранных объектах, поэтому они могут быть захвачены и взломаны злоумышленником с целью использования их как источников атак. В сенсорных сетях немаловажное значение имеет своевременное

обнаружение и изоляция таких скомпрометированных узлов, и активная защита от атак с их стороны до момента обнаружения. Критической угрозой для беспроводной сенсорной сети является внедрение через скомпрометированные узлы кодов для кражи важных данных о контролируемых процессах или для нарушения их корректной работы.

Выделим основные причины невысокой эффективности традиционных механизмов защиты передаваемых данных [3] для обеспечения безопасности SCADA-систем с беспроводными сенсорными сетями:

1) топология и динамические маршруты в сенсорной сети строятся на основе информации, полученной от координаторов, маршрутизаторов или конечных сенсорных узлов по принципу «маршрутизация от источника» [4];

2) при работе алгоритмов маршрутизации используется механизм широковещательной рассылки маршрутных кадров и квитанций подтверждения. Широковещательная рассылка также используется при конфигурировании сети и поиске новых узлов;

3) после построения маршрута передача кадров осуществляется последовательно по цепочке между соседними узлами по одному маршруту, который можно разрушить или изменить в любой момент времени;

4) идентификация сенсорных узлов и кадров данных осуществляется только на основе адресной информации, полученной сенсорными узлами от координатора сети, что позволяет подменить координатор и переназначить адреса;

5) аутентификация кадров данных и узлов сети в большинстве случаев просто не выполняется, что позволяет подменить сенсорные узлы и маршрутизаторы на «чужие» узлы с вредоносной «прошивкой». Широковещательная аутентификация узлов и кадров данных являются необходимым условием обеспечения защиты и устойчивости работы БСС.

Следовательно, системы диспетчерского управления и сбора данных SCADA на базе сенсорных беспроводных сетей [5] требуют новых решений по обеспечению безопасной передачи данных.

Принятие и внедрение стандарта 802.11i, в котором излагаются требования по обеспечению безопасности в беспроводных сетях, позволило предприятиям в некоторой мере решить проблемы защиты сетевой транспортной инфраструктуры. Однако стандарт включает

лишь рекомендации в отношении аутентификации и/авторизации пользователей с целью контроля и управления доступом к беспроводным сетям, а также в плане криптографической защиты передаваемых кадров данных. Стандарт не рассматривает технологии обнаружения (IDS – Intrusion Detection System) и предотвращения вторжений (IPS – Intrusion Prevention System), которые являются мощными инструментами мониторинга и аудита событий в беспроводных сетях. Данный инструментарий позволяет распознавать и классифицировать риски несанкционированных атак и вторжений через существующие уязвимости беспроводных сетей с целью принятия соответствующих мероприятий по обеспечению безопасности SCADA-системы.

Защищаемая беспроводная сенсорная сеть должна обеспечивать выполнение следующих требований:

1) быть устойчивой к активным радиопомехам;

2) обнаруживать и выявлять подмену узлов сенсорной сети;

3) иметь резервные маршруты передачи данных;

4) обнаруживать и предотвращать попытки реконфигурирования сети, подмены адресной информации, несанкционированной «перепрошивки» устройств;

5) использовать механизмы идентификации и аутентификации узлов и кадров;

6) быть устойчивой к искажению и фильтрации кадров данных;

7) применять механизмы канального шифрования кадров данных и управления ключами и т. д.

### **3. Основные методы решения проблем безопасности БСС SCADA-систем**

Для эффективного решения проблем безопасности SCADA-системы целесообразно использовать следующие методы.

1) резервирование транспортной среды (проводной или беспроводной) путем создания вторичной сети, которая активируется при обнаружении атаки на основную сеть, причем данная сеть отключается и изолируется от SCADA-системы. Естественно, что в этом случае сложность и стоимость системы существенно возрастает, что является оправданным в случае функционирования системы на особо критичных объектах, например, ядерных электростанций и т. п.;

2) интеграция в SCADA-систему программно-технических решений по обнаружению (IDS) и предотвращению (IPS) вторжений [6], которые могут поставляться самими разработчиками или представлять собой автономные комплексы сторонних разработчиков;

3) использование встроенных подсистем обеспечения безопасности, например механизмы аутентификации сенсорных узлов, протоколы шифрования трафика. Данный метод существенно дешевле предыдущих, но встроенные механизмы защиты, как правило, слабые и не могут противостоять серьезным атакам;

4) комбинированные решения.

Основными операциями по защите SCADA-системы являются следующие:

- планирование БСС и конфигурирование сенсорных узлов;
- идентификация и аутентификация пользователей, приложений, сетевых узлов [7], приборов промышленной автоматики и кадров данных;
- организация защиты от активных радиопомех. Шифрование и организация защищенных туннелей передачи данных;
- контроль и управление ключами доступа и шифрования;
- поиск и ликвидация уязвимостей в ПО SCADA-системы;
- локализация атак злоумышленников;
- обнаружение и предотвращение вторжений;
- контроль сетевого трафика в реальном времени и фильтрация нежелательных или подозрительных пакетов;
- анализ и ликвидация последствий атак;
- восстановление функциональности SCADA-системы после сбоев и отказов в результате атак;
- мониторинг компонентов системы обеспечения безопасности;
- закрытие нестандартных и неиспользуемых портов;
- отслеживание и своевременная установка пакетов обновлений ПО и ОС;
- отслеживание информации в Интернете по уязвимостям эксплуатируемой SCADA-системы у других потребителей и производителя;
- периодическое использование эксплоитов с новыми базами уязвимостей для пентестинга эксплуатируемой SCADA-системы;
- аудит работы приложений и пользователей и т. д.

К типовым инструментальным средствам для обеспечения безопасности SCADA-систем можно отнести.

1) системы обнаружения сетевых вторжений (NIDS – Network-Based Intrusion Detection System);

2) системы предотвращения вторжений через периметр сети (NIPS – Network-Based Intrusion Prevention System);

3) автономные системы предотвращения вторжений, размещаемые на сетевых узлах (HIPS – Host-Based Intrusion Prevention System);

4) системы антивирусной защиты;

5) межсетевые экраны (Brandmauer, Firewall);

6) системы аутентификации и управления доступом пользователей;

7) системы аутентификации сетевых ресурсов и передаваемых пакетов данных;

8) системы криптографической защиты и управления ключами и т. п.

### Заключение

В заключение отметим, что в настоящее время решение задач по обеспечению безопасности SCADA-систем, построенных с использованием беспроводной транспортной среды сбора и передачи данных, ведется недостаточно эффективно из-за особенностей сенсорной сети и программно-аппаратного обеспечения ее компонент. Анализ типовой архитектуры SCADA-системы позволяет выделить три зоны ответственности в плане реализации мероприятий безопасности:

1) транспортную зону сбора и передачи данных на основе беспроводной сенсорной сети, в которой узлы сенсорной сети объединены с датчиками, промышленными контроллерами (PLC) и исполнительными механизмами, где выполняются производственные и технологические процессы;

2) интерфейсную зону диспетчерского контроля и управления, где работают операторы и диспетчеры с целью наблюдения за ходом выполнения технологического процесса;

3) корпоративную доменную зону, где выполняются основные приложения бизнес-логики предприятия и работает административный и прочий персонал.

В первой зоне наиболее сложно реализовать традиционные меры обеспечения безопасности. Во-первых, производители датчиков, контрол-

леров и электронной компонентной базы разрабатывают собственные закрытые протоколы их функционирования, которые не позволяют внедрить технологии защиты посредством IPSec, SSL и VPN и т. п. Во-вторых, довольно часто транспортная среда представляет собой пространственно распределенные сети на большой территории. Такие сети характерны при реализации SCADA-систем городских инженерных коммуникаций [8] (сетей тепло-, водо-, электро- и газо-снабжения), нефте- и газопроводов и т. п. Здесь для передачи данных и команд используются модемные соединения (GPRS, 3G) через существующие телефонные сети и сети операторов сотовой связи публичного доступа. Для функционирования сенсорных узлов им выделяются «серые» или «белые» IP-адреса в сети мобильного оператора, что фактически означает предоставление общедоступного канала для проведения внешних атак. В-третьих, при построении сети в рамках ограниченного пространства, контроллеры и исполнительные механизмы часто подключаются по последовательному интерфейсу (RS-232/RS-485) закрытой промышленной сети к MODBUS-серверу, или по беспроводной сенсорной сети к координатору. MODBUS-сервер и координатор, как правило, имеет шлюз для выхода в корпоративную сеть предприятия и далее в Интернет с поддержкой технологий удаленного доступа и управления по протоколам стека TCP/IP. Таким образом, обеспечивается доступ к данным и узлам SCADA-системы из корпоративной предприятия и диспетчерской зон и удаленный доступ из сети Интернет.

В второй зоне диспетчеры и операторы могут подключаться к SCADA-системе с разным уровнем привилегий, создавать и рассылать различные запросы и команды, изменять конфигурацию и режимы работы всех компонентов системы. Здесь существует так называемая инсайдерская угроза безопасности, когда функциональность SCADA-системы не застрахована от ошибок и недостаточной квалификации персонала и полностью зависит от его действий.

В третьей зоне работают серверы, контроллеры доменов, приложения бизнес-логики, СУБД и основные информационные хранилища с данными и результатами мониторинга элементов SCADA-системы [9]. Поскольку зона

имеет непосредственное взаимодействие с внешней интернет-сетью, то она наиболее подвержена атакам внедрения, распространения и исполнения вредоносного кода, тем более, что многие SCADA-системы ведущих производителей работают на платформе ОС Microsoft Windows, которая наиболее уязвима к атакам.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Система удаленного мониторинга и управления сетями теплоснабжения на основе беспроводных сенсорных сетей / А. Г. Финогеев // Прикладная информатика. – № 3(33). – Москва: Изд. Маркет DS. 2011. – С. 83–93.
2. A Survey of Forecast Error Measures / М. В. Щербakov, А. Бребельс, Н. Л. Щербакowa, А. П. Тюков, Т. А. Яновский, В. А. Камаев // World Applied Sciences Journal (WASJ). – 2013. – Vol. 24, Spec. Issue 24 : Information Technologies in Modern Industry, Education & Society. – С. 171–176.
3. Камаев, В. А. Анализ методов оценки качества функционирования и эффективности систем защиты информации на предприятиях электроэнергетики / В. А. Камаев, В. В. Натров // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1(27) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – Вып. 1. – С. 67–69.
4. Бершадский, А. М. Классификация методов маршрутизации в беспроводных сенсорных сетях / А. М. Бершадский, Л. С. Курилов, А. Г. Финогеев // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 14 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – Вып. 10. – С. 181–185.
5. Финогеев, А. Г. Оперативный дистанционный мониторинг в системе городского теплоснабжения на основе беспроводных сенсорных сетей / А. Г. Финогеев, В. Б. Дильман, А. А. Финогеев, В. А. Маслов // Известия ВУЗов (Поволжский регион). Технические науки. – Пенза : Изд-во ПГУ. – 2010. – № 3. – С. 27–36.
6. Камаев, В. А. Методология обнаружения вторжений / В. А. Камаев, В. В. Натров // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 2 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2006. – (Серия «Концептуальное проектирование в образовании, технике и технологии»); вып. 2). – С. 127–132.
7. Маслов, В. А. Методика идентификации и событийного управления мобильными устройствами на основе технологии Bluetooth / В. А. Маслов, А. А. Финогеев, А. Г. Финогеев // Известия ВУЗов (Поволжский регион). – Пенза : Изд-во ПГУ. – 2008. – № 1. – С. 108–120.
8. Финогеев, А. Г. Мониторинг и поддержка принятия решений в системе городского теплоснабжения на базе гетерогенной беспроводной сети / А. Г. Финогеев, В. А. Маслов, А. А. Финогеев, В. Е. Богатырев // 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. 73–81.
9. Камаев, В. А. Разработка и применение модели автоматизированной системы управления информационными процессами к задаче мониторинга состояния оборудования / В. А. Камаев, В. В. Лежебоков // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2009. – № 9. – С. 18–22.

## УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 681.51, 004.31, 004.4

*В. А. Егунов, Х. А. Ал-Саади*

### УПРАВЛЕНИЕ «УМНЫМ ДОМОМ» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПРОВОДНОГО КАНАЛА СВЯЗИ

Волгоградский государственный технический университет

vegunov@mail.ru

Данная работа посвящена вопросам организации «умных домов» – автоматизированных домов, управляемых с помощью компьютеризированных систем. Рассмотрен вариант организации системы управления «умным домом» с использованием беспроводного канала связи, построенного на базе технологии ZigBee.

*Ключевые слова:* умный дом, беспроводной канал связи, сеть ZigBee, модуль XBee.

*V. A. Egunov, H. A. Al-Saadi*

### «SMART HOUSE» CONTROL USING WIRELESS COMMUNICATION CHANNEL

Volgograd State Technical University, Russia

This work is devoted to organization of «smart houses» – automated houses controlled by computerized systems. One type of organization management system «smart house» using a wireless communication channel, based on ZigBee technology is investigated.

*Keywords:* smart house, wireless link, network ZigBee, module XBee.

В современном мире люди все чаще заду- мываются над повышением удобства, комфорта в своем доме; немаловажной является проблема сбережения энергоресурсов и снижения затрат на потребление электричества. Эти и многие другие задачи позволяет решить система управления «умный дом». Под «умным домом» понимают систему, которая отслеживает текущее состояние инженерных систем здания, соответствующим образом на них реагирует. Основной особенностью подобных зданий является объединение отдельных подсистем в единый управляемый комплекс. Важной особенностью «умного дома», отличающей его от других способов организации жизненного пространства, является реализация наиболее прогрессивных концепций взаимодействия человека с жилым пространством. Человек последовательно команд задает желаемую обстановку; автоматика в соответствии с внешними и внутренними условиями задает и отслеживает режимы работы всех инженерных систем и электроприборов.

В процессе реализации проекта «умный дом» авторами на начальном этапе была спроектирована сенсорная сеть системы управле-

ния, построенная на технологии 1-wire «общая шина». Для этого были использованы датчик для измерения температуры, датчик движения и плата AT91SAM9 как координирующий центр, работающая под управлением системы Linux. В данную встраиваемую систему были загружены драйверы 1-wire и серверная часть программы, которая управляет системой в автоматическом режиме. Для удобства управления был разработан веб-сайт, который отражает состояние датчиков и текущий список устройств.

Основным недостатком разработанной системы, на взгляд авторов, является необходимость использования проводной связи. Проводная связь предполагает прокладку большого количества кабелей, что, безусловно, ухудшает характеристики системы управления в целом, в том числе характеристики надежности. Кроме того, все функции системы управления в данном случае оказываются централизованными, что, как показано в [1], при росте сложности системы ведет к значительному повышению требований к производительности центрального вычислительного узла системы управления.

Было принято решение использовать для управления системой беспроводной канал связи, для чего был произведен сравнительный анализ различных беспроводных технологий. В результате было решено остановиться на технологии ZigBee, которая, кроме всего прочего, позволяет децентрализовать функции управления, как это показано, например в [2].

Спецификация ZigBee регламентирует стек протоколов взаимодействия узлов сети, в котором протоколы верхних уровней используют

сервисы, предоставляемые протоколами ниже лежащих уровней. Одна из основных идей разработки стандарта ZigBee состояла в том, чтобы обеспечить возможность совместной работы в одной беспроводной сети устройств различных производителей.

Управляющие команды и ответы на запросы в сети передачи данных системы управления должны обеспечить поддержку протокола ZigBee и гарантировать доставку пакета получателю. Структура фрейма данных, передаваемого по радиоканалу, представлена на рис. 1.

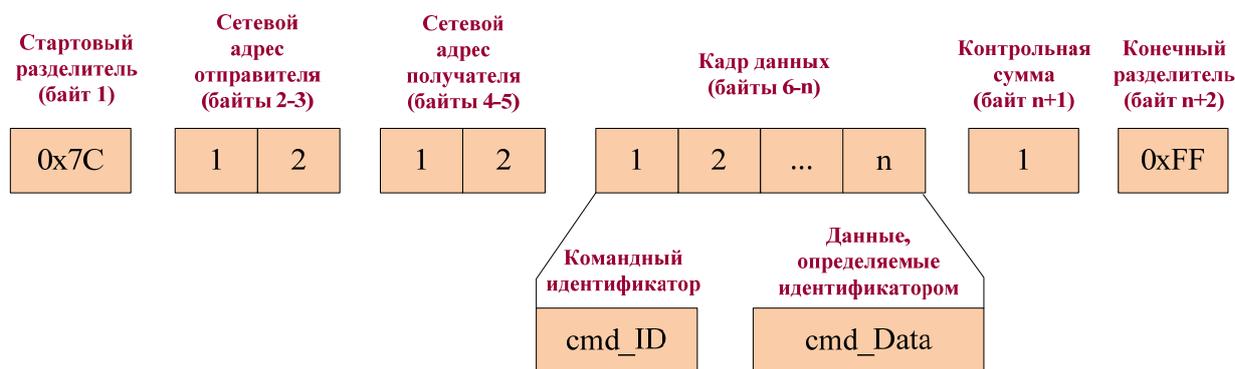


Рис. 1. Фрейм данных и структура передаваемых кадров данных

Структура кадра данных представляет собой командный идентификатор `cmd_ID` размером 1 байт, указывающий на конкретную команду, и передаваемые данные `cmd_Data`, определяемые идентификатором. Командный идентификатор может указывать на команду, передаваемую на исполнение управляющим устройством, ответ на запрос о статусе устройства, подтверждение об успешном или неудачном выполнении управляющей команды. В зависимости от `cmd_ID` кадр данных может со-

держивать передаваемые данные или не иметь их. Для каждого исполнительного устройства разработаны управляющие команды и ответы на запросы других устройств. С целью проверки целостности принимаемых данных введен байт, содержащий контрольную сумму пересылаемого фрейма.

Приведем пример фрейма, посылаемого диммером подчиненной группе освещения, содержащий команду увеличить яркость на заданный уровень.

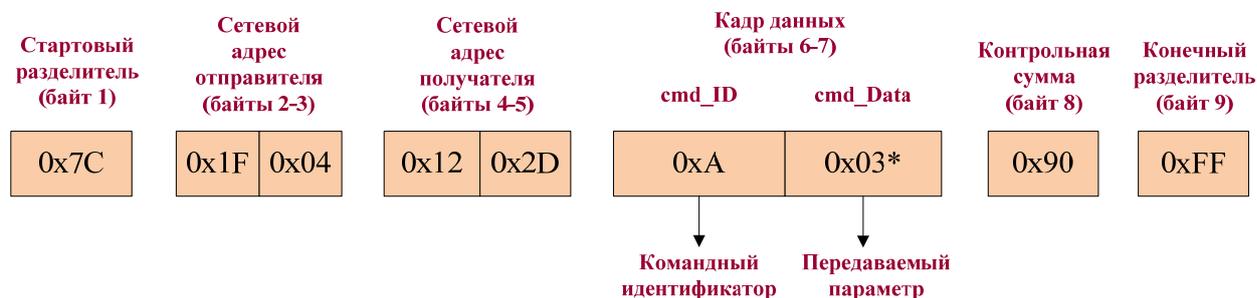


Рис. 2. Пример фрейма с командой:

\* – значение 0x03 (011b) соответствует 60 % яркости освещения

Исполнительное устройство посылает сообщение об удачном (или неудачном) завершении команды координатору сети, который в нашей системе является главным управляющим

модулем. Координатор имеет сетевой адрес, равный 0. Фрейм данных ответа группы освещения об удачном выполнении команды от диммера «увеличить яркость».

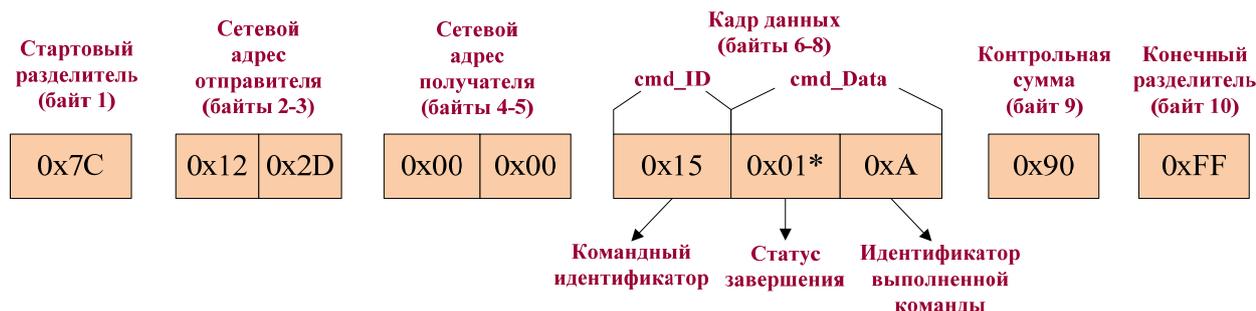


Рис. 3. Пример фрейма с ответом исполнительного устройства:

\* – статус завершения команды, показывает успешно или нет была выполнена команда управляющего устройства: 0x00 – неудачное завершение; 0x01 – удачное завершение

В результате была предложена следующая структура системы управления. Управляющая программа (серверная часть) работает на стандартном ПК, с которым соединен модуль XBee через XBee-USB адаптер. Через данный модуль производится управление ZigBee-сетью, в которую входит определенное количество узлов, каждый из которых управляет каким-то сегментом оборудования дома. Каждый узел представляет собой модуль XBee, соединенный с платой Arduino Uno, через которую собственно и происходит опрос датчиков и управление конечным оборудованием. Для удобства каж-

дый подобный модуль XBee установлен в Wireless Shield XBee.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Egunov, V. A. Robotic Complex Central Processing Node Performance Requirements Assessment / Egunov, V.A., Kirnosenko, S.I., Andreev, A.E.. // World Applied Sciences Journal (WASJ). – 2013. – Vol. 24, Spec. Issue 24 : Information Technologies in Modern Industry, Education & Society. – P. 37–42.
2. Егунов, В. А. Трехуровневая архитектура мобильных робототехнических комплексов / В. А. Егунов, М. И. Потапов // 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. 159–161.

УДК.685.01.:658.512.2.011.56

*М. Е. Кононов*

**ВЫБОР АНАЛОГОВ ПО ПРОТОТИПУ ПО СОВОКУПНОСТИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА В ПРОГРАММЕ «СТРУКТУРА»**

Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»  
kme.vim@gmail.com .

В работе рассмотрены примеры решения задач выбора аналогов в программе «Структура». Рассмотрены решения различных задач, включая схмотехнические, конструкторские задачи, а также задачи проектирования. Приведены скриншоты работы программы.

*Ключевые слова:* аналоги, прототипы, выбор аналогов, программа.

*М. Е. Kononov*

**SELECT AN ANALOG ACCORDING TO THE PROTOTYPE ON SET OF PARAMETERS QUALITY IN SOFTWARE «STRUKTURA»**

**National Research University «Moscow Power Engineering Institute»**

This work presents the examples of the selection in the software “STRUKTURA”. The various tasks including circuits, design tasks, as well as design tasks. Are screenshots of the software.

*Keywords:* analogues, prototypes, selection an analogs, software.

**Введение**

Задача выбора аналогов по заданному прототипу, как задача поиска наиболее близких вариантов, возникает при ремонте технических объектов с заменой вышедшего из строя компонента или целого блока, а также в ряде дру-

гих схожих задач, когда потребитель ищет необходимое ему функциональное изделие, желая посмотреть несколько наиболее приемлемых близких вариантов. К этому же классу задач можно отнести и выбор вариантов аналогов при проектировании новых изделий по прототипам

мирового класса, а также ряд других. Таким образом, задача автоматизации выбора аналогов по прототипу является *актуальной и значимой*.

Формализованная постановка задачи выбора аналога может быть представлена *тройкой*  $\langle C, \Omega, \omega_n(\alpha_n) \rangle$ , где  $C$  – принцип оптимальности;  $\Omega$  – исходное множество вариантов;  $\omega_n(\alpha_n)$  – прототип, задаваемый значениями его характеристик ( $\alpha_n$ ). При этом из всех допустимых вариантов оптимальным (наилучшим) аналогом считается тот вариант  $\omega_{\text{опт}}$ , который обладает наименьшими (в заранее установленном смысле) отличиями совокупности показателей качества  $\{PK_i\}_a$  от совокупности  $\{PK_i\}_{\text{пр}}$  прототипа.

В качестве меры близости аналога к прототипу можно использовать различные критерии. При слабой информированности целесообразно использовать неметрические безусловные критерии предпочтения, такие как Парето или Слэйтера. В случае же достаточной информированности могут быть использованы условные неметрические критерии, например, лексикографический ( $L$ ) или с уступками ( $\Delta$ ). В предлагаемой работе для выбора аналогов рассмотрим

использование неметрического критерия Парето с числом ПК  $\leq 4$ . Для ее решения целесообразно структурировать исходное множество вариантов  $\Omega$  по  $\pi$ -критерию. Известно [1], что вариант  $\omega_i$  доминирует по Парето вариант  $\omega_j$  (для минимизации), если выполняется условие:

$$k_l(\omega_i) \leq k_l(\omega_j) / \omega_i \succ \omega_j;$$

$$\forall l = \{1, M\}; i \neq j; i, j = \{1, N\},$$

где  $/$  – знак условия;  $\succ$  – бинарное отношение предпочтения; и хотя бы для одного  $l$  нестрогое неравенство превращается в строгое.

Структурированные по Парето множества представляют собой, с одной стороны, сильно-транзитивный направленный ориентированный граф  $G_\pi^T(\Omega, U_\pi^{T*})$  и бинарную матрицу смежности – с другой (рис. 1). Множество дуг  $\{U_\pi^{T*}\}$  графа найдем из условия:

$$\{U_\pi^{T*}\} = \{ \langle i, j \rangle : (\forall i \neq j = \{1, N\}) (\forall l = 1, M),$$

$$k_l(\omega_i) \leq k_l(\omega_j) \wedge \exists l_0 \in \{1, M\}; k_{l_0}(\omega_i) < k_{l_0}(\omega_j) \}.$$

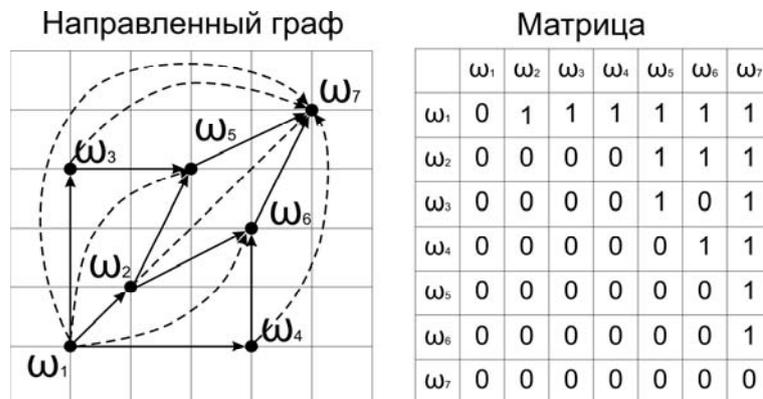


Рис. 1. Транзитивный направленный граф и матрица смежности

Однако граф  $G_\pi^T(\Omega, U_\pi^{T*})$  является избыточным и для выбора аналогов необходимо перейти к нетранзитивному графу  $G_\pi(\Omega, U_\pi)$  (рис. 2), где множество дуг  $\{U_\pi\}$  получено путем удаления из  $\{U_\pi^{T*}\}$  множества транзитивных дуг  $\{U_\pi^T\}$ :

$$\{U_\pi\} = \{U_\pi^{T*}\} \setminus \{U_\pi^T\}.$$

Для устранения транзитивных дуг был разработан специальный алгоритм [2], позволяющий преобразовать транзитивный направленный граф в нетранзитивный, который для анализа дуг использует матрицу смежности.

Такое дуальное представление порядка вариантов в соответствии с критерием Парето весьма наглядно для пользователя, так как позволяет увидеть как  $\pi$ -оптимальные элементы на заданном полном исходном множестве, так и возможные варианты-аналоги для прототипа. При этом ассоциативное представление данных в виде матриц смежности существенно упрощает компьютерную обработку данных, так как использует логические типы данных, занимающие малый объем.

На рис. 2 представлен результат, полученный при удалении транзитивных дуг.

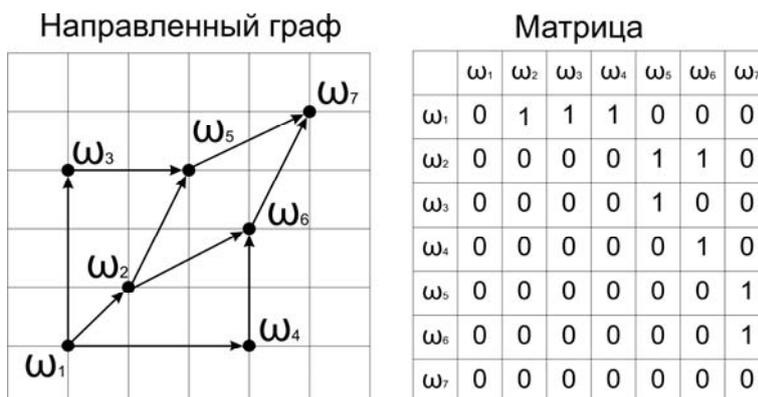


Рис. 2. Направленный граф и матрица смежности

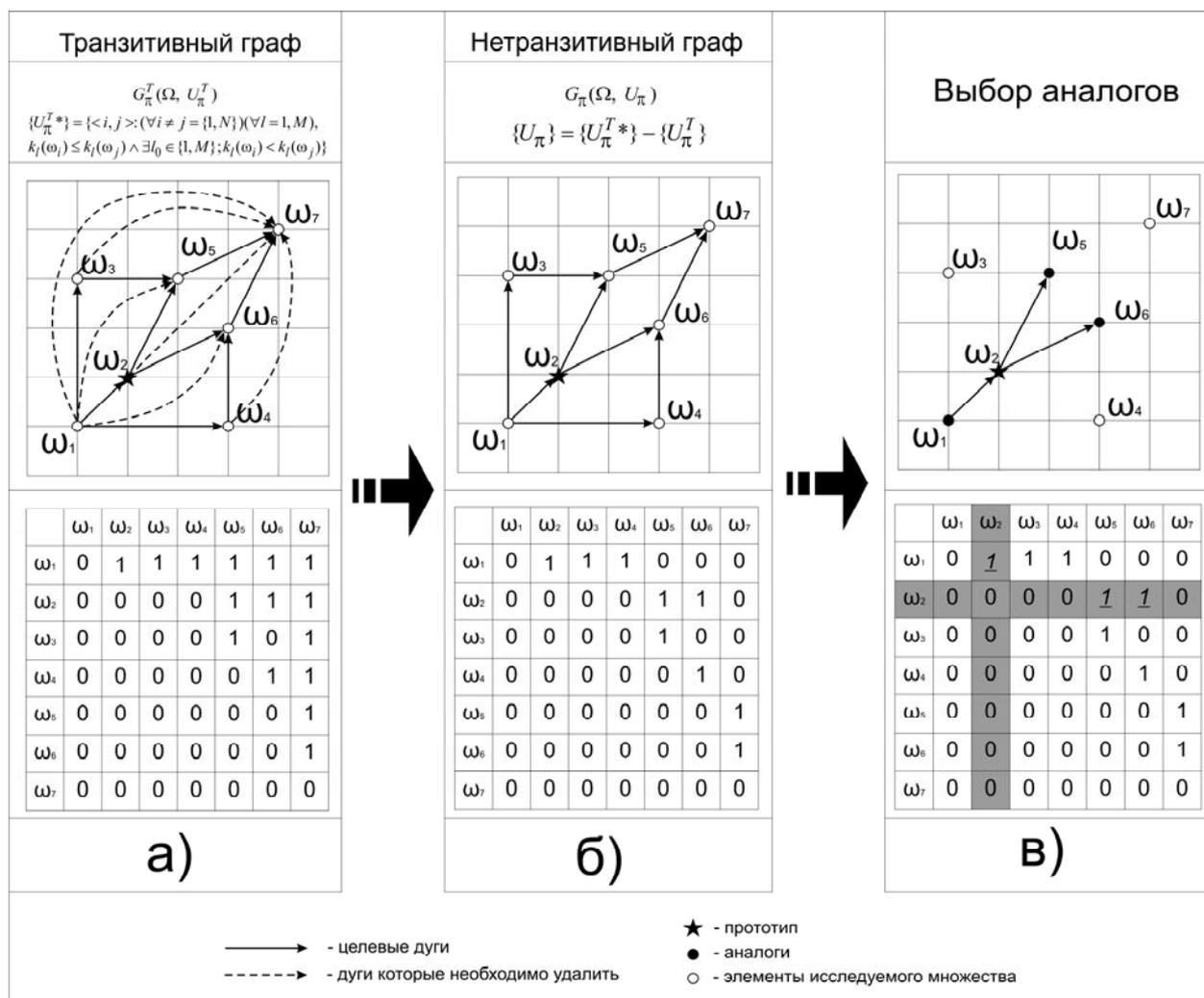


Рис. 3. Графическая интерпретация решения задачи выбора аналогов

Таким образом, алгоритм поиска аналогов с помощью графа  $G_{\pi}(\Omega, U_{\pi})$  по совокупности показателей качества состоит из трех этапов («а», «б», «в») – см. рис. 3).

По существу эти три этапа решают следующие задачи:

а) *структурирование множества по критерию Парето с получением транзитивного графа  $G_{\pi}^T(\Omega, U_{\pi}^{T*})$  и соответствующей матрицы смежности (рис. 3, а). Этот этап производится путем бинарного сравнения вариантов по выбранным показателям качества:*

$$k_l(\omega_i) \leq k_l(\omega_j) / \omega_i > \omega_j;$$

$$\forall l = \{1, M\}; i \neq j; i, j = \{1, N\};$$

б) удаление транзитивных дуг из графа  $G_\pi^T(\Omega, U_\pi^T)$  с получением нетранзитивного графа  $G_\pi(\Omega, U_\pi)$  и соответствующей ему матрицы (рис. 3, б). Эта процедура производится путем исполнения специального алгоритма [2] и позволяет устранить избыточность графа  $G_\pi^T(\Omega, U_\pi^T)$  удалением транзитивных дуг  $\{U_\pi^T\}$ , отмеченных пунктиром на рис. 3, а:

$$\{U_\pi\} = \{U_\pi^T\} \setminus \{U_\pi^T\}.$$

в) поиск аналогов производится на графе  $G_\pi(\Omega, U_\pi)$  путем поиска входящих и исходящих дуг прототипа. На матрице смежности он реализуется путем поиска единичных элементов в строке и столбце, соответствующих прототипу. Такой подход позволяет быстро находить аналоги в компьютерных программах и наглядно предоставлять результат (рис. 3, в).

Подробнее алгоритм выбора аналогов изложен в [3], суть же алгоритма, как показано на рис. 3, заключается в поиске дуг, входящих и исходящих из прототипа. Элементы на концах дуг указывают на возможные аналоги.

Для реализации разработанных алгоритмов была разработана программа «Структура» [4].

Далее приводятся примеры выбора аналогов, полученные с помощью этой программы.

#### Выбор аналогов в программе «Структура»

##### Пример 1

Пусть в качестве прототипа при ремонте принят транзистор IRF530, стоящий в конечном каскаде звукового усилителя «Pioneer A-307R». Рассмотрим задачу выбора отечественных аналогов и замены вышедшего из строя импортного компонента.

Пусть для примера в базе данных транзисторов присутствуют девять вариантов возможных замен из однородного множества, представленного реляционным отношением  $Re(S, U_{СИ}, I_{СИмакс}, P, U_{ЗИмакс})$  (см. табл. 1). В таблицу также внесены параметры прототипа. Характеристики транзисторов, представленные в табл. 1, обозначены

$S, A/B$  – крутизна транзистора;

$U_{ЗИмакс}, B$  – максимальное напряжение затвор-исток;

$U_{СИ}, B$  – максимальное напряжение сток-исток;

$I_{СИмакс}, A$  – максимальный ток стока;

$P, Вт$  – максимальная мощность, рассеиваемая на транзисторе.

Для наглядности в таблице прототип выделен серым тоном.

Таблица 1

Исходное множество транзисторов

Вариант	Наименование	$k_1 \uparrow = S, A/B$	$k_2 \uparrow = U_{СИ}, B$	$k_3 \uparrow = I_{СИмакс}, A$	$k_4 \uparrow = P, Вт$	$k_5 = U_{ЗИмакс}, B$
$\omega_1$	КП150	13	100	38	150	20
$\omega_2$	КП250	12	200	30	150	20
$\omega_3$	КП350	10	400	14	150	20
$\omega_4$	КП450	9,3	500	12	150	20
$\omega_5$	КП460	12	500	20	280	20
$\omega_6$	КП510	1,3	100	6	43	20
$\omega_7$	КП540	8,7	100	28	150	20
$\omega_8$	КП610	0,8	200	3,3	36	20
$\omega_9$	КП630	3,8	200	9	74	20
Прототип	IRF530	5,1	100	14	79	20

Все транзисторы являются полевыми МОП-транзисторами с каналом  $n$ -типа, поэтому они

все могут потенциально являться аналогами для рассматриваемого прототипа, но нас инте-

ресуют нехудшие замены для прототипа транзистора IRF530 по  $\pi$ -критерию. Очевидно, что для рассматриваемой задачи крутизну, максимальное напряжение «сток-исток», максимальный ток «сток-исток» и мощность, рассеиваемую на транзисторе, необходимо максимизировать.

Выбор аналогов по прототипу в программе состоит из следующих этапов:

1) загрузка исходной базы данных в программу;

2) выбор критерия, по которому будет производиться выбор. В нашем случае это критерий Парето;

3) выбор показателей качества и направления их оптимизации. Выше мы выбрали следующие ПК и направления оптимизации:

$$S \uparrow, U_{СИ} \uparrow, I_{СИ\max} \uparrow, P \uparrow;$$

4) ввод параметров прототипа по выбранным ПК. В нашей задаче, для транзистора IRF530, используем параметры:

$$S = 5.1A/B, U_{СИ} = 100B,$$

$$I_{СИ\max} = 14A, P = 79Вт;$$

5) на последнем этапе программа произведет выбор аналогов и отобразит результаты (рис. 4).

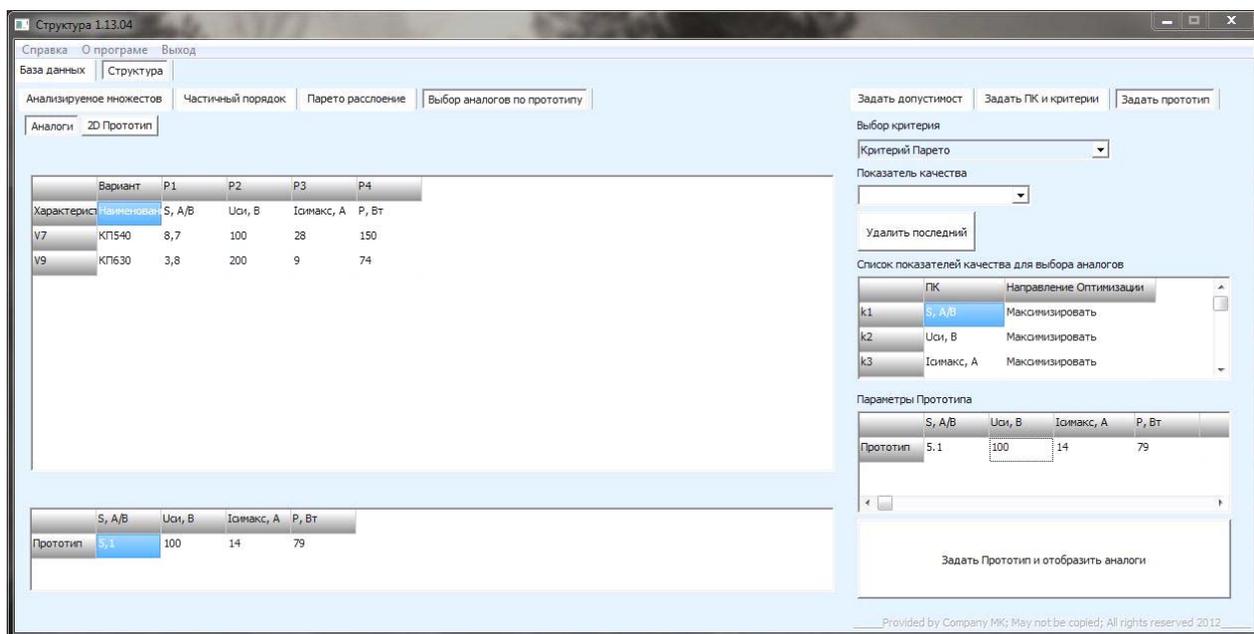


Рис. 4. Результаты выбора программы «Структура» для  $k_1, k_2, k_3$  и  $k_4$

Структурированное множество возможных аналогов для подмножества Парето, с учетом прототипа, описывается выражением:

$$\Omega_{\pi} = \pi\{\Omega/\{k_1, k_2, k_3, k_4\}\}$$

$$\Omega_{\pi_a\{k_1, k_2, k_3, k_4\}} = \Omega_{\pi_a\{k_1, k_2\}} \cup \Omega_{\pi_a\{k_1, k_3\}} \cup \Omega_{\pi_a\{k_1, k_4\}} \cup \Omega_{\pi_a\{k_2, k_3\}} \cup \Omega_{\pi_a\{k_2, k_4\}} \cup \Omega_{\pi_a\{k_3, k_4\}}.$$

Для представления множества в таком виде построим все отмеченные выше пары в программе и отобразим на одном рисунке (рис. 5).

Как видно из рис. 5, множество возможных аналогов значительно больше, чем выбрано в программе (рис. 4). Это объясняется тем, что если провести в программе, с учетом прототипа, Парето-расслоение множества по четырем показателям качества и построить диаграмму Хассе (рис. 6), мы получим граф, соответствующий четырехмерной постановке хорошо

видно, что в итоге с прототипом дугами соединены лишь элементы  $\omega_7$  и  $\omega_9$ . Таким образом, программа формирует матрицу смежности и, используя ее, находит элементы, дуги которых на графе входят и выходят из прототипа.

Полученное множество (табл. 2) далее можно анализировать любыми доступными методами (например, с помощью метрических критериев или эвристически). Важно, что количество потенциальных аналогов значительно сократилось.



Мы остановим свой выбор на варианте  $\omega_7$  (КП540), руководствуясь тем, что он имеет значительный запас по рассеиваемой мощности.

**Пример 2**

Рассмотрим задачу выбора аналогов по прототипу инфракрасного извещателя «Genius PLUS». Такой пример покажет, что разработанные методы и программа позволяют выбирать аналоги для любого типа продукции, начиная от элементной базы и заканчивая готовыми устройствами.

Предположим, что для охраны помещения используется ИК-извещатель «Genius PLUS» и необходимо подобрать аналоги из имеющихся девять вариантов возможных замен из однородного множества, представленного реляци-

онным отношением  $Re(Z_{ГОР}, Z_{ВЕР}, I_{ПОК}, I_T)$  (табл. 3), где прототип выделен серым тоном.

Характеристики ИК-извещателей, представленные в табл. 3:

$Z_{ГОР}$  – зона обнаружения по горизонтали;

$Z_{ВЕР}$  – зона обнаружения по вертикали;

$I_{ПОК}$  – ток, потребляемый в режиме покоя;

$I_T$  – ток, потребляемый в режиме тревоги.

Очевидно, что для сохранения рабочих характеристик прибора зону обнаружения по горизонтали и зону обнаружения по вертикали необходимо максимизировать, а ток, потребляемый в режиме покоя, и ток, потребляемый в режиме тревоги, минимизировать.

Таблица 3

**Исходное множество извещателей**

Вариант	Наименование	$k_1 \uparrow = Z_{ГОР}, М$	$k_2 \uparrow = Z_{ВЕР}, М$	$k_3 \downarrow = I_{ПОК}, мА$	$k_4 \downarrow = I_T, мА$
$\omega_1$	BV-301(D)	15,2	18,3	15	18
$\omega_2$	476	12	12	18	31
$\omega_3$	ИО-409-10	12	12	12	15
$\omega_4$	DG85	11	14	10	15
$\omega_5$	DG75	11	11	15	25
$\omega_6$	CX-502	15	15	15	15
$\omega_7$	Colt QUAD PI	10	10	11	12
$\omega_8$	D&D	15	18	8,5	13
$\omega_9$	EX-35T	11	11	8	18
Прототип	Genius PLUS	15	22	8,5	13

Здесь, как и в первом примере, необходимо выполнить следующие этапы:

1) загрузка исходной базы данных в программу;

2) выбор критерия, по которому будет производиться выбор. В нашем случае – это критерий Парето;

3) выбор показателей качества и направления их оптимизации. Выше мы выбрали следующие ПК и направления оптимизации:

$$Z_{ГОР} \uparrow, Z_{ВЕР} \uparrow, I_{ПОК} \downarrow, I_T \downarrow;$$

4) ввод параметров прототипа по выбранным ПК. В нашей задаче, для извещателя Genius PLUS, мы используем параметры:

$$Z_{ГОР} = 15М, Z_{ВЕР} = 22М,$$

$$I_{ПОК} = 8.5мА, I_T = 13мА$$

5) на последнем этапе программа произведет выбор аналогов и отобразит результаты (рис. 5).

Здесь, как и в предыдущем примере, структурированное множество возможных аналогов, с учетом прототипа, описывается формулой:

$$\Omega_{\pi} = \pi\{\Omega/\{k_1, k_2, k_3, k_4\}\}$$

$$\Omega_{\pi a\{k_1, k_2, k_3, k_4\}} = \Omega_{\pi a\{k_1, k_2\}} \cup \Omega_{\pi a\{k_1, k_3\}} \cup \Omega_{\pi a\{k_1, k_4\}} \cup \Omega_{\pi a\{k_2, k_3\}} \cup \Omega_{\pi a\{k_2, k_4\}} \cup \Omega_{\pi a\{k_3, k_4\}}.$$

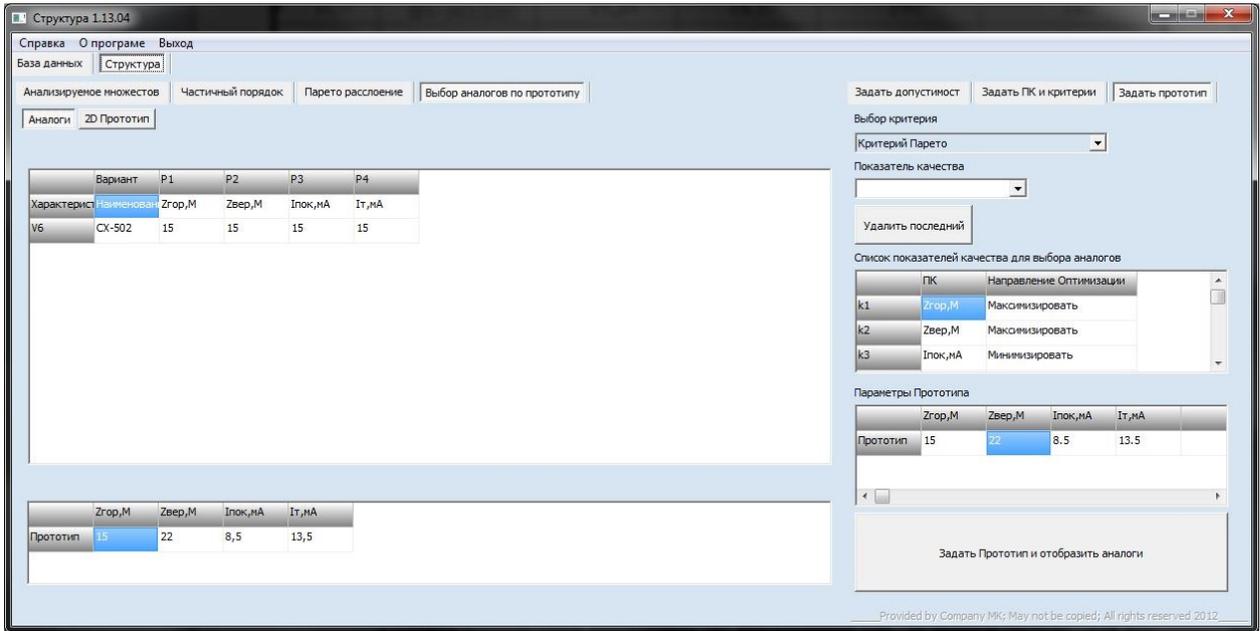


Рис. 7. Результаты выбора программы «Структура» для  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  и  $k_4$

Для представления множества в таком виде построим аналогично все отмеченные выше пары в программе и отобразим на одном рисунке (рис. 8).

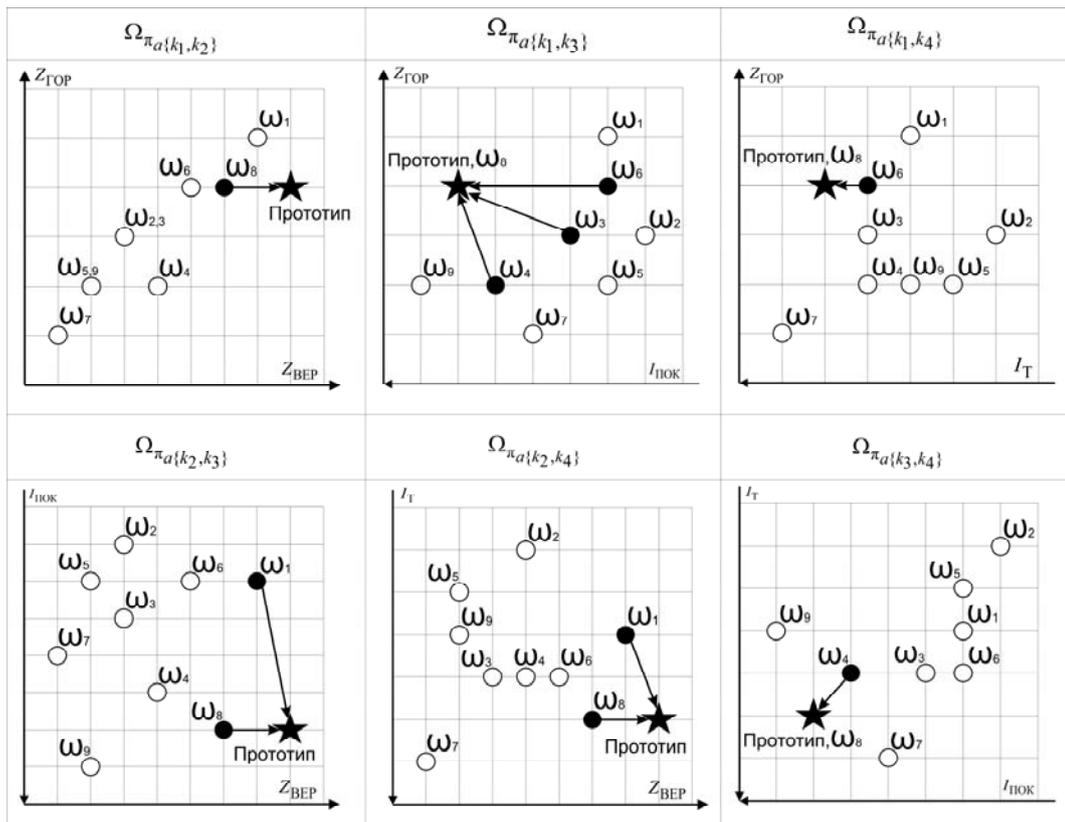


Рис. 8. Графы выбора аналогов для пар  $\{k_1, k_2\}$ ,  $\{k_1, k_3\}$ ,  $\{k_1, k_4\}$ ,  $\{k_2, k_3\}$ ,  $\{k_2, k_4\}$  и  $\{k_3, k_4\}$

Аналогично предыдущему примеру проведем в программе, с учетом прототипа, Парето

расслоение множества по четырем показателям качества и построим диаграмму Хассе (рис. 9).

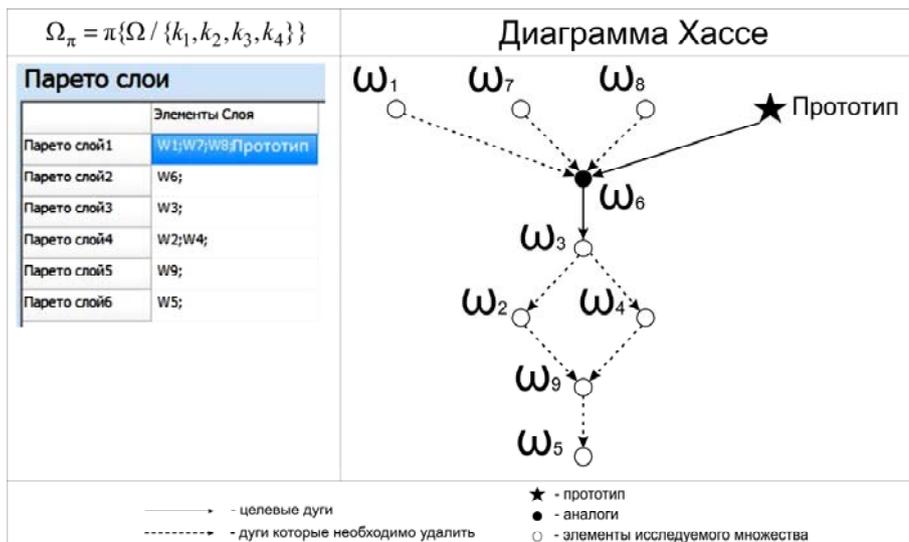


Рис. 9. Парето-расслоение-получение в программе (слева) и диаграмма Хассе для выбора аналогов для случая  $\{k_1, k_2, k_3, k_4\}$  (справа)

В результате сформирован нетранзитивный граф, соответствующий четырехмерной постановке, из которого видно, что с прототипом дугами соединен лишь один элемент –  $\omega_6$ , который в данной задаче и будет являться решением.

### Заключение

В статье кратко изложены результаты работы по разработке алгоритмов и автоматизированной программы «Структура» выбора аналогов по прототипу. Приведены основные этапы работы алгоритма и основные принципы работы программы. Рассмотрены примеры выбора аналогов в разработанной программе.

Из преимуществ разработанных алгоритмов и программы можно выделить:

- 1) возможность одновременного выбора из большого числа вариантов по критерию Парето по двум и более показателям качества;
- 2) высокая скорость работы;
- 3) возможность вариации выбора в зависимости от условий задачи;
- 4) наглядность представления выбора;

5) возможность выбора аналогов даже при малой информированности пользователя.

### 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. Алгоритм автоматизированного выбора аналогов по прототипам в частичных порядках / Ю. В. Кандырин, М. Е. Кононов // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. Т. 16. № 8(111). С. 137–145.
3. Кандырин, Ю. В. Выбор вариантов аналогов по прототипам в структурах графов частичных порядков и Парето-слоях / Ю. В. Кандырин, М. Е. Кононов // Радиотехника. – М.: Радиотехника. – 2013. – № 10. – С. 23–28.
4. Кандырин, Ю. В. Автоматизированная система выбора аналогов для прототипа в орграфах фактор-множеств / Ю. В. Кандырин, М. Е. Кононов // Вестник информационных и компьютерных технологий. – М. : СПЕКТР, 2014. – № 1. – С. 15–24.
5. 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.

УДК 004.67

*В. В. Кукарцев, Е. О. Тихончук***МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ СИСТЕМА КЛАССИФИКАЦИИ  
ВОЕННЫХ КАДРОВ КОНТРАКТНОЙ ОСНОВЫ****Сибирский государственный аэрокосмический университет  
имени академика М. Ф. Решетнева**

kukarcev@mail.sibsau.ru, ek.tikhonchuk@gmail.com

Рассматриваемой областью статьи является набор граждан на военную службу по контракту. Освещена проблема большого количества информации, обрабатываемой вручную, при подборе должности для соискателей. Для выявленной проблемы предложено использование средств и методов интеллектуального анализа данных. Также приведены группы методов и их краткое описание и назначение для решения тех или иных задач. Представлена область применения рассмотренных методов и выявлена группа наиболее подходящих для поставленной задачи: деревья решений и нейронные сети. Далее проведен сравнительный анализ двух методов, рассмотрены сильные и слабые стороны, применительно к выявленной проблеме. На основе проведенного анализа сделан вывод о том, что наиболее подходящим методом для решения проблемы будет являться метод деревьев решений. Показано, что данный метод дает возможность получить быстрый результат на естественном языке, что в дальнейшем сможет позволить специалисту, производящему подбор должности для кандидата, сразу же объяснять причины, почему была подобрана та или иная должность.

*Ключевые слова:* интеллектуальный анализ данных, деревья решений.

*V. V. Kukarcev, E. O. Tikhonchuk***MULTICRITERION CLASSIFICATION SYSTEM OF MILITARY PERSONNEL  
IN CONTRACT BASIS****Siberian State Aerospace University**

Area under consideration is a set of articles citizens for military service under the contract. The problem of a large amount of information processed by hand in the selection of applicants for the post. To identify problems and suggested the use of data mining techniques. Group also provides methods and a brief description, and the appointment to address those and other problems. Represented scope of the methods considered and there is a group most suitable for the task: decision trees and neural networks. Further comparative analysis of the two methods, the strengths and weaknesses in relation to the identified problem. Based on the analysis concluded that the most appropriate method for solving the problem will be the method of decision trees. It is shown that this method makes it possible to get a quick result in a natural language, that in the future will be able to afford a specialist producing the selection of the candidate for the post, immediately explain the reasons why she was chosen or another post.

*Keywords:* data mining, decision trees.

В настоящее время все большую популярность в России набирает военная служба по контракту. Для отбора граждан созданы специальные пункты по набору на контракт, а также введены новые должности в военных комиссариатах субъектов, работники, которые также занимаются гражданами, желающими начать или продолжить службу.

Механизм работы пунктов по отбору на контрактную службу прост – к ним поступает информация о требуемых специалистах из войсковых частей, перечисляются требования, предъявляемые к кандидатам, а когда приходит человек, изъявивший желание служить, ему подбирается должность из всего перечня. Но в связи с возросшей популярностью контрактной службы, соответственно, возрос и объем данных, которые приходится обрабатывать. На данный момент специалистам на местах приходится подбирать должность человеку вручную, что занимает немалое количество времени,

а так же может отразиться на качестве подобранной должности.

На самом деле перечень должностей для контрактников ограничен, и данные можно легко структурировать, но сейчас вся информация представляет из себя хаотичный набор данных в таблицах Excel, из которого очень сложно вычленивать требуемую информацию.

Для решения сформировавшейся проблемы подходят средства интеллектуального анализа данных (Data Mining). Data Mining переводится как «добыча» или «раскопка данных». Нередко рядом с Data Mining встречаются слова «обнаружение знаний в базах данных» и «интеллектуальный анализ данных». Их можно считать синонимами Data Mining. Возникновение всех указанных терминов связано с новым витком в развитии средств и методов обработки данных [1].

В связи с совершенствованием технологий записи и хранения данных на людей обрушились колоссальные потоки информации в са-

мых различных областях. Деятельность любого предприятия сопровождается регистрацией и записью всех ее подробностей. Ясно, что без продуктивной переработки потока необработанных, разнородных данных образуют никому не нужную свалку.

Специфика современных требований к такой переработке следующая:

- данные имеют неограниченный объем;
- данные являются разнородными (количественными, качественными, текстовыми);
- результаты должны быть конкретны и понятны;
- инструменты для обработки данных должны быть просты в использовании.

Интеллектуальный анализ данных является мультидисциплинарной областью, возникшей и развивающейся на базе достижений прикладной статистики, распознавания образов, методов искусственного интеллекта, теории баз данных и др. (см. рисунок). Отсюда обилие методов и алгоритмов, реализованных в различных действующих системах Data Mining. Многие из таких систем интегрируют в себе сразу несколько подходов. Тем не менее, как правило, в каждой системе имеется какая-то ключевая компонента, на которую делается главная ставка [2].



Data Mining – мультидисциплинарная область

Существуют различные методы классификации, моделирования и прогнозирования, а также статистические методы. Кратко рассмотрим некоторые из них:

1) корреляционный анализ. Данный анализ позволяет показать взаимосвязь двух или нескольких случайных величин. При этом изменения одной или нескольких из этих величин сопутствуют систематическому изменению другой или других величин;

2) регрессионный анализ. Статистический метод исследования влияния одной или не-

скольких независимых переменных на зависимую переменную;

3) метод поиска ассоциативных правил. Целью поиска ассоциативных правил является нахождение закономерностей между связанными событиями в базах данных;

4) метод деревьев решений (*decision trees*). Является одним из наиболее популярных методов решения задач классификации. Иногда этот метод *Data Mining* также называют деревьями решающих правил, деревьями классификации и регрессии;

5) нейронные сети. Это модели биологических нейронных сетей мозга, в которых нейроны имитируются относительно простыми, часто однотипными, элементами. Области применения нейронных сетей являются: автоматизация процессов распознавания образов, прогнозирование, адаптивное управление, создание экспертных систем и т. д.

Первые два приведенных метода интеллектуального анализа данных решают задачи прогнозирования. Метод ассоциативных правил применяется в области торговли и сбыта, где необходимо четко понимать какой продукт с каким приобретают. Последние два рассмотренных метода решают задачи классификации. Проанализировав поставленную задачу, можно точно утверждать, что она решается как раз последними двумя методами [3].

Сравнив методы деревьев решений и нейронных сетей, можно сделать следующие выводы:

- алгоритм деревьев решений дает легко интерпретируемый ответ в виде набора правил выбора того или иного класса, в то время алгоритм нейронных сетей дает лишь информацию о степени принадлежности к классам;

- алгоритм конструирования дерева решений не требует от пользователя выбора входных атрибутов (независимых переменных). На вход алгоритма можно подавать все существующие атрибуты, алгоритм сам выберет наиболее значимые среди них, и только они будут использованы для построения дерева. При использовании алгоритма построения нейронных сетей необходимо производить обучение сети для получения релевантных ответов;

- точность моделей, созданных при помощи деревьев решений, сопоставима с моделями, построенными с помощью метода нейронных сетей;

- главной проблемой логических методов обнаружения закономерностей является про-

блема перебора вариантов за приемлемое время. Но так как существующие данные точно причисляют к определенной должности конечным числом известных характеристик, то бояться за время обработки операции не стоит;

- выбор одного из алгоритмов зависит от поставленной задачи: если необходимо получить предельно точную степень классификации, то следует применять нейронные сети, если нужен быстрый и наглядный результат – дерева решений [4].

Так как поставленная задача сводится к классификации кандидатов на контрактную службу по многочисленным критериям их профессиональной принадлежности и личным предпочтениям, то специалистам, производящим отбор кандидатов, необходимо получить точный и быстрый ответ на основе полученных данных. К тому же очень важно, чтобы полученный ответ был как можно более нагля-

ден, так как необходимо объяснить кандидату, почему ему подходит та или иная должность. Исходя из этого, можно точно сказать, что наиболее отвечающим поставленным требованиям будет являться метод деревьев решений, на его основе будет строиться программа для отбора кандидатов на военную службу по контракту.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Основные понятия интеллектуального анализа данных [Электронный ресурс]. – 2013 – Режим доступа : <http://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/ms174949.aspx/>
2. Дюк, В. DATA MINING - интеллектуальный анализ данных [Электронный ресурс]. – 2013. – Режим доступа : [http://www.iteam.ru/publications/it/section\\_92/article\\_1448/](http://www.iteam.ru/publications/it/section_92/article_1448/)
3. Data Mining [Электронный ресурс]. – 2013. – Режим доступа : [http://ru.wikipedia.org/wiki/Data\\_mining](http://ru.wikipedia.org/wiki/Data_mining)
4. Методы классификации и прогнозирования. Деревья решений [Электронный ресурс]. – 2013. – Режим доступа : <http://www.intuit.ru/studies/courses/6/6/lecture/87?page=1>

УДК [004.946:658.62]:[338.47:654.15]

*Фам Куанг Хиен, И. Ю. Квятковская*

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕДИАННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОЦЕНКИ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ УСЛУГ

Астраханский государственный технический университет

phamhiephd@gmail.com, i.kvyatkovskaya@astu.org

В работе рассмотрена методика решения задачи оценки конкурентоспособности телекоммуникационных услуг. Определены задачи выбора, альтернативами в которых являются состояния качества различных объектов в структуре управления телекоммуникационной компании. Предложенный подход может быть использован при разработке программ повышения конкурентоспособности телекоммуникационных компаний.

*Ключевые слова:* конкурентоспособность, ранжирование, предпочтение, расстояние между ранжировками, матрица потерь, медиана Кемени, назначение, телекоммуникационная услуга.

### THE DEPLOYMENT OF DISTRIBUTION MEDIAN TO SOLVE PROBLEMS OF ESTIMATIONS COMPETITIVENESS TELECOMMUNICATION SERVICES

Astrakhan State Technical University (ASTU), Astrakhan

This article discusses the methodology to solving the problem estimation competitiveness of telecommunication services. We defined the tasks of selection, alternatives which are status quality of various objects in the management structure of the telecommunications company. The proposed approach can be used to develop programs to improve the competitiveness of telecommunications companies.

*Keywords:* competitiveness, ranking, preference, the distance between the rankings, matrix loss, median Kemeny, function, telecommunication service.

В последние годы рынок телекоммуникационных услуг активно развивается, что связано с появлением новых компаний, участвующих в процессе предоставления телекоммуникационных услуг. Однако для каждой компании, стремящейся добиться успеха на рынке, необ-

ходимо определение своих ближайших конкурентов в доле рынка, качестве предлагаемых услуг, рентабельности бизнеса. В условиях жесткой конкуренции на рынке вопрос конкурентоспособности компании и ее услуг становится краеугольным в рамках системы управления.

Конкуренция рассматривается как соперничество, результатом которого является отбор лучших участников.

Цель данной работы – разработка системного подхода для решения задачи оценки конкурентоспособности телекоммуникационных услуг.

Конкурентоспособность телекоммуникационных услуг – это оценка различными элементами рынка преимуществ данного предприятия, участвующих в процессе предоставления телекоммуникационных услуг по отношению к другим аналогичным предприятиям данного рынка. Фактически, количественно конкурентоспособность телекоммуникационных услуг может быть рассчитана только в сравнении с другими фирмами (конкурентной группы), работающими на одном рынке и предоставляющими аналогичные услуги.

Конкурентоспособность телекоммуникационных услуг часто выражается в показателях качества услуг.

Для оценки конкурентоспособности услуг все показатели, характеризующие различные стороны этого процесса, должны быть сведены в систему [1]. Часть показателей отражает параметры работы технической системы; другая часть формируется посредством обработки данных, хранящихся в корпоративной информационной системе предприятия, остальные – экспертным путем, либо в результате опроса.

На основе неоднородных данных результатов, полученных в процессе измерения параметров качества телекоммуникационных услуг, необходимо найти итоговое ранжирование объектов. Ниже дается детальное описание алгоритмов и методов решения этой задачи.

Определим объект (провайдера телекоммуникационных услуг) как альтернативу в задаче многокритериального принятия решения. Положим, всего имеется  $n$  объектов (компаний), каждая из которых характеризуется значениями  $m$  показателей, причем в качестве показателей могут выступать как количественные, так и качественные показатели. Значение  $j$ -го показателя для выбора  $i$ -ого объекта будем обозначать  $k_{j,i}, j = \overline{1, m}, i = \overline{1, n}$ .

Алгоритм оценки конкурентоспособности телекоммуникационных компании включает следующие шаги [2]:

1. На основании поставленной цели оценки конкурентоспособности выберем набор информативных показателей качества  $\{k_1, k_2, \dots, k_m\}$ , по которым будет оцениваться конкурентоспо-

собность каждого объекта из множества  $OBJ = \langle Ob_1, Ob_2, \dots, Ob_n \rangle$ .

Пример. Оценить пять объектов (компаний) по пяти показателям:  $k_1$  – время выполнения начального подключения потребителя к сети (день);  $k_2$  – доля успешных вызовов потребителя (процент);  $k_3$  – скорость установлений соединения (секунда);  $k_4$  – качество передачи речи (балл) и  $k_5$  – степень удовлетворенности (балл).

2. Ранжируем объекты по каждой строке, соответствующей одному из показателей. Каждый  $j$ -й показатель даст свой вектор предпочтений  $k_j = (k_{j1}, k_{j2}, \dots, k_{jn}), j = \overline{1, m}$ , где  $k_{ji}$  – порядковый номер объекта, занимающего в ранжировании по  $j$ -му показателю  $i$ -е место.

В этом примере исходные данные представлены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные показатели объектов

Показатели	Объекты (компания) ( $Ob_i$ )				
	$Ob_1$	$Ob_2$	$Ob_3$	$Ob_4$	$Ob_5$
Время выполнения начального подключения потребителя к сети ( $k_1$ )	3	6	2	4	3
Доля успешных вызовов потребителя ( $k_2$ )	96	90	98	95	80
Скорость установлений соединения ( $k_3$ )	2.5	2	1	3	3.5
Качество передачи речи ( $k_4$ )	5	4	4	5	3
Степень удовлетворенности ( $k_5$ )	4	3	5	3	4

3. Переопределим все оценки объектов в порядковой шкале и выясним, может ли предпочтение быть выражено рангами. В каждом ранжировании первое место занимает наиболее привлекательный, с точки зрения рассматриваемого показателя, объект и далее по убыванию. Затем каждому вектору  $k_j$  поставим в соответствие вектор  $\pi_j = (\pi_{j1}, \pi_{j2}, \dots, \pi_{jn})$ , сформированный по правилу: координата  $\pi_{ji}$  – число направлений, которые, согласно  $j$ -му частному показателю, являются более предпочтительными, чем направление, имеющее порядковый номер  $i$ .

Для примера: приоритет каждого показателя определяем следующим образом:  $\pi_1 = (1, 3, 0, 2, 1)$ ;  $\pi_2 = (1, 3, 0, 2, 4)$ ;  $\pi_3 = (2, 1, 0, 3, 4)$ ;  $\pi_4 = (0, 1, 1, 0, 2)$ ;  $\pi_5 = (1, 2, 0, 2, 1)$ .

Таблица 2

4. Поиск группового ранжирования, в котором наилучшим образом будут представлены индивидуальные предпочтения. В качестве такового будет рассматриваться медиана Кемени, определяемая следующим образом:

$$\pi^* = \min_{\pi} \sum_{j=1}^m d(\pi, \pi^j), \quad (1)$$

где  $d(\pi, \pi^j)$  – расстояние между двумя ранжировками, определяемое по формуле

$$d(\pi, \pi^j) = \sum_{i=1}^n |\pi_i - \pi_i^j|. \quad (2)$$

5. Далее строим матрицу потерь  $R = \{r_{pq}\}$ : рассматриваются векторы, в которых направление с номером  $i$  ( $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ ) расположено последовательно от 1-го до  $n$ -го места:  $\pi = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_p, \dots, \pi_n)$  – ранжирование, в котором  $p$ -й показатель стоит на  $q$ -м месте (т. е.  $\pi_p = q - 1$ ), тогда

$$r_{pq} = \sum_{j=1}^m |\pi_p - \pi_p^j|. \quad (3)$$

Для данных из примера получаем матрицу потерь в табл. 2.

Матрица потерь  $R$

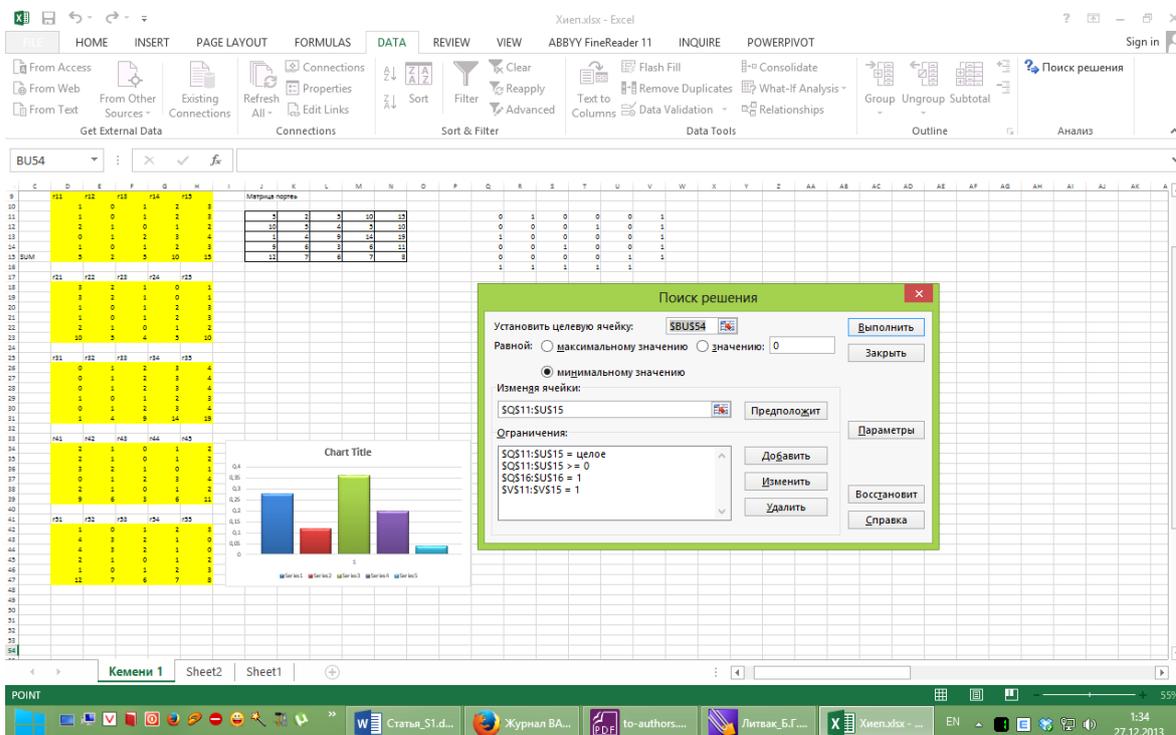
5	2	5	10	15
10	5	4	5	10
1	4	9	14	19
9	6	3	6	11
12	7	6	7	8

6. Путем минимизации функционала решим задачу о назначениях:

$$\begin{cases} \sum_{p=1}^n \sum_{q=1}^n r_{pq} \times x_{pq} \rightarrow \min \\ \sum_{p=1}^n x_{pq} = 1, \quad p = \overline{1, n} \\ \sum_{q=1}^n x_{pq} = 1, \quad q = \overline{1, n} \\ x_{pq} \geq 0, \end{cases} \quad (4)$$

где  $X$  – бинарная матрица назначений:  $x_{pq} = 1$ , если  $p$ -я альтернатива назначается на  $q$ -е место и  $x_{pq} = 0$ , в противном случае.

Матрица  $X = \{x_{pq}\}$  при выполнении условий (4) соответствует некоторому ранжированию.



Опция «Поиск решения» в программе Excel

Задача о назначениях может быть решена с использованием методов линейного програм-

мирования или алгоритма решения транспортной задачи. В этом случае для решения задачи

о назначении с минимальной стоимостью можем использовать программу «Excel», опцию «Поиск и решение» (см. рисунок).

Получаем матрицу назначения в виде (табл. 3):

Таблица 3

Матрица назначения

0	1	0	0	0
0	0	0	1	0
1	0	0	0	0
0	0	1	0	0
0	0	0	0	1

По матрице  $X^* = \{x_{pq}^*\}$  восстанавливаем вектор группового предпочтения  $K^*$ , анализируя матрицу  $X^*$  по строкам: если  $x_{pq}^* = 1$ , то в векторе  $K^*$  полагаем  $k_q^* = p$ . Для примера:  $x_{12} = 1$ ;  $x_{24} = 1$ ;  $x_{31} = 1$ ;  $x_{43} = 1$ ;  $x_{55} = 1$ ; следовательно,  $P^* = (3, 1, 4, 2, 5)$ .

7. При необходимости определения коэффициентов предпочтений объектов возможно использовать метод парных сравнений или схему весов Фишберна.

Для метода парных сравнений: составляем матрицу парных сравнений  $L = \{w_{pq}\}$ ,  $p, q = \overline{1, n}$  для группового предпочтения, элементы которой определяются следующим образом:  $w_{pq} = 2$ , если согласно ранжированию  $K^*$ -направление, имеющее порядковый номер  $p$ , является более предпочтительным, чем  $q$ -е направление;  $w_{pq} = 1$ , если  $p$ -й и  $q$ -й виды деятельности равно предпочтительны, и  $w_{kl} = 0$ , если  $p$ -й менее предпочтителен, чем  $q$ -й. Затем считаем сумму элементов каждой строки  $u_p = \sum_{q=1}^n w_{pq}$  и величину  $V = \sum_{p=1}^n u_p$ . Далее находим значения, соответствующие каждому объекту:

$$X_p = \frac{u_p}{V}, p = \overline{1, n}. \quad (5)$$

В примере получаем матрицу парных сравнений  $L$  (табл. 4):

Итоговое ранжирование альтернатив по методу поиска медианы Кемени представляет порядок: объект 3 (0,36) > объект 1 (0,28) > объект 4 (0,2) > объект 2 (0,12) > объект 5 (0,04)

Таблица 4

Матрица парных сравнений

$k \setminus l$	1	2	3	4	5	Приоритет
1	1	2	0	2	2	$7/25=0,28$
2	0	1	0	0	2	$3/25=0,12$
3	2	2	1	2	2	$9/25=0,36$
4	0	2	0	1	2	$5/25=0,2$
5	0	0	0	0	1	$1/25=0,04$

Замечание:

Кроме того, можем использовать *эвристический алгоритм* [3, 4] для решения этой задачи. Алгоритм включает следующие шаги:

1. Выразим все оценки показателей объектов в порядковой шкале и определим, может ли быть выражено предпочтение рангами.

Пример. Исходные данные представлены в табл. 1.

2. Сопоставим матрице рангов объектов по каждому показателю  $k_j$  вектор предпочтений  $\pi_j = (\pi_{j1}, \pi_{j2}, \dots, \pi_{jn})$ .

Для примера: матрица рангов объектов по каждым показателям представлена в табл. 5.

Таблица 5

Ранги объектов по показателям

Показатели	Объекты (компании) ( $Ob_i$ )				
	$Ob_1$	$Ob_2$	$Ob_3$	$Ob_4$	$Ob_5$
Время выполнения начального подключения потребителя к сети ( $k_1$ )	$\pi_{11} = 2$	4	1	3	2
Доля успешных вызовов потребителя ( $k_2$ )	2	4	1	3	5
Скорость установлений соединения ( $k_3$ )	3	2	1	4	5
Качество передачи речи ( $k_4$ )	1	2	2	1	3
Степень удовлетворенности ( $k_5$ )	2	3	1	3	2

3. Построим матрицу отношений  $p_{uv}^{(j)}$  с элементами  $p_{uv}, j = \overline{1, m}, u, v = \overline{1, n}, n$  – количество объектов.

$$p_{u,v}^{(j)} = \begin{cases} 1, & \text{если } \pi_{j,u} \text{ лучше } \pi_{j,v}, \\ 0, & \text{если } \pi_{j,u} \text{ и } \pi_{j,v} \text{ эквивалентны,} \\ -1, & \text{если } \pi_{j,u} \text{ хуже } \pi_{j,v}. \end{cases} \quad (6)$$

В этом примере получим матрицы отношений для ранжирования объектов (в табл. 6):

Таблица 6

Матрицы отношений для ранжирования объектов

$p_{u,v}^{(1)}$	0	1	-1	1	0
	-1	0	-1	-1	-1
	1	1	0	1	1
	-1	1	-1	0	0
	0	1	-1	1	0
$p_{u,v}^{(2)}$	0	1	-1	1	1
	-1	0	-1	-1	1
	1	1	0	1	1
	-1	1	-1	0	1
	-1	-1	-1	-1	0
$p_{u,v}^{(3)}$	0	-1	-1	1	1
	1	0	-1	1	1
	1	1	0	1	1
	-1	-1	-1	0	1
	-1	-1	-1	-1	0
$p_{u,v}^{(4)}$	0	1	1	0	1
	-1	0	0	-1	1
	-1	0	0	-1	1
	0	1	1	0	1
	-1	-1	-1	-1	0
$p_{ij}^{(5)}$	0	1	-1	1	0
	-1	0	-1	0	-1
	1	1	0	1	1
	-1	0	-1	0	-1
	0	1	-1	1	0

Например,  $p_{12}^{(1)} = 1$ , так как объект 1 лучше чем объект 2 по 1-му показателю.

4. Построим матрицу потерь  $R^*$  размером  $n \times n$  с элементами  $r_{u,v}$ ,  $u, v = \overline{1, n}$

$$r_{u,v} = \sum_{j=1}^m d_{u,v}(P, P_j), \quad (7)$$

где  $P$  – произвольное ранжирование, в котором  $p_{u,v} = 1$ ;  $d_{u,v}(P, P_j)$  – расстояние между двумя ранжировками, определяемое по формуле медианы Кемени–Снелла:

$$d_{u,v}(P, P_j) = |p_{u,v(i)} - p_{u,v(i)}^{(j)}|. \quad (8)$$

Заметим, что при  $p_{u,v} = 1$

$$d_{u,v}(P, P_j) = \begin{cases} 0, & \text{если } p_{u,v}^{(j)} = 1, \\ 1, & \text{если } p_{u,v}^{(j)} = 0, \\ 2, & \text{если } p_{u,v}^{(j)} = -1. \end{cases}$$

При этом задача поиска медианы Кемени для ранжирований формулируется как задача отыскания такого упорядочения объектов, т. е. упорядочения строк и одновременно столбцов матрицы  $R$ , чтобы сумма ее элементов, расположенных над диагональю, была минимальна.

Для данных из примера получаем матрицу потерь  $R^*$ , имеющую следующий вид (табл. 7):

Таблица 7

Матрица потерь  $R^*$

$R^*$	0	2	8	1	2
	8	0	9	7	4
	2	1	0	2	1
	9	3	8	0	3
	8	6	10	6	0

Например,  $r_{12} = \sum_{i=1}^5 d_{12}(P_{12}, P_{12}^{(i)}) = |1-1| + |1-1| + |1-(-1)| + |1-1| + |1-1| = 2$ .

5. Для матрицы потерь  $R^*$  процесс поиска итогового ранжирования состоит из двух этапов:

5.1. Строится предварительное ранжирование  $P^*$ .

1-я итерация. Подсчитаем суммы элементов строк матрицы потерь:

$$S_1^{(1)} = \sum_{u=1}^n r_{1,u}, \dots, S_n^{(1)} = \sum_{u=1}^n r_{n,u}. \quad (9)$$

Найдем минимальную из них:  $S_{u_1} = \min S_u^{(1)}$ .

Объект  $Ob_{u_1}$  ставим на первое место в искомом ранжировании. Вычеркивая в матрице потерь  $R^*$  строку и столбец с номером  $u_1$ , получаем матрицу  $R^{*(1)}$ , множество индексов строк и столбцов которой соответственно  $U^{(1)} = V^{(1)} = \{1, \dots, n\} \setminus u_1$ .

$k$ -я итерация. В матрице потерь  $R^{*(k-1)}$  подсчитаем суммы элементов строк:

$$S_u^{(k)} = \sum_{v \in V^{(k-1)}} r_{u,v}, u \in U^{(k-1)}. \quad (10)$$

Найдем минимальную из них:

$$S_{u,k} = \min_{u \in U^{(k-1)}} S_u^{(k)}.$$

Объект  $Ob_{u,k}$  ставим на  $k$ -е место в искомом упорядочении. Вычеркивая в  $R^{*(k-1)}$  строку и столбец с номером  $u_k$ , получаем новую матрицу  $R^{*(k)}$ , множество индексов строк и столбцов которой соответственно  $U^{(k)} = V^{(k)} = \{1, \dots, n\} \setminus \{u_1, \dots, u_k\}$ .

Алгоритм завершается после  $n$ -й итерации ( $U^{(k)} = V^{(k)}$  и равны пустому множеству). Получим ранжировку  $P^*$  по упорядочению

$$P^* = [Ob_{u,1}, Ob_{u,2}, \dots, Ob_{u,n}]. \quad (11)$$

5.2. Из найденного ранжирования  $P^*$  получают итоговое ранжирование  $P^{**}$ ; при этом процесс перехода от ранжирования  $P^*$  к ранжированию  $P^{**}$  происходит следующим образом: для элементов ранжирования  $P^*$  последовательно проверяем справедливость соотношений:

$$r_{u_k, u_{k+1}} \leq r_{u_{k+1}, u_k}, k = n-1, n-2, \dots, 1. \quad (12)$$

Как только для некоторого  $k$  оно нарушено, альтернативы  $S_{u,k}$  и  $S_{u,k+1}$  в ранжировании меняем местами, а соотношение (12) проверяем, начиная с альтернативы, непосредственно предшествующей альтернативе, подвергшейся перестановке. После конечного числа шагов будет получено ранжирование  $P^{**}$ .

Для данных из примера: Найдем предварительное ранжирование  $P^*$ .

1-я итерация. Подсчитаем:

$$S_u^{(1)} = \sum_{v=1}^5 r_{u,v}, u \in \{1, 2, 3, 4, 5\} : S_1^{(1)} = 13, S_2^{(1)} = 28, \\ S_3^{(1)} = 6, S_4^{(1)} = 23, S_5^{(1)} = 30.$$

Минимум достигается на  $S_3^{(1)}$ . На первое место в ранжировании  $P^*$  помещается альтернатива  $Ob_3$ , и она из дальнейших рассмотрений исключается.

2-я итерация. Подсчитаем:

$$S_u^{(2)} = \sum_{v \neq 3} r_{ij}, u \in \{1, 2, 4, 5\} : S_1^{(2)} = 5, \\ S_2^{(2)} = 19, S_4^{(2)} = 15, S_5^{(2)} = 20.$$

Минимум достигается на  $S_1^{(2)}$ . На второе место в ранжировании  $P^*$  помещается альтернатива  $Ob_1$ , и она из дальнейших рассмотрений исключается.

3-я итерация. Подсчитаем:

$$S_u^{(3)} = \sum_{v \neq 3,1} r_{u,v}, u \in \{2, 4, 5\} : S_2^{(3)} = 11, \\ S_4^{(3)} = 6, S_5^{(3)} = 12.$$

Минимум достигается на  $S_4^{(3)}$ . На третье место в ранжировании  $P^*$  помещается альтернатива  $Ob_4$ , и она из дальнейших рассмотрений исключается.

4-я итерация. Подсчитаем:

$$S_u^{(4)} = \sum_{v \neq 3,1,4} r_{u,v}, u \in \{2, 5\} : S_2^{(4)} = 4, S_5^{(4)} = 6.$$

Минимум достигается на  $S_2^{(4)}$ . На четвертое место в ранжировании  $P^*$  помещается альтернатива  $Ob_2$ , и она из дальнейших рассмотрений исключается.

Таким образом, ранжирование  $P^*$  имеет следующий вид:

$$P^* = [Ob_3, Ob_1, Ob_4, Ob_2, Ob_5].$$

Найдем ранжирование  $P^{**}$ :

Итак,  $u_1 = 3, u_2 = 1, u_3 = 4, u_4 = 2, u_5 = 5$ . Сравниваем  $r_{u_4, u_5}$  и  $r_{u_5, u_4}$  или  $r_{25}$  и  $r_{52}$ . Так как  $r_{25} < r_{12}$  ( $4 < 6$ ), то альтернативы не меняем местами, переходим к сравнению  $r_{42}$  и  $r_{24}$ . Так как  $r_{42} < r_{24}$  ( $3 < 7$ ), то альтернативы не меняем местами. Сравним  $r_{14}$  и  $r_{41}$ . Так как  $r_{14} < r_{41}$  ( $1 < 9$ ), то альтернативы не меняем местами и переходим к сравнению  $r_{31}$  и  $r_{13}$ . Поскольку  $r_{31} < r_{13}$  ( $2 < 9$ ), то найденное ранжирование  $P^{**} = [Ob_3, Ob_1, Ob_4, Ob_2, Ob_5]$  и является ранжированием  $P^{**}$ , для которого соотношения (12) выполнены.

6. Для определения коэффициентов предпочтений объектов возможно использовать метод парных сравнений или схему весов Фишберна (шаг 7 в приведенном выше алгоритме).

Для заданного примера оба подхода показали идентичные результаты

#### Заключение

В статье описана методика решения задачи – оценка конкурентоспособности услуг между телекоммуникационными компаниями. Данная методика позволяет сравнить и оценить качество предоставления услуг между компаниями в целом, и телекоммуникационными компаниями в частности. Кроме того, данный подход может быть применен например, для сравнения различных хозяйствующих субъектов, предоставляющих телекоммуникационные услуги: сетевых компаний и их филиалов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Квятковская, И. Ю. Система показателей оценки качества телекоммуникационных услуг и метод их оценки / И. Ю. Квятковская, Фам КуангХиеп // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2013. – № 2. – С. 98–103.
2. Оптимизационные модели распределения инвестиций на предприятии по видам деятельности / С. А. Баркалов, О. Н. Бакунец, И. В. Гуреева, В. Н. Колпачев, И. Б. Русман. – М. : ИПУРАН, 2002. – 68 с.
3. Литвак, Б. Г. Экспертная информация: методы получения и анализа / Б. Г. Литвак. – М. : Радио и связь, 1982. – 184 с.
4. Курс лекций дисциплины «Теория принятия решений» подготовки дипломированных специалистов по специальности 351500 «Математическое обеспечение и администрирование информационных систем» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://lib2.podelise.ru/docs/71191/index-7790-1.html?page=9>

## АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

УДК 648.8;796:378

*В. И. Аверченков<sup>1</sup>, В. А. Шкаберин<sup>1</sup>, Я. И. Лепих<sup>2</sup>,  
В. И. Сантоний<sup>2</sup>, Л. Н. Будиянская<sup>2</sup>, Ю. В. Крышнев<sup>3</sup>*

### АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕДУР ПРОТИВОПАВОДКОВОГО МОНИТОРИНГА УРОВНЯ ВОДЫ ОТКРЫТЫХ ВОДОЕМОВ\*

<sup>1</sup>Брянский государственный технический университет

<sup>2</sup>Украина, Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова

<sup>3</sup>Беларусь, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого

aver@tu-bryansk.ru, vash@tu-bryansk.ru

Рассмотрена постановка задачи по созданию автоматизированной системы мониторинга уровня воды открытых водоемов с помощью дистанционно управляемых уровнемеров.

*Ключевые слова:* автоматизация, мониторинг уровня воды, противопаводковая система, интеллектуальные датчики.

*V. I. Averchenkov, V. A. Shkaberin, Ya. I. Lepikh, V. I. Santonij, L. N. Budiyanskaya, Y. V. Kryshnev*

### AUTOMATION PROCEDURES FLOOD MONITORING WATER LEVELS OPEN WATERS

**Bryansky State Technical University**

**Ukraine, Odessa National Mechnikov University**

**Belarus, Gomel Sukhoy State Technical University**

We consider the formulation of the problem of the automated system for monitoring the water level of public waters with remote-controlled transmitters.

*Keywords:* automation, monitoring of water level, flood system, intelligent sensors.

В последнее десятилетие во многих регионах, в том числе в бассейне рек Днепр и Десна, протекающих по территории Украины, Беларуси и России, отмечается увеличение числа катастрофических наводнений. Наводнения являются одними из наиболее часто повторяемых стихийных бедствий. По площади охватываемых территорий и нанесенному вреду они часто превосходят все другие чрезвычайные ситуации.

Особенно актуальным это стало после событий, связанных с крупнейшими наводнениями в 2013 г. в России в Хабаровском крае.

Наводнения являются одним из наиболее часто повторяющихся стихийных бедствий, а по площади территорий и материальным убыт-

кам превосходят все другие чрезвычайные ситуации. Наводнения последних лет показали необходимость создания новых подходов к созданию систем их прогнозирования с использованием современных средств автоматизации и развития сотрудничества с соседними странами в вопросах разработки и создания таких систем, а также их использования, что является общей фундаментальной проблемой для многих стран.

Существующие общие климатические тенденции увеличения среднегодовых сумм осадков в результате экстремальных ливневых явлений для предупреждения катастрофических паводков и снижения отрицательных последствий вредного действия вод делают необходимым проведение системного анализа водного режима рек и постоянного комплексного мониторинга водного режима рек и открытых водоемов.

Проблема комплексного мониторинга водного режима многих рек может быть решена только путем тесного сотрудничества с соседни-

\* Статья подготовлена в рамках Межгосударственно-го гранта РФФИ, УФФ и БФФИ «Исследование и разработка метода и автоматической системы противопаводкового мониторинга уровня воды открытых водоемов» (проект № 13-01-90351).

ми странами в вопросах разработки и совместного использования систем мониторинга уровня воды в открытых водоемах и прогнозирования чрезвычайных ситуаций. Это связано с тем, что многие реки охватывают территории соседних государств, например, бассейны рек Днепр (Россия – Беларусь – Украина), Десна (Россия – Украина), Сож (Россия – Беларусь) и др.

Вместе с тем анализ открытых источников выявил, что существующие противопаводковые системы мониторинга малоэффективны и не могут надежно обеспечить защиту населения за счет отсутствия надежного раннего предупреждения о возможности наводнения. Таким образом, наличие опасного природного явления в виде речных наводнений, несовершенство и ненадежность существующих противопаводковых систем, рост ущербов от наводнений повышают актуальность создания современной системы мониторинга уровня воды открытых водоемов.

Реализуемый совместно учеными вузов России (Брянский государственный технический университет), Украины (Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова) и Республики Беларусь (Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого) проект был направлен на разработку методов анализа и создание автоматизированной противопаводковой системы для мониторинга открытых водоемов на основе применения новых конструкций лазерных адаптивных телеуправляемых уровнемеров и современных информационно-коммуникационных технологий. При этом изначально предполагалось, что автоматизированная система будет испытана для мониторинга параметров уровня воды в опасных районах, которые охватывают пограничные территории соседних славянских государств – это бассейны рек Припять, Днепр (Украина–Беларусь), Десна (Украина–Россия) и Сож (Россия–Беларусь).

В рамках реализации проекта был проведен анализ гидрометеорологических условий, имевшихся на протяжении весны 2013 г. в бассейнах рек Сож, Припять, Днепр. Для этих целей использовались данные, собранные при участии специалистов научно-практического центра учреждения «Гомельское областное управление Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь».

Этот анализ показал, что необходимо создание новых видов современных автоматиче-

ских противопаводковых систем раннего предупреждения о чрезвычайных ситуациях, которые не требуют постоянного обслуживания, с использованием информационных технологий в области мониторинга и управления данными по охране окружающей среды, для принятия решений относительно сокращения возможных убытков. При этом мониторинг изменений гидрологического режима должен проводиться на основании разработанных физических и математических моделей.

Проведенное исследование было направлено на решение важной общей научной фундаментальной проблемы – разработку метода и изучение влияния дестабилизирующих внешних факторов на телекоммуникационный канал автоматической системы раннего прогнозирования наводнений с проведенным противопаводковым мониторингом уровня воды открытых водоемов, в том числе трансграничных, на основе использования микроэлектронных лазерных уровнемеров нового поколения с целью их применения для комплексного экологического мониторинга окружающей среды.

В результате анализа современных конструкций уровнемеров были сформулированы следующие технические требования к лазерному уровнемеру, на основе которого должна строиться автоматизированная система:

- уровнемер должен быть защищен от ложного срабатывания при воздействии дестабилизирующих внешних факторов;
- уровнемер должен эффективно работать в нестационарных условиях эксплуатации;
- конструкция уровнемера должна обеспечивать возможность проведения дистанционного сбора и обработки информации об изменениях уровня воды независимо от состояния окружающей среды;
- уровнемер должен иметь возможность оперативно отреагировать на ухудшение экологической ситуации.

Основной подход к реализации новой конструкции лазерного уровнемера заключался в том, что дестабилизирующие внешние факторы использовались для управления характеристиками разработанного интеллектуального датчика [1–3] и распознавания оптических сигналов в условиях нестационарных помех. Для этого были проведены их исследования, установлены основные закономерности и разработаны соответствующие физико-математические модели.

Рабочая гипотеза при создании уровнемеров – учет корреляции между параметрами внешних факторов и адаптивным алгоритмом работы оптико-локационного уровнемера, которая предполагает, что использование динамики оптико-геометрических соотношений усовершенствует измерительный процесс по параметрам точности.

Исследование структуры оптических сигналов в атмосферном канале и их влияние на точностные характеристики используемого сенсора позволят развить новые в данной научной области методы и получить принципиально новые результаты и способ решения сложной научно-технической задачи, что не только способствует развитию соответствующей научной отрасли и смежных отраслей, но и имеет инвестиционную привлекательность.

Оптимизация управления динамическим объектом с переменной структурой при наличии значительной неопределенности его текущего состояния возможна лишь при использовании структур, обеспечивающих оперативное получение достоверной информации о состоянии объекта в контролируемом регионе.

Увеличение эффективности применения оптико-локационных методов и устройств путем использования цифровых методов обработки сигналов позволило существенно снизить количество аналоговых функциональных операций и решить поставленные в проекте задачи.

В результате анализа современных программно-аппаратных разработок в области мониторинга уровня воды были сформулированы следующие основные технические требования к создаваемой автоматизированной системе:

- система должна иметь распределенную архитектуру, включающую главный узел (базовую станцию) и измерительные узлы (измерительные станции);

- система должна базироваться на использовании современных бесконтактных лазерных уровнемеров, которые обладают возможностями учета посторонних влияний, предоставления достоверной информации, адаптации к внешним условиям (рациональному изменению режимов работы), организации передачи информации на основе использования беспроводных каналов связи в режимах, максимально приближенных к режиму реального времени;

- система должна позволять осуществлять дистанционный контроль и оповещение о состоянии водных объектов с помощью персон-

ального компьютера или мобильного телефона в автоматическом режиме, используя сеть сотовой связи;

- система должна обладать обширной базой данных для накопления и систематизации результатов измерений уровней воды;

- заполнение базы данных с результатами измерений уровня воды должно проводиться в двух режимах: автоматическом – путем передачи информации с датчиков уровня воды и обработки этой информации в автоматизированной системе; диалоговом – оператором автоматизированной системы;

- в состав системы должен входить модуль прогнозирования и/или подсистема поддержки принятия решений;

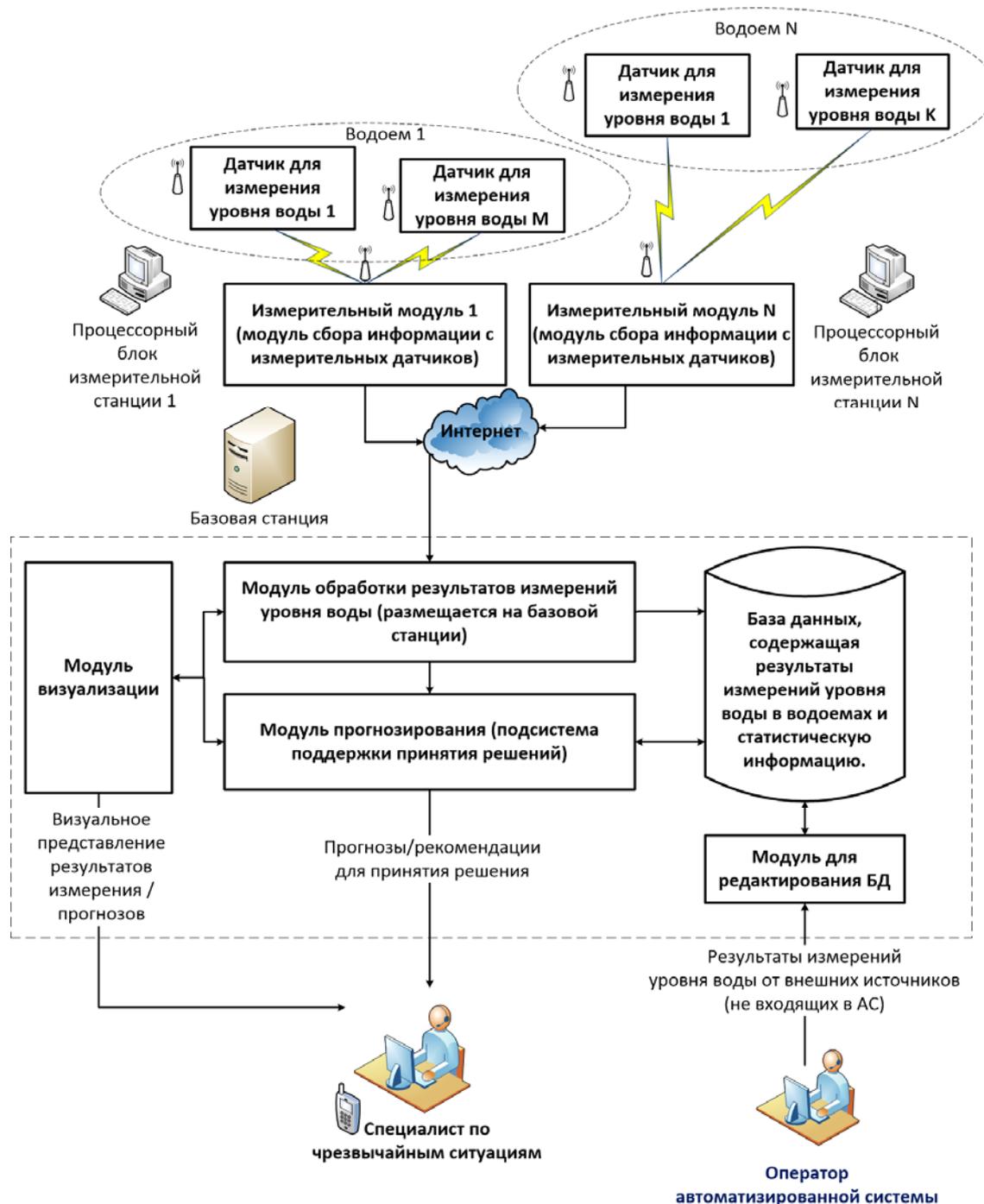
- в состав системы необходимо включить модуль визуализации результатов измерений уровня воды.

На основе сформулированных технических требований была разработана концепция создания и укрупненная структурная схема автоматизированной системы противопаводкового мониторинга уровня воды в открытых водоемах (см. рисунок).

Предлагаемая автоматизированная система включает один главный узел (базовую станцию) и несколько измерительных узлов (измерительных станций).

Базовая станция представляет собой сервер или персональный компьютер, где осуществляется сбор информации об уровне воды с измерительных станций, отображение этой информации в удобном для пользователя виде (карта гидрометрических постов с таблицами и диаграммами и др.).

Измерительная станция является системой, состоящей из основного процессорного блока и беспроводных бесконтактных датчиков уровня воды. Она осуществляет сбор информации с датчиков с помощью беспроводного канала связи, предварительно обрабатывает ее для уменьшения (компенсации) погрешности измерения, и передает на базовую станцию. При этом процессорный блок может быть реализован на основе ARM-процессора со встроенной операционной системой Linux. Используя беспроводной канал связи, он получает информацию с датчиков и осуществляет управление их конфигурацией и опросом. Также процессорный блок должен иметь Web-интерфейс, который позволит удаленно выполнять настройку всей измерительной системы.



Структурная схема автоматизированной системы противопаводкового мониторинга уровня воды в открытых водоемах

В качестве датчиков для измерения уровня воды были использованы лазерные уровнемеры новой конструкции, которые способны к сложной обработке полученных сигналов, обеспечивают учет посторонних влияний и позволяют получить достоверную информацию. Кроме того, указанные уровнемеры обеспечивают рациональное изменение режимов работы в зависимости от обстоятельств; приспособлены к пе-

редаче данных по компьютерным сетям в режиме реального времени [1–3].

Сигнал от уровнемеров по каналам сотовой связи передается в измерительные модули, которые могут физически размещаться, например, на процессорных блоках. Информация из измерительных модулей может быть передана по каналам Интернет на базовую станцию, где размещены основные модули автоматизированной

системы: модуль обработки результатов измерений уровня воды, модуль визуализации и модуль прогнозирования, связанные с базой данных, в которой представлены результаты измерений уровня воды.

Модуль визуализации предназначен для представления фактических результатов измерений уровня воды, а также для показа прогнозируемых значений, рассчитанных в модуле прогнозирования, в удобном для принятия решений виде. Один из вариантов – отображение информации может накладываться на карты водоемов. Реализация этого варианта предполагает возможность взаимосвязи с геоинформационной системой, на которой должны быть представлены анализируемые водные объекты.

Модуль прогнозирования должен быть ориентирован на обеспечение на основе применения математических методов статистики вычислений прогнозных результатов уровня воды на определенный период.

Наиболее перспективный вариант – использование полноценной подсистемы поддержки принятия решений с базой знаний, которая позволит формировать рекомендации для оперативного принятия решений специалистом по чрезвычайным ситуациям.

Результаты измерений могут передаваться в автоматизированную систему не только по каналам связи от уровнемеров, но и вводиться оператором автоматизированной системы вручную. Поддержка двух указанных режимов работы существенно расширяет возможности применения автоматизированной системы, обеспечивая ее универсальность и соблюдение принципов модульности и расширяемости при разработке программного обеспечения автоматизированной системы противопаводкового мониторинга.

В настоящее время ведутся работы по разработке взаимодействия основных модулей прототипа автоматизированной системы противопаводкового мониторинга.

Использование этой системы проведения локальных и глобальных обобщений по гидрологическому состоянию водных объектов в смежных межгосударственных районах позволит более оперативно осуществлять межгосударственные организационно-технические противопаводковые мероприятия, которые позволят существенно уменьшить материальные, а возможно и человеческие, потери от природных катастроф [4].

Система также позволит расширить возможности оперативного мониторинга путем увеличения объема и качества опорной информации, получаемой на гидрометрических постах, и обеспечит развитие дистанционных методов контроля количественных характеристик и гидрологического состояния водных объектов путем создания автономных уровнемеров с высокими метрологическими и эксплуатационными характеристиками на базе современной микропроцессорной техники и средств телекоммуникации.

Основными функциями системы являются получение и сбор данных о скорости изменения уровня воды, происходящей на наблюдаемом объекте, и анализ полученной информации.

Система также позволит информировать пользователей о наличии опасных отклонений уровня воды относительно некоторой заданной величины, происходящих за определенный промежуток времени, обнаруживать предпосылки спонтанного процесса, т. е. при недопустимо быстрых изменениях уровня воды контролируемого объекта.

Разрабатываемое программное обеспечение гарантирует получение оперативных данных измерений от лазерных уровнемеров, которые подключены к компьютеру дистанционно, используя телеметрическое устройство и сотовую связь. Информация об измеренных величинах записывается в специальную базу данных на компьютере, выполняющего функции основного серверного блока.

Анализировать можно как весь собранный массив данных, так и отдельные его фрагменты за заданный интервал времени. Такой анализ позволит прогнозировать, что ждет наблюдаемый водный объект как в ближайшем будущем, так и в длительной перспективе. Система также позволяет проводить мониторинг с использованием GPS-аппаратуры.

Во время сбора данных система может предупреждать пользователя о недопустимых смещениях точек или изменении других наблюдаемых величин. При этом оператор системы может быть уведомлен как по электронной почте, так и с помощью SMS. Таким образом, не нужно постоянно находиться у компьютера и контролировать состояние объекта.

Существующие противопаводковые системы малоэффективны и не могут надежно обеспечить защиту населения за счет раннего предупреждения о возможности наводнения. Та-

ким образом, наличие опасного природного явления, речных наводнений, несовершенство и ненадежность существующих противопаводковых систем, роста ущербов от наводнений повышает актуальность создания современной надежной системы мониторинга уровня воды открытых водоемов, что является конкретной фундаментальной задачей, которую решает данный проект.

Экономический эффект от применения автоматизированной системы будет достигнут за счет своевременного предупреждения катастроф и, таким образом, уменьшения материальных и людских потерь, что предполагает получение также и социального эффекта.

УДК 681.5:621

*В. А. Камаев<sup>1</sup>, Ю. В. Кандырин<sup>2</sup>*

### ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПРОЕКТНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ И САПР\*

<sup>1</sup>Волгоградский государственный технический университет,

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «МЭИ»

vkamaev@mail.ru, ywk@mail.ru

Рассмотрено место и роль задач повышения интеллектуального потенциала через образовательные процессы в подготовке специалистов для креативной проектной деятельности и САПР. Показаны основные отличия в видах деятельности исследователей и разработчиков новой техники и технологий. Приведены онтологические (сущностные) аспекты содержания процесса проектирования изделий новой техники и предпосылки формирования оптимальных (рациональных) проектных решений.

*Ключевые слова:* проектная деятельность, поисковое конструирование, онтологические предпосылки проектирования, экзистенциальные основы и этапы проектирования.

*V. A. Kamaev, Y. V. Kandyrin*

### INTRINSIC OF THE PREMISE DESIGN ACTIVITY AND CAD

The Volgograd State technical university

The National research university «the Moscow power institute»

The place and role of the tasks of rise of an intellectual potential of a society (community) through educational processes in preparation of the experts for creation of design activity and CAD surveyed. The main differences in sorts of activity of the contributors both developers of new engineering and technologies are shown. Are given intrinsic aspects of a contents of the process of designing of hardware products of new engineering and premises of creation of optimum (rational) design solutions.

*Keywords:* design activity, retrieval constructioning, intrinsic of the premise of designing, intrinsic a fundamentals and design stages.

Онтологические предпосылки экономического и технического прогресса занимают умы политиков, экономистов и ученых многих государств. От кардинального решения проблем эффективного развития информационной и технологической составляющей прогресса, всеобщего понимания принципов создания новых,

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Лепих, Я. И.* Применение оптико-геометрического метода в ближайшей оптической локации / И. А. Иванченко, Я. И. Лепих, Л. М. Будиянская // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2012. – Т. 55, № 2. – С. 42–49.

2. *Лепих Я. И., Гордієнко Ю. О., Дзядевич С. В.* та ін.. Інтелектуальні вимірвальні системи на основі мікроелектронних датчиків нового покоління : монографія. – Одеса : Астропринт, 2011. – 352 с.

3. *Лепих Я. И., Гордієнко Ю. О., Дзядевич С. В.* та ін.. Мікроелектронні датчики нового покоління для інтелектуальних систем : Основні технічні характеристики // Довідник. – Одеса : Астропринт, 2011. – 92 с.

4. Характеристики эксплуатационных параметров систем мониторинга уровня воды открытых водоемов / Я. И. Лепих, А. Л. Приступа, Ю. Я. Буянова, В. И. Сантоний, Л. Н. Будиянская, В. И. Аверченков, Ю. В. Кришнев // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім. Т. Шевченка. – К.: ВІКНУ, 2013. – вип. № 43. – С. 300–308.

полезных обществу вещей и технологий зависит благосостояние каждого человека и вместе с тем устойчивое развитие, как отдельных стран, так и всей цивилизации.

По прогнозу японских футурологов [1], в начале третьего тысячелетия все страны мира распределятся на *три группы* с соответствующими показателями уровня жизни своего населения в зависимости оттого, что именно та или иная страна сможет предложить на мировом рынке.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке со стороны Минобрнауки России в рамках базовой части (проект 2586 задания № 2014/16)

*Первая группа* стран будет торговать идеями, проектами и передовыми технологиями, поэтому граждане этих стран будут жить достаточно хорошо.

*Вторая группа* стран сможет предложить миру сложную радиоэлектронную технику и продукцию точного машиностроения: в результате, проживающие в них граждане будут жить неплохо, но хуже первой.

*Третья группа* стран будет снабжать мировой рынок продукцией машиностроения, пищевой промышленности и сырьем и, как следствие, уровень жизни граждан этих стран будет весьма низким.

По-видимому, следует предусмотреть существование еще одной, *четвертой группы* стран, которые окажутся в состоянии предложить мировому сообществу только дешевую рабочую силу.

Комментарии к вопросу о качестве жизни граждан этих стран, а также к вопросу о возможном прогнозе по месту этих стран в будущей мировой системе излишни.

Все это настоятельно заставляет задуматься о роли инновационной составляющей развития, в основе которой лежит исключительное внимание общества к проблемам всеобщего и специального образования вообще и, особенно, к задачам обучения методам поискового и концептуального проектирования. Важную роль при этом начинают играть методы генерации идей, новых принципов действия, а также сравнительного анализа альтернативных проектных решений, многокритериального выбора рациональных вариантов, как реализующих концепцию конвергентного поиска в инновационном проектировании. Деятельностный подход к образованию при этом приобретает особую значимость и во многом предопределяет успех. Общеизвестно, что в современных условиях интеллектуальный потенциал населения, наряду с демографическим, территориальным, сырьевым, технологическим является важнейшей основой всеобщего прогрессивного развития.

При этом одним из решающих факторов экономического развития становится высокотехнологичное интеллектуальное производство, а ключевой формой собственности – *собственность интеллектуальная*. По мнению ряда аналитиков, в настоящее время можно говорить о *глобальном интеллектуальном переделе мира*, означающем жесткую конкурентную борьбу от-

дельных государств за преимущественное обладание креативными и высокообразованными одаренными людьми – потенциальными носителями нового знания и технологий разработки новых продуктов.

Интеллектуальное творчество, будучи неотъемлемой стороной человеческой духовности, выступает в качестве социального механизма, который противостоит регрессивным направлениям в развитии общества [7]. Продуктом интеллектуального творчества являются идеи. Количество идей в интеллектуальной атмосфере подобно озоновому слою в земной атмосфере. При этом, чем меньше в обществе умных людей, тем более выражены деструктивные тенденции в обществе.

Кроме того, *работа интеллекта – это гарантия личной свободы человека и самостоятельности его индивидуальной судьбы*. Чем в большей мере человек использует свой интеллект в анализе и оценке происходящего, тем в меньшей мере он податлив по отношению к любым попыткам манипулирования им извне и тем больше возможностей он имеет для своего саморазвития, тем более он полезен обществу, как созидатель прогрессивного движения мысли и технологического взлета [4], [5].

Современное состояние российской экономики и состояние российского образования заставляют задуматься также о необходимости формирования (подготовки) разных типов специалистов в смысле их деятельностной окраски. Поясним, речь идет не о тех или иных «знаниевых» специализациях, а о приспособленности выполнять тот или иной род деятельности.

Обычно всех технических специалистов по виду деятельности подразделяют: на *исследователей, разработчиков (проектировщиков), технологов по производству и эксплуатации* [9].

С точки зрения *набора основных показателей качества*, характеризующих степень эффективности их работы, мы получим во многом непересекающиеся подмножества. Это было показано еще в работах Джонса [2], Диксона [3]. В любом случае новые изделия создаются для удовлетворения определенных потребностей [6]. Действительно, можно с уверенностью согласиться с мнением этих ученых о сущности деятельностных процедур в проектной и научной работе (см. таблицу). Разумеется, в практической деятельности возникают ситуации, промежуточные между двумя этими рафинированными понятиями.

Сопоставление процедур исследования и проектирования по признакам деятельности

Признаки деятельности	Вид деятельности	
	Исследование	Проектирование
Цель деятельности	Установление законов природы	Создание нового объекта
Методы достижения цели	Аксиоматический	Эвристический, интуитивный
Степень общности цели	Максимально широкая	Максимально конкретная
Основа подхода	Сомнение, скептицизм	Подсознательная вера
Характер результата	Однозначный, единственный	Множество вариантов
Критерий результативности	Истинность, верность	Эффективность, экономичность
Зависимость результата от личности автора	Слабая	Сильная

Сегодня *деятельностной* «окраски» в учебных планах вузовской подготовки бакалавров и магистров практически нет. И может быть пора задуматься над тем, чтобы она в значительной степени была более ярко выражена, с тем, чтобы минимизировать время и затраты на адаптацию молодых специалистов к условиям их будущей работы.

Далее остановимся на экзистенциальных предпосылках подготовки разработчиков (проектировщиков) новой техники.

В НИУ «МЭИ» и на кафедре «САПР и ПК» ВолгГТУ была проанализирована ситуация с проектной подготовкой разработчиков новой техники и технологий и сделана попытка обобщить наиболее важные составляющие этого вида деятельности. Причем многие предпосылки обобщений родились из анализа развития систем автоматизированного проектирования (САПР) и проектной подготовки студентов. И хотя в значительной степени САПР сегодня оформилось в самостоятельное научно-техническое направление, книги этого направления не содержат обобщающих онтологических (сущностных) начал проектирования как вида человеческой деятельности. Не сформирован общесистемный взгляд на основные деятельностные процедуры проектирования, инвариантные по отношению к объекту проектирования.

Создание рационально организованных систем автоматизированного проектирования и поискового конструирования требуют осознания наиболее актуальных принципов их построения, позволяющих рассматривать сам процесс проектирования как совокупность креативных деятельностных процедур, направляемых и уп-

равляемых человеком. Сформулируем кратко наиболее важные из этих принципов [1]:

1) проектная, как и любая другая креативная деятельность определяется экзистенциальными посылами – *мотивациями, смыслами и целями*, которые имеют *временное измерение* и, как результат, *порождают* функции состояния *объекта проектирования* (ОП). Создание новых решений предполагает не только использование формальной логики (индуктивные или дедуктивные выводы). Как правило, принципиально новое, креативное базируется на использовании аппарата абдукции [10, 11];

2) процесс проектирования в контексте развития целей и состояний (ОП) предполагает *существенно личностный*, диалоговый способ мышления, открытый будущему, *развивающийся во времени*, условно необратимый коммуникативный процесс. Подобный диалог во многом представляет собой искусство, которое не может быть целиком и полностью описано средствами формальной логики, сколь бы развитой и совершенной она ни была. Отсюда – единство формальных и неформальных эвристических способов мышления и обработки информации, единство логики и творческой интуиции. Отсюда – и сугубо личностный характер диалога. Причем в этом диалоге нет готовых ответов на задаваемые вопросы, как и нет окончательного перечня самих вопросов. Диалог в процессе проектирования – *открытый будущему процесс, в котором ответы на поставленные вопросы влекут за собой постановку все новых и новых вопросов*. Искусством подобного диалога обладал Сократ [11, 12];

3) результат проектирования является функцией целевых устремлений и граничных усло-



7) необходимым условием успеха при проектировании технических систем является и принцип нарастания сложности задач, решаемых на каждом последовательном уровне или этапе. Сложность систем имеет явные и неявные формы своего проявления. Обычно *явная сложность* оценивается объемом информации, необходимым для адекватного описания свойств, проектируемой системы. Практическим методом ее снижения является расчленение системы на компоненты и проектирование их по частям. *Неявная сложность* характеризуется степенью возможности прогнозирования реально достижимых ожидаемых свойств и показателей качества проектируемых композиционных систем по характеристикам их элементов. Это обусловлено *несводимостью* свойств системы к сумме свойств ее компонентов. В результате возникает коллизия, требующая многоуровневых постановок и процедур принятия решений.

На рисунке представлены интеллектуальные характеристики проектировщика, реализующего процедуры проектной деятельности и связи между ними;

8) и, наконец, необходимость широкого использования информационных технологий для автоматизации не только рутинных операций проектирования, но поиска новых технических решений [14].

**Выводы.** Прогресс и благосостояние государства во многом определяются способностью специально подготовленной части населения создавать интеллектуальные востребованные продукты, которые нужны в силу их уникальности или лучших стоимостных характеристик. В этой связи инновационная проектная подготовка выпускников вузов приобретает все большее значение для экономического потенциала страны. Внедрение тех или иных САПР обязательно должно поддерживаться внедрением не только автоматизированных расчетов и машинной графики, но и инвариантных составляющих процесса проектирования, включающих дивергенцию, трансформацию и конвергенцию, как базовых этапов поискового конструирования. При этом особую роль играют такие качества специалиста, как изобретательность, адаптивность, информированность, сообразительность, компетентность и ряд других.

#### 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. *Джонс, Дж.* Методы проектирования / Дж. Джонс. – М. : Мир, 1986. – 326 с.
3. *Диксон, Дж.* Проектирование систем / Дж. Диксон. – М. : Мир, 1969. – 440 с.
4. *Vzjatyshvt V., Kandyrin Y.* The engineering design centre of the MPEI – a history, experience, and development. Integrating Design Education Beyond 2000, Proceedings of the 22 SEED Annual Design Conference and 7 National Conference on Product Design Education, 6-7 September 2000, University of Sussex, Brighton, UK, 2000 ISBN 1 86058 265 6, pp. 285–292.
5. *Kadel V, Kandyrin Y.* The Theory of Decision-making in Engineering Design. Integrating Design Education Beyond 2000, Proceedings of the 22 SEED Annual Design Conference and 7 National Conference on Product Design Education, 6–7 September 2000, University of Sussex, Brighton, UK, 2000 ISBN 1 86058 265 6, pp. 305–312.
6. *Кандырин, Ю. В.* Проектное мировоззрение и его влияние на интеллектуальный потенциал общества. В кн. Инновационное образование и инженерное творчество / Ю. В. Кандырин. – М. : НИИВО, 1995. – С. 24–35.
7. *Кандырин, Ю. В.* Социальные технологии инженерного менеджмента. В кн. Россия сегодня: общество, культура, государство, человек : тез. докладов / Ю. В. Кандырин. – Минобр РФ, Москва 1998. – С. 153–154.
8. *Кандырин, Ю. В.* Экзистенциальные начала креативной проектной деятельности. Междунар. Электротехн. Конгрессе 28 июня–3 июля / Ю. В. Кандырин. – М. : Изд-во МЭИ, 1999. – С. 56–60.
9. *Кандырин, Ю. В.* Онтологические принципы проектной деятельности. В кн. Информационные технологии в образовании, технике и медицине; ВолгГТУ / Ю. В. Кандырин. – Волгоград, 2000. – С. 77–81.
10. *Камаев, В. А.* Абдукция – инструмент концептуального проектирования новых технических систем / В. А. Камаев // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2011. – № 2. – С. 32–36.
11. *Камаев, В. А., Щербakov M. B.* Абдукция в концептуальном проектировании, когнитивном моделировании, Data Mining.
12. *Камаев, В. А.* Абдукция и метод Сократа / В. А. Камаев // Труды Конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям «IS&IT`11» (Дивноморское, 2–9 сент. 2011 г.). В 4 т. Т. 1 : докл. секций междунар. науч.-техн. конференций «AIS`11» и «CAD-2011» / Южный федеральный ун-т [и др.]. – М., 2011. – С. 277–281.
13. *Камаев, В. А.* Abduction and Socrates method / Камаев В.А. // Proceedings of the Congress on intelligent systems and information technologies «IS&IT`11». Vol. 4 : [аннот. докл.] / SFU [et al.]. – Moscow, 2011. – С. 93–94. – Англ.
14. *Камаев, В. А.* Автоматизированное поисковое проектирование / В. А. Камаев // Наука – производству. – 2000. – № 1. – С. 3–4.
15. *Кандырин, Ю. В.* Творчество и менеджмент разработок новой техники: учеб. пособие для вузов / Ю. В. Кандырин. – М. : Дом МЭИ, 2012. – 100 с.

УДК 004.89

*Д. М. Коробкин, С. А. Фоменков, И. А. Кобликов***СИСТЕМА ИЗВЛЕЧЕНИЯ ОПИСАНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ  
НА ОСНОВЕ ОНТОЛОГИИ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ\***

Волгоградский государственный технический университет

dkorobkin80@mail.ru

В статье представлена методика извлечения описаний физических эффектов из текстов на естественном русском языке на основе разработанной онтологии предметной области. Представлены методики поиска по предикатам предметной области, формирования запроса к базе физических эффектов. Разработанная система показывает лучшие результаты по сравнению с известными аналогами.

*Ключевые слова:* извлечение фактов из естественно-языкового текста, онтология предметной области, физический эффект.

*D. M. Korobkin, S. A. Fomenkov, I. A. Koblikov***ONTOLOGY-BASED INFORMATION EXTRACTION SYSTEM  
OF PHYSICAL EFFECTS DESCRIPTION**

Volgograd State Technical University

The paper presents the method of Ontology-Based information extraction of physical effect's descriptions from Russian text. In paper method of search subject area predicate and formation of query to physical effects database is presents. The developed system shows better results compared to known analogs.

*Keywords:* fact extraction, text mining, ontology, physical effect.

На данный момент вопросам поддержки процесса формирования информационного обеспечения фонда физических эффектов (ФЭ) [1] (основной процедурой которого является автоматизированный поиск и извлечение описаний новых ФЭ) не уделяется должного внимания ни в одном из направлений, кроме подхода, описанного в трудах А. И. Половинкина и получившего дальнейшее развитие в работах кафедры САПР и ПК ВолгГТУ [2]. Однако и у методики модификации фонда ФЭ, созданной в рамках данного направления [3, 4] и реализованной в виде программного обеспечения «ИОФФЭ» [5], существуют серьезные недостатки: использование недостаточно эффективного алгоритма семантического анализа (невысокая точность и полнота), в качестве базы знаний используется тезаурус, а методом извлечения служит поиск по паттернам, который не обеспечивает должной точности обработки естественно-языковых текстов. Также представление онтологии в данном подходе не является стандартизированным, что усложняет интеграцию системы и использование результатов работы в других системах. Таким образом, актуальным является повышение эффективности поиска и извлечения описаний ФЭ за счет новых, более продуктивных подходов.

**Анализ методов и средств разработки**

В качестве модели представления знаний о физических эффектах была выбрана онтология предметной области [6]. В отличие от продукционной модели, семантической сети, фреймов и формальных логических моделей, онтология является наиболее формальной моделью, обладает модельно-теоретической семантикой, является наиболее распространенной формой описания знаний о какой-либо предметной области, обладает достаточной выразительностью и легкостью интеграции с информационными системами.

В настоящее время существует множество инструментов для создания, поддержки онтологий. Эти инструменты кроме стандартных функций просмотра и редактирования также выполняют импорт и экспорт различных форматов и языков, документирование онтологий, поддерживают визуализацию и графическое редактирование, осуществляют поддержку документирования онтологий и т. д.

Рассмотрим наиболее известные инструменты инженерии онтологий, основные характеристики которых представлены в табл. 1.

Для разработки онтологии предметной области физических эффектов было выбрано инструментальное средство Protégé [7]. Данный выбор обоснован критериями эргономики, а также возможностями визуализации таксономии

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 13-07-97032 р\_поволжье-а).

концептов, наличием редактора формальных аксиом, также возможностью сохранения онто-

логии в различных форматах, обеспечением совместимости со средствами разработки.

Таблица 1

Обзор средств проектирования онтологий

Критерии сравнения		Ontolingua	OntoEdit	Protege	OilEd	Onto-Saurus
Доступность		Свободный доступ	Свободная лицензия	Открытый код	Открытый код	Открытый код, свободный доступ
Поддержка методологией						
Архитектура программного обеспечения	Архитектура	Клиент/сервер	3-х уровневая	3-х уровневая	3-х уровневая	Клиент/сервер
	Расширяемость	–	Плагины	Плагины	–	–
	Хранение онтологий	Файлы	Файлы	Файлы, СУБД	Файлы	Файлы
Модель знаний	Формализм	Фреймы + FOL	Фреймы + FOL	Фреймы+ FOL, DL	DL	DL
	Основной язык представления знаний	Onto-lingua	OXML	OKBC	DAML + OIL	LOOM
	Формальный язык аксиом	Onto-lingua	F-logic	PAL	–	LOOM

**Разработка онтологии предметной области физических эффектов**

Для организации процесса извлечения описаний физических эффектов [8, 9] была разработана онтология предметной области, основанная на данных фонда физических эффектов, разработанном на кафедре САПриПК, а также на модели описания физического эффекта [10].

Основными требованиями к разрабатываемой онтологии физических эффектов являлись:

- 1) возможность выявления физического эффекта по его описанию;
- 2) возможность поддержки и пополнения;
- 3) возможность интеграции в информационные системы.

Физический эффект в разрабатываемой онтологии представлен в соответствии с обобщенной моделью: {Вход ФЭ, Выход ФЭ, Объект ФЭ} [1].

Для определения физического эффекта в онтологии были введены отношения, связывающие элементы модели:

- 1) «Иметь воздействие на». Отношение, связывающее понятие «Физический эффект» и «Выход физического эффекта»;
- 2) «Иметь объект воздействия». Отношение, связывающее понятие «Физический эффект» и «Вход физического эффекта»;
- 3) «Находиться в». Отношение, связывающее понятие «Физический эффект» и «Объект физического эффекта».

Также были введены отношения, характеризующие фундаментальные понятия онтологии – материю и свойства элементов материи:

- 1) «Иметь свойства поля». Связывает понятия поля и возможные свойства;
- 2) «Иметь свойства вещества». Соответственно – для вещества;
- 3) «Иметь единицу измерения». Позволяет количественно характеризовать физические величины.

Остальные отношения отражают иерархию классов онтологии и имеют обозначение «SuperclassOf».

Онтология была спроектирована при помощи инструментального средства Protégé и представлена на рис. 1.

Используемый язык описания онтологии – OWL [11]. В качестве диалекта был выбран OWL DL, который обеспечивает максимальную выразительность без потери полноты вычислений и разрешимости.

На рис. 2 изображена схема в форме сети, на которой отражены наиболее значимые отношения между классами.

Физическая схема онтологии показана на рис. 3. В онтологию добавлено описание физического эффекта: «Воздействие разности потенциалов на магнитное поле в твердом теле».



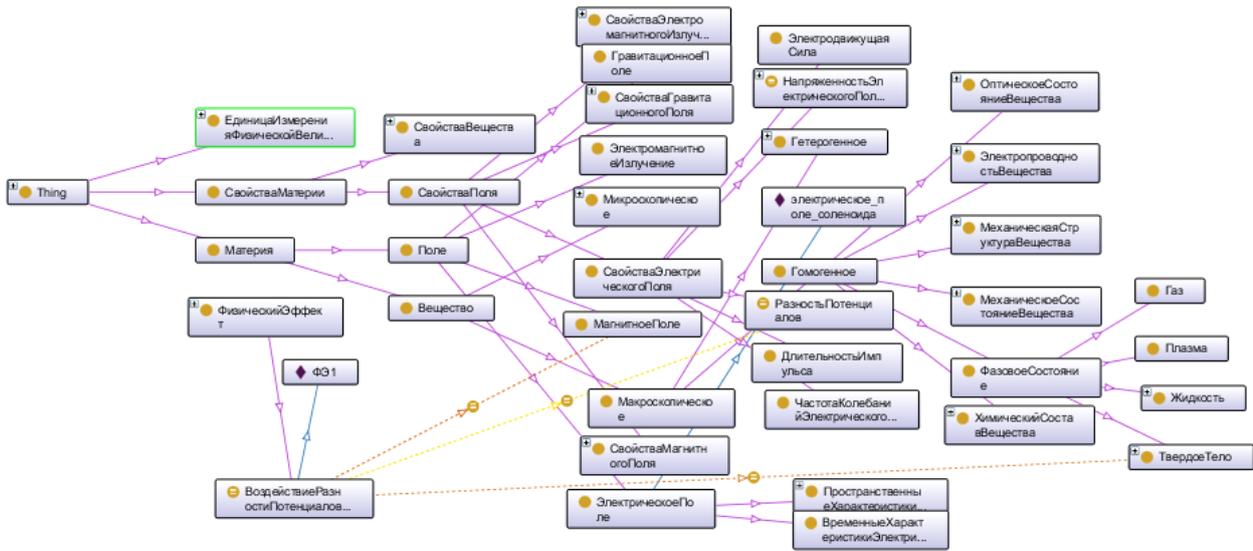


Рис. 3. Фрагмент физической схемы онтологии предметной области

При разработке онтологии предметной области существующая модель представления была модифицирована введением новых отношений и новой структурой. Это позволило получить следующие преимущества:

- 1) разрешение проблемы синонимии путем использования объектов классов. Синонимы добавляются в онтологию как объекты классов;
- 2) возможность выявления знаний из онтологии предметной области. Наличие средств автоматического анализа и визуализации;
- 3) удобство модификации и поддержки онтологии.

**Извлечение описаний физических эффектов из текста первичных источников**

Для выявления описаний физических эффектов (см. рис. 4) необходимо на начальном этапе локализовать область текста, содержащую предполагаемые описания физического эффекта. Данный процесс осуществляется с использованием поиска ключевых слов и понятий [10], определяющих возможность присутствия физического эффекта в тексте, таких как: «Зависимость», «Воздействие», «Влияние», «Уменьшение», «Увеличение», «Изменение» и т. д.

Для реализации семантического анализа было использовано средство автоматизированной обработки текстов на русском языке, разработанное группой АОТ.ru. Его выход представляет собой семантическую сеть с определенными отношениями. Список некоторых отношений, используемых в выбранном семантическом анализаторе, представлен в табл. 2.

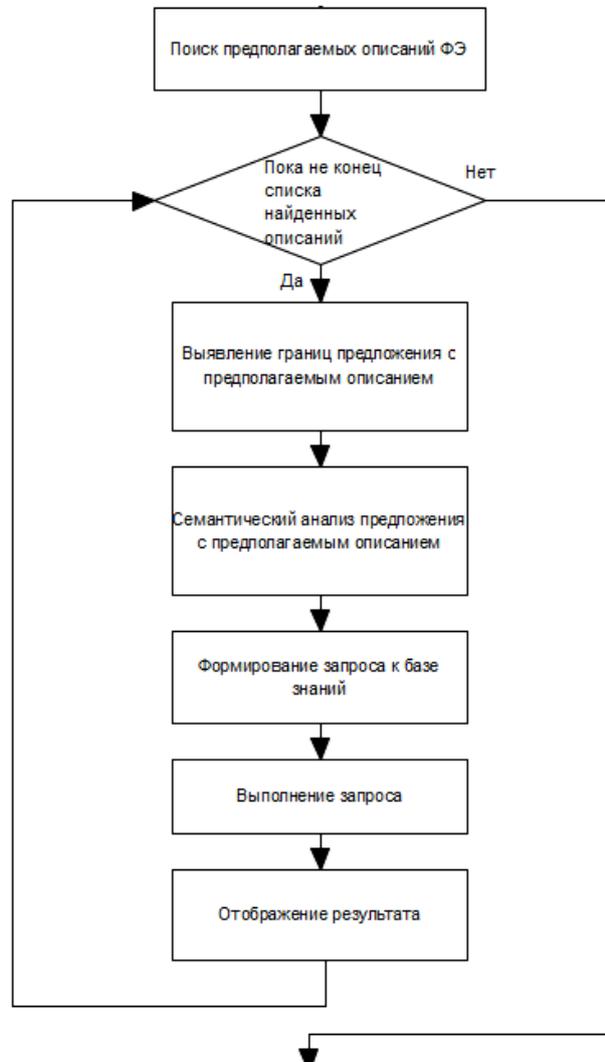


Рис. 4. Процесс выявления описаний физических эффектов

Список семантических отношений

Название	Обозначение	Примеры	Структура
ЗНАЧ	VALUE	Действие в среде	ЗНАЧ (Действие, Среда)
ОБ	OBJ	Воздействие поля	ОБ (Воздействие, Поле)
ПАРАМ	PARAM	Разность потенциалов	ПАРАМ (Разность, Потенциалов)
ПРИЗН	PROPERT	Магнитное поле	ПРИЗН (Поле, Магнитное)
Название	Обозначение	Примеры	Структура
СУБ	SUB	Воздействие разности	СУБ(Разность, Воздействие)
ЛОК	LOC	Протекать в проводнике	ЛОК (Проводник, Протекать)
F-АКТ	F-АКТ	Зависимость вязкости	ЗАВИС (Зависимость, Вязкость)
S-АКТ	S-АКТ	Зависимость от температуры	ЗАВИСОТ (Зависимость, Температура)

Разработанная структура и формат онтологии позволяют использовать механизмы запросов к базе знаний, целью которых в данном случае будет выявление описаний физических эффектов [8, 9].

Одним из наиболее распространенных, формальных и поддерживаемых автоматизированными средствами подходов к созданию запросов к онтологиям является подход, основанный на языке SPARQL.

Определим описание в общем виде физического эффекта в соответствии с выбранным языком и моделью:

Пример:

```
Class({(Воздействие разности потенциалов на магнитное поле в твердом теле));
partial{restriction(иметьВоздействиеНа allValuesFrom(Магнитное поле)),
restriction(иметьОбъектВоздействия allValuesFrom(Разность потенциалов)),
restriction(находитьсяВ allValuesFrom(Твердое тело))};
```

Запрос будем формировать из результатов семантического анализа предложения с предполагаемым описанием физического эффекта. Необходимо объединить семантические отношения в группы и сопоставить каждой из групп запрос к базе знаний физических эффектов.

```
SELECT DISTINCT ?result WHERE {
?resultSuperClass ns:иметьВоздействиеНа ns:ВыходФЭ .
?resultSuperClass ns:иметьОбъектВоздействия ns:ВходФЭ .
?resultSuperClass ns:находитьсяВ ns:ОбъектФЭ .
?result rdfs:subClassOf ?resultSuperClass . }
```

Иными словами, для определения физического эффекта, необходимо выявить три составляющих согласно модели: на что воздействует физический эффект, какое воздействие в нем содержится и где он локализован.

Так как приведенное выше описание является общим для всех физических эффектов, конкретный физический эффект будет являться подклассом данного описания.

Для преобразования семантического графа предложения произведем его обход в прямом порядке, фиксируя отношения и узлы. Введем следующие правила, сопоставляющие семантические отношения и их соответствующее представление в базе знаний (табл. 3).

Семантические отношения и соответствующий запрос

Отношения АОТ	Преобразованные отношения	Запрос к БЗ SELECT DISTINCT ?result WHERE {
SUB(Воздействие, Разность) + PARAM(Разность, Потенциал)	Input(Воздействие, Разность Потенциал)	?resultSuperClass ns:иметьОбъектВоздействия ns:Разность потенциалов
VALUE(Разность, Тело) + PROPERT(Тело, Твердое)	Object(Твердое Тело)	?resultSuperClass ns:находитьсяВ ns: Твердое Тело
OBJ(Воздействие, Поле) + PROPERT(Поле, Магнитное)	Output(Воздействие, Магнитное Поле)	?resultSuperClass ns:иметьВоздействиеНа ns:Магнитное поле

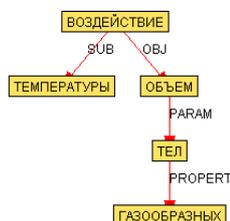
Таким образом, наличие соответствий между семантическими отношениями и запросами к базе знаний позволяет однозначно интерпре-

тировать структуру фрагмента с предполагаемым описанием физического эффекта. Пример описания физического эффекта:

Входные данные

Воздействие температуры на объем газообразных тел

Семантический анализ



Запрос к онтологии

```
SELECT DISTINCT ?result WHERE
{ ns:иметьОбъектВоздействия ns: Температура
?resultSuperClass ns:находитьсяВ ns: Газообразное тело
?resultSuperClass ns:иметьВоздействиеНа ns: Объем}
```

Результат

ФЭ «Тепловое расширение жидких и газообразных тел»

**Система извлечения описаний физических эффектов**

Автоматизированная система осуществляет поиск по предикатам предметной области и вы-

полнение запроса к базе знаний физических эффектов. Описание выявленного физического эффекта отображается в нижней части окна; результат выявления представлен на рис. 5.

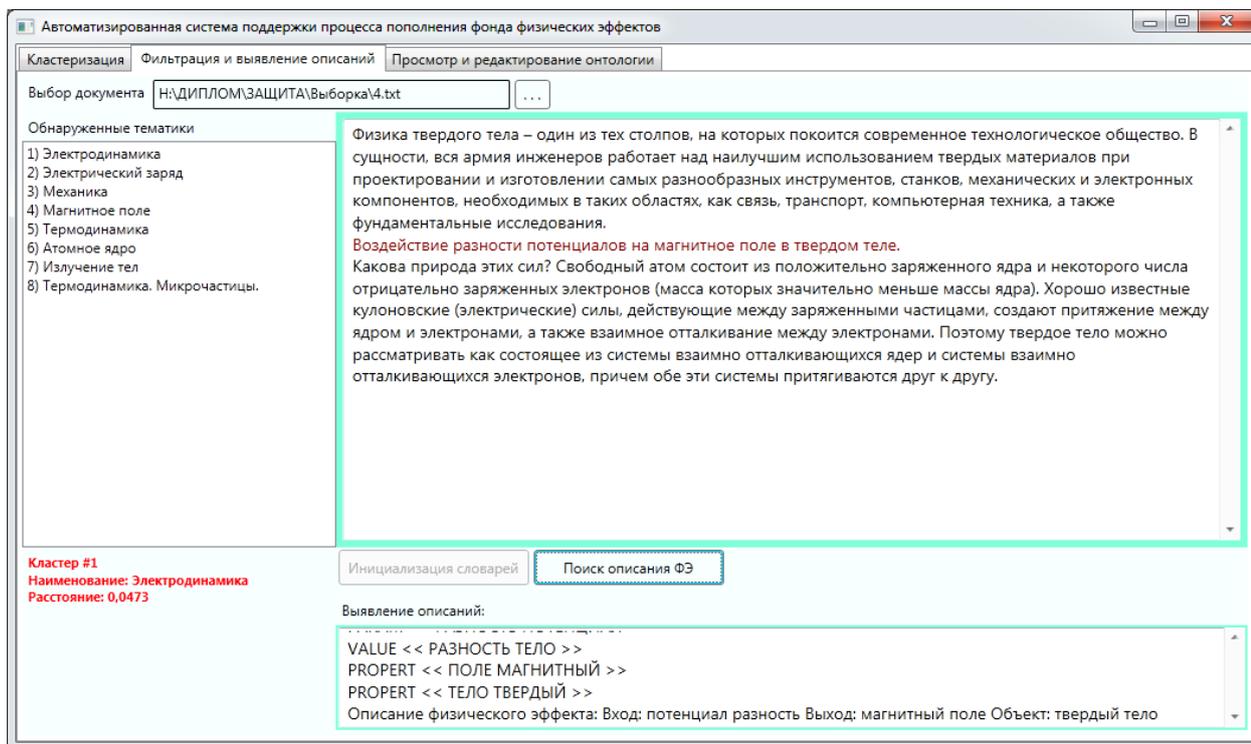


Рис. 5. Описание выявленного физического эффекта

Для апробации системы извлечения описаний была подготовлена выборка из 50 документов, в которых содержатся 80 физических эффектов. Оценка эффективности работы систе-

мы приведена в табл. 4.

Сравнение показателей с результатами работы системы с системой «ИОФФЭ» [12] представлены в табл. 5.

Таблица 4

## Результаты работы системы извлечения описаний ФЭ

Показатели	Значение
$D_{retr}^{rel}$ – количество извлеченных из документов релевантных ФЭ	50
$D_{retr}^{nrel}$ – количество извлеченных нерелевантных ФЭ	64
$D_{retr}$ – количество ФЭ, извлеченных системой	114
Точность Precision = $\frac{ D_{retr}^{rel} \cap D_{retr} }{ D_{retr} } = \frac{ D_{retr}^{rel} }{ D_{retr}^{rel} + D_{retr}^{nrel} }$	0,412
Полнота Recall = $\frac{ D_{retr}^{rel} \cap D_{retr} }{ D_{retr}^{rel} } = \frac{ D_{retr}^{rel} }{ D_{retr}^{rel} }$	0,625

Таблица 5

## Сравнение показателей эффективности

Показатель	ИОФЭ	Разработанная система
Precision	0,306	0,412
Recall	0,518	0,625

## Выводы

Разработана модель представления знаний о физических эффектах, основанная на онтологическом подходе. Спроектировано логическое и физическое представление онтологической модели.

Разработана методика извлечения описаний физических эффектов на основе применения семантического анализа средствами АОТ и формирования запросов к онтологической модели.

Осуществлена проверка эффективности работы созданной автоматизированной системы с использованием специально созданного тестового массива документов. Доказано повышение эффективности по сравнению с существующей программной разработкой кафедры САПР и ПК «ИОФЭ».

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Фоменков, С. А.* Моделирование и автоматизированное использование структурированных физических знаний: монография / С. А. Фоменков, Д. А. Давыдов, В. А. Камаев. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 278 с.
2. *Фоменков, С. А.* Информационное наполнение баз данных по физическим эффектам / С. А. Фоменков, С. Г. Колесников // Информационные технологии. – 2004. – № 6. – С. 60–62.
3. *Фоменков, С. А., Колесников С. Г., Коробкин Д. М.* Методика модификации информационного обеспечения базы данных физических эффектов // Известия Волгоградского государственного технического университета, 2012, т. 10. – С. 166–170.

4. *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.

5. *Коробкин, Д. М.* Программный комплекс поддержки процесса формирования информационного обеспечения фонда физических эффектов / Д. М. Коробкин, С. А. Фоменков // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2009. – № 87. – С. 306–310.

6. *Добров, Б. В.* Онтологии и тезаурусы: модели, инструменты, приложения / Б. В. Добров, В. В. Иванов, Н. В. Лукашевич, В. Д. Соловьев. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2009. – 173 с.

7. *Musen, M.* Domain Ontologies in Software Engineering: Use of Protege with the EON Architecture // Methods of Inform. in Medicine, pages 540–550, 2010.

8. *Коробкин, Д. М.* Методика выделения структурированной физической информации в виде физических эффектов из текста / Д. М. Коробкин, С. А. Фоменков // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2009. – № 10. – С. 35–39.

9. *Коробкин, Д. М., Фоменков С. А.* Автоматизированная методика извлечения структурированных физических знаний в виде физических эффектов из текстов на естественном английском языке // 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.

10. *Коробкин, Д. М.* Модель представления структурированной предметной информации в виде физических эффектов в тексте на естественном русском языке / Д. М. Коробкин, С. А. Фоменков // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2009. – № 7. – С. 17–21.

11. OWL Web Ontology Language. Overview: W3C Recommendation 10 February 2009 Электронный ресурс. / eds. Deborah L. McGuinness, Frank van Harmelen. – Режим доступа: <http://www.w3.org/TR/owl-features/>.

12. *Фоменков, С. А.* Программный комплекс представления и использования структурированных физических знаний / С. А. Фоменков, Д. М. Коробкин, А. М. Дворянkin // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2012. – № 11. – С. 24–28.

УДК 004.896

*Н. Н. Филатова, А. Г. Требухин***ОПЫТ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ В САПР  
АВТОМАТИЧЕСКИ РАЗВИВАЮЩЕЙСЯ БАЗЫ ЗНАНИЙ****Тверской государственный технический университет**

trebuchin2010@yandex.ru

Рассмотрен программный комплекс, расширяющий возможности САПР систем автоматизации технологических процессов средствами автоматического расширения базы знаний САПР и ее применения для проектирования схмотехнических решений.

*Ключевые слова:* база знаний САПР, интеллектуальная САПР, обобщение схем.

*N. N. Filatova, A. G. Trebukhin***EXPERIENCE OF CREATION AND APPLICATION  
AUTOMATICALLY DEVELOPING CAD KNOWLEDGE BASE****Tver State Technical University**

The software package that enhances CAD process automation systems of automatic increase knowledge of CAD and its application to design circuit decisions has been considered.

*Keywords:* CAD knowledge warehouse, intelligent CAD, schemes generalization.

На современном этапе развития база знаний (БЗ) в САПР аккумулирует информацию о классах технических решений и причинно-следственных связях между отдельными видами проектных ситуаций и методами их преобразования. Обычно БЗ создается в ходе разработки системы проектирования, и вопросы ее коррекции решаются только с помощью экспертов или лица, принимающего решения. Этот традиционный подход к интеллектуализации САПР, получивший развитие в виде экспертных подсистем или подсистем поддержки принятия решений, полностью оправдан в рамках интерактивных стратегий формирования проектных решений. Однако в современных САПР схем систем автоматизации значительно расширилась область решений, генерируемых без корректирующих действий инженера – проектировщика [1, 2]. Создание генераторов проектных решений ведет к перераспределению функций между инженером и информационно-программными компонентами САПР, а также позволяет расширить понятие «проектный опыт».

Опыт инженера проектировщика всегда связан с формированием и оценкой множества технических решений (ТР). Но расширение САПР генераторами ТР означает, что система приобретает возможность формирования архива собственных решений. Дополнив эти процедуры средствами анализа и автоматического обобщения решений, можно получить имитацию механизма формирования собственного опыта системы проектирования. Учитывая тесную взаимосвязь моделей представления зна-

ний и алгоритмов их использования с предметной ориентацией САПР, рассмотрим реализацию изложенных выше концептуальных утверждений на примере системы проектирования схем систем промышленной автоматики [3].

В состав САПР «Controlics» (рис. 1) включены специальные генераторы функциональных (SF) или принципиальных электрических (SP) схем автоматизации (систем контроля, сигнализации и управления технологическими параметрами). Множество схмотехнических решений создается для заданного варианта структурной схемы системы (СС\*) и слабых ограничений ( $G^*$ ), определяющих общие требования к вариантам ее технической реализации SF.

Схемы из множества SF, реализованные на одной модели регулятора, могут различаться незначительно, в частности:

$$\text{если } (\exists j) e_j \in sf_i, e_j \notin (SF \setminus sf_i), \text{ то } sf_i \in SF,$$

где  $E = \{e_i\}$  – множество технических средств автоматики (ТСА).

Учитывая этот факт, алгоритм генерации функциональных схем основан на последовательном формировании допустимого множества цепей (Z), из которых далее создаются так называемые шаблоны (Sh), а затем искомое множество функциональных схем (SF).

Для компактного представления сгенерированного множества цепей (Z) используется специальная структура – дерево схмотехнических решений (ДСР). ДСР – связанный ациклический неориентированный граф  $DSR=(E,U)$ ,

объединяющий варианты цепей функциональных схем, которые предназначены для исполь-

зования с одной моделью регулятора. В совокупности  $\cup ДСР_i = Z$ .

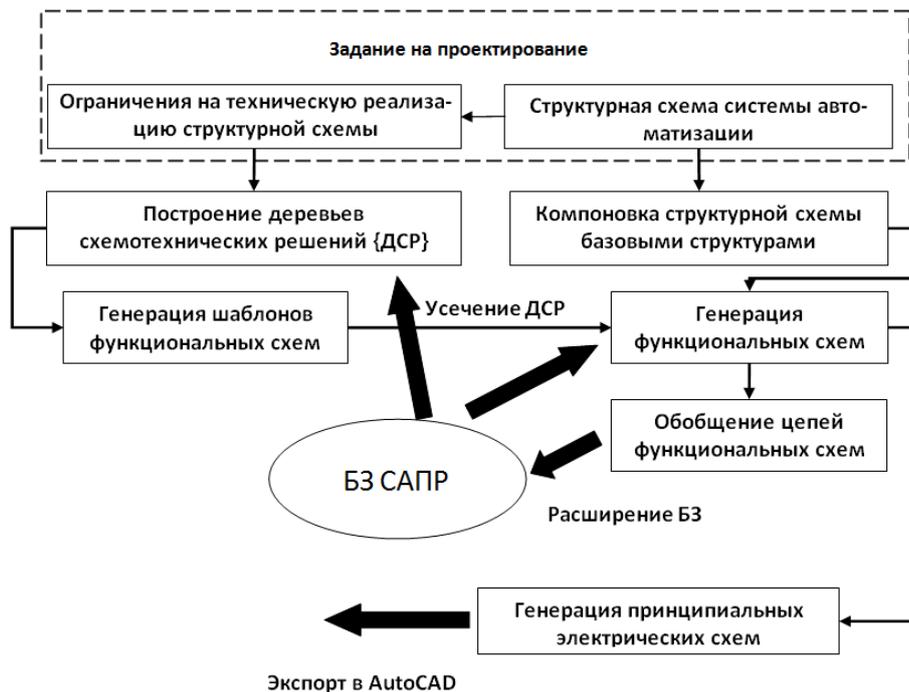


Рис. 1. Проектирование схем автоматизации в САПР Controlics

Особенности этого алгоритма, изложенные в работах [1, 2, 3], приводят к последовательному формированию схмотехнических решений, которые можно рассматривать как некоторые подмножества объемов понятий, заданных фрагментами или полной структурной схемой системы ( $CC^*$ ):

$$(CC^* \cup G^*) \rightarrow \{ДСР_t\},$$

$$(\exists t) ДСР_t \rightarrow Sh^* \rightarrow SF_t, \quad SF = \bigcup_t SF_t. \quad (1)$$

Стратегия вида (1) реализуется с помощью двух видов эвристических правил, которые определяют начальное содержание БЗ САПР «Controlics»:

- правила формирования связи между двумя блоками ТСА;
- правила генерации функциональных схем.

Проектирование схем автоматизации с использованием генераторов приводит к быстрому расширению архива проектных решений [4]. Структура этого архива неявно определена методикой (1). Действительно, получаются множество цепей  $\{ДСР_t\}$ , множество шаблонов  $Sh^*$  и множество функциональных схем  $SF_t$ . Очевидно, что если для характеристики каждого множества использовать некоторые наборы при-

знаков, каждому такому множеству можно поставить в соответствие некоторую логическую функцию, которая будет использоваться как форма представления понятия о соответствующем классе объектов. Задача формирования понятий о множествах схмотехнических решений относится к общей проблеме обобщения результатов проектирования, которая рассматривается в разных постановках в зависимости от предметной области САПР [3, 5, 6, 7].

#### Обобщение схмотехнических решений

Использование понятий о классах близких объектов ( $\{ДСР_t\} Sh^* SF_t$ ) позволяет унифицировать процедуры поиска технических аналогов схем, а также приводит к расширению БЗ САПР новыми правилами. В работах [3, 4] рассмотрена задача формирования обобщений на множестве схмотехнических решений (СТР). В зависимости от вида элементов множества СТР представлены алгоритмы формирования обобщенных описаний классов функциональных схем и отдельных типов цепей (измерительных, исполнительных и т. д.). Учитывая, что создаваемые обобщения должны использоваться для коррекции и расширения имеющегося набора правил БЗ САПР, при их формирова-

нии используются не только объективные данные (выборка функциональных схем, заданная описаниями в пространстве дискретных признаков), но и субъективные оценки эксперта. При этом специалиста не знакомят с системой признаков  $K$ , и для оценки функциональной схемы он использует лингвистическую переменную  $dэ$ : «целесообразность использования функциональной схемы (ФС)». Множество значений  $dэ$  задано тремя термами:  $T_1$ : «Большая» (целесообразность использования ФС) или краткая форма  $T_1$ : «Эффективная ФС»);  $T_2$ : «Малая» (ц...) или краткая форма  $T_2$ : «Неэффективная ФС»);  $T_3$ : «Средняя» (ц...) или краткая форма  $T_3$ : «Возможно эффективная ФС»). Необходимо отметить, что эксперт выделяет в обучающей выборке только множества  $T_1$  и  $T_2$ , а множество  $T_3$  формируется автоматически.

В процессе работы алгоритма обобщения для всех трех типов множеств создаются логические функции, определяющие общие свойства схем этого класса (например,  $PON1$  – понятие об эффективных ФС вида  $j$ -го, а  $T_1$  – объем этого понятия). Таким образом, знания о ре-

зультатах проектирования будут представляться понятиями трех типов. Введение такого сильного ограничения приводит к возникновению непустых классов эквивалентности на множестве схем. Очевидно, что две разные функциональные схемы, имеющие одинаковое описание в пространстве признаков  $K$ , входят в один класс эквивалентности и являются объектами из объема одного и того же конъюнктивного понятия  $Op_j$ . Учитывая, что в каждом множестве  $T_j$  может существовать несколько классов эквивалентности, получим:

$$Op_j = (\text{int } K_1^j \wedge \text{int } K_2^j \wedge \dots \wedge \text{int } K_Q^j)$$

и 
$$PON1 = \bigvee_{j=1}^M Op_j.$$

Таким образом, в качестве объема понятия  $PON1$  можно рассматривать не описания отдельных ФС, а описания соответствующих классов эквивалентности. Распространение этого подхода на  $PON2$  и  $PON3$  позволяет создавать иерархическую сетевую структуру [4], представляющую декларативные знания о результатах проектирования (рис. 2).

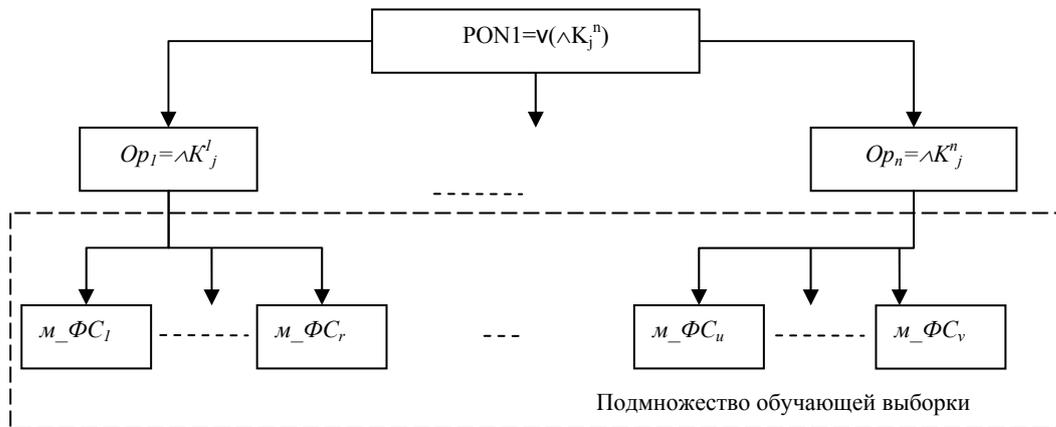


Рис. 2. Иерархия понятий о классах эффективных функциональных схем

В результате работы алгоритма формирования обобщений о некотором множестве цепей создаются автоматически генерируемые правила (АГП) вида:

$$P_v = \langle u, Q, F_v \rightarrow d_k(K, d_s) \rangle, F_v = \bigcup_{i=1}^M \bigcup_{j=1}^{N_i} e_{ij} \quad (1)$$

где  $u$  – индекс (имя) правила;  $F_v$  – упорядоченный перечень элементов, определяющих структуру и состав цепей  $Z$ ;  $i$  – номер цепи;  $M$  – число измерительных и исполнительных цепей в  $F_v$ ;  $N_i$  – длина (количество элементов)  $i$ -й це-

пи;  $j$  – номер элемента  $i$ -й цепи;  $e_{ij}$  – идентификаторы  $j$ -го элемента  $i$ -й цепи.

В правой части правил используется вычисляемый признак эффективности  $d_k$ , который вводится для согласования принятия решений при расхождении оценок эффективности эксперта ( $d_s$ ) и системы ( $d_{sc}$ );  $d_s$  – экспертная оценка эффективности схемы {1, если эксперт считает схему перспективной; 0 – нет};  $d_k = \{1, (\text{если } d_s=1 \text{ и } d_{sc}=1); 0 (\text{если } d_s=0 \text{ или если между } d_s \text{ и оценкой } d_{sc} \text{ есть противоречие})\}$ .

Выделение наиболее ( $Z^+$ ) и наименее ( $Z^-$ ) перспективных цепей и их регистрация в БЗ

в виде правил позволяет, с одной стороны, создавать средства для ускорения генерации ФС, но, с другой стороны, это может привести к быстрому росту в БЗ числа правил с пересекающимися условиями применений. Пересечения условий правил (U) возникают:

- если в БЗ существует множество правил  $\{U\}$  с одинаковым значением  $d_k$ ;
- в  $F_v$  для каждого из них имеется описание цепей, подобных с точностью до истока (стока), число элементов в цепи не менее двух;
- все истоки (стоки) цепей в  $F_v$  входят в одну ветвь W таксономии ТСА и имеют общую родительскую вершину;
- в ветвь W не входят никакие другие ТСА.

К правилам (U) можно применить операцию агрегирования, если в качестве истока цепей принять «все элементы ветви W», а все оставшиеся в цепи ТСА элементы объединить под одним идентификатором. Эта операция, являющаяся обобщением правил БЗ, позволяет в автоматическом режиме выявить определенные закономерности – «скрытые» устойчивые неформальные правила генерации цепей функциональных схем, не отраженные в БД ТСА в явном виде. Например, в БЗ присутствуют N положительных правил ( $d_k=1$ ), включающих в качестве посылок описание измерительных цепей одноконтурных схем регулирования параметра U1. Число элементов в каждой такой цепи  $M=3$ :

$P1: F_v = \langle e1 \rightarrow eV \rightarrow eW \rangle; P2: F_v = \langle e2 \rightarrow eV \rightarrow eW \rangle;$   
 $\dots PN: F_v = \langle eN \rightarrow eV \rightarrow eW \rangle.$

Элементы – истоки цепей  $e1 - eN$  входят в одну ветвь таксономии W1, другие элементов в W1 нет. В каждой цепи присутствует сочетание  $eV \rightarrow eW$ . Алгоритм обобщения правил выполнит процедуру агрегирования и сформирует новое (замещающее) правило:

$PN+1: F_v = \langle \text{любой из } W1 \rightarrow [\text{Sochet1}] \rangle,$   
 $d_k=1, \text{ Sochet1} = \langle eV \rightarrow eW \rangle$

То есть реализуется неполная индукция: на основании  $e1 - eN$ , являющихся частью содержимого W1, делается вывод о распространении правила PN+1 на все элементы из W1.

Особенностями предложенного способа обобщения правил генерации цепей ФС являются:

- сокращение числа правил в БЗ без потери информации;
- отсутствие в описаниях истоков и стоков цепей идентификаторов конкретных ТСА об-

легчает задачу усечения ДСР. Нет необходимости определять эквивалентность элементов, так как достаточно сравнить отраженные в правилах функции преобразования с характеристиками ТСА;

- одно правило может отражать не одну, а множество цепей, так как содержащимся в правилах ограничениям на истоки (стоки) цепей может удовлетворять не одно ТСА, а несколько;
- сложность выделения правил, являющихся предметом обобщения, при большом объеме БЗ;
- необходимость при каждом вводе в БД нового элемента проверять, не противоречит ли его описание правилам, сформированным в БЗ для ветви таксономии, включающей этот элемент.

#### Применение автоматически расширяющейся БЗ в САПР Controlics

В САПР Controlics принята стратегия, в соответствии с которой в БЗ сохраняется не только информация об условиях создания эффективных вариантов схемотехнических решений, но и сведения о неудачных схемах.

Рассмотрим особенности методик применения положительных и отрицательных правил для генерации новых вариантов ФС.

1. *Использование положительных правил* ( $P_u = \langle u, Q, F_v \rightarrow d_k(K, d_s) \rangle, d_k=1$ ).

Методика основана на реализации механизма обратного вывода, то есть вывода от цели (нахождения перспективных вариантов цепей) к данным (описанию этих вариантов). Находятся подходящие посылки правил, подтверждающие гипотезу «перспективная цепь,  $d_k=1$ ». Вариантами цепей функциональной схемы являются описания  $F_v$  посылок правил, заключение которых согласуется с данной гипотезой. Регулятор выбирается из числа аналогов Q.

Главное достоинство этой методики состоит в отсутствии необходимости построения и анализа деревьев схемотехнических решений, т. е. выполнения перебора множества ТСА.

К недостаткам методики относятся:

- зависимость правил от содержания БД по элементам ТСА; при вводе нового элемента необходима ревизия БЗ (или коррекция БЗ с новой обучающей выборкой);
- зависимость результата от объема БЗ.

2. *Использование отрицательных правил* ( $P_u = \langle u, Q, F_v \rightarrow d_k(K, d_s) \rangle, d_k=0$ ).

Методика основана на реализации механизма прямого вывода. Если какая-либо связь элементов ТСА согласуется с посылками более

одного отрицательного правила (т. е. отклоняется несколькими правилами), то в соответствии с отрицательными заключениями этих правил отражающее данную связь ребро можно не включать в ДСР. Это приведет к сокращению числа ветвей дерева, а следовательно, и к сокращению количества анализируемых шаблонов путем автоматического исключения наименее перспективных вариантов.

Достоинства методики являются:

- возможность усечения ДСР в процессе его построения;

- автоматическое выделение и исключение наименее перспективных функциональных схем еще до их непосредственной генерации.

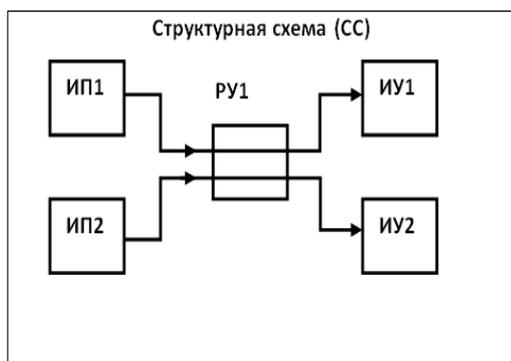
Главный недостаток методики видится в том, что из ДСР не исключаются ветви, оценка перспективности которых не дана. В результате

этого на основе анализа полученного ДСР могут быть сформированы схемы, которые по своим характеристикам в дальнейшем также будут признаны неэффективными.

Controlics обеспечивает автоматическую генерацию вариантов технической реализации схем автоматизации в виде множества альтернатив функциональных схем. При достаточно полной БД ТСА это множество может иметь достаточно большую мощность.

Например, на рис. 3, а задана структурная схема двухконтурной системы автоматизации. Ограничения на техническую реализацию ее блоков приведены на рис. 3, б.

С помощью «Controlics» генерируется множество технических реализаций данной схемы, в том числе с применением положительных и отрицательных АГП (см. таблицу).



а

Элемент СС	Область поиска в БД ТСА	
	Все	Ограниченное множество
ИП1,ИП2	Датчики t	-
РУ	Микропроц. регуляторы	-
ИУ1	Устр-ва свет. сигн.	-
ИУ2	МЭО	-

б

Рис. 3. Структурная схема системы автоматизации (а); ограничения на техническую реализацию блоков структурной схемы (б)

**Характеристики результатов генерации**

Характеристика	Без использования АГП	С применением отрицательных АГП	С применением положительных АГП
Число вершин ДСР	42	20	-
Число шаблонов	72	15	-
Число функциональных схем	324	36	4
Процент исключенных схем	-	$(324-36) / 324 * 100\% = 89\%$	$(324-4) / 324 * 100\% = 98\%$

Автоматическое расширение БЗ САПР требует постоянной согласованности производственных правил и содержания БД ТСА. В САПР «Controlics» предусмотрены средства ревизии информационного обеспечения. Основными из них являются алгоритм коррекции таксономии ТСА и правил генерации ФС.

Существует возможность включать в описания продукции наименования ветвей таксо-

номии ТСА вместо описаний элементов ТСА. При этом правило справедливо для всех элементов, входящих в указанную ветвь. Если для вновь добавленного в БД элемента в некоторых правилах возникают противоречия, то этот факт отмечается в дополнительном атрибуте. Множество элементов таксономии, удовлетворяющих правилам, обозначим как {Pos}, а – неудовлетворяющих правилам как {Neg}. Если

мощность  $Neg$  превысит  $Pos$ , то целесообразно решить вопрос о выделении всех элементов из  $\{Neg\}$  в отдельную ветвь.

Для проектирования современных решений систем автоматизации таксономия ТСА постоянно должна поддерживаться в актуальном состоянии. В частности, набор управляющих устройств (регуляторов, ПЛК и др.) постоянно расширяется и совершенствуется. Необходима периодическая ревизия БЗ САПР, в ходе которой для каждого отраженного в БЗ управляющего устройства  $Ru$  проводится поиск более новых модификаций  $\{iRu\}$ , расположенных с ним в одной ветви таксономии. Если такие элементы найдены, то в автоматическом режиме рассчитываются критерии  $K$  для функциональных схем, построенных на  $Ru$  и каждом элементе из  $\{iRu\}$ . Используются соотношения, по которым ФС принимается лучшей или худшей по критериям  $K$  по сравнению с другими схемами.

Реализованные механизмы ревизии БЗ заключаются в применении стратегий замещения одних правил другими, автоматически сгенерированными на основе содержимого базы данных ТСА.

Предложенный вариант программного комплекса расширяет возможности САПР систем автоматизации технологических процессов на этапах проектирования, предшествующих разработке принципиальных электрических схем.

УДК 681.3.069

*Т. В. Хоменко*

### МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ПРОСТРАНСТВА ЗНАНИЙ МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Астраханский государственный технический университет  
t\_v\_khomenko@mail.ru

Методы проектирования технических систем отличаются формально-языковым представлением, что вызывает определенные трудности при их контент-анализе, направленного на выявление наличия и эффективности процесса выбора в методах проектирования.

В статье приводится методика построения пространства знаний с топологической структурой методов проектирования, которая позволила выявить основы смыслового единства различных методов проектирования для их дальнейшего исследования.

*Ключевые слова:* методы концептуального проектирования технических систем, пространство знаний, операциональные определения, операциональный аппарат топологии, трансформация контента, топологическое пространство, топология, база топологии, клеточный комплекс.

*T. V. Khomenko*

### METHODOLOGY OF CONSTRUCTION OF SPACE OF KNOWLEDGE OF METHODS OF PLANNING OF TECHNICAL SYSTEMS

Astrakhan State Technical University

Methods of designing technical systems differ, formal linguistic representation, which causes some difficulties in their content analysis aimed at identifying the presence and effectiveness of the selection process in the design methods.

In article is given the technique of creation of space of knowledge of methods of design with topological structure, which allowed to reveal bases of semantic unity of various methods of design for their further research.

*Keywords:* methods of conceptual design of technical systems, knowledge space, operational definitions, operational apparatus topology, content transformation, a topological space, topology, base topology, cellular complex.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Филатова, Н. Н.* Структурный синтез схем автоматизации в условиях неполных требований к технической реализации / Н. Н. Филатова, А. Г. Требухин // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 4(91) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – Вып. 13. – С. 72–79.
2. *Филатова, Н. Н.* Генерация решающих правил для проектирования функциональных схем систем автоматизации / Н. Н. Филатова, А. Г. Требухин // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2012. – Т. 136. – № 11. – С. 206–211.
3. *Филатова, Н. Н.* Автоматическое построение и обобщение схемных решений при проектировании систем управления / Н. Н. Филатова, А. Г. Требухин // Программные продукты и системы. – 2012. – № 1(97). – С. 138–141.
4. *Ханеев, Д. М.* Пирамидальная сеть для классификации объектов, представленных нечеткими признаками / Д. М. Ханеев, Н. Н. Филатова // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2012. – Т. 134. – № 9. – С. 45–49.
5. *Вагин, В. Н.* Обобщение и классификация знаний / В. Н. Вагин, Н. П. Викторова // Искусственный интеллект. Кн. 2. Модели и методы : Справочник / под ред. Д. А. Поспелова. – М. : Радио и связь, 1992. – С. 82–89.
6. *Панфилов, А. Э.* Методика формального описания объектов технологического процесса для автоматизированной системы конструирования АСУТП / А. Э. Панфилов, В. А. Камаев // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 9(35) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – Вып. 3. – С. 94–97.
7. *Шевченко, С. В.* Применение нечетких продукционных правил и нейронных сетей для прогнозирования потребления электроэнергии в регионе / С. В. Шевченко, В. А. Камаев, Р. И. Манева // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 10(97) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – Вып. 14. – С. 108–112.

### Ведение

В современной научно-технической литературе приведены материалы, свидетельствующие о многообразии методов концептуального проектирования технических систем [1, 2]. В основном, данные методы, ставшие классическими, ориентированы на конструирование процесса выработки множества альтернативных вариантов, поэтому при выборе решений из полученного множества возникают определенные трудности.

Сложившаяся ситуация касается и методов, теоретические аспекты которых легли в основу систем, позволяющих автоматизировать процессы обработки информации и поиска решений [3]. Работа таких систем основана на использовании базы знаний, содержащей описание не менее двухсот физических эффектов, каждый из которых представлен моделью с элементами: входной/выходной величины и коэффициента преобразований. Простейшая модель технического решения представляется в виде последовательной параметрической структурной схемы. Увеличение количества эффектов, участвующих в синтезе решений, экспоненциально увеличивает количество альтернативных вариантов. Выбор решений проводится на основе эксплуатационных характеристик, фиксированный набор которых не обоснован, в предположении независимости характеристик, что соответствует субъективизму, но не действительности. В таких условиях может быть выбрано не лучшее техническое решение.

Тем не менее, методы данной группы являются наиболее перспективными, в связи со стремительным развитием нового научного направления «Computer-Aided Innovation» (CAI – автоматизации инновационных процессов) [4], поэтому должны обладать поддержкой принятия решений в полном объеме.

### Постановка задачи

Расширение базы знаний данных методов возможно за счет импортирования знаний о выборе решений из других методов концептуального проектирования.

Однако методы проектирования, обладая различной теоретической платформой и отличаясь формально-языковым представлением, затрудняют анализ контента. Необходима систематизация знаний, позволяющая выделить основы смыслового единства методов проектирования и разрешающая выполнять контент-

анализ методов проектирования для определения наличия и эффективности процесса выбора.

### Методы и результаты исследования

Для систематизации знаний и построения пространства знаний с топологической структурой методов проектирования технических систем предлагается методика, использующая аппарат общей топологии [5].

*Этап 1.*  $InfMP \xrightarrow{OO} \Pi$  – трансформация знаний методов проектирования в пространство знаний  $\Pi$  посредством предложенных операциональных определений.

Анализируя контент методов проектирования, рассмотрим предложения как множество представлений  $G$ , слова в предложении как множество понятий  $A$ .

**О п р е д е л е н и е.** Семантическим предикатом  $p \in P$  называется предложение текста  $g \in G$ , преобразованное путем замены его слова  $a \in A$ , обозначающего понятие, на переменную, значение которого, при подстановке  $\pi$  ( $\pi: P \times A \rightarrow G$ ) понятия  $A$  вместо переменной  $X$  и получении конкретного предложения  $G$ , семантически истинное, если совпадает с некоторым элементом множества представлений и семантически ложное, в противном случае, причем:  $\forall g \in G \exists p \in P \exists a \in A: \pi(p, a) = g$ .

Последовательная замена значимых слов в каждом представлении из  $G$  на переменную  $X$  при построении множества семантических предикатов  $P$ , позволяет сформировать конечное множество  $M$ , элементы которого обозначают основные понятия методов проектирования.

**О п р е д е л е н и е.** Элементами конечного множества  $M$  назовем основные понятия методов проектирования.

Введем дискретную метрику  $\rho$  на  $M$ :

$$\rho(a, b) = \begin{cases} 0, & \text{если } a = b \\ 1, & \text{если } a \neq b \end{cases}$$

которая рассматривается в контексте семантической метрики [6]  $\rho :=$  «семантически близкие» и характеризует силу тематической ассоциативной связи между анализируемыми понятиями, причем значение  $\rho(a, b) = 0$  только для таких слов  $a$  и  $b$ , что в предложении может использоваться любое из них,  $\rho(a, b) = 1$  для слов, которые не могут встречаться в одном контексте.

**О п р е д е л е н и е.** Функция  $\rho: M \times M \rightarrow \{0, 1\}$  называется метрикой, так как обладает свойст-

вами, характерными для расстояний в метрических пространствах:

Аксиома 1.  $\rho(a, b) = 0 \Leftrightarrow a = b$  – аксиома тождества.

Аксиома 2.  $\rho(a, b) = \rho(b, a)$  – аксиома симметрии.

Аксиома 3.  $\rho(a, c) \leq \rho(a, b) + \rho(b, c)$  – аксиома треугольника.

Из аксиом следует неотрицательность функции расстояния, поскольку

$$0 = \rho(a, a) \leq \rho(a, b) + \rho(a, b) = 2 \cdot \rho(a, b)$$

Если неравенство треугольника представить в виде:

$$\rho(a, b) \leq \rho(a, c) + \rho(b, c), \quad \forall a, b, c,$$

тогда из аксиомы тождества и неравенства треугольника следует аксиома симметрии.

Построив множество  $Z_a = \{p \mid p(a) \in G\}$  таких предикатов  $p \in P$ , в которые подстановка  $\pi$  для каждого понятия  $a \in A$  дает семантически истинное значение, получим разбиение  $\sigma: (l = \overline{1, L})$  множества  $M$  элементов на  $L$  классов знаний [6].

Определение. Классом знаний  $K'$ : «базисных объектов» называется минимальная система образующих исходных понятий;  $K''$ : «объектов-действий» называется система модификаций исходных понятий, полученных под воздействием «базисных операций» и связанных общим содержанием;  $K'''$ : «объектов-конструктов» называется система обобщенных понятий, формирование которых требует многовариантного формирования исходных понятий на основе «фактологических моделей» предметных спецификаций;  $\Lambda$ : «базисных операций» называется минимальная система необходимых действий над исходными понятиями.

Определение. Пространством знаний  $\Pi$  методов проектирования технических систем называется совокупность классов знаний разбиения  $\sigma$ , удовлетворяющих условию  $\sigma(l) \cap \sigma(l') = \emptyset$  при  $l \neq l'$ , где  $\sigma(l) \subseteq Mt$  – подмножество элементов множества  $Mt$ , принадлежащих классу знаний  $l$ .

Определение. Точкой пространства знаний называется вариант определенной комбинации представителей классов  $\sigma(l)$ ,  $l = \overline{1, L}$ ,  $x = \{x_1, \dots, x_L\}$ , где  $x_l \in \sigma(l)$ , окрестность точки – подмножество семантически близких вариантов.

Этап 2. Применение операционального аппарата топологии как оператора перевода основ смыслового единства различных методов проектирования технических систем в пространство знаний с топологической структурой:  $\Pi \xrightarrow{OT} T(\Pi^\Phi, \tau_{\Pi^\Phi})$ .

Для дальнейшего исследования структуры полученного пространства знаний формулируются следующие понятия.

Определение. Пусть  $\Pi^\Phi$  – совокупность фактор-множеств классов  $\sigma(l)$  пространства знаний  $\Pi$ :  $K', K'', K''', \Lambda$ ;  $\tau_{\Pi^\Phi} = \{U\}$  – совокупность его подмножеств, каждое из которых является открытым и обладает свойствами: 1)  $\emptyset, \Pi^\Phi \in \tau_{\Pi^\Phi}$ ; 2) объединение любой совокупности множеств из  $\tau_{\Pi^\Phi}$  принадлежит  $\tau_{\Pi^\Phi}$ ; 3) пересечение любого конечного числа множеств из  $\tau_{\Pi^\Phi}$  принадлежит  $\tau_{\Pi^\Phi}$ , тогда совокупность подмножеств  $\tau_{\Pi^\Phi}$  назовем топологией на  $\Pi^\Phi$ .

Определение. Множество  $\Pi^\Phi$  с заданной на нем топологией  $\tau_{\Pi^\Phi}$  назовем топологическим пространством  $T(\Pi^\Phi, \tau_{\Pi^\Phi})$  знаний методов проектирования технических систем.

Очевидно, что для всякого понятия метода проектирования технических систем существуют открытые множества из  $B_{\Pi^\Phi} \in \tau_{\Pi^\Phi}$ , такие, что выполняется условие:  $x \in B_{\Pi^\Phi}$  и  $B_{\Pi^\Phi} \subset U$ . К таким множествам относятся множество  $K'$  – базисных объектов и  $\Lambda$  – базисных операций.

Определение. Совокупность  $B_{\Pi^\Phi} = \{B_{\Pi^\Phi}\}$  открытых множеств топологического пространства  $T(\Pi^\Phi, \tau_{\Pi^\Phi})$  знаний методов проектирования технических систем называется базой топологии  $\tau_{\Pi^\Phi}$ .

Рассматривая знания методов проектирования как пространство с топологической структурой, нельзя не заметить «расслоения» базы топологии  $\tau_{\Pi^\Phi} = \{U\}$ , раскрывая семантику которой выделяются три степени абстрагирования формально-языковых представлений знаний: абстрактный уровень (относятся методы

проектирования, которые направлены на общее представление систем знаний); объектный уровень (относятся методы, обеспечивающие представление специфики систем знаний предметных областей); конкретный уровень абстрагирования, (относятся методы, описывающие множество конкретных фактов, событий в процессе решения прикладных задач). Таким образом, методы проектирования делятся «по вертикали» на три уровня абстрагирования  $\Omega^B \subset \Pi^\Phi$ .

*Этап 3.* Исследование подпространств пространства знаний  $\Pi^\Phi$ .

**Определение.** Пространство  $\Omega^B \subset \Pi^\Phi$  пространства знаний методов проектирования называется топологическим пространством  $T(\Omega^B, \tau_{\Omega^B})$ , с системой открытых подмножеств множества  $\Pi^\Phi$ , базой  $Bz_{\Omega^B} = \{B_{\Omega^B}\} \subset Bz_{\Pi^\Phi}$  и топологией на:  $\tau_{\Omega^B} = \{V : V = U \cap \Omega^B, U \in \tau_{\Pi^\Phi}\}$ , индуцированной из  $\Pi^\Phi$ .

Выделим  $j$ -й уровень абстрагирования ( $j = \overline{1;3}$ )  $j\Omega \subset \Omega^B$ , подпространства  $\Omega^B$ , где  $\Omega^B = \bigcup_{j=1}^3 j\Omega$ . Используя отображение  $i : \Omega^\Gamma \rightarrow \Omega^B$ , удовлетворяющее условиям вложения топологического пространства  $\Omega^\Gamma$  в  $\Omega^B$ , пространство  $\Omega^\Gamma$  «выделяется» для его исследования.

**Определение.** Пространство  $\Omega^\Gamma := j\Omega \subset \Omega^B$  пространства знаний  $\Pi^\Phi$  методов проектирования называется топологическим пространством  $T(\Omega^\Gamma, \tau_{\Omega^\Gamma})$ , с системой открытых подмножеств множества  $\Omega^\Gamma$  и топологией на:  $\tau_{\Omega^\Gamma} = \{W : W = V \cap \Omega^\Gamma, V \in \tau_{\Omega^B}\}$ , индуцированной из  $\Omega^B$ .

Определения 6–7 создают третий этап методики: «Исследование подпространств пространства знаний  $\Pi^\Phi$ ».

Представим решение задач системного анализа в методах проектирования, безотносительно к интерпретации предметной области в виде последовательности состояний  $z_i \in Z$ : решение задачи анализа/синтеза – состояние  $z_{2i-1}$ , переход к следующей задаче – состояние  $z_{2i}$ , в предположении, что система  $S_i$  сформирована (задача  $S_i$  решена) и перешла в состояние передачи информации  $z_{2i-1} \xrightarrow{z_{2i}} z_{2i+1}$ .

Поскольку связь двух топологических пространств сохраняется посредством естественного отображения  $\Omega^\Gamma$  в  $\Omega^B$ , при этом каждому элементу из  $\Omega^\Gamma$  сопоставляется тот же элемент из  $\Omega^B$ , то пространство  $T(\Omega^\Gamma, \tau_{\Omega^\Gamma})$  знаний методов проектирования технических систем  $j$ -го уровня абстрагирования («по горизонтали»), с учетом решения основных задач системного анализа, формулируются в терминах топологии  $T(\Omega^B, \tau_{\Omega^B})$  («по вертикали») обобщенных объектов, их обобщенных взаимосвязей, на трех уровнях абстракции:  $\Omega^\Gamma := j\Omega = \bigcup_{i=1}^3 \Omega_i$  ( $i = \overline{1,3}$ ): абстрактный уровень (задачи системного анализа методов проектирования, которые направлены на общее представление систем знаний); объектный уровень (задачи системного анализа методов проектирования, обеспечивающие представление специфики систем знаний предметных областей); конкретный уровень абстракции (задачи системного анализа методов проектирования, описывающие множество конкретных фактов, событий в процессе решения прикладных задач). Такая классификация позволяет рассматривать цикличность структуры пространства знаний при дедуктивном методе его построения.

*Этап 4.* Неформальное представление топологического пространства псевдоклеточным комплексом  $T_G(\Pi^\Phi, \tau_{\Pi^\Phi})$ .

Рассмотрим топологические пространства  $T(\Omega^B, \tau_{\Omega^B})$  и  $T(\Omega^\Gamma, \tau_{\Omega^\Gamma})$ , каждое из которых содержит топологию, построенную на классах разбиений таких, что  $\sigma^B(l) \cup \sigma^\Gamma(l) = \sigma(l)$  на  $i = \overline{1,3}$  и  $j = \overline{1;3}$ . Заметим, что каждое  $\sigma^B(l)$ ,  $\sigma^\Gamma(l)$  при  $l = \overline{1,4}$  образуют многоугольник  $KK'K''\Lambda$ . Назовем  $K, K', K'', \Lambda$  эквивалентными в своей принадлежности к  $\sigma^B(l)$  или  $\sigma^\Gamma(l)$  методов проектирования.

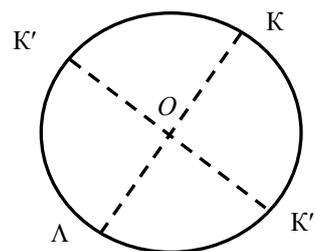


Рис. 1. Образование фактор-множества

Прямоугольник  $KK'K''\Lambda$  гомеоморфен кругу с границей  $KK'K''\Lambda$ , и проективную плоскость можно описать иначе как круг (рис. 1), у которого склеены диаметрально противоположные точки его границы  $^*\sigma_\alpha$ .

Выполнив «подходящую» склейку, получим новое множество  $^*M = \bigcup_\alpha ^*\sigma_\alpha$ , неформально

представляя топологическое пространство  $T(\Pi^\Phi, \tau_{\Pi^\Phi})$  знаний методов проектирования технических систем псевдоклеточным комплексом  $T_G(\Pi^\Phi, \tau_{\Pi^\Phi})$  с объединением непересекающихся множеств  $\Omega^B$  и  $\Omega^\Gamma$ , называемых клетками (рис. 2).

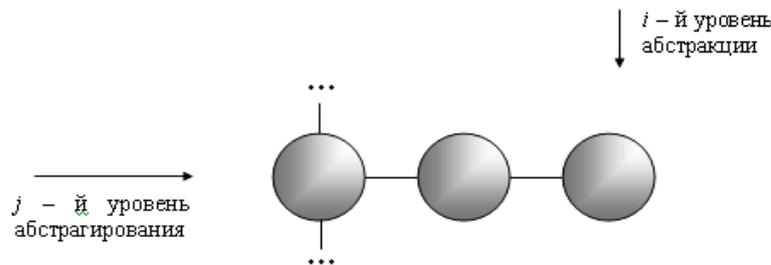


Рис. 2. Псевдоклеточный комплекс пространства знаний методов проектирования

Трансформация контента методов проектирования

$$\Pi \xrightarrow{\text{ОГ}} T(\Pi^\Phi, \tau_{\Pi^\Phi}) \xrightarrow{\text{ОГ}} T_G(\Pi^\Phi, \tau_{\Pi^\Phi})$$

позволила выявить неизменяющиеся свойства полученного объекта: принадлежность методов проектирования к одному из трех уровней абстрагирования; принадлежность задачи системного анализа в методах проектирования к одному из трех уровней абстракции; отождествление клетки  $^j\Omega_i$  с  $i$ -й задачей, решаемой  $j$ -м методом проектирования.

### Заключение

Предложенная методика систематизации знаний методов проектирования позволила классифицировать их одновременно по принадлежности метода проектирования к одному из уровней абстрагирования и раскрыть для каждого уровня абстрагирования, последовательность отображений основных задач на трех уровнях абстракции, инвариантных к синтаксической форме их реализаций. Графовое представление систематизации знаний в виде псевдоклеточного комплекса является основой для определения класса решаемых задач. В частности, формирование критерия и выбор решений в методах проектирования определяются как задачи  $^j\Omega_3$  ( $i=3$ ) [7], направленные на при-

менение множества конкретных фактов, в процессе решения прикладных задач.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Камаев, В. А. Моделирование физических принципов действия и формирование множеств технических решений преобразователей энергии / В. А. Камаев, А. А. Яковлев // Информационные технологии. – 2006. – № 1. – С. 2–8.
2. Хоменко, Т. В. Системные подходы к анализу измерительных устройств / Т. В. Хоменко // Вестник Астраханского государственного технического университета, Астрахань. Серия : Управление, вычислительная техника и информатика. – 2009. – № 1. – С. 88–93.
3. Хоменко, Т. В. Системоанализ автоматизированных систем поискового конструирования: концепция развития / Т. В. Хоменко // Прикаспийский журнал: Управление и высокие технологии. Астраханский государственный университет, Астрахань. Серия : Управление в технических системах. – 2012. – № 3. – С. 76–83.
4. Зарипова, В. М. Классификация автоматизированных систем поддержки инновационных процессов на предприятии (Computer-Aided Innovation CAI) / В. М. Зарипова, И. Ю. Петрова, Е. С. Цырульников // Прикаспийский журнал: Управление и высокие технологии. Астраханский государственный университет, Астрахань. Серия : Управление в технических системах. – 2012. – № 1. – С. 26–35.
5. Mishchenko A., Fomenko A. A Course of Differential Geometry and Topology. – MIR.: Publishers. – 2000. – 302 p.
6. Козлов, В. Н. Интеллектуальные технологии и теория знаний / В. Н. Козлов. – СПб. : Изд-во Политехнического университета. – 2012. – 157 с.
7. Хоменко, Т. В. Формирование критерия оценивания решений при поисковом конструировании датчиковой аппаратуры / Т. В. Хоменко // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2012. Т. 15. № 15. С. 136–141.

## ПОСТРОЕНИЕ СЕТЕЙ И ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.94

*Ф. А. Х. Аль-Хадша, С. В. Гаевой, В. С. Лукьянов*

### АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ СЕТЕВОЙ СТРУКТУРЫ В СТАЦИОНАРНОМ И ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

Волгоградский государственный технический университет

alhadsha@mail.ru, gaevserge@mail.ru

В связи с массовым распространением распределенных вычислительных систем необходим анализ показателей надежности подобных сетевых структур. 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 двумя элементами. Одна из наших первичных целей – продемонстрировать соответствие аналитического решения представленному ранее имитационному.

*Ключевые слова:* сети, аналитическое моделирование, имитационное моделирование, показатели надежности.

*F. A. H. AL-hadsha, S. V. Gaevoy, V. S. Lukyanov*

### ESTIMATION OF RELIABILITY OF NETWORK SYSTEMS IN STATIONARY AND DYNAMIC CONDITIONS BY ANALYTIC MODELING

Volgograd State Technical University

Due to wide spread of the distributed computing systems the analysis of reliability indices of similar networks is necessary. In this paper we attempt to analyze system containing two nodes (source and destination) and a number of intermediate nodes. The system is assumed to be in operating state if there is a connection between source node and destination node. One of our primary targets is to show that analytic model complies with simulation.

*Keywords:* net, network, analytic modeling, simulation modeling, simulation, reliability indices.

#### Введение

Сформулируем проблему следующим образом. Нам 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. Положим, что линии могут передавать сигнал в обоих направлениях [4], [6], [8]. Также примем, что в начальный момент времени система полностью исправна. Затем происходят отказы, моменты времени которых подчиняются стационарному пуассоновскому (простейшему потоку отказов). Вероятно восстановление отказавших элементов [2], [3], [5].

Возможны два варианта анализа показателей надежности.

Во-первых, мы можем рассмотреть процесс отказа в динамическом режиме (то есть берется полностью исправная система и рассчитывается

вероятность того, что она осталась исправной как функция от времени). Динамический режим характеризуется также средним временем до отказа [11].

Во-вторых, можно вести анализ показателей надежности сетей в стационарном режиме. Эти показатели являются усредненными. Если система будет работать достаточно долгий период времени, то произойдет большое число отказов и восстановлений. Эти показатели отображают, как система работает в течение длительного периода времени. Они включают: коэффициент готовности (долю времени, которую система работает), среднее время рабочего состояния (еще его называют средним временем наработки на отказ), среднее время отказного состояния (оно же – среднее время восстановления) [12].

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ

##### 1. Подход к решению

Элементом системы назовем линии связи и все узлы, а экземпляр – конкретный блок,

который выполняет функции элемента (это может быть основной экземпляр или один из резервных). Таким образом, элемент функционирует, если функционирует хотя бы один его экземпляр.

Рассмотрим систему, изображенную на рис. 1. Пуассоновские потоки отказов возьмем такими: для элементов сети «Пр» и «Ус» – 0,1 отк/час, 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 часам. Стрелками указано направление прохождения сигнала [4]. Источник и приемник имеют однократное нагруженное резервирование.

Под *резервированием* мы будем подразумевать нагруженное резервирование (т. е. существуют два источника и два приемника, работающих параллельно, и при отказе одного может продолжать работать другой).

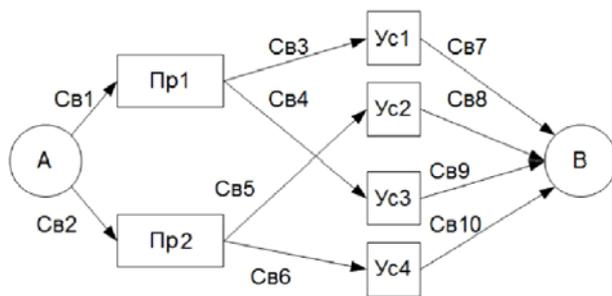


Рис. 1. Исследуемая сетевая система

Данная задача, в принципе, имеет аналитическое решение методом марковских цепей, однако в более ранних работах [11], [12] оно не приводилось ввиду ограниченной сферы применения.

## 2. Расчет стационарного режима

Каждый элемент может находиться в  $(R_i + 1)$  состоянии, где  $R_i$  – число экземпляров  $i$ -го элемента. Для расчета стационарного режима методом марковских цепей нам потребуется решить систему из  $\prod_{i=1}^N (R_i + 1)$  линейных уравнений, где  $N$  – число отказывающих элементов системы.

Решение теоретически возможно, но требует больших объемов памяти, которыми мы не располагаем. Предположим, что  $\forall i=1, N: R_i = 1$  и  $N = 15$ , тогда число уравнений равно  $2^{15} = 32768$ . Если для чисел использовать 32-бит-

ные вещественные числа, то хранение системы уравнений уйдет  $4 * 32768 * (32768 + 1) \approx 4Gb$ .

Такая задача не уместится в памяти ЭВМ, поэтому не будем использовать этот подход, ведь подобную задачу можно проще решить другим способом.

Элементы сети отказывают независимо (это предположение делается практически всегда), поэтому вероятность того, что сеть находится в некотором состоянии, есть произведение вероятностей того, что ее элементы находятся в не-

котором состоянии. Выбрав из  $\prod_{i=1}^N (R_i + 1)$  состояний рабочие, мы можем рассчитать их вероятности как произведения вероятностей пребывания в некотором состоянии отдельных элементов сети (они предполагаются независимыми, как и в работах [11], [12]), а затем сложить (состояния взаимоисключающие).

То есть коэффициент готовности дается формулой

$$K = \sum_{i \in W} p_i, \quad (1)$$

где  $p_i$  – вероятность  $i$ -го состояния;  $W$  – множество рабочих состояний.

Очевидно, что

$$W \vee B = U, \quad (2)$$

$$W \wedge B = \emptyset, \quad (3)$$

где  $B$  – множество отказных состояний.

Величина  $(T_{wrk} + T_{brk})^{-1}$  есть среднее число отказов/восстановлений в единицу времени.

События, которые приводят к отказам, случаются с частотой

$$\sum_{i \in W} p_i \sum_{j \in B} \lambda_{ij}, \quad (4)$$

где  $\lambda_{ij}$  – интенсивность переходов из  $i$ -го состояния в  $j$ -е.

А события, которые ведут к восстановлению, происходят с частотой

$$\sum_{i \in B} p_i \sum_{j \in W} \lambda_{ij}. \quad (5)$$

Очевидно, что в силу стационарности режима  $(T_{wrk} + T_{brk})^{-1} = \sum_{i \in W} p_i \sum_{j \in B} \lambda_{ij} = \sum_{i \in B} p_i \sum_{j \in W} \lambda_{ij}$ . (6)

В силу того, что

$$K = \frac{T_{wrk}}{T_{wrk} + T_{brk}} = T_{wrk} \cdot (T_{wrk} + T_{brk})^{-1}, \quad (7)$$

можно получить конкретные значения  $T_{wrk}$  и  $T_{brk}$ :

$$T_{wrk} = \frac{K}{(T_{wrk} + T_{brk})^{-1}}, \quad (8)$$

$$T_{brk} = \frac{1 - K}{(T_{wrk} + T_{brk})^{-1}}. \quad (9)$$

### 3. Расчет динамического режима

В динамическом режиме нас интересует первый переход в отказное состояние, поэтому все отказные состояния надо объединить в одно поглощающее состояние и запретить все переходы из отказных состояний. Вероятность этого поглощающего состояния является вероятностью отказа. Она будет являться функцией времени. Чтобы найти зависимость вероятности отказа от времени, надо решить систему линейных дифференциальных уравнений Колмогорова.

Каждому рабочему состоянию и единственному отказному соответствует одно дифференциальное уравнение. При составлении дифференциальных уравнений рабочих состояний надо учитывать, что каждый отказавший экземпляр может восстановиться, а каждый рабочий – отказать. Поэтому в каждом таком уравнении будет большое число слагаемых.

Эти дифференциальные уравнения надо будет решать численно. Это может занять большое время, но для малой сети решение является приемлемым. В качестве метода решения воспользуемся методом Эйлера.

Стоит отметить, что аналитическое решение требует, чтобы законы распределения всех случайных величин были показательными.

Динамический режим принимается марковским процессом. Это значит, что среднее время до отказа с некоторого момента времени определяется только состоянием в этот момент времени и не зависит даже от времени пребывания в этом состоянии. Поэтому можно утверждать, что

$$\forall i \in W: T_i = \frac{1}{\sum_{j \in W \vee B \diamond \{i\}} \lambda_{ij}} + \sum_{j \in W \diamond \{i\}} p_{ij} \cdot T_j, \quad (10)$$

где  $T_k$  – среднее время до отказа системы, пребывающей в рабочем состоянии  $k$ ;  $p_{ij}$  – вероятность перехода из  $i$ -го состояния в  $j$ -е.

Очевидно, что

$$\forall i, k \in B \vee W, i \neq k: p_{ik} = \frac{\lambda_{ik}}{\sum_{j \in W \vee B \diamond \{i\}} \lambda_{ij}}. \quad (11)$$

Таким образом,

$$\forall i \in W: T_i = \frac{1 + \sum_{j \in W \diamond \{i\}} \lambda_{ij} \cdot T_j}{\sum_{j \in W \vee B \diamond \{i\}} \lambda_{ij}}. \quad (12)$$

Данную систему уравнений можно решить методом Гаусса, Крамера, Жордана–Гаусса (и других), но проще всего (для человека) воспользоваться методом итераций, приняв начальные значения времен нулевыми. Из всего вектора решения нас интересует среднее время рабочего состояния из состояния полной исправности, но найти придется все компоненты.

Возможно альтернативное решение с использованием [14]. Это распределение описывает переход марковской цепи в поглощающее состояние. Но его использование требует выполнения различных матричных операций, в том числе поиска обратной матрицы и потенцирования матрицы, а эти операции являются весьма трудоемкими, особенно для настолько больших матриц.

### 4. Аналитическое и имитационное решения

Для получения решения воспользуемся методом имитационного моделирования, методом дискретных событий: много раз промоделируем 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]. Этот результат был уже получен нами ранее в [11], [12]. Для этого была использована программа, зарегистрированная под названием NetSys [13].

Для сравнения представлены аналитические (Anal) и имитационные (Sim) данные для случаев без восстановления (I) и с экспоненциальным восстановлением (E) для динамического режима (рис. 2) и представлено среднее время до отказа в нем же (табл. 1). Марковские цепи не позволяют нам рассмотреть иные варианты законов восстановления.

Для вычисления коэффициента готовности был использован подход с просмотром всех рабочих состояний, а затем по формулам (8)–(9) были получены средние времена, представленные в таблице.

Отметим, что для расчета аналитически методом марковских цепей стационарного режима потребовалось бы решить систему из  $2^{16} \cdot 3^2 = 65536 \cdot 9 = 589824$  линейных уравнений (6 узлов и 10 линий имеют два состояния – отказ и работа, а источник и приемник – три из-за резервирования).

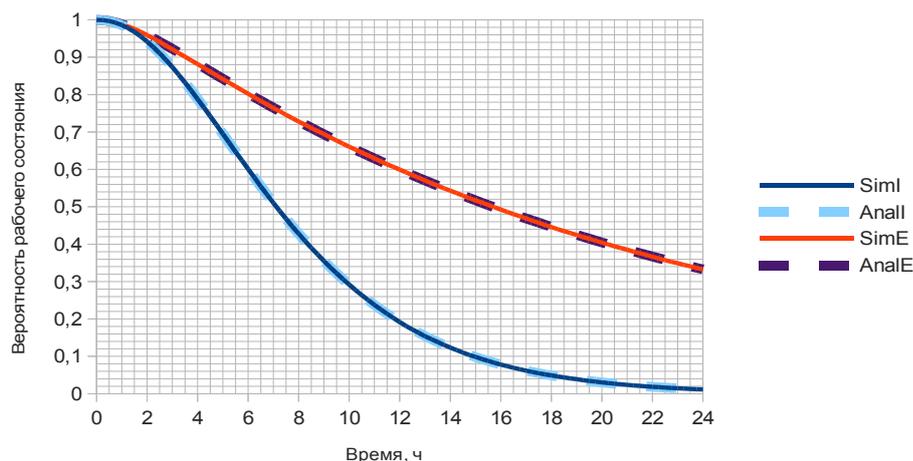


Рис. 2. Сравнение аналитического и имитационного результатов для динамического режима

### Сравнение имитационного результата с аналитическим

Модели	Динамика		Стационарный режим	
	Среднее время работы, ч	Среднее время работы, ч	Среднее время отказа, ч	Коэффициент готовности
SimI	8,14088	–	–	–
AnaII	8,14287	–	–	–
SimE	21,9415	17,8138	0,921644	0,950804
AnaIE	21,8987	17,8359	0,922993	0,950797

Анализ поведения аналитической и имитационной моделей на различных сетях показал, что аналитика проходит лишь на малых сетях, но в этих случаях дает решение гораздо быстрее имитационной.

### Заключение

Предложена новая аналитическая модель, основанная на анализе комбинаций отказовых и рабочих состояний узлов и каналов связи. Эта модель не является универсальной и не применима к сетям различной структуры, в отличие от имитационной, но позволяет, во-первых, провести валидацию имитационной модели, а, во-вторых, рассчитать малую сеть за меньшее время, по сравнению с имитационной. Для примера получены вероятностно-временные характеристики простой сети.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аль-Хадша, Ф. А. Х. Выбор в сети 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 «Актуаль-

ные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»; вып. 11). – С. 85–88.

3. Имитационное моделирование грид-систем : монография / 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 : монография / 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 октября 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. Райнике, К. Оценка надежности систем с использованием графов / К. Райнике ; под ред. И. А. Ушакова. – М. : Радио и связь, 1988. – 208 с. : ил.

8. 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. – 2010.

9. Филлин, Б. П. Методы анализа структурной надежности сетей связи / Б. П. Филлин. – М. : Радио и связь, 1988. – 208 с. : ил.

10. Фоменков, С. А. Моделирование систем [Электронный ресурс] / С. А. Фоменков. – Волгоград, 2004. – 1CD-ROM

11. Лукьянов, В. С. Оценка показателей надежности сетей / В. С. Лукьянов, С. В. Гаевой, Ф. А. Х. Аль-Хадша // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2013. – № 7. – С. 57–60.

12. Лукьянов, В. С. Оценка показателей надежности сетей в стационарном режиме / В. С. Лукьянов, С. В. Гаевой, Ф. А. Х. Аль-Хадша // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. Т. 16. № 8(111). С. 165–169.

13. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2013614144 от 24 апреля 2013 г. РФ, МПК (нет). Имитационная модель для оценки влияния параметров надежности и иных характеристик на передачу сообщений в сетевых системах (NetSys) / С. В. Гаевой, Ф. А. Х. Аль-Хадша, В. С. Лукьянов; ВолгГТУ. – 2013.

14. Phase-type distribution [Электронный ресурс] // Wikipedia. – 2013. – Режим доступа : [http://en.wikipedia.org/wiki/Phase-type\\_distribution](http://en.wikipedia.org/wiki/Phase-type_distribution)

УДК 519.711.3

*С. В. Кручинин*

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АКТОРОВ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ В ПРОЕКТИРОВАНИИ САПР

ООО «ВЭЛБОРН»

siblis@yandex.ru

В статье дается формализация акторов сети (которыми выступают телекоммуникационные устройства, пользователи, линии связи и группы акторов) и их объединений. Разработанная математическая модель позволяет как исследовать телекоммуникационные сети, так и строить архитектуру программного обеспечения. Модель удовлетворяет потребности, возникающие при разработке САПР проектирования телекоммуникационных сетей, но также может использоваться в реализации служб мониторинга, настройки и маршрутизации для телекоммуникационных сетей.

*Ключевые слова:* математическая модель, компьютерные сети, множества, гиперграфы, САПР, топология сети, программная архитектура.

*S. V. Kruchinin*

## MATHEMATICAL MODEL OF TELECOMMUNICATION ACTORS FOR CADD DESIGNING

Wellborn Llc.

The article presents the formalization of network actors (such as telecommunication devices, users, network line connections and groups of actors) and their unions. Developed mathematical model allows to research the telecommunication networks, and to design the software architecture. Model covers the needs of CADD development and can be used for network monitoring, configuration and roaming services development.

*Keywords:* mathematical model, networks, sets, hypergraphs, CADD, network topology, software architecture, XML.

Коллективом разработчиков, исследующих методы проектирования и построения телекоммуникационных сетей и разработки систем автоматизированного проектирования и автоматизированных систем управления для нужд телекоммуникационных сетей, был разработан ряд математических моделей, описывающих топологию и взаимодействие телекоммуникационных узлов в сети связи. Модели покрывают разные сферы функционирования сетей, такие как:

проектирование топологии сети – могут быть использованы как теоретическое обоснование и практический инструмент для разработки программного обеспечения и компонентов систем автоматизированного проектирования [1; 2];

управление сетями – могут быть использованы в построении автоматизированных систем управления сетями и комплексами телекоммуникационных устройств, в частности, в целях

синтеза и разработки протоколов управления телекоммуникационными устройствами [3];

обеспечение роуминга – могут быть использованы для синтеза и реализации протоколов различных уровней сетевой модели ISO/OSI, таких как протоколы маршрутизации и роуминга, в частности, так называемой «абонентской маршрутизации» [4; 5];

разработка графических языков нотаций для описания телекоммуникационных сетей, таких как UML, IDEF14 или NTDGL (Network Topology Description Graphic Language) [2].

Несмотря на различные сферы применения данных моделей, все они оперируют описаниями одних и тех же элементов телекоммуникаций, потому мы предположим, что можно создать обобщенную модель телекоммуникационной сети и телекоммуникационных устройств.

Рассмотрим компоненты, входящие в действующую телекоммуникационную систему:

телекоммуникационные устройства; абоненты (пользователи, роли, учетные записи, профили на ЭВМ пользователей);

линии связи (сети, подсети без конкретизации их внутреннего устройства, шины, радиоканалы, каналы вида «точка-точка», сетевые соединения верхнего уровня вида абонент-абонент, абонент-устройство, устройство-устройство);

группы связанных объектов вышеперечисленных типов.

Рассмотрим в рамках данной статьи понятие «актор». *Актором* в нашем рассуждении может быть устройство, пользователь, сеть, группа. В рамках разрабатываемой модели невозможно дать точное определение термину «актор», потому мы введем это понятие как аксиоматическое. Можно умозрительно отметить, что разнообразные элементы человеческим сознанием группируются как «схожие» и обладают определенной степенью однотипности, хотя разные варианты/типы/экземпляры актора могут различаться между собой, но все равно обладать определенной общностью.

Введем следующее правило. Пусть  $\mathbb{N}$  – некоторое множество типов акторов. Пусть для каждого типа акторов  $n_i \in \mathbb{N}$  существует множество акторов  $\exists N_i$ , так что каждый актор этого множества  $\forall n_j \in N_i$   $n_j$  имеет тип  $n_i \in \mathbb{N}$ . Тогда объединение всех множеств  $N_i$  обозначим как  $\underline{\mathbb{N}}$ . Таким образом, для всех акторов  $n_{ij} \in N_i$  верно  $n_{ij} \in \underline{\mathbb{N}}$ . Можно отметить, что множество  $\underline{\mathbb{N}}$  можно понимать как совокупность всех существующих акторов всех типов и произведением множества типов на множество акторов каждого типа. (В [3] нами также было отмечено, что  $\underline{\mathbb{N}}$  конечно и счетно).

Каждому типу актора  $n_i \in \mathbb{N}$  можно сопоставить набор его множеств характеристик.  $\mathbb{K}_i = \{K_1, K_2, K_3, K_4, \dots\}$ . Каждое множество характе-

ристик  $K_i$  также представляет набор характеристик, одну из которых может принимать в момент времени или обладать постоянно актор.

Для каждого набора  $\mathbb{K}_i$  будут свои несовпадающие совокупности характеристик, но как было показано в [3] можно построить множество  $\mathbb{K} = \{K_1, K_2, K_3, K_4, \dots\}$ , так пронумеровав его множества  $K_i$ , что каждое  $K_i$  будет подмножеством  $\mathbb{K}$ . Более того, если добавить к элементам каждого из множеств  $K_i$  еще один элемент  $\Theta$  (условный ноль), обозначающий что данная характеристика к описываемому актору не применима, то  $\mathbb{K}$  будет описывать набор характеристик, применимый к любому элементу актору. Характеристиками могут являться такие понятия, как IP-адрес, тип передатчика, роль пользователя, тип передачи и т. д. Множество значений характеристики будет представлять совокупность ее возможных значений: например, для характеристики «IP-адреса» – это совокупность IP-адресов, для характеристики «тип устройства» – совокупность доступных для моделирования/используемых в описываемых телекоммуникационных сетях устройств, для характеристики «роль пользователя» – совокупность ролей. Каждый конкретный же актор принимает одно значение характеристики (например, значение IP-адреса для устройства). Возможны также множественные характеристики (когда один актор обладает несколькими значениями одной характеристики).

Рассмотрим теперь следующие разновидности акторов:  $T$  – телекоммуникационные устройства;  $A$  – пользователи (абоненты);  $L$  – линии связи;  $U$  – группы (и даже сети – в широком смысле – со всеми входящими в них устройствами и абонентами).

Для  $T, A, L, U$  справедливы соотношения, предложенные для  $\mathbb{N}$ :

$$\begin{aligned} \exists \underline{T} \forall t_i \in \underline{T} \exists T_i = \{t_{i1}, t_{i2}, t_{i3}, \dots\}; \underline{T} = T_1 \cup T_2 \cup \dots \cup T_n; t_{ik} \in \underline{T}. \exists \mathbb{K}_T = \{K_{T1}, K_{T2}, \dots\} \\ \exists \underline{A} \forall a_i \in \underline{A} \exists A_i = \{a_{i1}, a_{i2}, a_{i3}, \dots\}; \underline{A} = A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n; a_{ik} \in \underline{A}. \exists \mathbb{K}_A = \{K_{A1}, K_{A2}, \dots\} \\ \exists \underline{L} \forall l_i \in \underline{L} \exists L_i = \{l_{i1}, l_{i2}, l_{i3}, \dots\}; \underline{L} = L_1 \cup L_2 \cup \dots \cup L_n; l_{ik} \in \underline{L}. \exists \mathbb{K}_L = \{K_{L1}, K_{L2}, \dots\} \\ \exists \underline{U} \forall u_i \in \underline{U} \exists U_i = \{u_{i1}, u_{i2}, u_{i3}, \dots\}; \underline{U} = U_1 \cup U_2 \cup \dots \cup U_n; u_{ik} \in \underline{U}. \exists \mathbb{K}_U = \{K_{U1}, K_{U2}, \dots\} \end{aligned}$$

Возьмем теперь некий набор устройств  $T_c$  и некий набор связывающих их линий  $L_T$ . Построим граф  $G_T = \{T_c, L_T\}$  таким образом, что  $T_c$  образует совокупность вершин графа,  $L_c$  – линии связи между парами устройств. Мы рассмотрим упрощенный случай – возьмем такое множество  $L_T$ , которое содержит только линии связи точка-точка. Если  $L_c$  содержит один или

более элементов  $l_i$ , соответствующих в физическом воплощении многоточке (шине), объединяющей три и более элемента, то преобразуем  $L_c$  таким образом, что каждый  $l_i \in L_c$  заменяем на  $l_i' l_i'' l_i'''$  (для объединения трех элементов и так далее – заменяем одну связь трех элементов на три связи вида точка-точка). Без выполнения данной декомпозиции  $G_T$  являлся бы гипергра-

фом. Такое преобразованное множество  $L_c$  способно описывать множество дуг, так как для каждой  $l_i$  можно указать два элемента  $t'$  и  $t''$ , для которых она является вершиной. По условию рассматриваемой нами задачи граф является неориентированным, ввиду того, что каждая дуга служит для отображения в модели канала связи между двумя устройствами, а в рассматриваемом случае эта связь двунаправленная (дуплексная).

Физический смысла графа  $G_T$  состоит в том, что он описывает определенную физическую телекоммуникационную сеть, состоящую из физических телекоммуникационных устройств и физических линий связи (которые, в свою очередь могут присутствовать как в виде проводов, оптических волокон и так далее, так и в виде частот радиоканалов).

Мы также можем построить граф  $G_A$ , если за множество вершин возьмем множество абонентов  $G_C$  (для примера, это могут быть абоненты, работающие с телекоммуникационными устройствами  $T_C$ ). Тогда  $U_A$  – множество каналов связи (как правило, канал связи IP-IP или, например, PPP), описываемых на сетевой модели ISO/OSI (на уровне протокола IP стека протоколов TCP/IP). Итак,  $G_A = \{A_C, U_A\}$ . Можно даже выделить некую зависимость (соотношения) между элементами  $A_C$  и  $T_C$ ,  $U_A$  и  $U_T$ , описав функции отношений (какой абонент с каким телекоммуникационным устройством работает, какой логический канал посредством каких физических каналов работает). Но более интересным фактом является то, что  $G_A$  и  $G_T$  обладают одинаковыми свойствами, что в ряде случаев (с учетом поправок на разную физическую природу элементов  $A$  и  $T$ ) позволяет использовать одни и те же алгоритмы для  $A$  и  $T$ . Таким образом, мы поступили в [4], показав, что перемещение абонента относительно телекоммуникационных устройств и перемещение телекоммуникационного устройства относительно других телекоммуникационных устройств с изменением соответствующих таблиц маршрутизации в процессе перемещения (роуминга) математически эквивалентны. Кроме того, возможно объединение множеств  $S = A_C \cup T_C$ , когда и устройства и абоненты учитываются в модели сети. Но для этого надо добавлять к  $L_c = L_T$  также  $L'$ , который, в отличие от  $L_A$ , описывающей связи абонент-абонент, описывает связи абонент-устройство (дуга, в которой одной вершиной является устройство, а другой –

абонент). Таким образом,  $L_c = L_T \cup L'$ . Такую сеть будет описывать граф  $G_c = \{C, L_c\}$ .

Для построения модели классов для реализации системы автоматизированного проектирования и отображения определенной модели телекоммуникационной системы (схемы связи) с помощью области отображения на экране САПР и соответствующего инструментария для редактирования необходимо реализовать соответствующие элементы математического описания с помощью языка программирования.

Так, актору, в целом, можно сопоставить базовый абстрактный класс в терминах объектно-ориентированного программирования. Тогда ему будут наследовать классы базовый класс устройства, базовый класс пользователя, базовый класс линии и базовый класс группы, соответственно для  $T, A, L, U$ .

Стоит отметить, что способ представление элементов  $T, A, L, U$  может быть различным в зависимости от поставленных задач. Например, можно не рассматривать  $A$  и  $U$ , тогда на схемах будут присутствовать только сами телекоммуникационные устройства и их линии связи. Напротив, можно создать более полную и подробную схему, с использованием всех типов акторов. В ряде случаев можно отказаться от какого-то типа актора, обозначив эти акторы на схеме не как самостоятельный актор, а как особые характеристики связанного с ними существующего актора другого типа. Возможно также ввести преобразование, задающее актору в одной модели соответствующую характеристику в другой модели. Такие модели могут быть как взаимнообратимыми, так и преобразовываться только в одну сторону.

Попробуем рассмотреть отображение частного случая объектов на схеме (рабочей области экрана в проектируемой САПР – рис. 1).

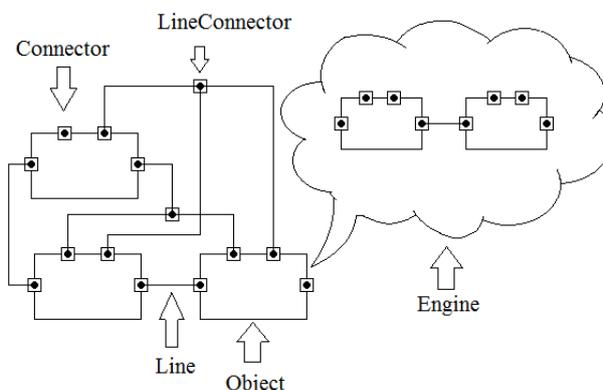


Рис. 1. Отображение некоторых акторов на условной визуальной схеме

Актеры на схеме обозначены в соответствии с наименованием соответствующих им классов в разработанном нами программном обеспечении подключаемой библиотеки графического ядра визуализации и анализа инженерных схем [6].

На схеме мы отображали актер вида Т (телекоммуникационное устройство), на схеме он указан как Object (так как в разрабатываемой САПР является практически основным отображаемым объектом). Линия связи между двумя устройствами (которой в нашей модели соответствует дуга  $l_i$ ) обозначена на схеме Line. Для графического соединения двух устройств между собой линией связи точка-точка используется графический объект Connector. Но таким образом можно построить только дугу графа. Мы выше уже говорили, что при формализации необходимо для некоторых линий связи (типа шина, многоточка, радиоканал) производить декомпозицию по схеме  $l \rightarrow l', l'', l'''$ . Необходимо декомпозиция и при построении САПР и схемы связи в САПР. Так, одна линия связи, соединяющая три объекта разбивается на три дуги с созданием искусственной вершины  $e$ . То есть производится декомпозиция  $l \rightarrow l_1, l_2, l_3, e$ . Существует зависимость между приведенными декомпозициями (рис. 2). Первая декомпозиция отображает связи между объектами (в ряде случаев эти линии взаимно-однозначно соответствуют линиям  $L_A$ , см. выше, мы упоминали о зависимости между линиями связи абонентов и линии связи устройств; а в ряде случаев и физической связи  $L_C$  – например, когда линия физически построена по принципу точка-точка с маршрутизацией, которой мы в модели связи пренебрегаем). Вторая – графическое отображение этой связи или даже физическое устройство такой связи (шина, либо объединение через коммутационное устройство. В последнем случае дополнительная вершина соответствует такому устройству). Дополнительная вершина  $e$  на схеме отображается как LineConnector. В данном случае она не обладает физическим смыслом (за ней может как стоять телекоммуникационное устройство – коммутатор или сетевой концентратор, так такового устройства может и не быть – для линии связи типа шина или радиоканала).

На рис. 2 изображены три устройства  $t_1, t_2, t_3$  и связь между ними  $l$ , т. е., по сути, гиперграф, так как дуга  $l$  связана с тремя вершинами. Декомпозиция позволяет преобразовать гипер-

граф в обычный граф без ввода дополнительной вершины  $l \rightarrow l', l'', l'''$  или с вводом одной  $l \rightarrow l_1, l_2, l_3, e$ .

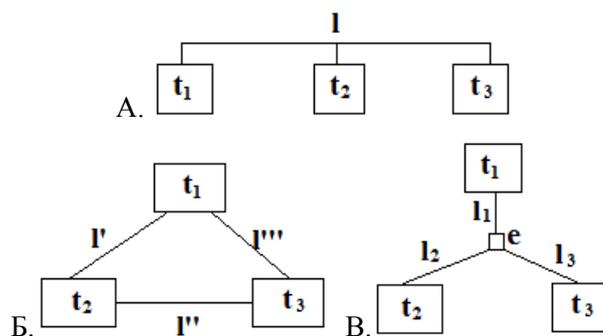


Рис. 2:

*A* – устройства  $t_1, t_2, t_3$  и линия связи между ними; *B* – декомпозиция линии связи в дуги графа  $l', l'', l'''$ ; *B* – декомпозиция линии связи в дуги  $l_1, l_2, l_3$  с вводом дополнительной вершины  $e$

Общим между двумя вариантами декомпозиции является то, что вершины графа, образованного без ввода дополнительной вершины, совпадают с вершинами исходного гиперграфа – с одной стороны, и каждая вершина графа, образованного добавлением дополнительной вершины, соответствует условию: либо она является дополнительной вершиной  $e$ , либо совпадает с вершиной в гиперграфе до выполнения декомпозиции или с вершиной графа при выполнении декомпозиции без ввода дополнительной вершины. При проектировании САПР мы использовали вариант декомпозиции с вводом дополнительной вершины, которая является в программном обеспечении экземпляром класса LineConnector, но стоит отметить, что и модель с декомпозицией без добавления линии графа также используется, но уже не для графического отображения, а для генерации настроечных данных, где как раз важна именно связность с удаленными устройствами, а не то, каким образом данные будут доставляться в процессе функционирования сети физически (подробнее см. [7]).

Мы почти не касались акторов типа U. Тем не менее, иногда в схеме может участвовать актер, внутренней структурой которого в одних случаях можно пренебречь, в других, напротив, интересна внутренняя структура, а иногда именно она и нужна. К такому можно, в принципе, отнести и разобранный вариант декомпозиции с вводом дополнительной вершины, когда за ней стоит действительно-существующее устройство (сетевой концентратор). Но в реализации мы не учитывали этот случай как актер ти-

па  $U$ , рассматривая его как совокупность элементов типа  $L$ . Напротив, иногда можно рассматривать как одно устройство несколько устройств (например, рассматривая сеть зданий или транспортных средств, их можно рассмотреть целиком как акторы, аналогичные устройствам на крупной схеме, а на детальной изобразить внутреннюю структуру каждого актора (ЭВМ, модемы, радиостанции и прочее оборудование). И вероятно ситуация, когда внутренняя структура актора (сама являясь телекоммуникационной сетью) может, наконец, интересовать нас отдельно, без привлечения внешних по отношению ее компонентов.

Рассмотрим простой случай. Возьмем граф  $G = \{O, L_O\}$ , где за  $O$  примем  $T$ , либо  $A$ , либо  $T \cup A$ , т. е.  $O = \{T|A| T \cup A\}$ . Рассмотрим теперь множество элементов  $M$ , являющихся графами вида  $G = \{O, L_O\}$ , т. е.  $M = \{G_1, G_2, \dots\}$ . Рассмотрим теперь граф  $G' = \{O', L_{O'}\}$ , такой что  $O' = \{O|M|O \cup M\}$ , а  $L_{O'}$  – дуги между вершинами  $O'$ . Отметим что граф  $G'$  будет являться гиперграфом в случае, если  $O' = M$  или  $O \cup M$ . Логично можно определить и гиперграфы более высокой вложенности  $G'' = \{O'', L_{O''}\}$  и т. д. Таким образом,  $U = \{G_1, G_2, G_3, \dots, G_1', G_2', \dots, G_1'', \dots\}$ . Множество  $U$  счетно, так как комбинация элементов  $T, A, L$  и степень вложенности графов конечная, но может достигать большого числа элементов. Отметим, что  $U$  является мультигра-

фом, так как некоторые его вершины сами являются графами.

В разработанной нами графической библиотеке [6] для отображения (см. рис. 1) элементов типа  $U$  использовался класс Engine. Класс Engine был построен таким образом, что мог содержать в своем составе экземпляры собственного класса; следовательно, можно было породить достаточную вложенность.

Для отображения пользователей могут применяться несколько различных подходов. Один из них заключается в использовании отображения на графической схеме отдельных акторов вида  $A$  и связей их с ЭВМ  $L_{AT}$ , с помощью соответствующих классов. Другой подход вместо отдельного отображения актора  $A$  в виде редактируемого в САПР объекта предполагает использовать создание соответствующей этому актору  $A$  характеристики  $K_A$  соответственного устройства  $t$ . Таким образом, вместо использования набора  $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots\}$  и набора связей абонентов и ЭВМ  $L_{AT} = \{l_1, l_2, l_3, \dots\}$  использовался набор характеристик  $K_A = \{a_1, a_2, a_3, \dots\}$ , а множество  $Q_{ЭВМ} = \{K_{IP}, K_{Туре}, \dots, K_A\}$  дополнялось элементом  $A$ . Этот метод обладает и недостатком (остановимся позднее), но в целом способ хранения абонентов в виде отдельных акторов или характеристик идентичен.

Рассмотрим теперь разработанную модель классов.

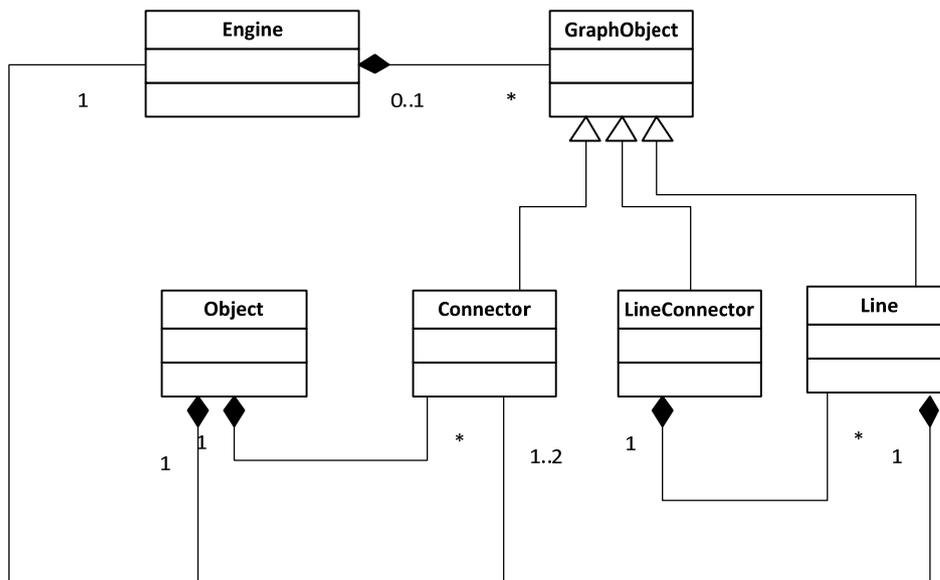


Рис. 3. Иерархия классов объектов

На рис. 3 изображена иерархия классов, используемая в ПО «Графическое ядро визуализации и анализа инженерных схем» [6]. Указан-

ное ПО представляет собой подключаемую библиотеку, разработанную на языке C++ с использованием библиотеки QT, может быть ском-

пилирована для использования как в ОС Linux, так и для ОС семейства Microsoft Windows. Библиотека может использоваться в построении САПР, в разработке систем визуализации и контроля телекоммуникационных устройств и сетей.

Теперь мы остановимся на особенностях модели, которые не требуются для описания собственно модели сети, но необходимы для отображения ее в САПР – это графические элементы. Графические элементы – это элементы, которые служат для отображения на визуальной схеме геометрических объектов. В нашем случае это простейшие геометрические фигуры: квадраты, прямоугольники, точки и отрезки. При этом изначально также присутствовали треугольники, но от них было решено отказаться. В общем случае графические элементы, служащие для отображения акторов математической модели, являются элементами графического языка описания NTDGL (Network Topology Description Graphic Language – язык графического описания сетевой топологии), отображенного нами в [2].

Базовый графический объект – GraphObject – обладает двумя важными свойствами:  $X$ ,  $Y$  – относительными положениями на координатной сетке области отображения, а также длиной и высотой. Эти свойства наследуются и объектами Line и LineConnector, но у них длина и высота фиксирована. Line, наконец, уже не обладает в прямом смысле шириной, так как вторая пара координат задает не длину и высоту, а вторую точку отрезка. При этом в нашем исполнении отрезок мог быть только горизонтальным или вертикальным, а более сложные структуры создавались из их комбинаций, хотя возможно создать и вариацию с диагональным направлением отрезков.

Так получается, что множество Line на схеме схоже с множеством  $L$  математической модели. Но не идентично. Практически при переходе от математической модели к схеме, происходит декомпозиция сети связи в совокупность объектов Line и LineConnector. При этом создаются дополнительные LineConnector, служащие для трассировки пути линий связи на схеме и носящих в большей степени декоративный характер. При создании по схеме файлов настроечных данных происходит обратный процесс – трассировка путей от одного Connector до другого через объекты Line и LineConnector; таким образом, восстанавливается множество  $L$  для математической модели.

Объект Object не является графическим. Он как раз несет совокупность информационных данных, т. е. фактически служит для хранения информации об элементах множества  $T$ . Элементы  $A$  тоже могут храниться в виде объектов Object, как и связи вида  $A-A$  (и даже  $T-T$ , помимо декомпозиции через Connector, Line и LineConnector), но мы хранили свойства элементов  $A$  в качестве свойств соответствующих элементов типа  $T$ . Для графического же отображения элементов использовалось включение в качестве свойства в объект типа Object экземпляра объекта GraphObject.

Сам GraphObject мог включать в себя экземпляр объекта Engine. По умолчанию используется один экземпляр объекта Engine, который и представляет рабочую область. Но любой Object через GraphObject может содержать вложенную сеть, которую можно редактировать в отдельном окне, порождающимся экземпляром Engine. Таким образом, нами достигнуто представление элементов множества  $U$ .

При представлении вышеуказанной информации с помощью библиотеки [6] (либо аналогичной реализации предложенной математической модели) создается визуальный интерактивный интерфейс, который состоит из следующих элементов:

- область редактирования (канва);
- интерактивные графические объекты;
- всплывающее окно;
- свойства.

Область редактирования – это графическая область экрана, на которой производится редактирование схемы. Для редактирования схемы должна быть хотя бы одна область редактирования (базовая область редактирования). В этом случае она размещается в окне приложения (программного средства). Область редактирования содержит интерактивные графические объекты. Манипуляции с графическими объектами сводятся как к графическим манипуляциям над ними (перетаскивание, изменение размеров, соединение и разъединение), так и манипуляции над их свойствами. Последнее может реализовываться с помощью открытия всплывающего окна, содержащего окно редактирования свойств, которое относится уже собственно к характеристикам акторов, представленных, в свою очередь, в виде графических объектов. Кроме того, всплывающее окно может представлять вложенную область редактирования, которая, как и базовая, реализуется

с помощью класса Engine. Множество вложенных областей редактирования нами описано выше в виде акторов вида  $U=\{U',T',A',L'\}$ .

Предположим, что множество  $M=\{U,T,A,L\}$  (схоже с множествами  $U$ , но само не вложено в другие такие же множества) и есть наша искомая модель сети связи. Рассмотрим теперь  $M^E=\{U^E,T^E,A^E,L^E\}$ , где для любого  $S$  мы введем  $S^E$ , означающее, что в него добавлены помимо функциональных характеристик, описывающих свойства  $S$ , также графические характеристики. Таким образом,  $S \subseteq S^E$ . Соответственно и  $M \subseteq M^E$ . Задача создания графической схемы является задачей построения множества  $M^E$  по исходным данным для  $M$  путем искусственного добавления графических элементов и преобразований-декомпозиций  $l \rightarrow l_1,l_2,l_3,e$ . Задача же получения из визуальной схемы  $M^E$  данных, необходимых для настройки телекоммуникационных сетей и устройств, представляет обратное преобразование  $M^E \rightarrow M$ .

Для хранения информации о редактируемой схеме телекоммуникационных устройств авторами использовался язык NTDDL (Network Topology Description Markup Language – язык разметки описания сетевой топологии) [2], построенный на основе XML (NTDDL-XML) и в совокупности с NTDDL образующий языковое пространство NTDL (Network Topology Description Language – язык описания сетевой топологии) [2]. Файл в формате NTDDL-XML позволяет сохранять данные об акторах телекоммуникационной сети в виде файла и загружать из файла в оперативную память программы, порождая на основе хранимых в файле данных экземпляры соответствующих классов. Также как и классы программной библиотеки, записи в файле NTDDL-XML позволяют хранить элементы множеств ( $T, A, L, U$ ) в виде тегов XML.

Общий вид файла в формате NTDDL-XML имеет следующий вид:

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>
<Map>
<Layer>
<Objects>
<Object />
<Object />
</Objects>
<Nets>
<Net />
</Nets>
</Layer>
<DL>
```

```
<DLConnection/>
```

```
<DLConnection/>
```

```
</DL>
```

```
</Map>
```

Корневой тег файла – `<Map/>`. Он должен содержать тег `<Layer />`, несущий информацию об области редактирования и принадлежащих ей графических объектах. В свою очередь, каждый `<Layer />` содержит перечень объектов `<Objects />` и перечень сетей `<Nets />`. Как не сложно понять, объектами `<Object />` представлены акторы типа  $T$ , сетями `<Net />` – акторы типа  $L$ . При этом тег `<Nets />` отображает связь между самими объектами, а вложенные теги `<Net />` – элементы-отрезки, из которых состоит графическое отображение сети. Теги `<Net />` несут в большей степени информацию для графического отображения, нежели функциональную. Добавление в `<Nets />` тегов `<Net />` фактически является операцией преобразования  $l \rightarrow l_1,l_2,l_3,e$ . Удаление тегов `<Net />` является обратной операцией и может использоваться при подготовке настроечных файлов, когда графическая информация уже не нужна.

Тег `<Layer />` также может быть вложен в элемент `<Object />`, равно как и список объектов `<Objects />`, содержащий другие `<Object />`. Разница в использовании или не использовании `<Layer />` объясняется тем, будут ли вложенные объекты отображаться в новом окне программного обеспечения, или вкладываться непосредственно. И в том и в другом случае элементы являются способом отображения акторов-групп  $U$ .

Тег `<DL />` является не обязательным. Он служит для отображения акторов вида  $A$ , а `<DLConnections />` – для задания связей между ними. О декомпозиции фактической связи пользователей (акторов вида  $A$ ) в физические связи  $L$  мы уже писали выше. Также возможно отображение акторов  $A$  в виде объектов `<Object />` (тогда на схеме они также будут отображаться в виде графических блоков, как и акторы вида  $T$ ), либо в виде характеристик объектов вида  $T$ . В последних двух случаях хранение записей об акторах типа  $A$  в виде тегов `<DL />` и связей между ними в виде тегов `<DLConnections />` является излишним, хотя допускается и хранение этой избыточной информации с помощью указанных тегов и в явном виде. В то же время, если иным способом в файле информация о пользователях, т. е. акторах вида  $A$  не хранится, использование тегов `<DL />`

и `<DLConnections />` становится не просто желательным, но даже и обязательным.

Характеристики же хранятся в виде атрибутов тегов. Атрибуты могут иметь префикс. Предусмотрено два вида префикса: «g\_» и «key\_».

Префикс «g\_» служит для обозначения свойств, используемых для отображения графических характеристик (которые будут отображаться при преобразовании графической схемы в информацию, предназначенную для настройки аппаратного и программного обеспечения телекоммуникационной сети). Примерами характеристик могут быть `g_x`, `g_y`, `g_height`, `g_weight` – атрибуты, характеризующие положение (x, y) элемента относительно области редактирования, в которой он задан, и его линейные размеры (высота и ширина) или такие характеристики как `g_color`, `g_background`, `g_border`, `g_transparency` – задающие вид графического оформления элементов (и в какой-то степени являющиеся аналогами свойств каскадных таблиц стилей CSS для языка разметки веб-страниц HTML, но в очень ограниченном виде). Отметим также, что внедрение поддержки CSS в язык NTDL (NTDML/NTDGL) может являться одним из перспективных направлений в рамках нашего исследования.

Атрибуты с префиксом «key\_», в свою очередь, несут информацию о характеристиках самих акторов (в отличие от атрибутов «g\_», схожих со свойствами CSS, они в большей степени несут информационную нагрузку, в соответствии с классическим представлением о роли атрибутов в XML). Это могут быть атрибуты `key_type`, `key_name`, `key_IP`, `key_MAK`, `key_tty`, `key_TTL`, `key_GW` (и т. д.) – они могут задавать данные об особенностях телекоммуникационных устройств и связей, которые описываются математической моделью.

Отметим, что использование акторов T, а также акторов U, включающих в себя, в том числе акторы вида T и G, и соответствующие им элементы в NTDML-XML позволяют создавать «шаблоны». Шаблон – это схема, хранящая определенную формализованную модель элемента (группы элементов сети, с заданными связями), используя которую, можно создавать новые схемы сетей, повторно используя заранее созданные элементы. Применение шаблонов значительно упрощает процесс проектирования схем телекоммуникационных сетей и уменьшает количество возникающих при этом ошибок.

Отметим, что рассмотренные нами приложения математической модели в виде классов графических элементов (и реализованных в [6]) и формата файла NTDML-XML (описанного в [2], [7] и т. д.) покрывают ее использование на этапе разработке и использования САПР. Разработанный нами инструментарий позволяет формализовать информацию о телекоммуникационной сети, используемых в ней телекоммуникационных устройствах, пользующихся ею пользователях и их роли в виде математической модели, что, в свою очередь, позволяет разработать программное обеспечение, обеспечивающее хранение (на диске в виде файла формата NTDML-XML и в памяти программы в виде набора экземпляров класса), графическое представление на экране (в виде соответствующих визуальных объектов, реализованных с помощью соответствующих экземпляров класса подключаемой графической библиотеки [6] или аналогичной, разработанной в соответствии с графической нотацией NTDGL[2]), обработки (с помощью визуального интерфейса, манипулируя объектами NTDGL, пользователем, или с использованием программ, в том числе и путем манипуляции над файлами в формате NTDML-XML, описанного в [2], с помощью утилит – специально разработанных программных модулей).

В то же время, после подготовки в САПР настроечных данных и ввода их в сеть (настройка телекоммуникационной сети, телекоммуникационного оборудования и программного обеспечения) информация, заложенная в соответствующей модели, продолжает свое существование в виде набора статусов, существующих в данной сети. Развитие рассматриваемой математической модели позволит использовать полученные данные для создания гибких и надежных систем автоматизированного управления сетями и использующими их вычислительными комплексами, в том числе для нужд мониторинга функционирования телекоммуникационной сети и ее компонентов – с одной стороны; осуществлять управление и работу телекоммуникационной сети на уровне протоколов разных уровней сетевой модели ISO/OSI – например, осуществлять динамическую перенастройку, реконфигурацию и маршрутизацию сети (см. например [4], [5]) – с другой. Обе задачи основаны на обмене между акторами телекоммуникационной сети характеристиками и изменении этих характеристик в зависимости

от полученных ответов от остальных акторов. Разработка полученной математической модели позволяет формализовать используемые в сети типы акторов, характеристики и взаимодействия, что может применяться в разработке соответствующих телекоммуникационных протоколов для использования в целях маршрутизации, обновления таблиц имен, обмена конфигурационными и информационными данными об акторах телекоммуникационной сети.

Итак, мы сделали очередной шаг в развитии математической модели телекоммуникационных сетей. Обобщены разработанные ранее частные модели и опыт их применения в разработке САПР и соответствующего формата файлов для хранения и обработки данных, полученных в САПР. При этом затронуты и другие области применения математической модели – например, применение модели акторов телекоммуникационной сети как методологического инструмента в разработке систем обслуживания работающей телекоммуникационной сети.

Дальнейшая проработка данного направления, составляющего переход от разработки частных моделей к разработке обобщенной модели сети, позволит расширить использование данной модели и обеспечить связность решаемых задач на разных уровнях функционирования сети: от ее проектирования в САПР до ее

функционирования и модификаций в процессе эксплуатации.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов, А. М. Математическая модель мультиграфа телекоммуникационной сети и иерархия классов / А. М. Кузнецов // Научно-исследовательские публикации. – Воронеж. – 2013. – № 1. – С. 87–93.
2. Вишняков А. В., Кручинин С. В., Кручинина М. Ю. Язык описания топологии вычислительных сетей NTDL // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 15(102) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – Вып. 15. – С. 126–129.
3. Кручинин, С. В. Математическая модель контролируемых устройств // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. Т. 17. № 14(117). С. 19–20.
4. Кручинин, С. В. Особенности построения системы доменных имен (DNS) в мобильных Ad Hoc сетях / С. В. Кручинин // Теория и техника радиосвязи. – 2011. – № 2/2011. – С. 79–83.
5. Кручинин, С. В. Реализация службы имен в децентрализованных телекоммуникационных сетях / С. В. Кручинин, А. В. Вишняков // Научно-исследовательские публикации. – Воронеж. – 2013. – № 2. – С. 132–147.
6. Кручинин, С. В. Графическое ядро визуализации и анализа инженерных схем / С. В. Кручинин, А. М. Кузнецов, С. В. Зотов, М. В. Обельченко // Свидетельство о государственной регистрации программа для ЭВМ № 2011618938 от 27.09.2011. – Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.
7. Вишняков, А. В. Опыт разработки архитектуры программного обеспечения САПР вычислительных сетей / А. В. Вишняков, С. В. Зотов, С. В. Кручинин, М. Ю. Кручинина // Теория и техника радиосвязи. – Воронеж. – 2013. – № 1. – С. 98–104.

УДК. 004.056

*В. А. Лахно*

### ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ КОРПОРАТИВНЫХ СИСТЕМ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Луганский национальный аграрный университет  
valss21@mail.ru

Предлагаемый в работе подход для решения задач информационной безопасности корпоративных систем на железнодорожном транспорте предусматривает интеграцию математических моделей обработки и защиты информации в случае реализации сценария атаки на корпоративную сеть с использованием нескольких конфликтных потоков заявок.

*Ключевые слова:* корпоративная информационная система, информационная безопасность, конфликтные потоки данных, цепи Маркова.

*V. A. Lahno*

### PROVISION OF INFORMATION SECURITY CORPORATE OF THE RAILWAYS

Lugansk National Agrarian University

In this paper we propose a new approach for solving the problems of corporate information security systems in rail transport. It provides for the integration of mathematical models of processing and data protection in the case of the scenario of an attack on a corporate network using multiple threads of applications.

*Keywords:* corporate information systems, information security, conflict streams, Markov chains.

Процесс реформирования железнодорожной отрасли в государствах СНГ выдвигает новые требования к информационным системам

(ИС), которые эксплуатируются на железнодорожном транспорте (ж/д), что влечет за собой пересмотр концепции и стратегии информати-

зации, изменение первоочередных задач при создании корпоративных информационных систем (КИС).

Следует отметить, что информационные технологии, развиваемые на ж/д транспорте, часто ориентированы на взаимодействие с системами других отраслей для сокращения задержек при транспортировке грузов. К таким системам относятся системы взаимодействия с клиентурой и партнерами, а также информационные комплексы по обслуживанию грузоотправителей, грузополучателей, грузоперевозчиков и т. п. Самыми последними разработками в области информатизации являются: системы «Пальма», «Сириус»; система «Этран», «Экспресс».

В последние годы во многих странах используется практика, когда в рамках государственных программ информатизации на транспорте, в частности железнодорожном [1, 2], создаются мультитехнологичные системы информационной безопасности (СИБ) для АСУ и АИС, интегрирующие нормативные, аппаратные и программные элементы защиты. Активное расширение областей информатизации транспортной отрасли, особенно в сегменте мобильных, распределенных и беспроводных технологий, сопровождается появлением новых угроз безопасности [2].

Функционирование подобных структур при соблюдении должного уровня информационной безопасности (ИБ) на ж/д транспорте поддерживается системами защиты информации (СЗИ).

При этом надежность информационных процессов (ИП) должна характеризоваться его соответствием некоторым эталонным моделям безопасной циркуляции информации в КИС типа «Экспресс». В связи с этим существует практическая проблема, состоящая в том, что подобное положение вещей лишь частично реализуется на практике и не находит прямого отражения в соответствующих стандартах на унифицированные архитектурные решения КИС ж/д транспорта, удовлетворяющие общепринятым эталонным моделям.

Причина лежит в принципиальных теоретических трудностях моделирования технологий обеспечения надежности и защиты ИП в КИС ж/д транспорта, возникающих при попытке соединить перспективный подход к обеспечению надежности и защиты ИП от НСД с гибкостью защитных механизмов.

Цель работы – моделирование защиты корпоративных информационных систем на железнодорожном транспорте в случае реализации сценария атаки на сеть с использованием нескольких конфликтных потоков заявок.

Проблема обеспечения безопасности КИС на ж/д транспорте усиливается отсутствием единой методической базы, позволяющей проводить адекватную оценку угроз информационным ресурсам, а также степени защищенности данных. В то же время вмешательство в национальные, региональные и муниципальные системы управления на ж/д транспорте для того, чтобы нарушить графики движения подвижного состава или подвергнуть опасности пассажиров – часто упоминаемая угроза для информационных атак злоумышленников [1–3].

Для формализованного описания ряда типовых угроз информации – программных атак – можно использовать аппарат сетей Петри–Маркова и цепей Маркова [3, 4].

Ограничение доступа к ресурсам КИС в определенные интервалы времени часто встречается в инфотелекоммуникационных сетях, когда между пользователем и сервером (или группой серверов) находится СЗИ (точнее ее аппаратная часть – супервизор). Она и определяет размеры временных интервалов, в течение которых пользователь имеет доступ к ресурсам.

В настоящий момент остается малоизученным вопрос моделирования систем обслуживания с переменной структурой, в том числе СЗИ, представляющих собой математические модели поведения объектов с входными потоками требований в условиях их конфликтности.

Опираясь на вышеприведенный анализ [3, 4] возможности моделирования атак на КИС и, соответственно СЗИ, функциональную схему системы можно представить следующим образом, см. рис. 1.

Входные потоки  $k_1, k_2, k_3$  формируются в некоторой случайной среде ( $CC$ ), состояние которой определяет вероятностную структуру этих потоков. Примем, что при состоянии  $c^{(0)}$  входные потоки представляют собой потоки типа Пуассона (ПП), а при  $c^{(1)}$  – потоки типа Бартлетта (ПБ).

Примем, что поток  $k_1$  – малоинтенсивный приоритетный поток заявок (данных); поток  $k_2$  – малоинтенсивный поток; поток  $k_3$  – приоритетный поток наибольшей интенсивности.

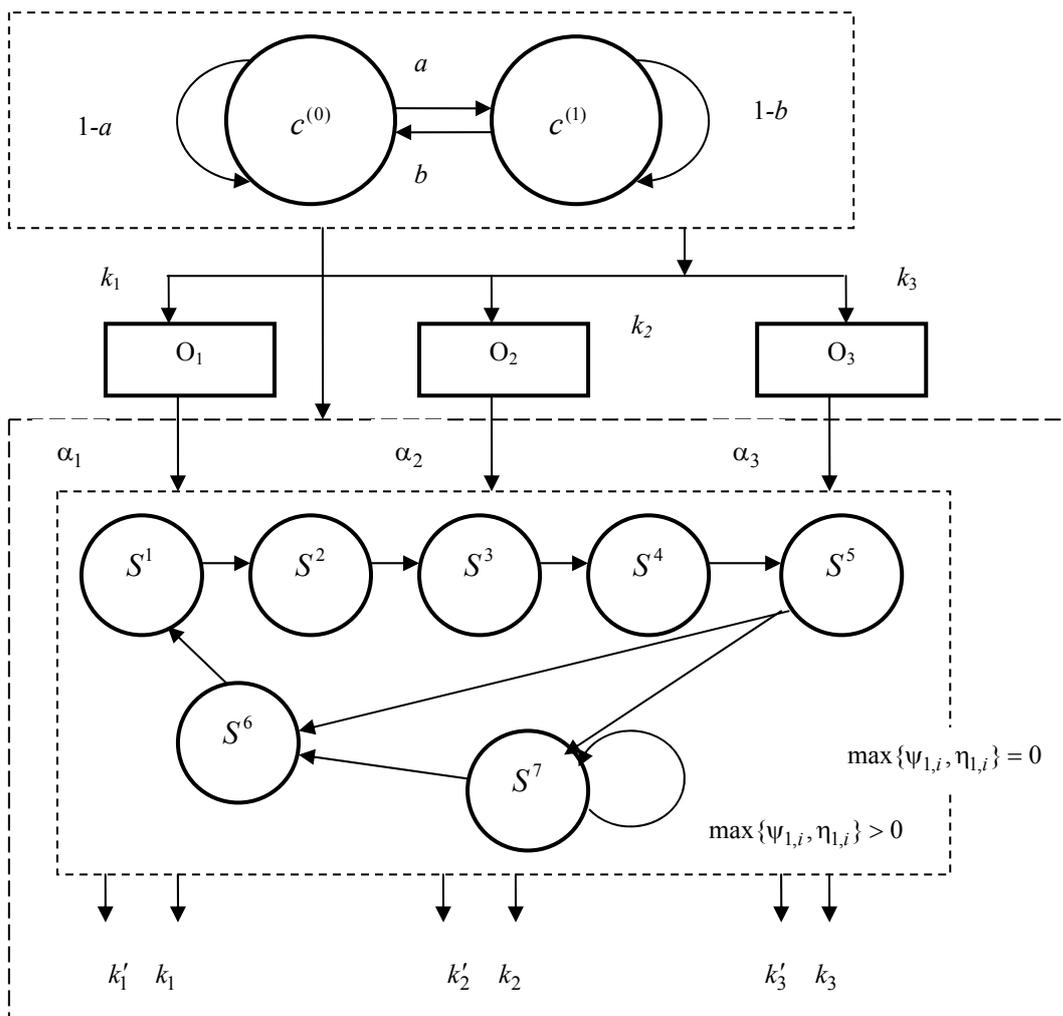


Рис. 1. Функциональная схема КИС с конфликтными заявками на обслуживание:  $S^1$  – начальное состояние входа в КИС;  $S^2$  – начало сканирования доступных ресурсов;  $S^3$  – ожидание ответа о наличии свободных ресурсов;  $S^4$  – подключение к имеющимся ресурсам;  $S^5$  – передача данных в КС;  $S^6$  – передача данных на доступные АРМ КИС;  $S^7$  – загрузка отправка запросов на серверы КИС

Информативность потока  $k_1$  означает, что в динамике работы системы учитывается наличие заявок в накопителе  $O_1$  и поступление требований по этому потоку. Его приоритетность – необходимость оперативного обслуживания поступающих требований. Приоритетность потока  $k_3$  означает, что при отсутствии требований по потоку  $k_1$  (разрыв) будет продолжено обслуживание по потоку  $k_3$ . В соответствии с этими соображениями организована работа обслуживающего устройства (ОУ), например сервер КИС), имеющего семь состояний  $S^{(r)}, r = \overline{1,7}$ , образующих множество  $S = \{S^{(r)} : r = \overline{1,7}\}$ . ОУ в состоянии  $S^{(r)}$  находится в течении времени  $\tau_r, r = \overline{1,7}$ . Обслуживающее устройство выпол-

няет функции по анализу и обслуживанию требований, управлению входными потоками, формированию очередей в накопителях и отбору требований из очередей с помощью некоторых стратегий обслуживания  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ . Состояние  $S^{(2j-1)}$  для  $j = 1, 2, 3$  обслуживающего устройства соответствует обслуживанию требований потока  $k_j$ . В состоянии  $S^{(2j)}$  для  $j = 1, 2, 3$  не обслуживаются требования ни одного из входных потоков. В состоянии  $S^{(7)}$  обслуживаются требования потока  $k_3$ . В соответствии с графом (см. рис. 4), при каждом  $r = 1, 2, 3, 4$  состояние  $S^{(r)}$  переходит в состояние  $S^{(r+1)}$ .

Выходные потоки при работе системы с максимальной загрузкой, когда по любому потоку всегда есть очередь, а ОУ работает без простоев, назовем потоками насыщения и обозначим

через  $k'_1, k'_2, k'_3$ . Реальные выходные потоки в системе будем обозначать как  $k_1, k_2, k_3$ .

Все анализируемые далее случайные объекты, применяемые при построении математической модели и связанные с процессом обслуживания заявок, будем задавать на некотором полном вероятностном пространстве  $(\Omega, A, P(\cdot))$  элементарных случайных событий  $\omega \in \Omega$  с вероятностной мерой  $P(A)$ . Для описания входных потоков заявок будем использовать нелокальный способ, т. е. нашему рассмотрению подлежит не конкретное требование, а весь поток заявок.

Произвольный входной поток  $k_j$  описывается векторной случайной последовательностью  $\{\{\tau_i, v_i, \eta_{j,i}\}; i \geq 0\}$ , где  $\eta_{j,i}$  – число заявок типа  $v_i$ , поступивших на промежутке времени  $[\tau_i, \tau_{i+1}]$  по этому потоку. Тип заявок определен меткой  $v_i$  (состоянием случайной среды). Поведение случайной среды для простоты будем описывать однородной Марковской последовательностью  $\{v_i; i \geq 0\}$  с двумя состояниями  $c^{(0)}$  – поток заявок с малой интенсивностью;  $c^{(1)}$  – большой поток заявок и вероятностями перехода  $a, b$   $0 \leq a < b \ll 1$ . Такие ограничения означают, что смена интенсивности потока происходит редко, и что обычный режим работы с малоинтенсивным потоком заявок бывает чаще чем поток с большим количеством запросов. Подобные выводы позволяют считать, что за время  $\tau_r$ , когда ОУ пребывает

в состоянии  $S^{(r)}$ , интенсивность запросов не меняется.

Известно, что случайные элементы  $v_i; i \geq 0$  связаны соотношением  $v_{i+1} = \phi_i(v_i, \omega_i)$ , где  $\phi_i$  – некоторые измеримые отображения пространства  $\{c^{(0)}, c^{(1)}\} \cdot \{0, 1\}$  на  $\{c^{(0)}, c^{(1)}\}$ ;  $\{\omega_i; i \geq 0\}$  – последовательность независимых случайных величин с некоторым распределением, в нашем случае, равномерным на интервале  $(0, 1)$ .

В соответствии со структурой анализируемой системы с входными конфликтными потоками требований (данных), наибольший интерес представляет исследование процессов обслуживания по потокам  $k_1$  и  $k_3$ . Обозначим через  $\psi_{j,i}$  длину очереди в накопителе  $O_j$  по потоку  $k_i$  в момент  $\tau_i; i \geq 0, j = 1, 2, 3$ .

Последовательность  $\{(S_i, v_i, \psi_i); i \geq 0\}$  будет Марковской, если выполнено равенство

$$P(S_{i+1} = S^{(r)}, v_{i+1} = c^{(s)}, \psi_{i+1} = x_{i+1} | A) = \\ = P(S_{i+1} = S^{(r)}, v_{i+1} = c^{(s)}, \psi_{i+1} = x_{i+1} | B),$$

где  $A = \{\omega: S_k = S^{(r_k)}, v_k = c^{(s_k)}, \psi_k = x_k; 0 \leq k \leq i\}$ ;

$$B = \{\omega: S_i = S^{(r_i)}, v_i = c^{(s_i)}, \psi_i = x_i\}.$$

Применяя формулу полной вероятности и принятые в данной модели основные свойства ее случайных элементов, получим (с некоторыми сокращениями в выкладках результата):

$$P \left( S_{i+1} = S^{(r)}, v_{i+1} = c^{(s)}, \psi_{i+1} = x_{i+1} | A \right) = \\ = \sum_{y_1, y_2, y_3=0}^{\infty} \sum_{z_1, z_2, z_3=0}^{\infty} P \left( S_{i+1} = S^{(r)}, v_{i+1} = c^{(s)}, \psi_{i+1} = x_{i+1}, \eta_i = (y_1, y_2, y_3), \zeta_i = (z_1, z_2, z_3) | A \right) = \\ = \sum_{y_1, y_2, y_3=0}^{\infty} \sum_{z_1, z_2, z_3=0}^{\infty} \left[ \begin{array}{l} P \left( \eta_i = (y_1, y_2, y_3) | S_{i+1} = S^{(r_i)}, v_{i+1} = c^{(s_i)} \right) \cdot \\ \cdot P \left( \zeta_i = (z_1, z_2, z_3) | S_{i+1} = S^{(r_i)}, v_{i+1} = c^{(s_i)} \right) \cdot \\ \cdot P \left( u \left( S^{(r_i)}, x_{1,i}, y_1 \right) = S^{(r)} \right) \cdot P \left( \phi_i \left( c^{(s_i)}, \omega_i \right) = c^{(s)} \right) \cdot \\ \cdot P \left( \max \left\{ x_{j,i} + y_j - z_j, 0 \right\} = x_{j,i+1}; j = \overline{1,3} \right) \end{array} \right].$$

Для правой части доказываемого равенства, из тех же соображений, получим

$$\begin{aligned}
 & P\left(S_{i+1} = S^{(r)}, v_{i+1} = c^{(s)}, \psi_{i+1} = x_{i+1} \mid B\right) = \\
 & = \sum_{y_1, y_2, y_3=0}^{\infty} \sum_{z_1, z_2, z_3=0}^{\infty} P\left(S_{i+1} = S^{(r)}, v_{i+1} = c^{(s)}, \psi_{i+1} = x_{i+1}, \eta_i = (y_1, y_2, y_3), \zeta_i = (z_1, z_2, z_3) \mid B\right) = \\
 & = \sum_{y_1, y_2, y_3=0}^{\infty} \sum_{z_1, z_2, z_3=0}^{\infty} \left[ \begin{aligned} & P\left(\eta_i = (y_1, y_2, y_3) \mid S_{i+1} = S^{(r_i)}, v_{i+1} = c^{(s_i)}\right) \cdot \\ & \cdot P\left(\zeta_i = (z_1, z_2, z_3) \mid S_{i+1} = S^{(r_i)}, v_{i+1} = c^{(s_i)}\right) \cdot \\ & \cdot P\left(u\left(S^{(r_i)}, x_{1,i}, y_1\right) = S^{(r)}\right) \cdot P\left(\phi_i\left(c^{(s_i)}, \omega_i\right) = c^{(s)}\right) \cdot \\ & \cdot P\left(\max\left\{x_{j,i} + y_j - z_j, 0\right\} = x_{j,i+1}; j = \overline{1,3}\right) \end{aligned} \right].
 \end{aligned}$$

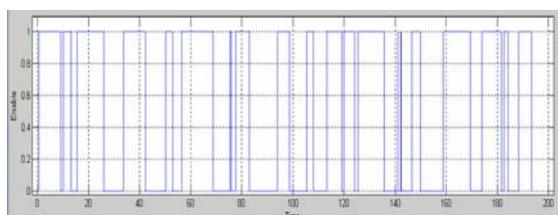
Основываясь на ранее полученных зависимостях, нетрудно получить следующие, рекуррентные по  $i \geq 0$  соотношения для этих последовательностей:

$$\begin{aligned}
 (S_{i+1}, v_{i+1}, \psi_{1,i+1}) &= \left( u(S_i, \psi_{1,i}, \eta_{1,i}), \Theta_i(v_i, \omega_i), \right. \\
 & \left. \max\{\psi_{1,i} + \eta_{1,i} - \zeta_{1,i}, 0\} \right), \\
 (S_{i+1}, v_{i+1}, \psi_{1,i+1}, \psi_{3,i}) &= \left( u(S_i, \psi_{1,i}, \eta_{1,i}), \Theta_i(v_i, \omega_i), \right. \\
 & \left. \max\{\psi_{1,i} + \eta_{1,i} - \zeta_{1,i}, 0\}, \right. \\
 & \left. \max\{\psi_{3,i} + \eta_{3,i} - \zeta_{3,i}, 0\} \right).
 \end{aligned}$$

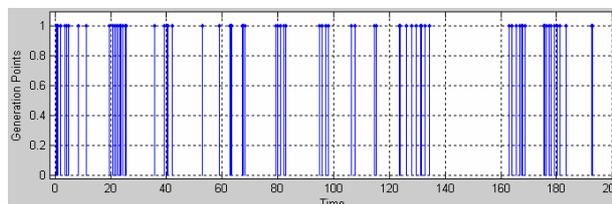
Заметим что исследование последовательностей  $((S_i, v_i, \psi_i); i \geq 0)$  и  $((S_i, v_i, \psi_{1,i}, \psi_{2,i}); i \geq 0)$  проводится аналогично.

Полученные выражения были реализованы в среде MatLab 7/2009 и Simulink. В ходе моделирования программно изменялось количество заявок для КИС на обслуживание в диапазоне от 10 до 100 000 и соответственно режимы (закон) распределения поступления заявок – по ПП (обычный режим работы КИС) и ПБ (конфликтный поток заявок, созданный в результате информационной атаки).

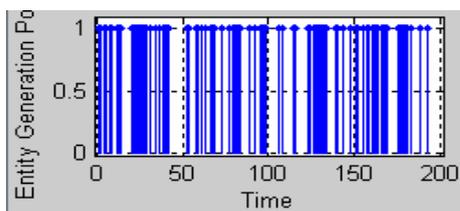
Полученные в ходе исследований зависимости показаны на рис. 2. Как видно из графиков (рис. 2, а, б), при обычных режимах функционирования сервера АС, т. е. при показательном законе распределения потока заявок (поток Пуассона), время обслуживания заявки варьируется в допустимых пределах и очередь не возникает.



а



б



в

Рис. 2. Зависимость распределения точек доступа заявки на обслуживание в АИС ПП от времени и длины очереди: а – распределение потока заявок по показательному закону (поток Пуассона)  $10 < k_1 < 100$ ; б – распределение потока заявок по показательному закону (поток Пуассона)  $10 < k_1 < 100$  и  $100 < k_2 < 200$ ; в – распределение конфликтного потока (поток Барлетта)  $10 < k_1 < 100$ ,  $100 < k_2 < 200$  и  $1000 < k_3 < 100\ 000$

Однако если в результате воздействия на очередь в ней выделяются приоритетные потоки (рис. 2, в), ситуация коренным образом изменяется. Например, злоумышленнику, вошедшему в реальную КИС, удалось создать несколько интенсивных входных потоков. Тогда, во-первых, невозможно суммировать некоторые потоки заявок и свести задачу к одномерному случаю; во-вторых, обслуживание заявок конфликтных потоков осуществляется в пересекающиеся интервалы времени; в-третьих, существуют интервалы недоступности, в течение которых потоки не обслуживаются вследствие использования СЗИ.

**Выводы.** Таким образом, процесс реализации угрозы КИС представляет собой последовательность перемещений, реализуемых в виде полушагов по цепи Маркова. При этом цепь пребывает в каждом состоянии некоторое случайное время, определенное соответствующей этому состоянию плотностью распределения

вероятности для случайного времени пребывания, и затем выполняется шаг и проверка логических условий переключения цепи в следующее состояние. Последовательность состояний цепи (графа атаки) и будет траекторией моделируемого процесса для КИС.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ададулов, С. Е.* Средства защиты информации на железнодорожном транспорте / С. Е. Ададулов. – М.: Маршрут, 2006. – 206 с.
2. *Корниенко, А.А.* Информационная безопасность и защита информации на железнодорожном транспорте / А. А. Корниенко. – М.: УМЦ ИСТ, 2013. – 156 с.
3. *Лахно, В. А.* Имитационное моделирование систем защиты информации предприятия в MATLAB 7/2009 и SIMULINK / В. А. Лахно, А. С. Петров // Современная специальная техника. – 2010. – № 3(22). – С. 63–73.
4. *Тихоненко, О. М.* Модели массового обслуживания в информационных системах / О. М. Тихоненко. – Минск: Технопринт, 2003. – 237 с.

## РОБОТОТЕХНИКА

УДК 681.51, 004.31, 004.4

*В. А. Егунов, О. А. Абед*

### СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ С ПОМОЩЬЮ РЕЧЕВЫХ КОМАНД

Волгоградский государственный технический университет

vegunov@mail.ru

Работа посвящена разработке интерфейса управления системой мобильных роботов с использованием речевых команд. Авторами сформулированы основные задачи, необходимые для создания подобного интерфейса, определены основные требования к нему, описывается вариант решения данной задачи.

*Ключевые слова:* мобильный робот, речевые команды, система управления роботом.

*V. A. Egunov, O. A. Abed*

### MOBILE ROBOT SYSTEM CONTROL BY VOICE COMMANDS

Volgograd State Technical University

Developing the interface of mobile robot using voice commands is discussed. Basic tasks required to create a similar interface, the basic requirements for it are formulated, described solution to this problem.

*Keywords:* mobile robot, voice commands, a robot control system.

Распознавание человеческой речи является одной из сложных научно-технических задач. Проблема реализации речевого диалога человека и технических средств – актуальная задача современной кибернетики. Задача машинного распознавания речи привлекает внимание специалистов уже очень давно. В настоящее время пользователями вычислительных машин и средств, оснащенных вычислительными машинами, становятся люди, не являющиеся специалистами в области программирования. Проблема речевого управления актуальна, кроме того, в связи с тем, что в ряде случаев речь является единственно возможным средством общения с техникой (в условиях перегрузок, темноты, резкого изменения освещенности, при невозможности использования ручного управления, чрезвычайной сосредоточенности внимания на объекте, который не позволяет отвлечься и т. д.), а также в связи с невозможностью использования других вариантов управления (например, беспроводного канала связи [1]).

Для управления мобильным роботом не требуется полного решения задачи распознавания речи, достаточно нескольких голосовых команд. Однако при реализации данной задачи

необходимо решить несколько технических проблем. Первую можно сформулировать следующим образом: «Где осуществлять распознавание речевых команд?».

Первый вариант очевиден. Распознавание необходимо осуществлять средствами устройства управления самим мобильным роботом. Данный вариант является очевидным, однако, не лишенным ряда недостатков.

В общем случае данная задача является вычислительно сложной и предъявляет высокие требования к производительности центрального вычислительного узла мобильного робота [2]. Кроме того, если в системе присутствуют несколько мобильных роботов, каждый из них должен быть оснащен микрофоном и каким-то вариантом звуковой карты, оцифровывающей звук. Все это также ведет к усложнению оборудования, которое несет на своем борту каждый мобильный робот.

Второй недостаток связан с условиями, в которых будет эксплуатироваться данная система. Выше было сказано, что одним из возможных применений речевого управления могут являться некоторые чрезвычайные ситуации, в которых руки оператора могут быть заняты, и ре-

ческое управление может являться одной из немногих доступных альтернатив для управления мобильными роботами. В данной ситуации роботы могут работать в условиях сильного шума, что сильно затруднит как распознавание команд, так и доставит оператору массу неудобств. А в некоторых случаях подобное управление может стать и вовсе невозможным из-за сильного постороннего шума работающих машин и механизмов.

Второй вариант заключается в следующем. Оператор оснащен гарнитурным микрофоном, который соединен с некоторым переносным устройством, которое назовем пультом управления. Это может быть планшет, смартфон. Распознавание команд осуществляется в пульте управления, который затем транслирует команды мобильным роботам с использованием беспроводного канала связи (Bluetooth, Wi-Fi и др.). Данный подход избавлен от обоих приведенных выше недостатков. Во-первых, распознавание производится централизованно, что снимает повышенные требования к производительности систем управления мобильными роботами, отпадает необходимость встраивать в них микрофоны и звуковые карты. Во-вторых, серьезно снижается влияние шума. Полностью от него, конечно, избавиться не получится, однако, данный вариант сильно упрощает задачу фильтрации входного сигнала.

Теперь задача построения системы, включающей несколько мобильных роботов, управляемых голосовыми командами, распадается на две задачи:

- распознавание речевых команд в пульте управления;
- организация беспроводной связи с мобильными роботами для трансляции команд и передачи служебной информации.

Для решения задачи голосового управления были разработаны функциональные требования к системе управления и введены следующие ограничения на задачу распознавания речи:

- управление голосовыми командами, представляющими из себя отдельные короткие слова;
- небольшой набор команд (10–20 команд), который достаточен для управления во встраиваемых системах и мобильных роботах;

– фильтрация входного сигнала от собственных шумов.

При разработке программы распознавания речевых команд был применен метод, основанный на использовании дискретных вейвлет-преобразований Добеши. При этом осуществляется вычисление степени корреляции между рядами, образованными с помощью команды, поступившей от оператора и сохраненными ранее командами; вычисляются характеристики звукового сигнала, такие как кратковременная энергия сигнала, число нулей интенсивности. На основе полученных данных принимается решение о том, какая команда поступила и является ли звуковой фрагмент одной из команд.

Так как в общем случае система может включать несколько мобильных роботов, команды делятся на две группы:

- адрес;
- команды управления.

Под адресом здесь понимается голосовая команда, однозначно идентифицирующая конкретный мобильный робот, например, «Первый». Допускаются также широковещательные адреса, например, «Все». Команды управления – команды, задающие некоторое действие, выполняемое роботом, например, «Вперед».

Авторами было выполнено прототипирование описанной системы. В качестве пульта управления был использован персональный компьютер под управлением Windows 7, для которого была разработана программа на языке C#. Производится перенос функций пульта управления на смартфон под управлением Windows Phone 7. В качестве устройства управления мобильными роботами в прототипе решено использовать Raspberry Pi; связь осуществляется с помощью Bluetooth.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Егунов, В. А. Трехуровневая архитектура мобильных робототехнических комплексов / В. А. Егунов, М. И. Потапов // 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. 159–161.
2. Egunov, V. A. Robotic Complex Central Processing Node Performance Requirements Assessment / Egunov V. A., Kirnosenko S. I., Andreev A. E. // World Applied Sciences Journal (WASJ). – 2013. – Vol. 24, Spec. Issue 24 : Information Technologies in Modern Industry, Education & Society. – Pp. 37–42.

Научное издание

**ИЗВЕСТИЯ**  
**Волгоградского государственного технического университета**  
**№ 6 (133), 2014 г.**

Серия «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ  
И ИНФОРМАТИКИ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»  
Выпуск 20

*Межвузовский сборник научных статей*

Редактор *Л. Н. Рыжих*  
Компьютерная верстка *Е. В. Макаровой*

Темплан 2014 г. (научные издания). Поз. № 13н.  
Подписано в печать 23.04.2014. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.  
Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл. печ. л. 16,28. Уч.-изд. л. 16,21.  
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.

## 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 *a*, *b*, 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.