

Главный редактор научного журнала  
«Известия Волгоградского государственного технического университета»  
академик РАН, профессор, доктор химических наук,  
президент Волгоградского государственного технического университета (ВолгГТУ)  
*И. А. НОВАКОВ*

**Редакционная коллегия:**

*Байбурин В. Б.*, д-р физ.-мат. наук, проф., академик РАЕН, засл. деятель науки РФ, Саратовский государственный технический университет (г. Саратов, Россия)  
*Безъязычный В. Ф.*, д-р техн. наук, проф., Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П. А. Соловьева (г. Рыбинск, Россия)  
*Бодров В. Н.*, д-р, проф., Университет прикладных наук (г. Берлин, Германия)  
*Бребельс А.*, PhD, доцент факультета инженерных наук университета г. Левена (г. Левен, Бельгия)  
*Буренин А. А.*, чл.-корр. РАН, Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН (г. Комсомольск-на-Амуре, Россия)  
*Голованчиков А. Б.*, д-р. техн. наук, проф. ВолгГТУ  
*Гринберг Б. А.*, д-р физ.-мат. наук, Институт физики металлов УрО РАН (г. Екатеринбург, Россия)  
*Гуревич Л. М.*, д-р техн. наук, доцент ВолгГТУ  
*Добрушин Л. Д.*, д-р техн. наук, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины (г. Киев, Украина)  
*Злотин С. Г.*, д-р хим. наук, проф., Институт органической химии им. Н. Д. Зелинского РАН (г. Москва, Россия)  
*Иванов А. М.*, д-р техн. наук, проф., Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ, г. Москва, Россия)  
*Иващенко Н. А.*, д-р техн. наук, профессор, засл. деятель науки РФ, МВТУ им. Н. Э. Баумана (г. Москва, Россия)  
*Королев А. В.*, д-р техн. наук, проф., Саратовский государственный технический университет (г. Саратов, Россия)  
*Кузьмин С. В.*, д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ  
*Кураев А. А.*, д-р физ.-мат. наук, проф., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР, г. Минск, Республика Беларусь)  
*Лысак В. И.*, академик РАН, засл. деятель науки РФ, д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ  
*Марков В. А.*, д-р техн. наук, проф., Московский государственный технический университет МГТУ им. Н. Э. Баумана (МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва, Россия)  
*Мертен Клеменс*, д-р техн. наук, проф. Universität Stuttgart Institut für Chemische Verfahrenstechnik (г. Штутгарт, Германия)  
*Навроцкий А. В.*, д-р хим. наук, проф. ВолгГТУ  
*Нижегородцев Р. М.*, д-р экон. наук, главный научный сотрудник, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН (г. Москва, Россия)  
*Пай В. В.*, д-р физ.-мат. наук, Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН (г. Новосибирск, Россия)  
*Поляничков Ю. Н.*, д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ  
*Пустовойт В. Н.*, д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ, Донской государственный технический университет (г. Ростов-на-Дону, Россия)  
*Русинов В. Л.*, чл.-корр. РАН, Химико-технологический институт Уральского федерального университета (ХТИ УрФУ, г. Екатеринбург, Россия)  
*Рыбин В. В.*, чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., Санкт-Петербургский политехнический университет (г. Санкт-Петербург, Россия)  
*Трюэль Жан-Луи*, д-р экон. наук, проф., Университет «Париж-12», Сорбонна, Франция, вице-президент Международного клуба экономистов «Круг Кондратьева»  
*Тхай Куанг Винь*, д-р философии, Институт информационных технологий (г. Ханой, Вьетнам)  
*Федянов Е. А.*, д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ  
*Фролов В. А.*, д-р техн. наук, проф., «МАТИ – Российский государственный технологический университет им. К. Э. Циолковского (г. Москва, Россия)  
*Шарипов В. М.*, д-р техн. наук, проф., Московский государственный технический университет (МАМИ, г. Москва, Россия)  
*Шаховская Л. С.*, д-р экон. наук, проф. ВолгГТУ  
*Шейн А. Г.*, д-р физ.-мат. наук, проф. ВолгГТУ  
*Щербаков М. В.*, д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ

**Серия**

«АКТУАЛЬНЫЕ  
ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ,  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ  
И ИНФОРМАТИКИ  
В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»

# ИЗВЕСТИЯ



**ВОЛГОГРАДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

*Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней*

**РЕДАКЦИОННЫЙ  
СОВЕТ:**

Председатель

*Щербаков М. В.*, д.т.н., проф.

*Аверченков В. И.*, д.т.н., проф.  
(БрГТУ, г. Брянск, Россия)

*Бериадский А. М.*, д.т.н., проф.  
(ПензГУ, г. Пенза, Россия)

*Брискин Е. С.*, д.ф.-м.н., проф.

*Горобоцов А. С.*, д.т.н., проф.

*Дворянкин А. М.*, д.т.н., проф.

*Заболеева-Зотова А. В.*, д.т.н.,  
проф.

*Кравец А. Г.*, д.т.н., проф.

*Курейчик В. М.*, д.т.н., проф.  
(ТаГРТУ, г. Таганрог, Россия)

*Петрова И. Ю.*, д.т.н., проф.  
(АИСИ, г. Астрахань, Россия)

*Проталинский О. М.*, д.т.н., проф.  
(АстрГТУ, г. Астрахань, Россия)

*Тхай Куанг Винь*, д-р философии  
(Институт информационных  
технологий, г. Ханой, Вьетнам)

*Фоменков С. А.*, д.т.н., проф.

*Шилин А. Н.*, д.т.н., проф.

*Юрген Баст*, д.т.н., проф.  
(Технический университет Горной  
Академии, г. Фрайберг, Германия)

Международный индекс журнала  
ISSN 1990-5297

Журнал распространяется  
по подписке.

Индекс журнала по каталогу  
Агентства «Роспечать»  
для Российской Федерации –  
80811(ОК+ЭК). По вопросам  
подписки обращаться  
в издательство.

**Тел. издательства ВолГТУ:**

(8442) 24-84-06

Факс (8442) 24-84-06

otr@vstu.ru

Научный журнал  
Издается с января 2004 г.  
Выходит двенадцать раз в год

**№ 14 (209)**  
**Декабрь**  
**2017**

**УЧРЕДИТЕЛЬ:**

**ФГБОУ высшего образования  
«Волгоградский государственный технический университет»**

**Адрес редакции:**

Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28.

Телефон: гл. редактор – (8442) 24-80-00

**E-mail:** president@vstu.ru

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77–61113 от 19 марта 2015 г.

Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Волгоградского государственного технического университета

**Авторское право на журнал в целом принадлежит Учредителю,  
на отдельные статьи – сохраняется за автором**

*Перепечатка из журнала «Известия Волгоградского государственного технического  
университета» категорически запрещена без оформления договора  
в соответствии с действующим законодательством РФ*

*При перепечатке материалов ссылка на журнал «Известия Волгоградского  
государственного технического университета» обязательна*

© Волгоградский государственный технический университет,  
«Известия Волгоградского государственного технического университета», 2017

Head Editor of the scientific journal "Izvestiya VSTU":

**Novakov I. A.** – Academician of RAS, Prof., Doctor of Chemistry, President of VSTU

### **Editorial board:**

*Baiburin V. B.*, D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Prof., Academician of RAS, Honored Scientist of the Russian Federation, State Technical University of Saratov (Saratov, Russia)

*Bezyazychny V. F.*, D. Sc. (Engineering), Prof., Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solovyov (Rybinsk, Russia)

*Bodrov V. N.*, D. Sc., Prof., University of Applied Sciences (Berlin, Germany)

*Brebels A.*, PhD, Associate Prof., Faculty of Engineering Science of University of Leuven (Leuven, Belgium)

*Burenin A. A.*, Corresponding Member of RAS, Institute of Machinery and Metallurgy of the FEB RAS (Komsomolsk-on-Amur, Russia)

*Golovanchikov A. B.*, D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU

*Grinberg B. A.*, D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Institute of Metal Physics, Ural Division of RAS (Ekaterinburg, Russia)

*Gurevich L. M.*, D. Sc. (Engineering), Associate Prof. of VSTU

*Dobrushin L. D.*, D. Sc. (Engineering), E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kiev, Ukraine)

*Zlotin S. G.*, D. Sc. (Chemistry), Prof., N.D. Zelinsky Institute of Organic Chemistry Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)

*Ivanov A. M.*, D. Sc. (Engineering), Prof., Moscow Automobile and Road Construction University (MADI) (Moscow, Russia)

*Ivashchenko N. A.*, D. Sc. (Engineering), Prof., Honored Scientist of the Russian Federation, Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia)

*Korolev A. V.*, D. Sc., Prof., State Technical University of Saratov (Saratov, Russia)

*Kuzmin S.V.*, D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU

*Kurayev A. A.*, D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Prof., Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR) (Minsk, Republic of Belarus)

*Lysak V. I.*, Academician of RAS, Honored Scientist of the Russian Federation, D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU

*Markov V. A.*, D. Sc. (Engineering), Prof., Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia)

*Merten K.*, D. Sc. (Engineering), Prof., Institute of Chemical Process Engineering (Stuttgart, Germany)

*Navrotsky A. V.*, D. Sc. (Chemistry), Prof. of VSTU

*Nizhegorodtsev R. M.*, D. Sc. (Economy), Chief research worker, Institute of Control Sciences V. A. Trapeznikov Academy of Sciences (Moscow, Russia)

*Pai V. V.*, D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of SB RAS (Novosibirsk, Russia)

*Polyanchikov Y. N.*, D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU

*Pustovoit V. N.*, D. Sc. (Engineering), Prof., Honored Scientist of the Russian Federation, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russia)

*Rusinov V. L.*, Corresponding Member of RAS, Institute of Chemical Technology of Ural Federal University (Ekaterinburg, Russia)

*Rybin V. V.*, Corresponding Member of RAS, D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Prof., St. Petersburg Polytechnic University (St.Petersburg, Russia)

*Thai Quang Vinh*, D. Sc. (Philosophy), Institute of Information Technology (Hanoi, Vietnam)

*Truel J.-L.*, D. Sc. (Economy), Prof., University Paris Est Créteil, Sorbonne, France, Vice-president of International economists club "Kondratiev Circle"

*Fedyanov E. A.*, D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU

*Frolov V. A.*, D. Sc. (Engineering), Prof., "MATI Russian State Technological University named after K.E. Tsiolkovsky" (Moscow, Russia)

*Sharipov V. M.*, D. Sc. (Engineering), Prof., Moscow State Technical University "MAMI" (Moscow, Russia)

*Shakhovskaya L. S.*, D. Sc. (Economy), Prof. of VSTU

*Shcherbakov M. V.*, D. Sc. (Engineering), Prof. VSTU

*Sheyin A. G.*, D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Prof. of VSTU

SERIES "ACTUAL  
PROBLEMS  
OF MANAGEMENT,  
COMPUTING HARDWARE  
AND INFORMATICS  
IN ENGINEERING  
SYSTEMS"

# IZVESTIA



VOLGOGRAD STATE TECHNICAL  
UNIVERSITY

*The Journal is included to the list of peer-reviewed scientific journals and publications of the Higher Attestation Commission (HAC) of the RF for publishing of results of candidates for scientific degrees*

## Editorial board:

Chairman

**Shcherbakov M. V.**, D. Sc.  
(Engineering), Prof.

**Averchenkov V. I.**, D. Sc.  
(Engineering), Prof. (BSTU, Bryansk,  
Russia)

**Berdshadskiy A. M.**, D. Sc.  
(Engineering), Prof. (PSU, Penza,  
Russia)

**Briskin E. S.**, D. Sc. (Physical  
and Mathematical Sciences), Prof.  
**Gorobtsov A. S.**, D. Sc. (Engineering),  
Prof.

**Dvoryankin A. M.**, D. Sc.  
(Engineering), Prof.

**Zaboleeva-Zotova A. V.**, D. Sc.  
(Engineering), Prof.

**Kravets A. G.**, D. Sc. (Engineering)

**Kureytchik V. M.**, D. Sc.  
(Engineering), Prof. (TRTU,  
Taganrog, Russia)

**Petrova I. Y.**, D. Sc. (Engineering),  
Prof. (AICE, Astrakhan, Russia)

**Protalinskiy O. M.**, D. Sc.  
(Engineering), Prof. (ASTU,  
Astrakhan, Russia)

**Thai Quang Vinh**, D. Sc. (Philosophy),  
Institute of Information Technology  
(Hanoi, Vietnam)

**Fomenkov S. A.**, D. Sc. (Engineering),  
Prof.

**Shilin A. N.**, D. Sc. (Engineering), Prof.

**Jurgen Bast** D. Sc. (Engineering),  
Prof. (TU Bergakademie Freiberg,  
The University of Resources,  
Freiberg, Germany)

International index of the journal  
ISSN 1990-5297

The journal is distributed by subscrip-  
tion.

Index of the journal in the catalogue of  
the Agency "Rospechat" for the Rus-  
sian Federation – 80811(OK+ЭК).  
Concerning subscription turn to the  
editorial office.

**Tel. Of VSTU editorial office:**

(+7 8442) 24-84-06

Fax: (+7 8442) 24-84-06

otr@vstu.ru

Scientific journal

Published since January 2004

12 times a year

**№ 14 (209)**  
**December**  
**2017**

**FOUNDER:**

**FSBEI of Higher Education**  
**"Volgograd State Technical University"**

**Editorial office address:**

Volgograd, Lenin avenue, 28.

Tel.: Head Editor – (+7 8442) 24-80-00

**E-mail:** president@vstu.ru

The journal is registered at the Federal Service on Control in the Sphere of Communication,  
IT and Mass Communications (Roscomnadzor)

Registration certificate ПИ № ФС77–61113 of March 19, 2015

Is printed according to the decision of editorial-review board of  
Volgograd State Technical University

*The copyright for the journal in general belongs to the Founder,  
for separate articles – to authors.*

*Reprint from the journal "Izvestia VSTU" is strongly forbidden without conclusion of an  
agreement in accordance with the legislation of the RF  
When reprinting the materials, the citation to the journal "Izvestia VSTU" is obligatory*

## АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- |                        |                             |
|------------------------|-----------------------------|
| Аверченков В. И. 59    | Мустафаев Г. К. 30          |
| Астахов Д. А. 35       | Новиков А. Е. 18            |
| Белов А. Г. 47         | Парыгин Д. С. 41            |
| Бориско С. Н. 7        | Пеньшин И. С. 87            |
| Брискин Е. С. 11, 87   | Петрова Т. М. 41            |
| Бурлаков М. Е. 69      | Петросян М. К. 95           |
| Гаврилов А. Е. 90      | Побегайло П. А. 90          |
| Голованчиков А. Б. 18  | Приходько А. А. 11          |
| Горбов И. А. 105, 111  | Селюнин Д. М. 90            |
| Догадин Н. Б. 75       | Симонов А. Б. 54            |
| Донченко Д. С. 41      | Симонова И. Э. 54           |
| Дегтяренко Д. Р. 41    | Скоробогатченко Д. А. 24    |
| Егунов В. А. 95        | Смелягин А. И. 11           |
| Зеленский И. С. 41     | Смирная Л. Д. 87            |
| Капитанов А. В. 64     | Сорокин А. А. 79            |
| Катаев А. В. 35        | Старусев А. В. 30           |
| Кобышев В. А. 100      | Степанова П. Ю. 24          |
| Козловцева Н. В. 64    | Тарасова И. А. 54           |
| Кравец А. Г. 47        | Твердохлебов С. А. 105, 111 |
| Крылов Е. Г. 64        | Филимонов М. И. 18          |
| Ламскова М. И. 18      | Хантимирова С. Б. 90        |
| Леонард А. В. 105, 111 | Шапошникова Н. И. 79        |
| Лобейко В. И. 30       | Шаронов Н. Г. 87            |
| Мишта В. П. 54         | Швецов Я. А. 59             |
| Мишустин О. А. 90      | Яковлев А. А. 64            |

## СОДЕРЖАНИЕ

---

### Часть I. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

<i>Бориско С. Н.</i> Метод выделения объектов по траекториям их поведения.....	7
<i>Брискин Е. С., Приходько А. А., Смелягин А. И.</i> О математическом моделировании динамики планетарного возвратно-вращательного перемешивающего устройства.....	11
<i>Голованчиков А. Б., Ламскова М. И., Филимонов М. И., Новиков А. Е.</i> Моделирование процесса разделения дисперсных жидкостей в гидроциклоне с учетом геометрического и гидродинамического подобия....	18
<i>Скоробогатченко Д. А., Степанова П. Ю.</i> Применение искусственных нейронных сетей при краткосрочном прогнозировании уровня загрузки городских автомобильных дорог.....	24
<i>Старусев А. В., Лобейко В. И., Мустафаев Г. К.</i> Метод оценки имитационной модели сложной технической системы с помощью конструктивных критериев.....	30

### Часть II. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

<i>Астахов Д. А., Катаев А. В.</i> Распознавание эмоций с использованием алгоритмов машинного обучения.....	35
<i>Зеленский И. С., Донченко Д. С., Парыгин Д. С., Дегтяренко Д. Р., Петрова Т. М.</i> Извлечение структурированного описания объектов недвижимости из пользовательских записей на естественном языке.....	41

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

<i>Белов А. Г., Кравец А. Г.</i> Структурно-функциональная модель автоматизированной системы управления эффективностью предприятия.....	47
<i>Симонова И. Э., Симонов А. Б., Тарасова И. А., Мишта В. П.</i> Применение статистических методов к задачам управления региональными предприятиями.....	54
<i>Швецов Я. А., Аверченков В. И.</i> Исследование процессов передачи, обработки и хранения информации о котировках фондовой биржи.....	59

### Часть IV. АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

<i>Яковлев А. А., Крылов Е. Г., Козловцева Н. В., Капитанов А. В.</i> Поиск оптимальных технологических решений в условиях недетерминированной информации в гибких производственных системах.....	64
---	----

### Часть V. ПОСТРОЕНИЕ СЕТЕЙ И ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

<i>Бурлаков М. Е.</i> Исследование динамики публикаций уязвимостей с использованием открытых и закрытых источников данных.....	69
<i>Догадин Н. Б.</i> Применение устройств мобильной связи для инструментального контроля границы санитарно-защитной зоны базовой станции сети WI-FI.....	75
<i>Сорокин А. А., Шапошникова Н. И.</i> Методика оценки состояния базовых станций сетей мобильной связи.....	79

## Часть VI. РОБОТОТЕХНИКА

<i>Брискин Е. С., Пеньшин И. С., Смирная Л. Д., Шаронов Н. Г.</i> Определение усилий в движителях якорно-тросового типа.....	87
<i>Гаврилов А. Е., Хантимирова С. Б., Мишустин О. А., Побегайло П. А., Селюнин Д. М.</i> Универсальная шагающая инсектоморфная платформа «АГ» с экскаваторным модулем.....	90
<i>Егунов В. А., Петросян М. К.</i> Разработка системы управления мобильного робота-гексапода на базе датчиков инерциальной навигации.....	95
<i>Кобышев В. А.</i> Качественное исследование динамической системы с тремя особыми точками.....	100
<i>Леонард А. В., Горбов И. А., Твердохлебов С. А.</i> Синтез законов движения наземным роботом при обходе стационарного препятствия.....	105
<i>Леонард А. В., Твердохлебов С. А., Горбов И. А.</i> Синтез рационального управления манипуляционной системы с дублированными линейными приводами.....	111
К сведению авторов.....	119

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

УДК 681.3.001.005: 167/168: 681.518

*С. Н. Бориско*

## МЕТОД ВЫДЕЛЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ПО ТРАЕКТОРИЯМ ИХ ПОВЕДЕНИЯ

Астраханский государственный университет

boris62ko@gmail.com

Предлагается метод выявления факта изменения поведения динамического объекта с использованием траекторий типа синус-спиралей. Синтезированный алгоритм использует инварианты, характеризующие разные типы синус-спиралей.

*Ключевые слова:* автоматизированная система управления, алгоритм, вид движения, динамический объект, траектория.

*S. N. Borisko*

## OBJECTS DEFINITION METHOD ALONG THEIR BEHAVIOUR TRAJECTORY

Astrakhan State University

A method of dynamic object behavior modification detecting with the use of sinusoidal spiral type route. Synthesized algorithm implements some invariants characterizing different sinusoidal spirals types.

*Keywords:* automated control system, algorithm, movement type, dynamic object, route.

При обработке информации о динамических объектах (ДО) в процессе их сопровождения (вторичная обработка) обнаружение начала и конца криволинейного движения (маневра) занимает одно из ключевых мест, так как это связано с изменением модели наблюдаемого процесса и модели ошибок измерительных средств. Это особенно важно для алгоритмов сопровождения ДО, использующих изменение своих параметров без изменения своей структуры.

Литература по решению задачи обнаружения маневра (отклонения от направления прямолинейного движения) достаточно обширна, например [1, 2]. Как правило, в этих работах обнаружение маневра требует априорных знаний о среднеквадратических ошибках измерительных средств (ИС), а модель движения ДО аппроксимируется полиномом второй степени с некоторым законом распределения ускорения.

Одним из источников обнаружения и сопровождения объектов в пространстве являются радиолокационные средства, измеряющие местонахождение ДО в полярной системе ко-

ординат ( $R, \beta$ ) и пересчитывающие в прямоугольную систему координат ( $X, Y$ ), в которой осуществляется дальнейшее сопровождение ДО. Кроме этого, отдельные типы ИС дополнительно измеряют  $\dot{R}$  (радиальную скорость).

Предположим, что модель движения отдельного ДО является детерминированным, но неизвестным процессом, состоящим из участков разных типов траекторий ( $S_j$ ), представляющих прямолинейное или криволинейное движение, где  $j$  – номер участка траектории. В общем случае, длительность криволинейных участков ( $S_j^k$ ) по времени значительно меньше суммарной длительности отрезков прямолинейных участков ( $S_j^p$ ).

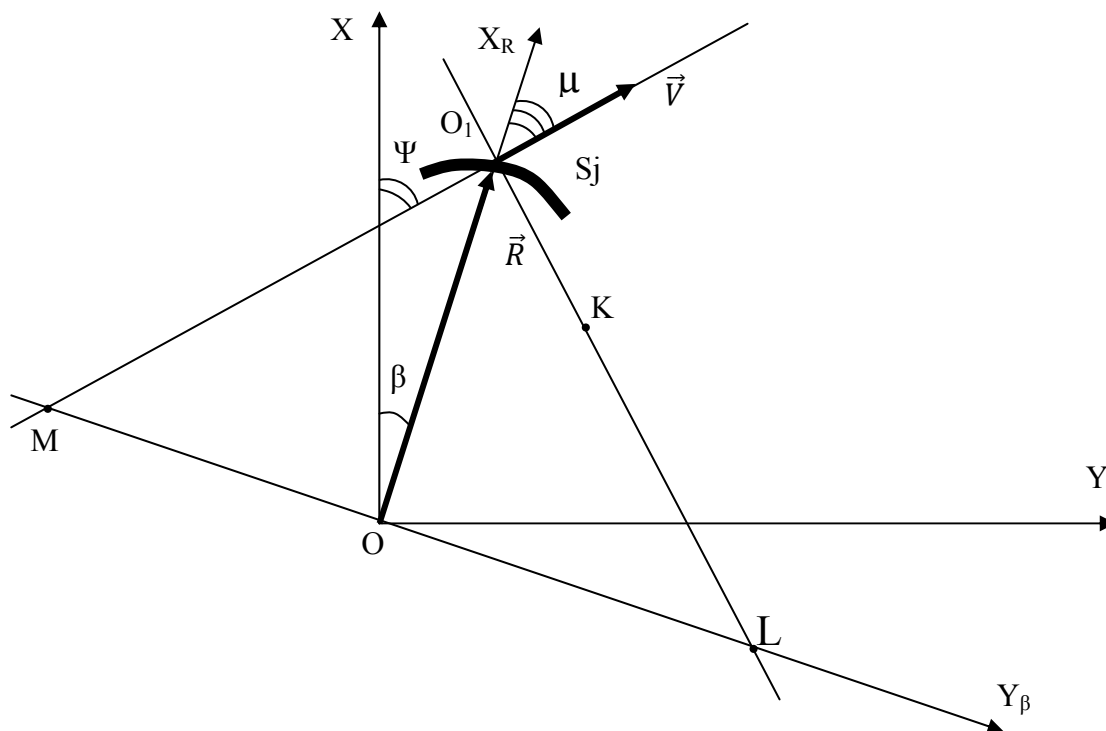
Смежные участки движения ДО имеют общую точку, удовлетворяющую разным траекториям движения, и эта точка из-за дискретности измерительного процесса не может быть обнаружена точно. Кривая, которая в общей точке изменяет вид траектории (принятая и истинная при совершении ДО маневра модель движения), является соприкасающейся.



Синтезированный алгоритм сопровождения ДО, предназначенный для автоматизированной системы управления, должен оценивать параметры  $S_i^p$  или  $S_i^k$  на текущий момент времени, а значение конкретного типа траектории необходимо определить для экстраполяции на ограниченные интервалы времени. Поэтому, чтобы обеспечить непрерывность сопровождения трассы ДО, для алгоритмов, использующих изменение параметров, необходимо выявить момент смены прямолинейной траектории  $S_i^p$  на  $S_i^k$  и наоборот, а также зафиксировать сам факт смены вида движения. Исходя из этого, обнаружение маневра проводится на этапе вторичной обработки радиолокационной информации в системе координат, в которой происходит измерение параметров тра-

екторий ДО, а не в центрах обработки информации (ЦОИ) более высокого уровня.

Если между оцениваемыми векторами положения (координаты), скорости и ускорения имеются какие-то дополнительные соотношения, то их можно использовать для определения конкретного характера движения ДО. Таким свойством (соотношением) обладают траектории типа синус-спиралей [3]. Синус-спираль – это плоская кривая, которая в полярных координатах описывается выражением  $r^m = a^m \sin(m\varphi)$  или  $r^m = a^m \cos(m\varphi)$ , при этом, для всех точек которой отношение отрезка нормали от центра кривизны  $O$  до пересечения нормали с осью подвижной системы координат к радиусу кривизны –  $a$ , остается постоянным –  $m$ .



Графические соотношения траектории типа синус-спиралей

При рациональном значении  $m$  синусоидальная кривая является алгебраической кривой, форма которой зависит от значения  $m$ . К таким траекториям относятся: окружности ( $m = 1$ ), прямые ( $m = -1$ ), лемниската Бернулли ( $m = 2$ ), гиперболы ( $m = -2$ ), кардиоиды ( $m = 1/2$ ), параболы ( $m = -1/2$ ).

На приведенном рисунке используются две совмещенные общим началом  $O$  системы координат ( $X, Y$  – система координат с началом в точке дислокации ИС, а  $X_R, Y_\beta$  – подвижная система координат).

Согласно [3]:

$$\frac{LK}{KO_1} = \frac{O_1L - KO_1}{KO_1} = \lambda,$$

где  $\lambda$  – безразмерная постоянная величина для конкретного типа  $S_i^p$  или  $S_i^k$ .

До тех пор, пока ДО движется по одному из участков  $S_i^p$  или  $S_i^k$ , отношение отрезков  $\lambda$  остается постоянным, а его величина характеризует тип траектории.

Отрезок

$$KO_1 = \frac{v}{\psi} = \frac{v}{(1+\lambda)\beta},$$

где  $\dot{\Psi}$  и  $\dot{\beta}$  – дифференциалы углов при перемещении по  $S_j^p$  или  $S_j^k$  на  $dS$ .

$$\text{Отсюда: } \dot{\Psi} = (1 + \lambda)\dot{\beta}. \quad (1)$$

Так как угол  $\mu = \Psi - \beta$ , а  $\dot{\mu} = \dot{\Psi} - \dot{\beta}$  имеем:

$$\dot{\mu} = \lambda\dot{\beta} \quad (2)$$

$$\text{или} \quad \dot{\mu} = \frac{\lambda}{1+\lambda}\dot{\Psi} \quad (3)$$

В соответствии с (1) и (2)  $S_i$  характеризуется тем, что угол  $\mu$  является линейной функцией азимута  $\beta$ , а курс  $\Psi$  ДО получает приращение, пропорциональное приращению азимута с коэффициентом пропорциональности  $(1+\lambda)$ .

Таким образом, (1) представляет преобразование вектора угловой скорости  $\vec{\omega}_R$ , определенного в пространстве координат, в вектор угловой скорости  $\vec{\omega}_V$ , определенного в пространстве скоростей.

Если в пространстве координат вектор  $\vec{R}$  описывает траекторию с угловой скоростью  $\dot{\beta}$ , то в пространстве скоростей вектор  $\vec{V}$  описывает кривую годографа скорости с угловой скоростью  $\dot{\Psi}$  [3].

В [4] приводятся расчетные формулы определения навигационных параметров ДО на текущий момент времени, когда на борту ДО автономными средствами измеряется столько независимых величин, сколько необходимо для определения параметров траектории.

При обнаружении маневра в процессе обработки радиолокационной информации [1, 2, 5] в отличие от определения навигационных параметров [4] решается обратная задача – установление различия прямолинейной траектории от криволинейной (оценка  $\lambda$ ) при ограниченном количестве измеряемых параметров ДО ( $R$ ,  $\beta$  или, в лучшем случае,  $-R$ ,  $\beta$ ,  $\dot{R}$ ). При этом ошибки измерения  $\delta_R$ ,  $\delta_\beta$  являются некоррелированными случайными ошибками с неизвестной функцией распределения, соизмеримые с реальным перемещением ДО, и определяют ошибку расчета  $\delta_\lambda$ .

Так как вид траектории движения ДО неизвестен (по условиям задачи), то неизвестно значение  $\lambda$ . Эта величина должна быть выражена через непосредственные измерения или через расчетные значения от этих измерений.

Интегрируя первое уравнение из (3) получаем

$$\mu = \lambda_\beta + \mu_0 - \lambda_{\beta_0}, \quad (4)$$

где  $\mu_0$ ,  $\beta_0$  определяют начальные условия, т. е. значения величин в начальный момент времени  $t_0$ .

Тогда, с учетом (2),

$$\lambda = \frac{\Psi - \Psi_0}{\beta - \beta_0} - 1 = \frac{\Delta\Psi}{\Delta\beta} - 1. \quad (5)$$

Из (5) следует, что систематические ошибки измерения  $\beta$  не влияют на вычисления  $\lambda$ . Так как обнаружение маневра происходит в интересах системы сопровождения в координатах  $X$ ,  $Y$ , то при расчете  $\lambda$  участвуют только ошибки измерения  $R$ ,  $\beta$ ,  $\dot{R}$  (что исключает ошибки экстраполяции и пересчета координат).

Известно, что значения  $\lambda = 1, -0,5, -1, -2$  соответствуют траекториям: окружности, параболы, прямой линии с траверсным расстоянием от начала координат, равноточной гиперболы. Поэтому для распознавания прямолинейного движения важно, в первую очередь, не величина  $\lambda$ , а знак  $\lambda$ .

Знак  $\lambda$  различает два класса траекторий ДО, что позволяет использовать это свойство  $\lambda$  для обнаружения маневра.

В частном случае при прямолинейном движении ДО с траверсным расстоянием равно нулю, когда объект приближается или удаляется

$$\beta = \Psi = const$$

$$\text{или} \quad \beta = \Psi - \pi = const, \quad (6)$$

а при  $\dot{R} < 0$  или  $\dot{R} > 0$  формула (5) дает неопределенность.

Поэтому будем считать, что если  $\Psi - \beta \leq 5^\circ$ , то движение ДО происходит с постоянным курсом  $\Psi = const$  на точку или от точки стояния ИС и  $\lambda$  не вычисляется.

Теперь рассмотрим движение ДО с траверсным расстоянием, когда траектория не проходит через точку  $O$ .

Выразим  $\Psi$  через  $R$ ,  $\beta$ ,  $\dot{R}$ . Согласно [4]

$$\Psi = \beta - \arctan \frac{R\dot{\beta}}{\dot{R}}. \quad (7)$$

Так как  $\lambda$  – случайная величина из-за ошибок измерения  $R$ ,  $\beta$ ,  $\dot{R}$ , определим среднеквадратическую ошибку  $\sigma_\lambda$ :

$$\sigma_\lambda = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \left( \frac{\partial F}{\partial x_i} \right)^2 \right)} = \frac{1}{\Delta\beta} \sqrt{(\sigma_{\Delta\Psi})^2 + \left( \frac{\Delta\Psi}{\Delta\beta} \right)^2 \sigma_{\Delta\beta}^2}, \quad (8)$$

где  $\Delta\Psi$ ,  $\Delta\beta$  – приращение курса и азимута соответственно;  $\sigma_{\Delta\Psi}$ ,  $\sigma_{\Delta\beta}$  – среднеквадратические ошибки приращений.

Для прямолинейного движения, когда  $\Delta\Psi=0$ ,

$$\sigma_\lambda = \frac{1}{\Delta\beta} \sigma_{\Delta\Psi}, \quad (9)$$

$$\text{а оценка} \quad \hat{\lambda} = -1 \pm \sigma_\lambda. \quad (10)$$

Определим  $\Delta\Psi$ ,  $\sigma_{\Delta\Psi}$ ,  $\sigma_{\Delta\beta}$  через  $R$ ,  $\dot{R}$ ,  $\beta$ ,  $\dot{\beta}$ . Из (7) следует:

$$\Delta\Psi = \dot{\beta} - \left( \arctg \frac{R\dot{\beta}}{\dot{R}} \right)', \quad (11)$$

$$\left( \arctg \frac{R\dot{\beta}}{\dot{R}} \right)' \cong \dot{\beta} \frac{\dot{R}^2}{(\dot{R})^2 + (R\dot{\beta})^2}. \quad (12)$$

Если пренебречь при дифференцировании членами с  $\dot{R}$ ,  $\dot{\beta}$ , тогда

$$\Delta\Psi \cong \dot{\beta} \frac{(R\dot{\beta})^2}{(\dot{R})^2 + (R\dot{\beta})^2}. \quad (13)$$

Среднеквадратическая ошибка  $\sigma_{\Delta\Psi}$  при  $\frac{\dot{R}}{R_{min}} \ll \dot{\beta}_{min}$ :

$$\sigma_{\Delta\Psi} \cong \sigma_{\dot{\beta}}. \quad (14)$$

Подставляя (13) и (14) в (8), получим:

$$\sigma_{\lambda} = \sqrt{2} \frac{\sigma_{\dot{\beta}}}{\dot{\beta}}. \quad (15)$$

Если  $\Delta\Psi$  и  $\Delta\beta$  определяются видом движения ДО по траектории, то  $\sigma_{\dot{\beta}}$  характеризуется характеристиками ИС, а  $\sigma_{\lambda}$  при наших предположениях не зависит от  $R$ ,  $\dot{R}$ ,  $\sigma_R$ ,  $\sigma_{\dot{R}}$ . На ИС непосредственно не измеряется  $\dot{\beta}$ , а измеряется только  $\beta$ , поэтому  $\sigma_{\dot{\beta}}$  неизвестна.

Пусть, в простейшем случае

$$\sigma_{\dot{\beta}} = \frac{\sqrt{2}\sigma_{\beta}}{T}, \quad \text{а} \quad \dot{\beta} = \frac{\beta_i - \beta_{i-1}}{T},$$

тогда

$$\sigma_{\lambda} \cong \sqrt{2} \frac{\sigma_{\beta}}{\Delta\beta}. \quad (16)$$

Приближенная оценка среднеквадратической ошибки  $\sigma_{\lambda}$  позволяет определить условия, когда возможно использовать расчет  $\lambda$  для обнаружения маневра ДО. Величина ошибок измерений  $\sigma_R$ ,  $\sigma_{\dot{R}}$ ,  $\sigma_{\beta}$  влияет на время наблюдения, необходимое для устойчивой оценки  $\hat{\lambda}$ .

Будем считать, что на интервале оценивания  $\lambda$ , сохраняется неизвестный тип траектории ( $S_i^p$  или  $S_i^k$ ), а при автозахвате  $\lambda(0) = -1$  (организация трассы ДО). Зависимость  $\sigma_{\lambda}$  от  $R$ ,  $\dot{R}$ ,  $\sigma_R$ ,  $\sigma_{\dot{R}}$  проявляется при расчете  $\Delta\Psi$ , что может быть установлено моделированием, уточняющим зависимость (16).

Из (16) следует, что  $\sigma_{\lambda}$  не зависит от темпа измерения  $R$ ,  $\beta$ ,  $\dot{R}$ , а зависит, в основном, от приращения  $\Delta\beta$ , т. е. порога «чувствительности» ИС.

Поэтому, если ДО сопровождается несколькими (одинаковыми по точностным характеристикам) ИС на этапе третичной обработки, то достоверность обнаружения криволинейного движения ДО за один и тот же интервал времени выше на том из них, для которого  $\Delta\beta$  больше, так как тип траектории для каждого из них один и тот же.

Чем ближе по  $R$  находится ИС к ДО, совершающему криволинейное движение, тем больше  $\Delta\beta$ , а значит меньше  $\sigma_{\lambda}$ . Особенно это касается прямолинейного движения ДО и при объединении информации от нескольких ИС в ЦОИ, когда должна учитываться достоверность обнаружения криволинейного движения. Эта достоверность определяется значениями  $\sigma_{\beta}$  данного ИС и  $\Delta\beta$ .

Еще большую значимость приобретает процедура вычисления и оценки  $\lambda$ , если ИС измеряют лишь  $\beta$  на ДО, а в ЦОИ производится совместная обработка от нескольких ИС (решение триангуляционной задачи). В этом случае дополнительно к определению маневра возникает задача об определении статуса вновь обработанной трассы (истинная или ложная). Ложные трассы часто ведут себя как маневрирующие ДО. Если траектория ДО прямолинейна, то  $\lambda_i = -1$  для каждого из ИС, измерение от которых участвуют в автозахвате и сопровождении обобщенной трассы. Если траектория ДО криволинейна, то  $\lambda_i \neq -1$  для каждого из ИС. Если знаки  $\lambda_i$  различаются для каждого из ИС, то вполне возможно, что трасса ДО – ложная.

Так как  $\lambda = \text{const}$  и является инвариантом относительно времени, а для разных типов  $S_i$  различается лишь величиной  $\lambda$ , чтобы уменьшить влияние на оценку  $\lambda$  случайных ошибок измерений  $\sigma_R$ ,  $\sigma_{\dot{R}}$ ,  $\sigma_{\beta}$ , можно использовать любую из простейших процедур «сглаживания», например:

$$\hat{\lambda}_i = a\lambda_i + (1 - a_i)\hat{\lambda}_{i-1}, \quad (17)$$

где  $a_i = \frac{\Delta t_i}{T + \Delta t_i}$ ;  $\lambda_i$  – расчетное значение  $\lambda$  на  $i$ -момент времени;  $\hat{\lambda}_{i-1}$  – оценка  $\lambda$  на  $i-1$  момент времени;  $\Delta t_i$  – интервал времени между  $i$  и  $i-1$  моментом времени;  $T$  – период обработки информации,  $\text{const}$ .

В данном случае  $\hat{\lambda}$  выступает как интегральный показатель типа движения ДО и не требует расчета оценок координат и параметров движения ДО, а также использования сложных в вычислительном плане алгоритмов линейной или нелинейной фильтрации [1, 2]. Фактически задача обнаружения маневра при расчете  $\hat{\lambda}$  сводится к задаче «разладки», когда  $\hat{\lambda}_i = -1$  и  $\hat{\lambda} \neq -1$ .

В зависимости от величины  $\hat{\lambda}$  выбирается один из вариантов экстраполяции (по прямой, окружности или по параболе) на ограниченном интервале времени или принимается сам факт того, что  $\hat{\lambda} \neq -1$  для изменения параметров фильтра сопровождения [1, 2].

**Выводы:**

1. Предложен и обоснован подход для обнаружения криволинейного движения динамических объектов в плоскости (выявление маневра) по данным измерительных средств, основанный на известных геометрических соотношениях и не требующий априорной статической информации.

2. Описание участков траекторий в виде синус-спиралей достаточно для обработки траекторной информации, так как знание вида траекторий необходимо для экстраполяции на ограниченный интервал времени.

3. Предлагаемый подход по использованию инвариантов, характерных для траектории типа синус-спиралей, близок по физическому смыс-

лу обнаружителям маневра, применяемым в системах сопровождения ДО.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Кузьмин, С. З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации. – М.: Советское радио, 1974.
2. Фарина, А., Студер, Ф. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей : пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1993. – 320 с.: ил.
3. Егоров, Д. Ф. Дифференциальная геометрия, 1923. – М.: ЛитРес, переизд. 2010. – 329 с.
4. Громов, Г. Н. Дифференциально-геометрический метод навигации. – М.: Радио и связь, 1986.
5. Лобейко, В. И. и др. Метод виртуализации модели реальной траектории воздушного объекта при испытаниях сложных технических систем. // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2011. Т. 12. № 12 (86). С. 19–21.

УДК 66.063.8+ 621.833.51

*Е. С. Брискин<sup>1</sup>, А. А. Приходько<sup>2</sup>, А. И. Смелягин<sup>2</sup>*

**О МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ДИНАМИКИ ПЛАНЕТАРНОГО ВОЗВРАТНО-ВРАЩАТЕЛЬНОГО ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА\***

<sup>1</sup>Волгоградский государственный технический университет

<sup>2</sup>Кубанский государственный технологический университет

dtm@vstu.ru, sannic92@gmail.com

Рассматривается динамика возвратно-вращательного перемешивающего устройства (ВВПУ), в качестве исполнительного механизма которого применен планетарный механизм с эллиптическими зубчатыми колесами. Динамическая модель построена путем приведения сил, масс и моментов к начальному звену (входному валу исполнительного механизма). Исследование полученной динамической модели проведено с помощью метода энергомасс и с использованием интерполяционной функции Эрмита третьего порядка. В результате динамического анализа определен необходимый движущий момент для различных режимов работы ВВПУ, а также найдены соответствующие законы движения звена приведения.

**Ключевые слова:** возвратно-вращательное перемешивающее устройство (ВВПУ), планетарный механизм, эллиптические зубчатые колеса, приведенный момент инерции, приведенный момент сил сопротивления, динамическая модель, математическое моделирование.

*E. S. Briskin<sup>1</sup>, A. A. Prihodko<sup>2</sup>, A. I. Smelyagin<sup>2</sup>*

**ON MATHEMATICAL MODELING OF THE PLANETARY ROTATIONALLY RECIPROCATING STIRRED TANK DYNAMICS**

<sup>1</sup>Volgograd State Technical University

<sup>2</sup>Kuban State Technological University

There is considered the dynamics of rotationally reciprocating stirred tank (RRST), whose actuator is the planetary mechanism with elliptical gearwheels. The dynamic model is constructed by reduction of driving forces, masses and moments to the reduction link (the input shaft of the actuator). The study of the resulting dynamic model was carried out by energy-mass method and by using Hermite interpolation function of 3<sup>rd</sup> order. As a result of the dynamic analysis the necessary moment of driven forces and the reduction link laws of motion were determined.

**Keywords:** rotationally reciprocating stirred tank (RRST), planetary gear, elliptical gears, reduced moment of inertia, reduced moment of the resistance forces, dynamic model, mathematical modeling.

### Введение

Механические перемешивающие устройства широко используются в машиностроительной, нефтехимической, химической, пищевой и многих других отраслях промышленности [1, 2]. В настоящее время наиболее исследованными и распространенными являются перемешивающие устройства с вращательным движением рабочих органов, так как они обладают высокой надежностью, простотой в изготовлении и эксплуатации.

В этих устройствах угловая скорость рабочего органа является постоянной величиной, поэтому с течением времени скорости движения перемешиваемой среды и рабочего органа уравниваются, что приводит к низкой интенсивности теплообмена. Для повышения производительности перемешивающих устройств необходимо изменять скорость и направление вращения рабочих органов [3, 4].

Предложено [5, 6] перемешивающее устройство, в котором возвратно-вращательное движение рабочего органа обеспечивается за счет реверсивного движения шагового двигателя. Такая конструкция является простой и благодаря широкому диапазону угла поворота позволяет проводить различные эксперименты в реакторах небольшого объема. Однако применение этого устройства в промышленных масштабах нерационально, так как шаговый двигатель имеет низкую эффективность и не может применяться при большой частоте колебаний рабочего органа.

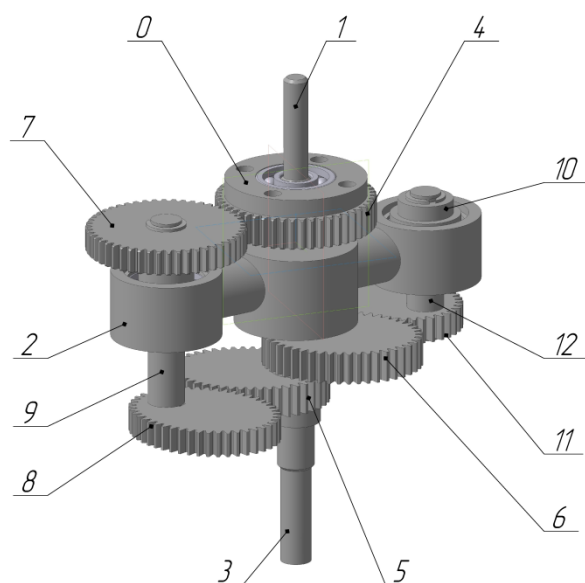


Рис. 1. Двухсателлитный планетарный механизм с эллиптическими зубчатыми колесами

Разработан планетарный преобразователь вращательного движения в возвратно-вращательное, который может быть использован в качестве исполнительного механизма перемешивающего устройства [7, 8]. Он представляет собой двухрядную планетарную передачу с двумя внешними зацеплениями, в которой одна пара цилиндрических колес заменена на эллиптические. Для уравнивания механизма предложено использовать двухсателлитную схему устройства, при этом на дополнительном сателлите расположен противовес [9, 10] (рис. 1).

Планетарный механизм состоит из стойки 0, которая крепится к корпусу (на рисунке не показан), входного вала 1, водила 2, выходного вала 3, солнечного колеса 4, эллиптических зубчатых колес 5 и 6 на выходном валу, расположенных под углом  $180^\circ$ , первого сателлита, состоящего из цилиндрического зубчатого колеса 7, эллиптического колеса 8 и вала 9, второго сателлита, состоящего из противовеса 10, эллиптического колеса 11 и вала 12. Возвратно-вращательное движение выходного вала обеспечивается за счет переменного передаточного отношения пары эллиптических зубчатых колес 5 и 8.

Возвратно-вращательное перемешивающее устройство (ВВПУ) получается, если соединить входной вал исследуемого механизма с двигателем, а выходной вал с рабочим органом (рис. 2).

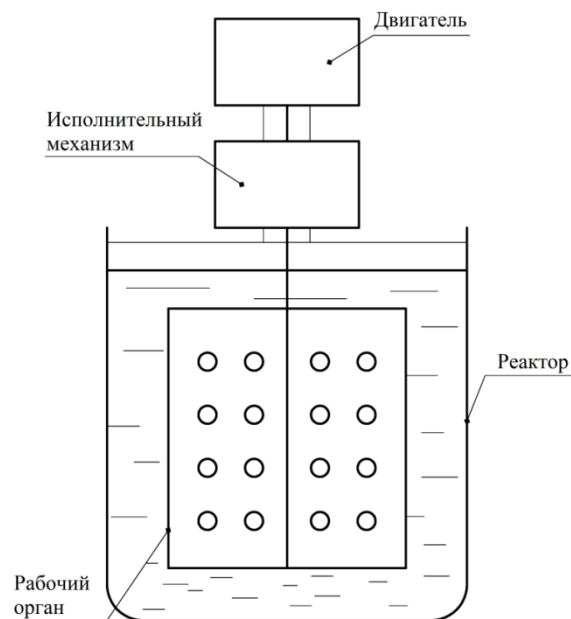


Рис. 2. Возвратно-вращательное перемешивающее устройство

Рассмотренное устройство позволяет добиться высокого градиента скоростей перемешиваемой среды, что приведет к увеличению интенсивности тепло и массообмена. Подбор оптимальной амплитуды и частоты колебаний позволит сократить время протекания многих процессов в 1,5–2 раза, а удельные капитальные и эксплуатационные затраты в 1,2–1,8 раза [11].

Одним из важнейших этапов при проектировании новых машин является изучение протекающих при их работе динамических процессов.

### Постановка задачи

Ставится задача выбора и обоснования расчетной схемы и разработки динамической модели, позволяющей провести анализ зависимостей динамических характеристик, как в целом всей машины, так и отдельных ее звеньев, от режимов движения рабочего органа.

### Построение расчетной схемы и разработка одномассовой динамической модели

Перемешивающее устройство имеет одну степень свободы (рис. 1, 2) и его звенья жестко связаны между собой, поэтому для решения поставленной задачи за звено приведения принимается входной вал 1. Тогда расчетная модель ВВПУ примет вид (рис. 3).

Для установления закона движения звена приведения, определяются параметры динамической модели: приведенный момент инерции

$$I_{np} = (I_o + I_1 + I_2) \cdot \varphi_1'^2 + m_7 \cdot S_7'^2 + m_8 \cdot S_8'^2 + m_9 \cdot S_9'^2 + m_{10} \cdot S_{10}'^2 + m_{11} \cdot S_{11}'^2 + m_{12} \cdot S_{12}'^2 + (I_7 + I_8 + I_9) \cdot \varphi_9'^2 + (I_{10} + I_{11} + I_{12}) \cdot \varphi_{12}'^2 + (I_3 + I_5 + I_6 + I_{po}) \cdot \varphi_3'^2, \quad (2)$$

где  $I_o$  – момент инерции двигателя;  $I_{po}$  – момент инерции рабочего органа. Индексы моментов инерции и аналогов скоростей звеньев исполнительного механизма обозначены в соот-

$I_{np}$ , приведенный момент сил сопротивления  $M_{nc}$ , требуемый приведенный момент двигателя  $M_{nd}$ .

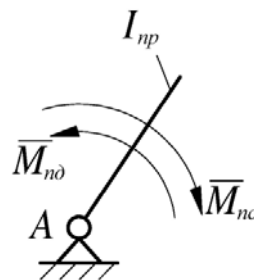


Рис. 3. Расчетная модель ВВПУ

Приведенный момент инерции определяется [12, 13] в форме:

$$I_{np} = \sum_{i=1}^n m_i S_i'^2 + \sum_{i=1}^n I_{Si} \varphi_i^2, \quad (1)$$

где  $n$  – число подвижных звеньев, массы и моменты инерции которых известны;  $m_i$  – масса  $i$ -го звена;  $I_{Si}$  – момент инерции  $i$ -го звена относительно оси, проходящей через центр масс;

$S_i' = \frac{dS_i}{d\varphi_1}$  – аналог скорости центра масс  $i$ -го

звена;  $\varphi_i' = \frac{d\varphi_i}{d\varphi_1}$  – аналог угловой скорости  $i$ -го

звена,  $\varphi_1$  – обобщенная координата

Для исследуемого устройства (рис. 1) уравнение (1) принимает вид:

ветствии с рис. 1.

Учитывая, что  $\varphi_1' = 1$ ,  $S_7' = S_9' = S_{10}' = S_{12}'$ ,  $S_8' = S_{11}'$  и  $\varphi_9' = \varphi_{12}' = \varphi_c'$ , из (2) следует:

$$I_{np} = I_o + I_1 + I_2 + (m_7 + m_9 + m_{10} + m_{12}) \cdot S_9'^2 + (m_8 + m_{11}) \cdot S_8'^2 + (I_7 + I_8 + I_9 + I_{10} + I_{11} + I_{12}) \cdot \varphi_c'^2 + (I_3 + I_5 + I_6 + I_{po}) \cdot \varphi_3'^2 \quad (3)$$

Откуда, с учетом  $S_9'' = 0$ ,  $\varphi_c'' = 0$ , имеет место выражение:

$$\frac{dI_{np}}{d\varphi_1} = 2 \cdot [(m_8 + m_{11}) \cdot S_8' \cdot S_8'' + (I_3 + I_5 + I_6 + I_{po}) \cdot \varphi_3' \cdot \varphi_3'']. \quad (4)$$

Полученный результат (3), (4) позволяет определить приведенный момент инерции одномассовой динамической модели и его производную. Аналогии угловых  $\varphi_i$ ,  $\varphi_i'$ ,  $\varphi_i''$  и линейных  $S_i$ ,  $S_i'$ ,  $S_i''$  скоростей планетарного исполнительного механизма определены при кинема-

тическом анализе [14].

Для построения динамической модели необходимо также найти момент сил сопротивления, действующий на рабочий орган. Линейная скорость точек рабочего органа переменна, следовательно, на рабочий орган ВВПУ будет действовать переменная сила сопротивления среды (рис. 4).

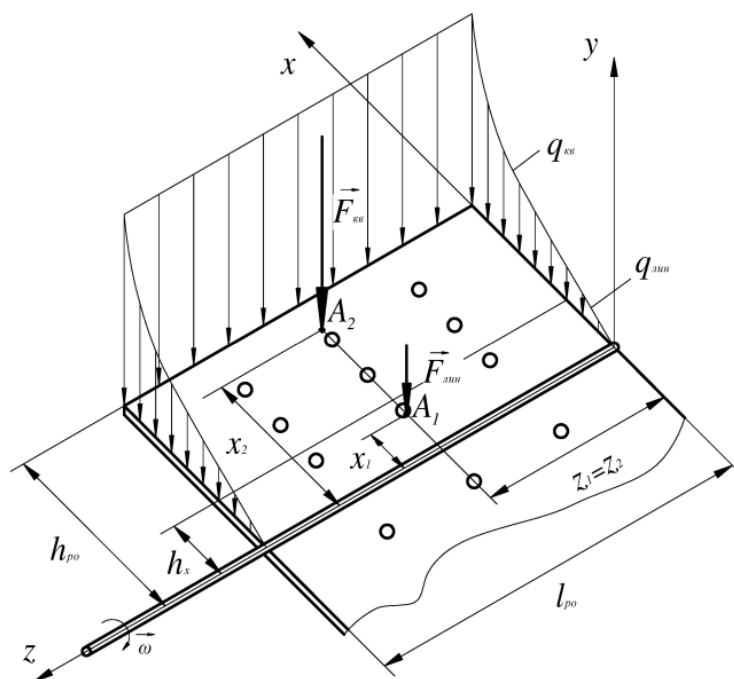


Рис. 4. Силовые факторы, действующие на рабочий орган

Для определения момента сопротивления, действующего на рабочий орган, совершающий возвратно-вращательное движение, имеет место формула [15]:

$$M = \frac{k}{3} B'_{\text{лин}} \cdot \omega \cdot l_{po} \cdot h_x^3 + \frac{k}{4} B'_{\text{кв}} \cdot \omega^2 \cdot l_{po} (h_{po}^4 - h_x^4) \cdot \text{sign}(\omega), \quad (5)$$

где  $B'_{\text{лин}}$ ,  $B'_{\text{кв}}$  – приведенные коэффициенты линейного и квадратичного сопротивления;  $\omega$  – угловая скорость рабочего органа;  $l_{po}$  – длина рабочего органа;  $h_{po}$  – ширина лопасти;  $h_x$  – расстояние от оси вращения до границы между ламинарным и турбулентным режимами;  $k$  – количество лопастей рабочего органа (в рассматриваемом устройстве  $k = 2$ ).

Для большинства технологических процессов наблюдается турбулентный режим движения жидкости [1], для которого (5) примет вид:

$$M = \frac{1}{2} B'_{\text{кв}} \cdot \omega^2 \cdot l_{po} \cdot h_{po}^4 \cdot \text{sign}(\omega) = B \cdot \omega^2 \cdot \text{sign}(\omega), \quad (6)$$

где  $B = 0.5 \cdot B'_{\text{кв}} \cdot l_{po} \cdot h_{po}^4$ .

Так как в исследуемом устройстве на рабочий орган действует только момент сопротивления жидкости  $M$ , то, в соответствии с [12, 13], приведенный момент сопротивления  $M_{nc}$  имеет вид:

$$M_{nc} = M \cdot \varphi'_3 = B \cdot \omega_1^2 \cdot \varphi_3^3 \cdot \text{sign}(\varphi'_3). \quad (7)$$

Зависимость (7) позволяет найти момент сил сопротивления, приведенный к входному валу 1.

#### Аналитическое исследование динамической модели

Разработанное перемешивающее устройство имеет следующие параметры (номера звеньев соответствуют рис. 1):  $I_{06} = 100 \text{ г} \cdot \text{см}^2$  (двигатель);  $I_1 = 9.8 \text{ г} \cdot \text{см}^2$ ;  $I_2 = 1233 \text{ г} \cdot \text{см}^2$ ;  $I_3 = 30.4 \text{ г} \cdot \text{см}^2$ ;  $I_5 = I_6 = 627 \text{ г} \cdot \text{см}^2$ ;  $I_7 = 400 \text{ г} \cdot \text{см}^2$ ,  $m_7 = 0.1 \text{ кг}$ ;  $I_8 = I_{11} = 564 \text{ г} \cdot \text{см}^2$ ,  $m_8 = m_{11} = 0.09 \text{ кг}$ ;  $I_9 = 19.2 \text{ г} \cdot \text{см}^2$ ,  $m_9 = 0.04 \text{ кг}$ ;  $I_{10} = 350 \text{ г} \cdot \text{см}^2$ ,  $m_{10} = 0.09 \text{ кг}$ ;  $I_{12} = 25 \text{ г} \cdot \text{см}^2$ ,  $m_{12} = 0.05 \text{ кг}$ ;  $I_{po} = 15 \text{ г} \cdot \text{см}^2$ . Ширина и длина рабочего органа равны  $h_{po} = 0.045 \text{ м}$  и  $l_{po} = 0.12 \text{ м}$  соответственно. Допускаемый коэффициент неравномерности вращения  $[\delta]$  принимается равным 0.05.

Угол качания выходного вала планетарного исполнительного механизма, а соответственно и угол колебаний рабочего органа  $\alpha$ , зависит от эксцентриситета эллиптических зубчатых колес [8]. Для получения различных углов колебаний рабочего органа и проведения широких исследований лабораторная установка оснащена набором сменных эллиптических колес с различными эксцентриситетами. Динамический анализ проведен для перемешивающих

устройств с углами  $30^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$  и частотой колебаний  $f = \omega_1 / 2\pi$ , изменяющейся в пределах  $5 \leq f \leq 30$  Гц.

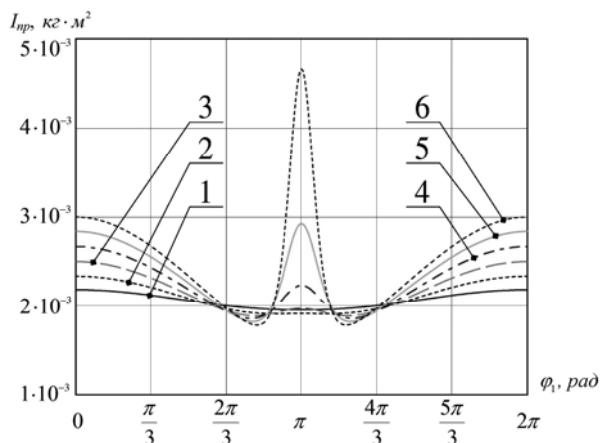


Рис. 5. Графики функций  $I_{np}(\varphi_1)$ :  
1 —  $\alpha = 30^\circ$ ; 2 —  $\alpha = 60^\circ$ ; 3 —  $\alpha = 90^\circ$ ; 4 —  $\alpha = 120^\circ$ ;  
5 —  $\alpha = 150^\circ$ ; 6 —  $\alpha = 180^\circ$

Графики функций  $I_{np}(\varphi_1)$  для перемешива-

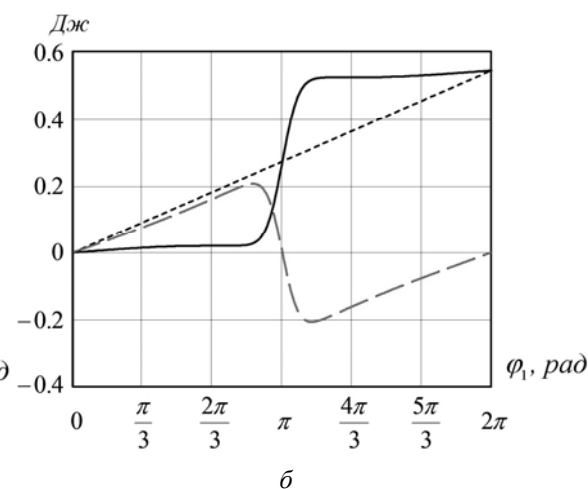
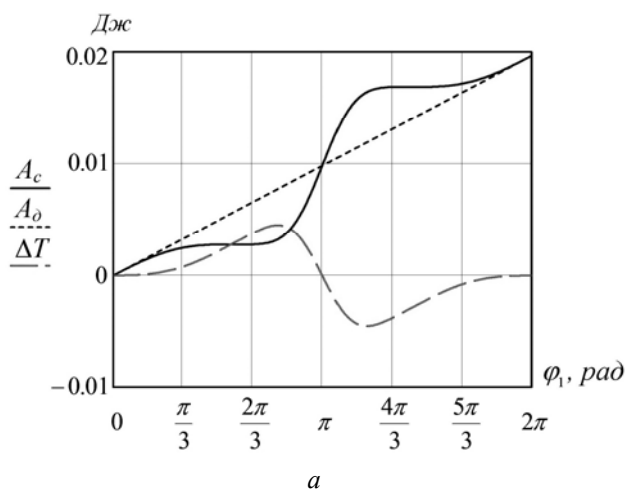


Рис. 6. Графики изменения  $A_c$ ,  $A_d$  и  $\Delta T$ :  
а —  $f=20$  Гц,  $\alpha = 60^\circ$ ; б —  $f=20$  Гц,  $\alpha = 150^\circ$

Исследования показали, что при увеличении угла колебаний рабочего органа  $\alpha$  возрастает значение  $\Delta T$ , большие значения которой и приводят к неравномерности движения звена привода.

Значения момента  $M_{nd}$  при различных режимах работы ВВПУ показаны на графике  $M_{nd}(\alpha, f)$  (рис. 7).

Анализ графика на рис. 7 показывает, что увеличение угла и частоты колебаний приводит к возрастанию требуемого движущего момента.

Ющих устройств с различными углами колебаний  $\alpha$  представлены на рис. 5, а их анализ показывает, что при увеличении угла колебаний в ВВПУ внутрицикловое изменение приведенного момента инерции и его производной увеличивается.

Исследование динамической модели проводится методом энергомасс [12], который широко применяется при анализе динамики машин. В соответствии с выбранным методом приращение кинетической энергии определится:

$$\Delta T = A_d - A_c = M_{nd} \cdot \varphi_1 - \int_0^{\varphi_1} M_{nc} d\varphi_1, \quad (8)$$

где  $A_d$  — работа движущего момента,  $A_c$  — работа момента сопротивления. Приведенный движущий момент определится:

$$M_{nd} = \frac{\int_0^{2\pi} M_{nc} d\varphi_1}{2\pi}. \quad (9)$$

Примеры изменения  $A_c$ ,  $A_d$ ,  $\Delta T$  приведены на рис. 6.

Угловая скорость звена привода определится [12]:

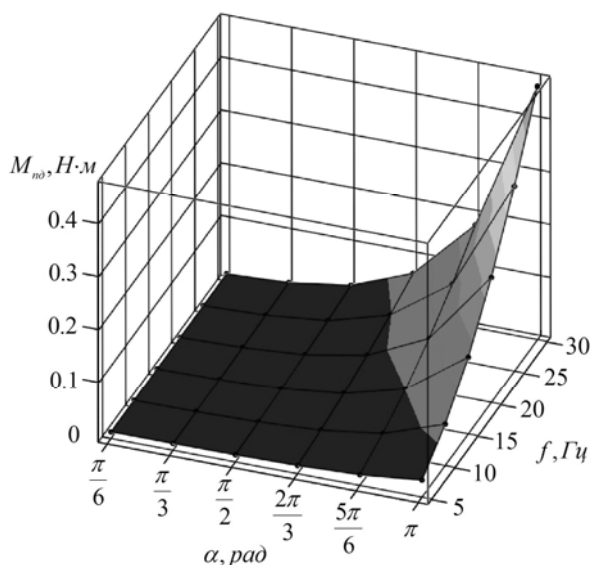
$$\omega_1 = \sqrt{\frac{2\Delta T - C_{\max} - C_{\min}}{I_{np}}}, \quad (10)$$

где

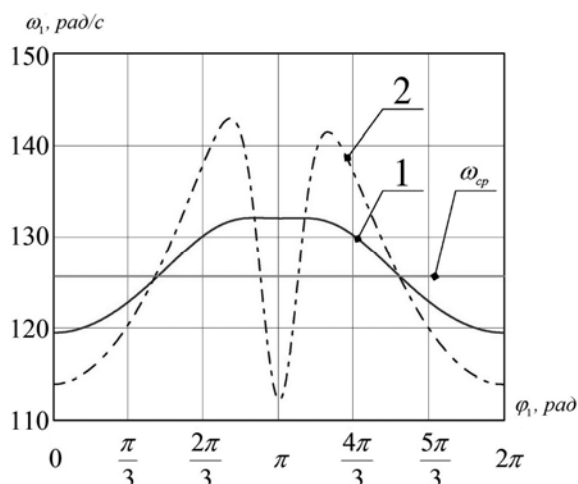
$$C_{\max} = \max \left[ \Delta T - \frac{1}{2} I_{np} \omega_{cp}^2 (1 + [\delta]) \right], \quad (11)$$

$$C_{\min} = \min \left[ \Delta T - \frac{1}{2} I_{np} \omega_{cp}^2 (1 - [\delta]) \right]. \quad (12)$$



Рис. 7. График зависимости  $M_{no}(\alpha, f)$ 

С использованием (8)–(12) и результатов расчета (рис. 5–7) строятся графики зависимостей  $\omega_1(\varphi_1)$  для различных режимов (рис. 8).

Рис. 8. Графики зависимостей  $\omega_1(\varphi_1)$ :  
 $1 - f=20$  Гц,  $\alpha = 60^\circ$ ;  $2 - f=20$  Гц,  $\alpha = 150^\circ$ 

Из графика  $\omega_1(\varphi_1)$  следует, что угловая скорость звена привода не является постоянной величиной и колеблется вокруг среднего значения. Колебания скорости определяются внутрицикловым изменением передаточного отношения механизма с эллиптическими колесами и изменением нагрузки на рабочем органе. Неравномерность движения начального звена характеризуется коэффициентом неравномерности движения  $\delta$  [12]:

$$\delta = \frac{\omega_{1\max} - \omega_{1\min}}{\omega_{cp}}$$

Предварительные расчеты показали, что во всех исследуемых режимах значение коэффициента  $\delta$  превышает допустимое значение  $[\delta] = 0.05$ . Следовательно, в исследуемых ВВПУ требуется установить маховик с моментом инерции:

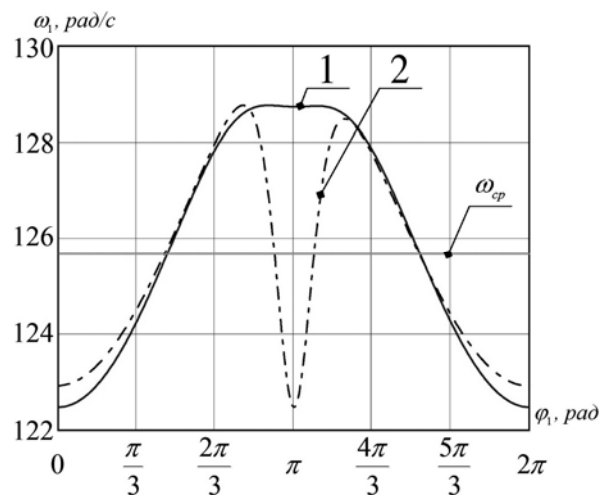
$$I_{\max.} = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{[\delta] \cdot \omega_{cp}^2}. \quad (13)$$

Подставляя в (13)  $C_{\max}$ ,  $C_{\min}$ ,  $[\delta]$  и  $\omega_{cp}$ , можно найти требуемые моменты инерции маховика для различных режимов работы ВВПУ. Исследования показали, что с увеличением угла колебаний рабочего органа увеличивается момент инерции маховика.

Угловая скорость звена привода определяется с учетом предварительно полученных значений момента инерции маховика  $I_{\max.}$ :

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{I_{\max.} \cdot \omega_{cp}^2 (1 + [\delta]) - 2(C_{\max} - \Delta T)}{I_{\max.} + I_{np}}}. \quad (14)$$

Используя (14) и результаты предыдущих расчетов, можно построить графики зависимостей  $\omega_1(\varphi_1)$  с учетом установки маховика для различных режимов (рис. 9).

Рис. 9. Графики зависимостей  $\omega_1(\varphi_1)$  с учетом установки маховика:

$1 - f=20$  Гц,  $\alpha = 60^\circ$ ;  $2 - f=20$  Гц,  $\alpha = 150^\circ$

Как следует из графиков, установка маховика уменьшает неравномерность движения звена привода. Коэффициент неравномерности снизился до допустимого значения  $[\delta] = 0.05$ .

#### Исследование динамической модели численным методом

Для применения численных методов исследований используются дифференциальные

уравнения, полученные с помощью уравнения Лагранжа:

$$I_{np} \cdot \varepsilon_1 + \frac{\omega_1^2}{2} \cdot \frac{dI_{np}}{d\varphi_1} = M_{п0} - M_{пс}. \quad (15)$$

Уравнение (15) является нелинейным дифференциальным уравнением второго порядка.

Функции  $I_{np}$ ,  $\frac{dI_{np}}{d\varphi_1}$ ,  $M_{пс}$  описаны формулами

(3), (4), (7) соответственно. Решение уравнения (15) осуществляется при начальных условиях: при  $t = 0$   $\varphi_{10} = 0$ ,  $\varphi_1' = \omega_{10}$ . Значение  $\omega_{10}$  определяется из (14) при  $\varphi_1 = 0$ . Значение  $M_{п0}$  определено из (9).

В качестве примера исследуется динамическая модель ВВПУ с различными углами колебаний рабочего органа ( $30^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ ) при частоте  $f = 20$  Гц, с установленным маховиком. График функции  $\omega_1(t)$  при  $\alpha = 150^\circ$ , полученной численно, показан на рис. 10.

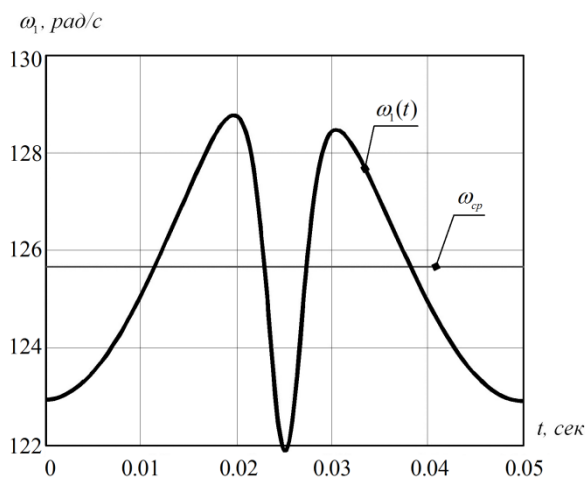


Рис. 10. График функции  $\omega_1(t)$  при  $f = 20$  Гц,  $\alpha = 150^\circ$

Численные решения уравнения (15) получены с использованием интерполяционной функции Эрмита третьего порядка. Расхождение результатов численных и аналитических решений во всех случаях не превышает 1,5 %.

#### Заключение

Построена и исследована динамическая модель перемешивающего устройства с возвратно-вращательным движением рабочего органа. В качестве исполнительного механизма такого устройства применен планетарный механизм для преобразования вращательного движения в возвратно-вращательное с эллиптическими зубчатыми колесами. В результате проведен-

ных исследований получены следующие результаты:

- установлены законы движения звена приведения (входного вала планетарного механизма) аналитическим и численным методами;
- определена зависимость движущего момента от различных режимов работы ВВПУ, характеризующихся частотой и углом колебаний рабочего органа;
- для рассмотренных ВВПУ разработана методика определения момента инерции маховика, необходимого для снижения коэффициента неравномерности вращения до допускаемой величины.

Анализ результатов показал адекватность полученных численных и аналитических решений. Разработанная математическая модель может использоваться при расчетах звеньев планетарного исполнительного механизма на прочность, проектировании и исследовании перемешивающих устройств с возвратно-вращательным движением рабочих органов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Брагинский, Л. Н. Перемешивание в жидких средах : Физические основы и инженерные методы расчета / Л. Н. Брагинский, В. И. Бегачев, В. М. Барабаш. – Л.: Химия, 1984. – 336 с.
2. Васильцов, Э. А. Аппараты для перемешивания жидких сред / Э. А. Васильцов, В. Г. Ушаков. – Л.: Машиностроение, 1979. – 272 с.
3. Торубаров, Н. Н. Перемешивающие устройства со сложным законом движения мешалок / Н. Н. Торубаров, Р. М. Малышев // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2013. – № 3. – С. 19–21.
4. Kato, Y. Improvement of mixing efficiencies of conventional impeller with unsteady speed in an impeller revolution / Y. Kato, Y. Tada, M. Ban, Y. Nagatsu, S. Iwata, K. Yanagimoto // Journal of chemical engineering of Japan. – 2005. – Т. 38. – № 9. – С. 688–691.
5. Power characteristics of a rotationally reciprocating impeller / S. Senda, N. Yamagami, Y. Komoda, Y. Hirata, H. Suzuki, R. Hidema // Journal of chemical engineering of Japan. – 2015. – Т. 48. – № 11. – С. 885–890.
6. Characteristics of flow field induced by a rotationally reciprocating plate impeller / S. Senda, Y. Komoda, Y. Hirata, H. Takeda, H. Suzuki, R. Hidema // Journal of chemical engineering of Japan. – 2016. – Т. 49. – № 4. – С. 341–349.
7. Приходько, А. А. Структурный синтез перемешивающих устройств с возвратно-вращательным движением рабочих органов / А. А. Приходько, А. И. Смелягин // Вестник Донского государственного технического университета. – 2015. – № 4. – С. 69–75.
8. Смелягин, А. И. Структура и кинематика планетарного преобразователя вращательного движения в возвратно-вращательное / А. И. Смелягин, А. А. Приходько // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2016. – № 6. – С. 19–24.
9. Приходько, А. А. Уравновешивание планетарного исполнительного механизма возвратно-вращательного перемешивающего устройства / А. А. Приходько, А. И. Сме-

лягин // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2016. – № 4. – С. 62–67.

10. Приходько, А. А. Перемешивающее устройство с возвратно-вращательным движением рабочего органа / А. А. Приходько, А. И. Смелягин, Е. О. Герасименко, С. А. Сонин // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2017. – № 4. – С. 84–87.

11. Смелягин, А. И. Синтез и исследование машин и механизмов с электромагнитным приводом / А. И. Смелягин. – Новосибирск : Изд-во Новосиб. ун-та, 1991. – 248 с.

12. Смелягин, А. И. Теория механизмов и машин / А. И. Смелягин. – М.: Инфра-М ; Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. – 263 с.

13. Prikhodko, A.A. Dynamic analysis of rotationally re-

ciprocating stirred tank with multiple impellers / A. A. Prikhodko, A.I. Smelyagin // 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). – IEEE, 2015. – С. 1–5.

14. Prikhodko, A. A. Kinematic analysis of mechanism for converting rotational motion into reciprocating rotational motion / A.A. Prikhodko, A.I. Smelyagin // Procedia Engineering. – 2015. – Т. 129. – С. 87–92.

15. Приходько, А. А. Определение момента сопротивления среды на рабочем органе возвратно-вращательного перемешивающего устройства / А.А. Приходько, А.И. Смелягин // Инновации в машиностроении : Сборник трудов VII Международной научно-практической конференции. – Кемерово : Изд-во КузГТУ, 2015. – С. 516–519.

УДК 628.35

**А. Б. Голованчиков, М. И. Ламскова, М. И. Филимонов, А. Е. Новиков**  
**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ЖИДКОСТЕЙ**  
**В ГИДРОЦИКЛОНЕ С УЧЕТОМ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО**  
**И ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДОБИЯ**

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

Представлен анализ гидромеханических процессов в батарее гидроциклонов с учетом геометрического и гидромеханического подобия.

Представленные расчеты показывают, что с ростом числа гидроциклонов в батарее уменьшается номинальный диаметр и растет локальная доля уловленных частиц. Для характеристики зависимости степени очистки от числа гидроциклонов в батарее предлагается использовать параметр Р, равный произведению фактора разделения на среднее время пребывания частиц в аппарате.

**Ключевые слова:** гидроциклон, фракционный состав, степень улавливания, геометрическое подобие, гидродинамическое подобие, батарея гидроциклонов.

**A. B. Golovanchikov, M. I. Lamskova, M. I. Filimonov, A. E. Novikov**  
**MODELING OF THE PROCESS SEPARATION DISPERSIVE LIQUIDS IN HYDROCYCLONE**  
**WITH THE ACCOUNT OF GEOMETRIC AND HYDRODYNAMIC SIMILARITIES**

**Volgograd State Technical University**

The analysis of hydromechanical processes in a battery of hydrocyclones is presented which takes into account geometric and hydromechanical similarity.

The presented calculations show increasing number of hydrocyclones in the battery leads to decreasing the nominal diameter and the local fraction of trapped particles grows. To characterize the dependence of the degree of purification on the number of hydrocyclones in the battery, it is proposed to use the parameter P, equal to multiplication of the separation factor for the mean residence time of the particles in the apparatus.

**Keywords:** hydrocyclone, fractional composition, degree of trapping, geometric similarity, hydrodynamic similarity, battery of hydrocyclones.

Гидроциклонирование, как и разделение пылей в циклонах, нашло применение в химической промышленности благодаря существенному преимуществу перед процессами отстаивания в поле сил тяжести, что связано с увеличением скорости осаждения в центробежном поле и, как следствие, возможности в десятки раз уменьшить производственные площади [1–3].

Однако для циклонов теоретические аспекты физического моделирования аэродинамических процессов изучены в значительно боль-

шей степени, чем гидромеханические процессы в гидроциклонах.

В частности, в циклонах при установке их в батарею институтом НИИОГАЗ решена задача геометрического подобия всех размеров, полагающая, что их величины, отнесенные к диаметру цилиндрической части, должны быть постоянными [4]. Такое геометрическое подобие приводит к зависимости диаметра цилиндрического корпуса от числа циклонов в батарее:

$$\frac{D_m}{D} = \frac{1}{\sqrt{m}}. \quad (1)$$

Достоинством этой методики расчета диаметра цилиндрического корпуса является предварительное определение фиктивной средней скорости осевого течения газа в цилиндрической части циклона как в трубе по известным гидравлическому сопротивлению, плотности газа (воздуха) и коэффициенту сопротивления  $\xi$  рассчитываемого типа циклона ( $\frac{\Delta p}{\rho}$  и  $\xi$  – рекомендуемые параметры для соответствующего типа циклона):

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho \xi}},$$

которая постоянна и не зависит от диаметра циклонов. Тогда диаметр каждого циклона в батарее рассчитывается по уравнению неразрывности:

$$D_m = \sqrt{\frac{4q_v}{m \cdot \pi \cdot v \cdot 3600}},$$

из которого вытекает пропорция (1).

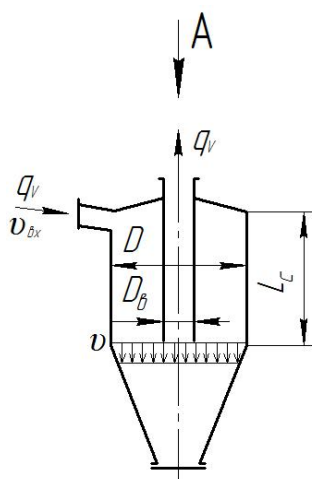


Рис. 1. Схема гидроциклона с геометрическими параметрами и профилями скоростей

Рассмотрим алгоритм расчета гидроциклона, представленный в справочниках [4–7].

Скорость жидкости во входном патрубке при любом числе аппаратов  $m$  в батарее определяется по формуле:

$$v_{вх} = \frac{4 \cdot q_v}{3600 \cdot m \cdot \pi D_m^2}, \quad (3)$$

а тангенциальная (окружная) скорость (рис. 1) – по формуле:

$$v_y = \frac{3,15 \cdot v_{вх} \cdot \left(\frac{D_n}{D_m}\right)}{\left(\frac{L_c}{D_m}\right)^{0,32}}, \quad (4)$$

Проверим для циклонов в батарее, рассчитываемых по типовому алгоритму, выполнение условия гидродинамического подобия:

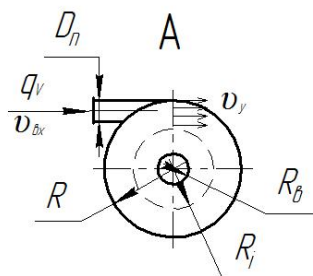
$$Re = Re_m,$$

где  $Re$  и  $Re_m$  – соответственно определяющие критерии Рейнольдса для одного и батареи из  $m$  циклонов:

$$\frac{vD}{\nu} = \frac{v_mD_m}{\nu}. \quad (2)$$

Так как фиктивные скорости  $v$  и  $v_m$  должны быть равны при любом числе циклонов в батарее, то согласно условию гидродинамического подобия  $D=D_m$ , то есть нельзя, сохраняя геометрическое подобие с условием (2), одновременно обеспечить и равенство определяющих чисел Рейнольдса в одном циклоне и в батарее.

Целью настоящей работы является анализ гидромеханических процессов в батарее гидроциклонов с учетом геометрического и гидромеханического подобия.



или, подставляя  $v_{вх}$  из предыдущего уравнения, получаем

$$v_y = \frac{3,15 \cdot \frac{4 \cdot q_v}{3600 \cdot m \cdot \pi D_m^2} \cdot \left(\frac{D_n}{D_m}\right)}{\left(\frac{L_c}{D_m}\right)^{0,32}}. \quad (5)$$

Равенство гидродинамических критериев подобия предполагает выполнение условия

$$Re_y = Re_{ym}$$

или

$$v_y D = v_{ym} D_m,$$

где  $v_y$  и  $v_{ym}$  – соответственно тангенциальные

(окружные) скорости в одном гидроциклоне и в батарее из  $m$  гидроциклонов, а  $D$  и  $D_m$  – диаметры цилиндрического корпуса в одном гидроциклоне и в батарее.

Подставляя значения  $v_y$  и  $v_{ym}$  из уравнения (5) в последнее равенство после алгебраических преобразований, получаем

$$\left( \frac{q_V}{\pi D^2} \right) \cdot D = \left( \frac{q_V}{\pi D_m^2} \right) \cdot D_m$$

или следующую пропорцию

$$\frac{D_m}{D} = \frac{1}{m}, \quad (6)$$

обеспечивающую равенство определяющих чисел подобия  $Re$  в батарее гидроциклонов и в одном гидроциклоне, то есть в отличие от циклонов и батареи циклонов, где числа геометрического подобия и гидродинамического подобия не совместны, в гидроциклонах такое одновременное подобие возможно при выполнении условия (6).

Проведем расчет батареи гидроциклонов, в которых диаметры изменяются в зависимости от числа гидроциклонов в батарее по формуле (6), то есть обеспечивающих одновременно гидродинамическое и геометрическое подобия.

I. Первый блок формул связан с выходом на номинальный диаметр частиц, то есть частиц, улавливаемых на 100 %.

1. Фактор разделения:

$$F_p = \frac{v_{ок}^2}{(g \cdot D/2)}.$$

2. Из условия

$$\frac{\pi L_c \left( \frac{D^2 - D_6^2}{4} \right)}{q_V / 3600} = \frac{\left( \frac{D - D_6}{2} \right)}{v_o}.$$

определяем скорость осаждения частиц номинального диаметра в центробежном поле

$$v_o = \frac{q_V / 3600}{\pi L_c \left( \frac{D + D_6}{2} \right)},$$

число Лященко для этих частиц

$$La_0 = (v_o^3 \cdot \rho^2) / [g \cdot F_p \cdot \mu \cdot (\rho_q - \rho)],$$

а также число Архимеда, исходя из уравнения связи [7]

$$La_0 = Ar_0^2 / (18 + 0,61 \cdot \sqrt{Ar_0})^3.$$

3. Зная число  $Ar_0$ , находим номинальный диаметр частиц, улавливаемых на 100 %

$$d_0 = \sqrt[3]{(Ar_0 \cdot \mu^2) / [g \cdot F_p \cdot \rho \cdot (\rho_q - \rho)]},$$

и число Рейнольдса для этих частиц

$$Re_0 = (v_o \cdot \rho \cdot d_0) / \mu.$$

II. Второй блок формул связан с определением локальной степени улавливания частиц дисперсной среды с размером  $d_i < d_0$ :

1. Число Архимеда  $Ar_i$  для фракций  $d_i < d_0$

$$Ar_i = Ar_0 \cdot (d_i / d_0)^3.$$

2. Число Рейнольдса  $Re_i$  для фракций  $d_i < d_0$  [7] – формула Тодеса

$$Re_i = \{ Ar_i / [18 + 0,61 \cdot \sqrt{Ar_i}] \}.$$

3. Скорость осаждения в центробежном поле частиц  $d_i < d_0$

$$v_i = (Re_i \cdot \mu) / (\rho \cdot d_i).$$

4. Из условия времени пребывания частиц каждой фракции  $d_i$  равного времени центробежного их осаждения с траектории  $R_6 < R_i < R$  (рис. 1), где  $R = D/2$

$$\tau_i = (R - R_i) / v_i,$$

то приравнивая правые части последнего уравнения и уравнения (1), получаем пропорцию

$$\frac{R - R_i}{R - R_6} = \frac{v_i}{v_o}.$$

5. При условии равномерного распределения частиц каждой фракции по объему очищаемой жидкости в исходной суспензии получаем, что левая часть последней пропорции численно равна локальной степени очистки для частиц данной фракции. Тогда локальная степень улавливания частиц диаметром  $d_i$  будет определяться

$$\chi_i = v_i / v_o, \quad d_i < d_0;$$

$$\chi_i = 1, \quad d_i \geq d_0.$$

6. Локальная концентрация уловленных частиц рассчитывается по формуле

$$C_{yi} = \chi_i \cdot C_i,$$

а общая степень улавливания  $\chi_0 = \sum_{i=1}^n C_{yi}$ .

В табл. 1 приведены исходные данные по ситовому анализу частиц в сточных водах и результаты расчетов параметров в зависимости от числа гидроциклонов в батарее. В качестве первого гидроциклона выбираем гидроциклон ГНС-320 с возможным диапазоном производительности  $q_V = 24 \div 117 \text{ м}^3/\text{час}$  и диапазоном улавливаемых частиц  $(15,3 \div 685) \text{ мкм}$ , что соответствует фракциям частиц, представленных в табл. 1 [4]. Алгоритм расчета параметров представлен в работах [8–10].

Таблица 1

**Фракционный состав частиц в сточной воде и расчетные параметры локальных степеней улавливания частиц по фракциям в зависимости от числа гидроциклонов в батарее (число фракций  $k = 12$ )**

№ п/п	Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина параметра												Примечание
1	Номер фракции	—	$i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
2	Размер частиц по фракциям массы фракции	мкм	$d_i$	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	
3	Масса фракции	г	$C_i$	34	121	196	231	212	194	173	144	111	67	33	16	$\Sigma = 1532$
4	Плотность распределения частиц по фракциям	%	$C$	2,22	7,9	12,8	15,1	13,8	12,7	11,3	9,4	7,2	4,4	2,1	1	$\Sigma = 100$
5	Локальные доли уловленных частиц	$m=1$	$C_y$	0,036	0,283	0,806	1,47	1,91	2,35	2,7	2,8	2,6	1,08	1,08	0,6	18,5*
		$m=2$		0,14	1,09	3,05	5,44	6,95	8,35	9,37	9,4	7,2	4,4	2,1	1	58,6*
		$m=3$		0,30	2,31	6,34	11,0	13,8	12,7	11,3	9,4	7,2	4,4	2,1	1	82,0*
		$m=4$		0,53	3,96	10,6	15,1	13,8	12,7	11,3	9,4	7,2	4,4	2,1	1	92,2*

\* – Общая степень очистки при числе гидроциклонов в батарее.

Примечание: ступенчатой линией разделены фракции частиц в батарее гидроциклонов, улавливаемых на 100 %: справа – крупные фракции, размер которых больше номинального диаметра частиц, то есть частиц теоретически улавливаемых на 100 %; слева – мелкие частицы, размер которых меньше номинального  $d_0$ .

В табл. 2 представлены геометрические параметры гидроциклонов, установленных параллельно в батарею, обеспечивающих одновременно геометрическое и гидродинамическое

подобия, и результаты расчетов общих технологических параметров, соответствующих последовательности их расчетов в алгоритме.

Таблица 2

**Геометрические и технологические параметры и размеры батарей гидроциклонов (плотность частиц  $\rho_{\text{ч}} = 2000 \text{ кг/м}^3$  больше плотности сточной воды  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ , динамическая вязкость сточных вод  $\mu = 0,051 \text{ Па}\cdot\text{с}$ )**

№ п/п	Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина			
	Число гидроциклонов в батарее	—	$m$	1	2	3	4
1	Производительность в каждом гидроциклоне	$\text{м}^3/\text{час}$	$q_V$	100	50	33,33	25
2	Внутренний диаметр цилиндрического корпуса	м	$D$	0,32	0,16	0,107	0,08
3	Наружный диаметр сливного патрубка	м	$D_{\text{с}}$	0,06	0,03	0,02	0,015
4	Эквивалентный диаметр питающего патрубка	м	$D_n$	0,04	0,02	0,133	0,010
5	Длина сепарационной части гидроциклона	м	$L_c$	0,5	0,25	0,167	0,125
6	Скорость жидкости во входном патрубке	м/с	$v_{\text{вх}}$	22,11	44,22	65,7	88,46
7	Окружная (тангенциальная) скорость жидкости	м/с	$v_y$	7,55	15,1	22,4	30,2
8	Фактор разделения	—	$F_p$	36,3	290,2	960,6	2321,0
9	Число Лещенко для частиц номинального диаметра	—	$La_0$	0,442	0,442	0,442	0,442
10	Число Архимеда для частиц номинального диаметра	—	$Ar_0$	74,7	74,7	74,7	74,7

Окончание табл. 2

№ п/п	Наименование параметра	Размер- ность	Обозна- чение	Величина			
11	Размер частиц номинального размера	мкм	$d_0$	177,6	82,8	59,7	44,4
12	Скорость центробежного осаждения частиц номинального диаметра	м/с	$v_0 \cdot 10^2$	9,3	18,6	27,8	37,2
13	Число Рейнольдса для частиц номинального диаметра	—	$Re_0$	3,24	3,24	3,24	3,24
14	Общая степень очистки	%	$\chi_0$	18,5	58,61	82,0	92,17
15	Среднее время пребывания частиц в сепарационной части гидроциклона	с	$\tau_0$	1,4	0,349	0,157	0,087 4
16	Произведение фактора разделения на среднее время пребывания частиц в сепарационной части гидроциклона	с	$P_p$	50,7	101,4	150,7	202,8 7

На рис. 2 для наглядности представлены графики зависимости общей степени очистки и фактора разделения от числа гидроциклонов в батарее, а на рис. 3 – плотность распределе-

ния частиц по фракциям в исходной суспензии и локальные концентрации уловленных частиц каждой фракции в зависимости от числа гидроциклонов в батарее.

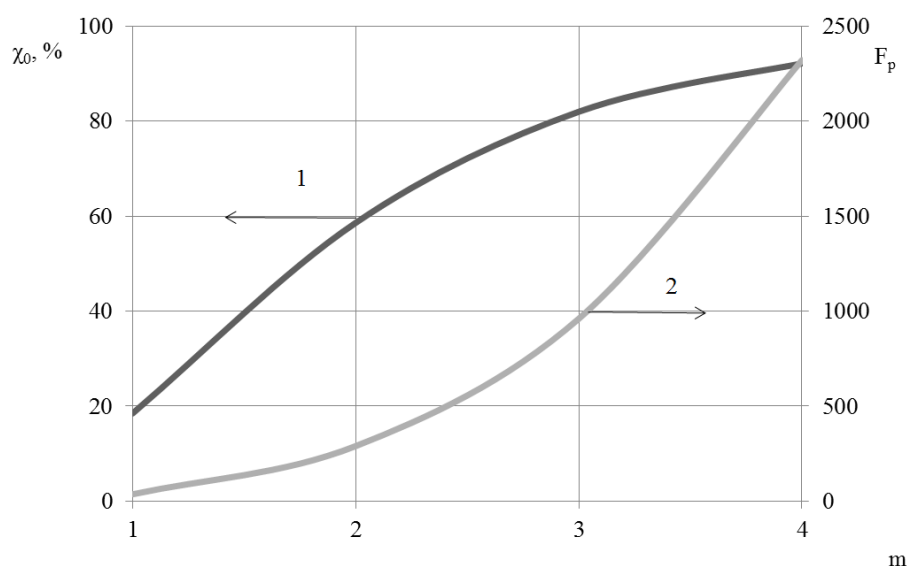


Рис. 2. Зависимости общей степени очистки  $\chi_0$  (1) и фактора разделения  $F_p$  (2) в гидроциклоне и батарее гидроциклонов

На рис. 3 справа от вертикальной линии  $d_{0i}$  – частицы, теоретически улавливаемые на 100 %; слева – доля уловленных частиц по фракциям (меньше 100 %), которая снижается с уменьшением размера частиц.

Как видно из материалов табл. 1 и 2 и графиков на рис. 2 и 3 с ростом числа гидроциклонов в батарее растет фактор разделения и, хотя среднее время пребывания частиц равно времени пребывания частиц номинального диаметра (то есть улавливаемых теоретически на 100 %), произведение этих технологических парамет-

ров растет и, соответственно, увеличивается общая степень очистки  $\chi$  и при числе гидроциклонов в батарее  $n=4$  она достигает заданной степени очистки в 92 %.

Кроме того, из материалов табл. 1 и графиков рис. 3, наглядно видно, как с ростом числа гидроциклонов в батарее уменьшается номинальный диаметр частиц и растет локальная доля уловленных частиц (ломаная линия в табл. 2 разделяет фракции, улавливаемые на 100 % и тонкие частично улавливаемые фракции).

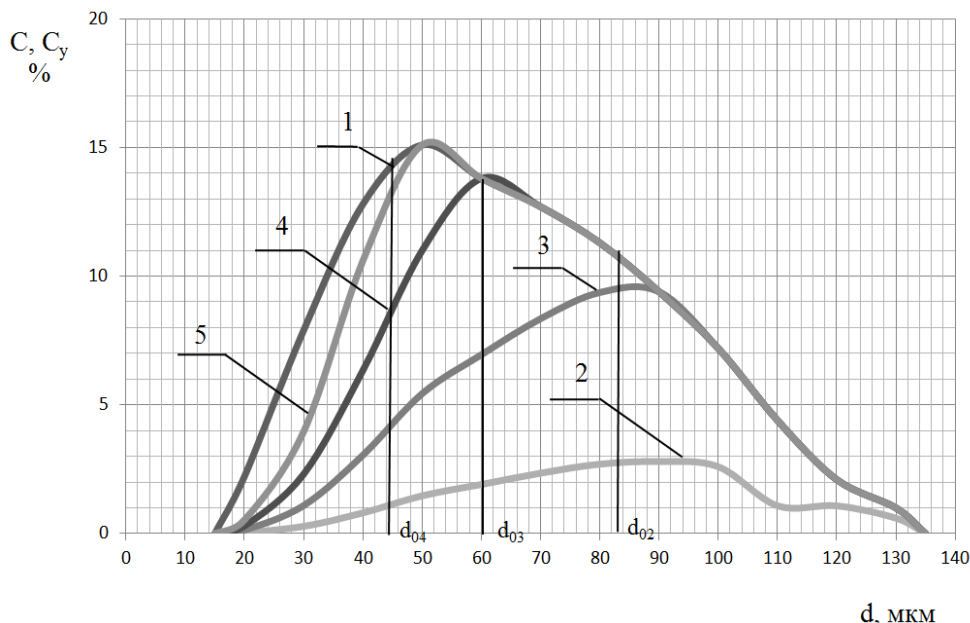


Рис. 3. Графики зависимостей концентраций частиц по фракциям:  
 1 — плотность распределения частиц исходной суспензии; 2 — концентрация уловленных частиц в одном гидроциклоне ( $m = 1$ ); 3 — концентрация уловленных частиц при числе гидроциклонов в батарее ( $m = 2$ ); 4 — концентрация уловленных частиц при числе гидроциклонов в батарее ( $m = 3$ ); 5 — концентрация уловленных частиц при числе гидроциклонов в батарее ( $m = 4$ )

Важно отметить, что фактор разделения растет быстрее, чем уменьшается среднее время пребывания жидкой фазы (равное времени осаждения частиц номинального диаметра, то есть частиц, теоретически улавливаемых на 100 %). Поэтому параметр  $P$ , характеризующий произведение фактора разделения на среднее время пребывания с ростом числа гидроциклонов в батарее монотонно увеличивается.

Таким образом, одновременное выполнение гидродинамического подобия и геометрического подобия всех размеров, приведенных к внутреннему диаметру цилиндрической части корпуса  $D$  обеспечивается в батарее гидроциклонов, если

$$D_m = \frac{D}{m},$$

что обеспечивает пропорциональное увеличение скорости жидкостей во входном патрубке  $v_{вх}$  и окружной части  $v_y$ , так что

$$Re = Re_m,$$

а с ними увеличение фактора разделения и общей степени очистки.

#### Список обозначений

$C$  — плотность распределения частиц по фракциям в исходной суспензии, %;  
 $C_i$  — масса  $i$ -й фракции, г;  
 $D$  — внутренний диаметр цилиндрического корпуса одного аппарата, м;

$D_m$  — внутренний диаметр для каждого из  $m$  аппаратов в батарее, м;

$D_n$  — диаметр входного (питающего) патрубка в гидроциклоне, м;

$d_i$  — условный диаметр частиц  $i$ -й фракции, мкм;

$d_0$  — условный диаметр частиц, улавливаемых на 100 %, мкм;

$F_p$  — фактор разделения;

$L_c$  — длина сепарационной части гидроциклона, м;

$m$  — число аппаратов в батарее;

$n$  — число фракций частиц в сточной воде;

$P_p$  — произведение фактора разделения на среднее время пребывания частиц в сепарационной части гидроциклона, с;

$q_v$  — объемный расход жидкости в аппарате,  $m^3/ч$ ;

$v$  — осевая скорость жидкости в одном аппарате, м/с;

$v_m$  — осевая скорость жидкости в каждом из  $m$  аппаратов в батарее, м/с;

$v_{вх}$  — скорость жидкости во входном патрубке гидроциклона, м/с;

$v_y$  — окружная (тангенциальная) скорость потока жидкости в аппарате, м/с;

$v_y$  — окружная (тангенциальная) скорость потока жидкости в каждом из  $m$  аппаратов в батарее, м/с;

$\zeta$  — коэффициент гидравлического сопротивления;



$\Delta p$  – гидравлическое сопротивление одного аппарата, Па;

$\mu$  – динамическая вязкость жидкости, Па·с;

$\nu$  – кинематическая вязкость жидкости, м<sup>2</sup>/с;

$\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{\text{ч}}$  – плотность частиц суспензии, кг/м<sup>3</sup>;

$\chi_i$  – локальная степень очистки каждой  $i$ -й фракции;

$\chi_0$  – общая степень очистки;

$\tau_0$  – среднее время пребывания частиц в сепарационной части гидроциклона, с;

$Ar_0$  – число Архимеда для частиц номинального диаметра, то есть улавливаемых на 100 %;

$La_0$  – число Лященко для частиц номинального диаметра;

$Re$  – число Рейнольдса для одного аппарата;

$Re_m$  – число Рейнольдса для каждого из  $m$  аппаратов в батарее;

$Re_0$  – число Рейнольдса для частиц номинального диаметра;

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Яблонский, В.О. Влияние конструктивных параметров гидроциклона на гидродинамику нелинейно вязкопластической жидкости // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2015. № 8. С. 6–10.
2. Лагуткин, М.Г., Булычев, С.Ю., Пигарев, В.М. Применение гидроциклонов с приемным бункером для очист-

ки оборотной воды от механических примесей // Химическое и нефтегазовое машиностроение. № 11. 2004. С. 3–5.

3. Кутепов, А.М., Баранов, Д.А., Лагуткин, М.Г. Опыт создания и применения гидроциклонов в процессах химической технологии // Химическая технология. 2000. № 1. С. 28–37.

4. Тимонин, А.С. Инженерно-экологический справочник. Т. 2. – 2-е изд., перераб., испр. и доп. Калуга : Ноосфера, 2015. 1126 с.

5. Терновский, И.Г. Гидроциклонирование / И.Г. Терновский, А.М. Кутепов. М.: Наука, 1994. 350 с.

6. Поваров, А.И. Гидроциклоны на обогатительных фабриках. М.: Недра, 1978. 232 с.

7. Павлов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. 14-е изд., стер. перепеч. с изд. 1987 г. М.: Альянс, 2007. 575 с.

8. Голованчиков, А.Б., Ламскова, М.И., Филимонов, М.И. Сравнение вероятности улавливания частиц в напорном гидроциклоне при обычном и двухслойном течении // Известия ВолгГТУ. Сер. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Вып. 8. Волгоград, 2015. № 1 (154). С. 64–67.

9. Голованчиков, А.Б., Ламскова, М.И., Филимонов, М.И. Моделирование процессов очистки нефтяных шламов в гидроциклоне одновременно от «тяжелых» и «легких» частиц дисперсной фазы // Известия ВолгГТУ. Сер. Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. Волгоград, 2016. № 11 (190). С. 8–13.

10. Голованчиков, А.Б., Симонов, Б.В. Применение ЭВМ в химической технологии и экологии. Ч. 2. Моделирование гидромеханических процессов : учеб. пособие. Волгоград : Царицын, 1995. 121 с.

УДК 656.13.021

**Д. А. Скоробогатченко, П. Ю. Степанова**  
**ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**  
**ПРИ КРАТКОСРОЧНОМ ПРОГНОЗИРОВАНИИ**  
**УРОВНЯ ЗАГРУЗКИ ГОРОДСКИХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ**  
**Волгоградский государственный технический университет**  
 dmitryskor2004@gmail.com

Предлагается метод краткосрочного прогнозирования уровня загрузки городской улично-дорожной сети на основе определения часовой интенсивности движения. В качестве математического инструмента для реализации метода выбран аппарат искусственных нейронных сетей. Прогноз краткосрочной интенсивности движения предлагается осуществлять с учетом времени суток, дня недели и времени года. Фактор сезонности учитывается при расчете как интенсивности движения, так и параметров пропускной способности городской улично-дорожной сети. Представлены результаты прогнозирования загрузки городской улично-дорожной сети на примере одной из центральных улиц г. Волгограда.

**Ключевые слова:** пропускная способность, интенсивность движения, городская улично-дорожная сеть, прогнозирование, искусственные нейронные сети

**Д. А. Skorobogatchenko, P. Yu. Stepanova**  
**APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS WITH SHORT-TERM**  
**PREDICTION OF THE LEVEL OF LOADING OF URBAN AUTOMOBILE ROADS**  
**Volgograd State Technical University**

The method of short-term forecasting of the level of loading of a city street-road network based on the determination of the hourly traffic intensity is proposed. As a mathematical tool for the implementation of the method, the device of artificial neural networks was chosen. The forecast of short-term traffic intensity is proposed to be implemented taking into account the time of the day, the day of the week and the time of the year. The factor of seasonality is taken into account when calculating both the traffic intensity and the parameters of the city's road network traffic capacity. The results of forecasting the loading of the urban street-road network by the example of one of the central streets of Volgograd are presented.

**Keywords:** carrying capacity, traffic intensity, urban street-road network, forecasting artificial neural networks.

### Введение

Эффективная работа автомобильного транспорта в значительной степени определяется транспортно-эксплуатационным состоянием автомобильных дорог [14]. Одним из наиболее существенных транспортно-эксплуатационных показателей является интенсивность движения и пропускная способность дорог. На основании этих показателей рассчитывается коэффициент загрузки автомобильных дорог, представляющий собой основную характеристику технико-экономической эффективности работы городской улично-дорожной сети (УДС) [11].

При этом следует отметить, что значительный рост интенсивности движения и качественное изменение состава транспортного потока, наблюдающиеся в последнее десятилетие привело к тому, что значительная часть УДС крупных городов работает на пределе пропускной способности. Как результат – заторы, значительное снижение скорости транспортного потока, рост аварийности, повышенный износ дорожной инфраструктуры и нагрузка на экологию городской среды [13].

Одним из способов решения перечисленных проблем является применение методов моделирования транспортных процессов, программного обеспечения, сбора информации и управления транспортными системами в реальном времени [7]. Построение такой интеллектуальной системы управления дорожным движением представляет сложную, комплексную задачу, основанную на моделировании транспортных систем и регулировании транспортных потоков.

Известно, что в основе мероприятий по улучшению организации движения, повышению безопасности, увеличению средней технической скорости и производительности подвижного состава автомобильного транспорта лежит изучение и своевременный учет интенсивности, направлений и состава движения [4]. Тем не менее, в настоящее время не достаточное внимание уделяется вопросам, связанным с определением параметров транспортного потока, таких как интенсивность и пропускная способность городской УДС [2]. Так среднегодовую суточную интенсивность движения зачастую принимают не по данным непрерывного автоматизированного учета и численных методов, а в соответствии с рекомендациями ВСН 42-87 Минтрансстроя СССР [5], согласно которому на эксплуатирующихся дорогах суточная интенсивность определяется в результате экстен-

сивности непосредственных часовых наблюдений в пиковый период. Ситуация ухудшается тем, что во многих крупных городах исчерпаны или близки к исчерпанию возможности экстенсивного развития транспортных сетей [9, 15]. В связи с этим особую актуальность в настоящее время приобретает решение вопросов, связанных с прогнозированием загрузки городской УДС. Управление городской УДС на основе эффективного метода прогнозирования и оценки ее загрузки будет способствовать также решению проблем создания «умных городов» [17] и интеллектуальных транспортных систем [19].

Целью данной работы является оперативное управление пропускной способностью дорожной сети на основе метода краткосрочного прогнозирования загрузки городской УДС.

### Обзор литературы

Задаче краткосрочного прогнозирования параметров транспортных потоков в отечественной и мировой печати посвящено значительное количество исследований. При этом методы прогноза основываются на учете различных факторов, которые, по мнению их авторов, оказывают существенное влияние на интенсивность движения автотранспорта и пропускную способность УДС. Среди исследователей нет единого подхода к выбору факторов – это и сведения о пользователях дорог (демографические показатели, уровень доходов на душу населения и данные анализа выгод пользователей, уровень автомобилизации населения, данные анализа отправных пунктов и пунктов назначения по маршрутам следования автомобилистов и макроэкономические показатели, влияющие на деловую активность), а также данные о сети автодорог [12].

Из-за нестабильности дорожных условий осуществляются попытки декомпозиции проблемы прогнозирования. Так, в работе [8] авторы при определении среднегодовой суточной интенсивности используют краткосрочные наблюдения в соответствии с [10]. В работе [6] при определении ограничиваются условиями урбанистической среды конкретных городов.

В ряде работ [1, 4] авторы делают попытку совместить при моделировании физические концепции транспортных потоков с математическим аппаратом (в частности, с теорией графов).

Можно констатировать, что, несмотря на множество исследований в области прогнозирования интенсивности движения и управления транспортными потоками, общий уровень их

практического использования не достаточен как из-за обилия определяющих факторов и входной информации, подчас не поддающейся формализации, так и нестабильности дорожных условий и дорожного движения.

Анализируя математические подходы к решению задачи прогнозирования и оценки параметров транспортных потоков, можно выделить регрессионные модели [21], модели, основанные на временных рядах [18], модели, основанные на нейронных сетях [20, 23] и модели, построенные на основе метода опорных векторов [22].

По ряду замечаний, высказанных авторами в работе [23] при прогнозировании пропускной способности выбор математического инструментария был сделан в пользу искусственных нейронных сетей. Поскольку для оценки пропускной способности необходимо осуществлять краткосрочный прогноз интенсивности движения, данный математический аппарат позволяет использовать параметры исследуемого

показателя за предыдущие годы, повышая объективность результатов прогноза. Следует отметить, что искусственные нейронные сети достаточно широко применяются для прогнозирования различных процессов, связанных с изменением транспортно-эксплуатационных показателей автомобильных дорог в дорожно-транспортной отрасли [16].

#### Метод оценки загрузки городской УДС

Предлагаемый метод оценки загрузки городской УДС исходит из нормативного подхода к определению коэффициента загрузки [11], дополняя отраслевой документ учетом фактора сезонности и краткосрочным прогнозированием среднегодовой часовой интенсивности движения. В качестве инструмента для прогнозирования часовой интенсивности предлагается использовать искусственные нейронные сети. Согласно официальному подходу [5], на интенсивность движения оказывают определяющее влияние следующие факторы (см. рис. 1).

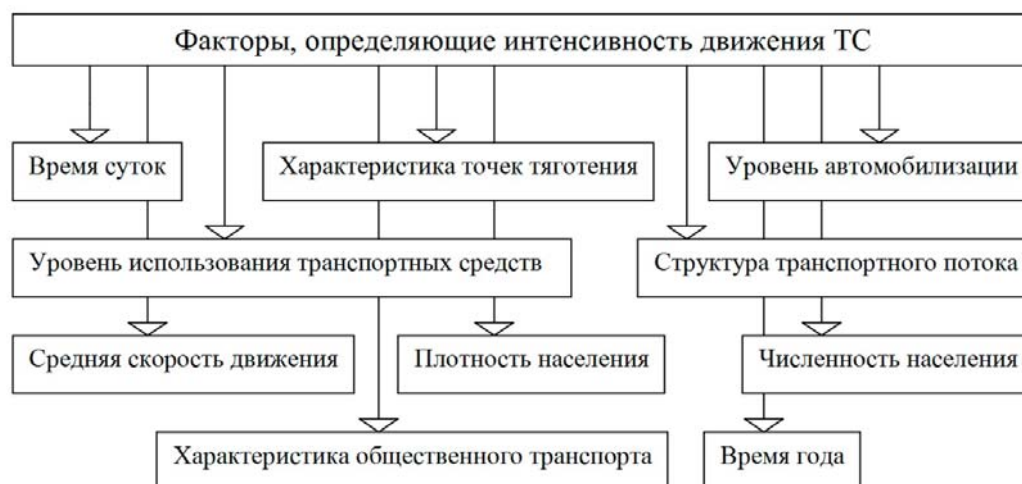


Рис. 1. Факторы, учитываемые при построении модели прогнозирования интенсивности движения

В качестве факторов снижающих пропускную способность в зимнее время учитывались состояние покрытия, интенсивность работы дорожных служб и уменьшение ширины крайних полос [3, 10]. В качестве экспериментальной базы, авторами был выбран участок по ул. Рабоче-Крестьянская г. Волгоград в границах от пересечения с ул. Бобруйская до пересечения с ул. Баррикадная, интенсивность по которому относительно однородна. Измерения по данной улице проводились в летний и зимний периоды года (рис. 2).

Для моделирования в среде Deductor Studio была реализована нейронная сеть, структура

которой экспериментально модифицировалась в зависимости от количества входных сигналов и числа наблюдений. Скорость обучения принималась равной 0,01, ошибка по выборке устанавливалась на уровне 0,1. Условия окончания обучения оставлены стандартными.

Практическим путем была подобрана искусственная нейронная сеть с пятью входами, двумя скрытыми слоями, содержащими шесть и двенадцать нейронов, соответственно. Выходной слой представлен одним нейроном, на выходе которого будет значение прогнозируемой интенсивности движения. Общий вид используемой в работе нейронной сети представим на рис. 3.

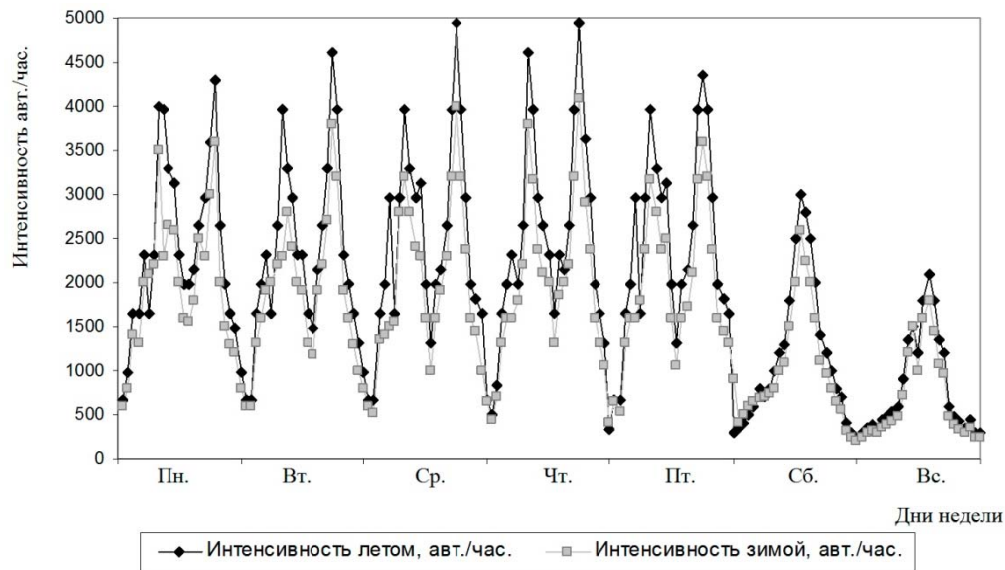


Рис. 2. Общий тренд изменения часовой интенсивности движения в пределах недели по ул. Рабоче-Крестьянская в различные периоды года

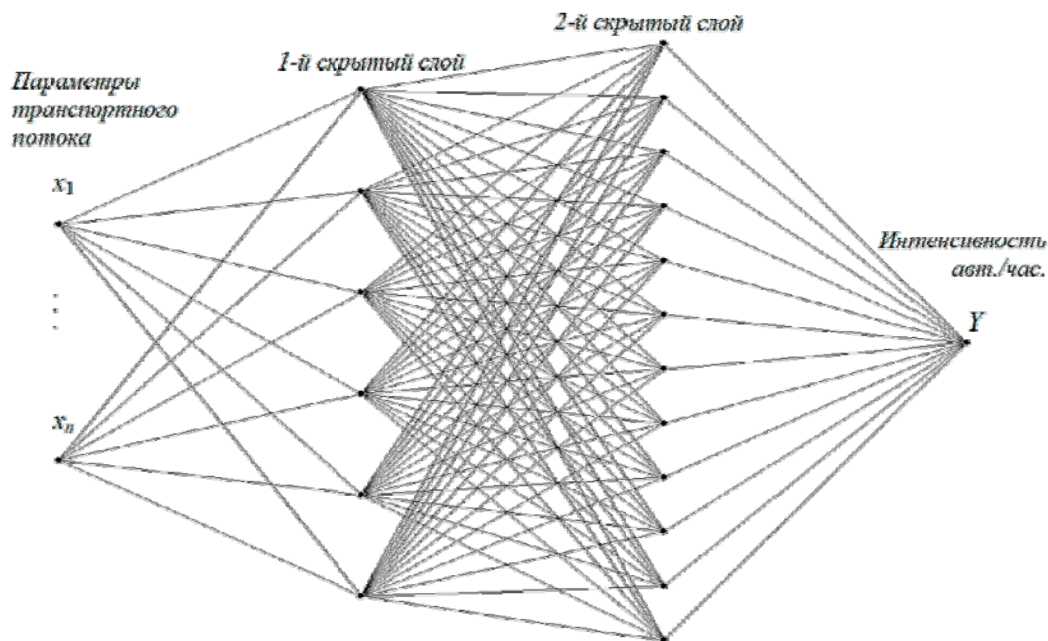


Рис. 3. Структура искусственной нейронной сети, применяемой для краткосрочного прогнозирования интенсивности движения

Входные нейроны принимают значения переменных вектора входного воздействия  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , где  $n$  – число компонентов вектора, равное числу входных параметров характеризующих среднегодовую часовую интенсивность движения (время суток, период года, уровень автомобилизации и т. п.). Соответственно, ему же будет равно число входных нейронов, образующих вход нейронной сети.

Сеть представлена только одним выходным нейроном  $Y$ , который будет принимать различ-

ные конечные значения в зависимости от значения интенсивности. Выходной нейрон служит для вывода результатов обработки нейронной сетью входного вектора.

Для учета смещения в нейронную сеть добавляются единичные входы, а все первые элементы векторов – активационных функций приравниваются к единице.

Процедуры вычисления выходного значения  $Y$  сетью, стандартные, поэтому мы не приводим их в работе. В качестве алгоритма обу-

чения нейронной сети выбран метод обратного распространения ошибки (back propagation), реализованный в Deductor Studio.

После обучения НС на 168 примерах, представляющих собой почасовые данные об ин-

тенсивности движения за одну неделю в летний период был осуществлен прогноз интенсивности за месяц. Результаты прогнозирования интенсивности движения сетью после обучения в летний период года представим на рис. 4.

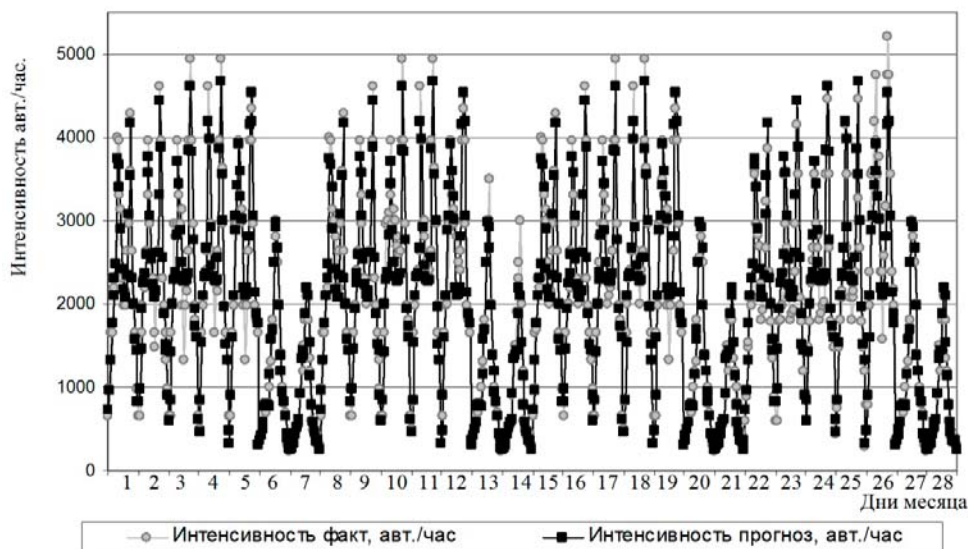


Рис. 4. Результаты прогноза часовой интенсивности движения по ул. Рабоче-Крестьянская за месяц летнего периода в сравнении с фактическими данными, реализованного после обучения НС

Аналогичные результаты получены при применении обучения на данных по интенсивности, собранных в зимний период.

Очевидно, что прогноз среднегодовой часовой интенсивности движения достаточно близко аппроксимирует фактические данные, полученные в результате наблюдений на дороге. Так, средняя абсолютная ошибка (Mean absolute percentage error) при прогнозировании за месяц не превышает 10 % в летний период и 12–15 % в зимний (в зависимости от наличия совокупного влияния негативных факторов – дождь,

снег, гололед). Следовательно, качество результатов расчета коэффициента загрузки, основанного на прогнозных данных по интенсивности будет достаточно высоким. Методика расчета пропускной способности и коэффициента загрузки дороги принималась в соответствии с нормативными документами [11].

Данные расчета прогноза коэффициента загрузки дороги в сравнении с фактическими результатами для ул. Рабоче-Крестьянская в различные периоды года представим на рис. 5–6.

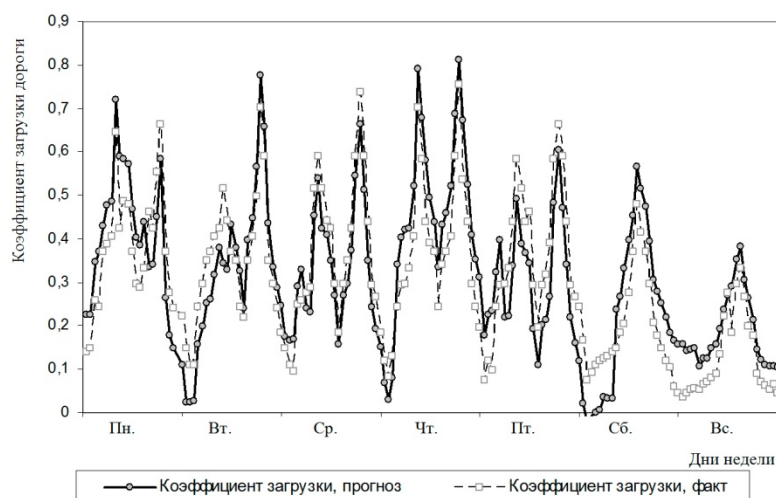


Рис. 5. Данные прогноза коэффициента загрузки ул. Рабоче-Крестьянская в зимний период в сравнении с фактически полученными результатами



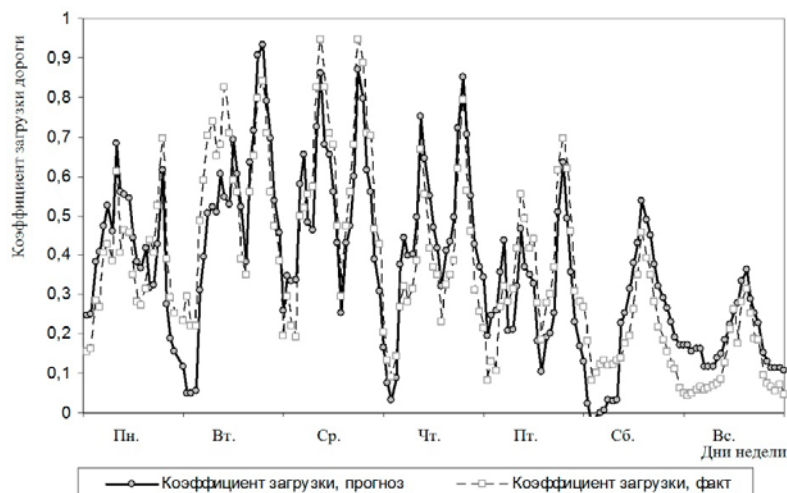


Рис. 6. Данные прогноза коэффициента загрузки ул. Рабоче-Крестьянская в зимний период в сравнении с фактически полученными результатами в условиях воздействия неблагоприятных погодных-климатических факторов

### Обсуждение результатов и выводы

Авторами разработан метод оценки загрузки городской УДС, основанный на краткосрочном прогнозировании среднегодовой часовой интенсивности движения. В качестве инструмента реализации предлагается применение искусственных нейронных сетей в среде Deductor Studio. Расчеты пропускной способности показали хорошую сходимость результатов прогноза с фактически полученными данными, что говорит о работоспособности предложенного метода. По результатам проделанной работы можно сделать следующие выводы:

1. Предложенный метод отличается высокой адаптивностью – обучая сеть на других участках городской УДС и включая в сеть дополнительные параметры, учитывающие специфические особенности функционирования конкретных участков УДС (геометрические, как то ширина проезжей части, транспортные, такие как особенности состава транспортных потоков или социально-экономические – к примеру, близость торгово-развлекательным центрам тяготения потоков), предлагаемый метод может лечь в основу системы оперативного управления пропускной способностью городской УДС.

2. Авторский подход позволяет учесть изменения в пропускной способности городской УДС не только в течении часа или дней недели, но так же отражает сезонные изменения, в том числе при проявлении неблагоприятных погодных-климатических факторов.

3. На основании предлагаемого метода возможно планирование мероприятий по органи-

зации движения и оперативному управлению городскими транспортными потоками с учетом фактора сезонности и проявления неблагоприятных погодных-климатических факторов.

Одним из дальнейших направлений работы авторов является разработка системы поддержки принятия решений при оперативном управлении пропускной способностью городской УДС с использованием предложенного в работе метода прогнозирования как одного из компонентов. Кроме этого, возможно направление работы по приложению авторского метода в качестве составляющей технологий создания «умных городов», интеллектуальных транспортных систем и интернет сервисов для участников дорожного движения, позволяющих анализировать развитие транспортной ситуации при планировании перемещений по городу.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агафонов, А.А., Мясников, В.В. Оценка и прогнозирование параметров транспортных потоков с использованием композиции методов машинного обучения и моделей прогнозирования временных рядов // Компьютерная оптика. 2014. № 3, Т. 38. С. 539–549.
2. Акулов, В.В. Анализ методов учета интенсивности движения на автомобильных дорогах // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». 2012. № 4. [Электронный ресурс]. Режим доступа : <https://naukovedenie.ru/PDF/1trgsu412.pdf> (Дата обращения 23.10.2017)
3. Боброва, Т.В., Слепцов, И.В. Моделирование решений по снегоочистке городской улично-дорожной сети в многоагентной системе // Вестник СибАДИ. 2013. № 5 (33). С. 51–57.
4. Введение в математическое моделирование транспортных потоков : учеб. пособие / А.В. Гасников, С.Л. Кленов, Е.А. Нурминский, Я.А. Холодов, Н.Б. Шамрай ; Приложения: М.Л. Бланк, Е.В. Гасникова, А.А. За-

матин и В.А. Малышев, А.В. Колесников, А.М. Райгородский; под ред. А.В. Гасникова. М.: МФТИ, 2010. 362 с. 4

5. ВСН 42-87 Инструкция по проведению экономических изысканий для проектирования автомобильных дорог. М.: ЦБНТИ Минавтодора РСФСР, 1989.

6. Гасанов, Т.Г., Батманов, Э.З., Гусейнов, М.Р. Определение интенсивности городского движения в условиях республики Дагестан // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2014. № 3 (34). С. 98–102.

7. ГОСТ Р ИСО 14813-1-2011 «Интеллектуальные транспортные системы. Схема построения архитектуры интеллектуальных транспортных систем. Ч. 1. Сервисные домены в области интеллектуальных транспортных систем, сервисные группы и сервисы». М.: Стандартинформ. 2011. 51 с.

8. Ермаченко, К.А., Шакина, Е.И. Прогнозирование транспортных потоков на улицах Читы при кратковременных обследованиях // Аспирант. Приложение к журналу Вестник Забайкальского государственного университета. 2013. № 1 (13). С. 86–91.

9. Иносэ, Х., Хамада, Т. Управление дорожным движением. М.: Транспорт, 1983. 248 с.

10. Исаков, В.Г., Дягелев, М.Ю. Применение метода анализа иерархий в оценке пропускной способности проезжей части городских дорог в зимнее время // Вестник ИЖГТУ им. М.Т. Калашникова. 2011. № 2. С. 170–172.

11. Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог: ОДМ 218.2.020-2012: утв. Минтранс РФ 17.02.2012: ввод в действие с 01.03.2012. М.: 2012. 135 с.

12. Пингасов, Д.В. Прогноз транспортных потоков в регионах Сибирского федерального округа Российской Федерации // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования, № 4(43), Изд-во ООО «КРЕДО-ДИАЛОГ», 2011. С. 82–84.

13. Серова, Е.Ю. Возможные пути повышения пропускной способности улично-дорожной сети города // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. Вып. 46(65). С. 84–94.

14. Скоробогатченко, Д.А. Модель для оценки эксплуатационного состояния автомобильных дорог с учетом информации качественного характера // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2011. № 21. С. 60–66.

15. Ширин, В.В. Повышение пропускной способности улично-дорожной сети города // Вестник ХНАДУ. 2010. № 50. С. 40–47

16. Щербаков, М.В., Скоробогатченко, Д.А., Авдеев, А.А., Аль-Гунаид, М.А. Проблемы проектирования систем прогнозирования эксплуатационного состояния автомобильных дорог на основе нечетких нейронных сетей // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2011. Т. 10. № 3(76). С. 82–87.

17. Batty, M. Smart cities of the future / M. Batty, K.W. Axhausen, F. Giannotti, A. Pozdnoukhov, A. Bazzani, M. Wachowicz, G. Ouzounis, Y. Portugali // The European Physical Journal Special Topics. 2012. Vol. 214, Issue 1. P. 481–518.

18. Box, G.E. Time Series Analysis: Forecasting and Control / G.E. Box, G.M. Jenkins, G.C. Reinsel. 4th edition. Wiley, 2008. 784 p.

19. Hall, R. Handbook of transportation science / R.W. Hall. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003. 737 p.

20. Min, W. Real-time road traffic prediction with spatio-temporal correlations / W. Min, L. Wynter // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2011. Vol. 19, Issue 4. P. 606–616.

21. Sun, H. Short term traffic forecasting using the local linear regression model / H. Sun, H. Liu, H. Xiao, R. He, B. Ran // Journal of Transportation Research Board. 2003. Vol. 1836. P. 143–150.

22. Zhang, X. Forecasting Approach for Short-term Traffic Flow based on Principal Component Analysis and Combined Neural Network / X. Zhang, G. He // Systems Engineering: Theory & Practice. 2007. Vol. 27(8). P. 167–171.

23. Zheng, W. Short-term freeway traffic flow prediction: bayesian combined neural network approach / W. Zheng, D.-H. Lee, Q. Shi // Journal of Transportation Engineering. 2006. Vol. 132, N 2. P. 114–121.

УДК 623.618

*А. В. Старусев, В. И. Лобейко, Г. К. Мустафаев*

## МЕТОД ОЦЕНКИ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ПОМОЩЬЮ КОНСТРУКТИВНЫХ КРИТЕРИЕВ

**Астраханский государственный университет**

starusev-av@yandex.ru

В статье предлагается метод, который позволяет оценить разрабатываемую имитационную модель сложной технической системы с помощью ряда конструктивных критериев. Выбор этих критериев определяется этапом жизненного цикла имитационной модели. На этапе разработки модели используются показатели сложности и трудоемкости. При этом сложность разработки оценивается тремя показателями: структурной модульностью; информационной модульностью; функциональной модульностью.

**Ключевые слова:** имитационная модель, конструктивные критерии, качество имитационной модели, сложность и трудоемкость программирования, структурная, информационная и функциональная модульность.

*A. V. Starusev, V. I. Lobeyko, G. K. Mustafaev*

# METHOD OF THE ESTIMATION OF IMITATING MODEL COMPLEX TECHNICAL SYSTEM BY MEANS OF CONSTRUCTIVE CRITERIA

The Astrakhan State University

In this article there is the method which allows to estimate the developed imitating model of complex technical system by a number of design criteria. The choice of these criteria is determined by a stage of life cycle of imitating model. Indicators of difficulty and complexity are used on the development cycle of this model. In this connection complexity of development is estimated by three parameters: structural modularity; information modularity; functional modularity.

**Keywords:** Imitating model, constructive criteria, quality of imitating model, complexity and difficulty of programming, structural, information and functional модульность.

## Введение

Следует отметить, что принципиальной особенностью имитационных моделей (ИМ) сложных технических систем (СТС) является сложность выделения единого критерия качества, полностью характеризующего ИМ. Критерии качества представляют собой измеряемые численные показатели в виде некоторой целевой величины, характеризующие степень выполнения имитационной моделью своего назначения. Показатели качества подлежат измерению и численной оценке [1]. Применение числовых оценок параметров к имитационным моделям позволяет упорядочить их разработку, применение и эксплуатацию.

Однако использование лишь только числовых оценок параметров ИМ СТС обычно приводит к неполным мерам соответствующих характеристикам, часто определяющихся лишь косвенным путем. Анализ существующего состояния в области оценки качества позволяет сделать следующие выводы [5, 6, 7, 8, 9]: желательные качества имитационных моделей меняются с потребностями и приоритетами предполагаемого пользователя на различных фазах жизненного цикла ИМ СТС; не существует одной общей численной оценки параметров, которая могла бы дать универсальную полезную оценку качества ИМ СТС; предполагаемый пользователь может получить полезную оценку качества ИМ СТС путем предоставления системе оценивания качества полного множества контрольных списков и приоритетов; так как

численные оценки параметров ИМ СТС не являются исчерпывающими, получаемая общая оценка будет носить характер в большей степени совета, чем заключения или предписания.

Таким образом, численные оценки параметров ИМ СТС лучше применять как индикаторы отдельных аномалий, которые могут использоваться в качестве ориентиров для разработки, планирования тестов, применения и сопровождения.

Ряд применяемых критериев качества можно отнести к группе конструктивных критериев.

## Постановка задачи

Конструктивные критерии качества ИМ СТС выражают сложность создания и эксплуатации ИМ СТС, их надежность, сложность модернизации и т.п. Они выбираются таким образом, чтобы в минимальной степени зависеть от назначения ИМ СТС. Выбор конструктивных критериев качества определяется этапом жизненного цикла ИМ СТС, к которому они применяются. На этапе разработки используются показатели, выражающие сложность и трудоемкость разработки. При модульном построении сложность разработки будем оценивать тремя показателями: структурной модульностью; информационной модульностью; функциональной модульностью.

## Решение

Показатель структурной модульности ИМ СИС определяется степенью связанности ее модулей по управлению и может быть представлена в следующем виде [1, 7, 10]:

$$M_C = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N (K_{1i} + K_{2i}) - 2N}{2N^2}\right) \exp\left(-\frac{(K_{BX} + K_{BBLX} - 2N)}{3}\right), \quad (1)$$

где  $K_{1i}$  – количество модулей, от которых может поступить управление на  $i$ -й модуль;  $K_{2i}$  – количество модулей, на которые может быть

передано управление после завершения работы  $i$ -го модуля;  $K_{BX}$  и  $K_{BBLX}$  – суммарное количество точек входа и выхода по управлению для всех модулей;  $N$  – количество модулей.



При проектировании ИМ СТС требования структурной модульности нарушаются в основном вследствие неоднозначности передачи и приема управления, так как возможен альтернативный выбор модулей, что и учитывается в показателе (1).

Если ИМ СТС представляет направленную цепочку функциональных модулей без альтернативного выбора, то формула (1) имеет следующий вид:

$$M_C = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N (1+1) - 2N}{2N^2}\right) \exp\left(-\frac{(2N-2N)}{3}\right) = 1. \quad (2)$$

Поэтому для ИМ СТС, представляющей направленную цепочку функциональных модулей без альтернативного выбора, получаем следующую оценку (1):

$$M_C = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (K_{1i} + K_{2i}) - 2N}{2N^2}. \quad (3)$$

Для получения показателя, характеризующего информационную модульность, определяется информационное поле модели, как модуль данных. Предположим, что  $n_{1i}$  – количество информации, принимаемой ИМ СТС от модуля данных, а  $n_{2i}$  – количество информации, передаваемое модулю данных. Тогда оценка показателя информационной модульности определяется по следующей формуле:

$$M_H = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (n_{1i} + n_{2i}) - 2N}{2N^2}, \quad (4)$$

где  $N$  – общее число функциональных модулей.

Функциональные модули характеризуются абсолютной информационной модульностью  $n_{1i} = n_{2i} = 1$ ,  $n = 1 \rightarrow M_H \rightarrow 1$ .

ИМ СТС можно охарактеризовать и показателем функциональной модульности.

Абсолютной информационной модульностью обладают те функциональные модули, которые ориентированы на выполнение единственной функции. Произвольной ИМ СТС в общем случае реализуется совокупность функций. Уровень функциональной модульности оценивается показателем:

$$M_\phi = 1 - \frac{N_p}{N}, \quad (5)$$

где  $N_p$  – количество функциональных модулей, участвующих в реализации совокупности  $N$  функций.

Критерий показателя трудоемкости разработки в значительной степени определяется объемом программ, степенью автономности ИМ СТС, количеством функциональных модулей глобальных переменных, а также наличием жестких требований к времени работы и затратам памяти на размещение ИМ [2].

Совокупность рассмотренных показателей достаточно точно характеризует критерий показателя трудоемкости разработки программ ИМ СТС. Реализация рассмотренного метода с вышеперечисленными показателями на практике позволяет изучить структуру трудовых затрат при программировании задач, что весьма важно для рационального использования определенных ресурсов [2; 3].

Качество ИМ СТС по внешним связям с реальной системой и взаимодействию с другими ИМ можно характеризовать двумя показателями:

Показатель полноты обработки входной информации:

$$K_H = \frac{K_M}{K_C}, \quad (6)$$

где  $K_M$  – количество входных кодограмм (параметров), обрабатываемых ИМ;  $K_C$  – количество входных кодограмм (параметров), обрабатываемых моделируемой системой с данного направления.

Показатель полноты формирования выходной информации:

$$K'_H = \frac{K'_M}{K'_C}, \quad (7)$$

где  $K'_M$  – количество выходных кодограмм (параметров), формируемых ИМ;  $K'_C$  – количество выходных кодограмм (параметров), формируемых моделируемой системой в данном направлении.

На приведенном рисунке представлена схема оценки соответствия заданного в ТЗ качества ИМ СТС реальному объекту с помощью конструктивных критериев.

Не следует забывать, что важнейшим критерием качества имитационных моделей на этапе эксплуатации выступает надежность (безотказность) функционирования.

Показатель надежности характеризует относительную длительность получения корректных (достоверных) результатов или вероятность правильных (не вышедшие за допустимые пределы) выходных данных.

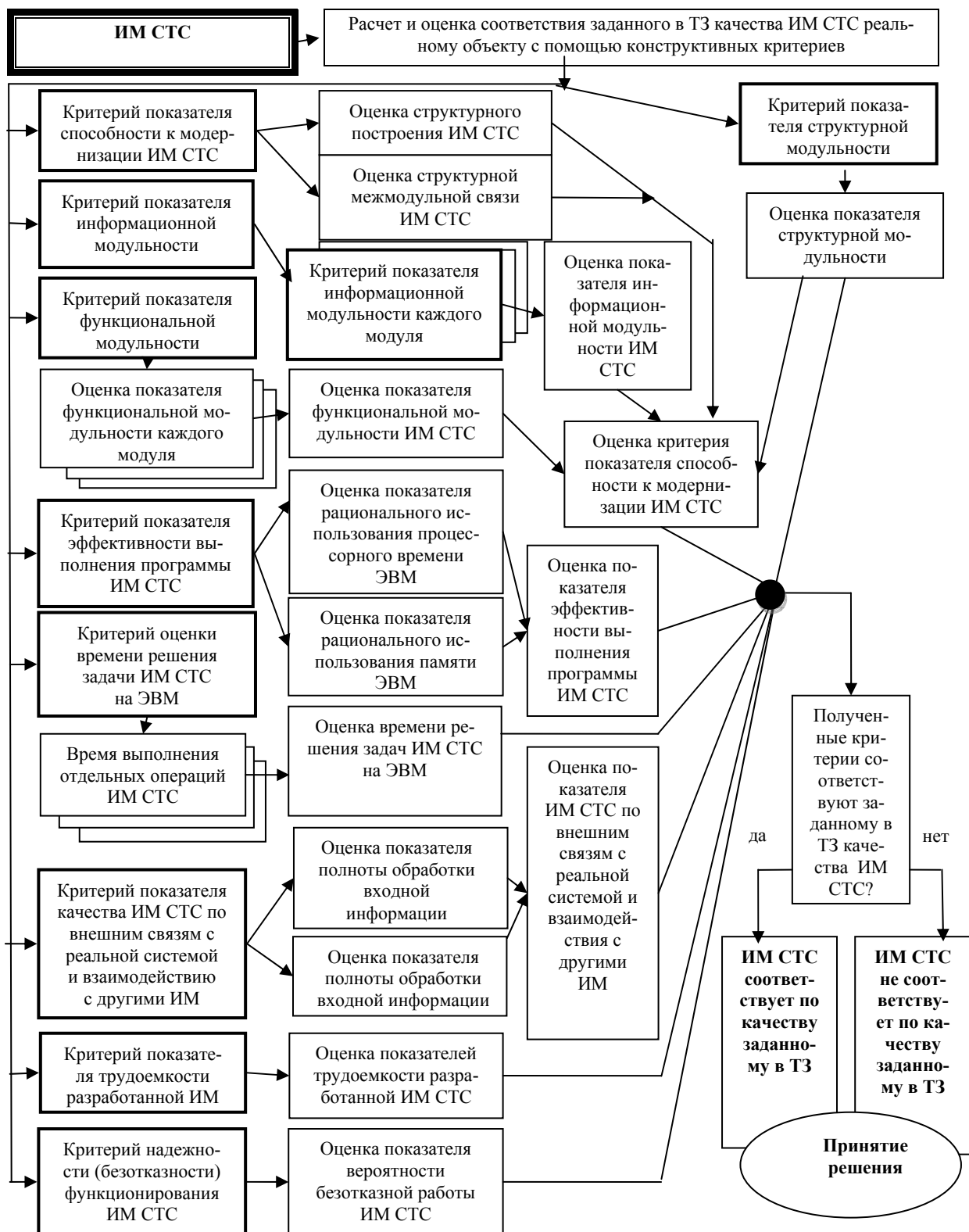


Схема оценки соответствия заданного в ТЗ качества ИМ СТС реальному объекту с помощью конструктивных критериев

Для количественной оценки надежности ИМ СТС могут быть использованы ряд показателей [4, 5, 9]. Будем считать, что модель считается

работоспособной, если она в состоянии выполнить задание функции с параметрами, установленными требованиями технического задания.

В процессе функционирования ИМ СТС возможен переход из работоспособного состояния в неработоспособное и обратно. С этими переходами связаны события отказа и восстановления.

Отказом будем называть событие, заключающееся в нарушении работоспособности ИМ СТС, а восстановление – событие перехода системы из неработоспособного состояния в работоспособное в случае устранения отказа.

Критерии, используемые в теории надежности являются вероятностными, статистически и в том или ином виде учитываются временными показателями.

Вероятностью безотказной работы будем считать вероятность того, что при заданных условиях эксплуатации в течение интервала времени  $t$  не возникает отказа, т. е. ИМ СТС будет работоспособна:

$$P_p(t) = P_p(T \geq t). \quad (8)$$

Соответственно вероятностью отказа является вероятность того, что в течение заданного времени произойдет хотя бы один отказ:

$$Q_p(t) = P_p(T < t) = 1 - P_p(t). \quad (9)$$

Интегральными критериями являются интенсивность отказов, которая характеризует плотность распределения наработки до первого отказа, рассчитанную при условии, что до рассмотренного момента времени система проработала безотказно:

$$\lambda(t) = -\frac{d \ln P_p(t)}{dt}, \quad t \geq 0. \quad (10)$$

Если исследуется ИМ СТС, которая проработала в течение некоторого времени  $\lambda(t)$ , то необходимо использовать условные показатели надежности. В этом случае вероятность безотказной работы учитывает, что отказа не было в течение времени  $t_0$

$$P_p(t_0, t) = P_p\left(\frac{T \geq t_0 + t}{T \geq t_0}\right) = \frac{P_p(t_0 + t)}{P_p(t_0)}. \quad (11)$$

Способность к модернизации ИМ СТС определяется четкостью их структурного построения и структурой межмодульных связей. Для количественной оценки этого показателя могут использоваться показатели структурной, имитационной и функциональной модульности.

## Выводы

Предложенный метод позволяет оценить качество разрабатываемой имитационной модели сложной технической системы с требуемой заказчиком точностью. Данный метод рекомендуется применять в качестве ориентира для разработки, планирования тестов, применения и сопровождения имитационного моделирования. Метод оценки разрабатываемой имитационной модели сложной технической системы является универсальным в своей предметной области, так как не зависит от назначений имитационных моделей.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Липаев, В. В. Качество программного обеспечения / В. В. Липаев. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 263 с.
2. Старусев, А. В. Метод оценки трудоемкости процессов программирования / А. В. Старусев // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2012. № 4 (20). С. 51–54.
3. Старусев, А. В. Метод повышения эффективности использования ресурсов ЭВМ / А. В. Старусев // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2013. № 1 (21). С. 12–16.
4. Шурикаков, В. В. Надежность программного обеспечения систем обработки данных / В. В. Шурикаков. – М.: Финансы и статистика, 1987. – 272 с.
5. Арканов, А. В. Метод оценки показателей качества испытываемых сложных технических систем с использованием априорной информации / А. В. Арканов, В. И. Лобейко, А. В. Старусев // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2012. № 2. С. 39–43.
6. Баштанник, Н. А. Оптимизация путей обмена информацией между элементами АСУ сетевым методом / Н. А. Баштанник, В. И. Лобейко // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2010. Т. 8. № 6 (66). С. 48–51.
7. Михолап, Л. А. Метод оценки степени соответствия имитационной модели ее целевому назначению с помощью функциональных критериев // Л. А. Михолап, А. В. Старусев, В. И. Лобейко // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2016. № 3 (182). С. 17–21.
8. Старусев, А. В. Оптимизация технологии подготовки и проведения экспериментов с использованием имитационного моделирования // А. В. Старусев, В. И. Лобейко, С. А. Горемыкин // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2017. № 8(203). С. 40–44.
9. Лобейко, В. И. Современные подходы к организации испытаний сложных систем. / В. И. Лобейко. – Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», 2006. – 332 с.
10. Старусев, А. В. Один из вопросов оценки имитационной модели сложной технической системы / А. В. Старусев // Теория и практика актуальных исследований: мат-лы XV Междунар. науч.-техн. конф. – Краснодар, 2016. – С. 198–202.

# СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК004.93'12

*Д. А. Астахов, А. В. Катаев*

## РАСПОЗНАВАНИЕ ЭМОЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Волгоградский государственный технический университет

astakhov.d.a@gmail.com, alexander.kataev@gmail.com

В работе сравниваются результаты работы алгоритмом машинного обучения SVM, ANN на наборе данных из нормализованных ключевых точек и дистанций между ними. Проводится описание процесса подготовки базы для обучения и алгоритмов нормализации.

*Ключевые слова:* система распознавания эмоций, ключевые точки, машинное обучение, распознавание лица, эмоции.

*D. A. Astakhov, A. V. Kataev*

## RECOGNITION OF EMOTIONS WITH USE OF MACHINE TRAINING ALGORITHMS

Volgograd State Technical University

The work compares the results of the work of the machine learning algorithm SVM, ANN on a set of data from the normalized key points and the distances between them. The process of preparing the training base and normalization algorithms is described.

*Keywords:* the system of recognition of emotions, key points, machine learning, face recognition, emotions.

### Введение

Задолго до возникновения речи взаимодействие между людьми осуществлялось посредством невербального общения. Изменение выражения лица стало одним из наиболее значимых средств передачи эмоций и намерений человека.

В последние годы задача автоматического анализа эмоционального состояния человека привлекла большое число исследователей.

В частности, в работе под руководством А. В. Заболеевой-Зотовой рассматриваются вопросы определения эмоциональных реакций человека по мимике, невербальным движениям и голосу [1]. Задача распознавания динамических жестов человека рассматривается в работах В. В. Девяткова и А. Н. Алфимцева [2]. В докторской диссертации В. В. Дементенко рассматривается система автоматического предсказания засыпания водителя по его морганиям и движению глаз [3]. В работе Цайфенг Шан рас-

сматривается алгоритм детектирования эмоций на основе локальных бинарных паттернов [4].

В последнее время для определения эмоций стали часто использоваться методы машинного обучения, такие как SVM и ANN; это можно заметить по таким работам как [5]. Целью данного исследования является сравнение работы данных методов при разных наборах данных.

### 1. Определение эмоционального состояния человека

Известно, что выражение эмоций может быть весьма разнообразным и различаться как в зависимости от индивидуальных особенностей, так и от ситуативного контекста. Культурный контекст играет важную роль, если речь идет об эмоциях, не относящихся к категории базовых, поскольку принятые в определенной общности способы выражения сложных эмоциональных состояний различаются. Кроме того, проявления, соответствующие «смешанным»

эмоциям, трудны для распознавания, поскольку за ними скрывается целый комплекс испытываемых человеком чувств. Еще один фактор, влияющий на эффективность распознавания эмоций, – возможность фальсифицировать эмоциональное поведение. Культурные требования, личные представления о допустимом или любые соображения, вытекающие из восприятия человеком актуальной ситуации (желание что-то скрыть или демонстрация чувства, которого на самом деле нет), – эти и другие факторы оказывают влияние на выражение челове-

ком своих эмоций. Автоматическая идентификация образов (текст, звук, лицо, персона, предметы и т. д.) с помощью компьютера, является одним из наиболее важных направлений развития технологий искусственного интеллекта, позволяющая дать ключ к пониманию особенностей работы человеческого интеллекта. Исследование методов автоматического распознавания эмоций позволяет дать компьютеру возможность оценивать настроение человека, для этого в работе используется алгоритм распознавания эмоций, представленный на рис. 1.

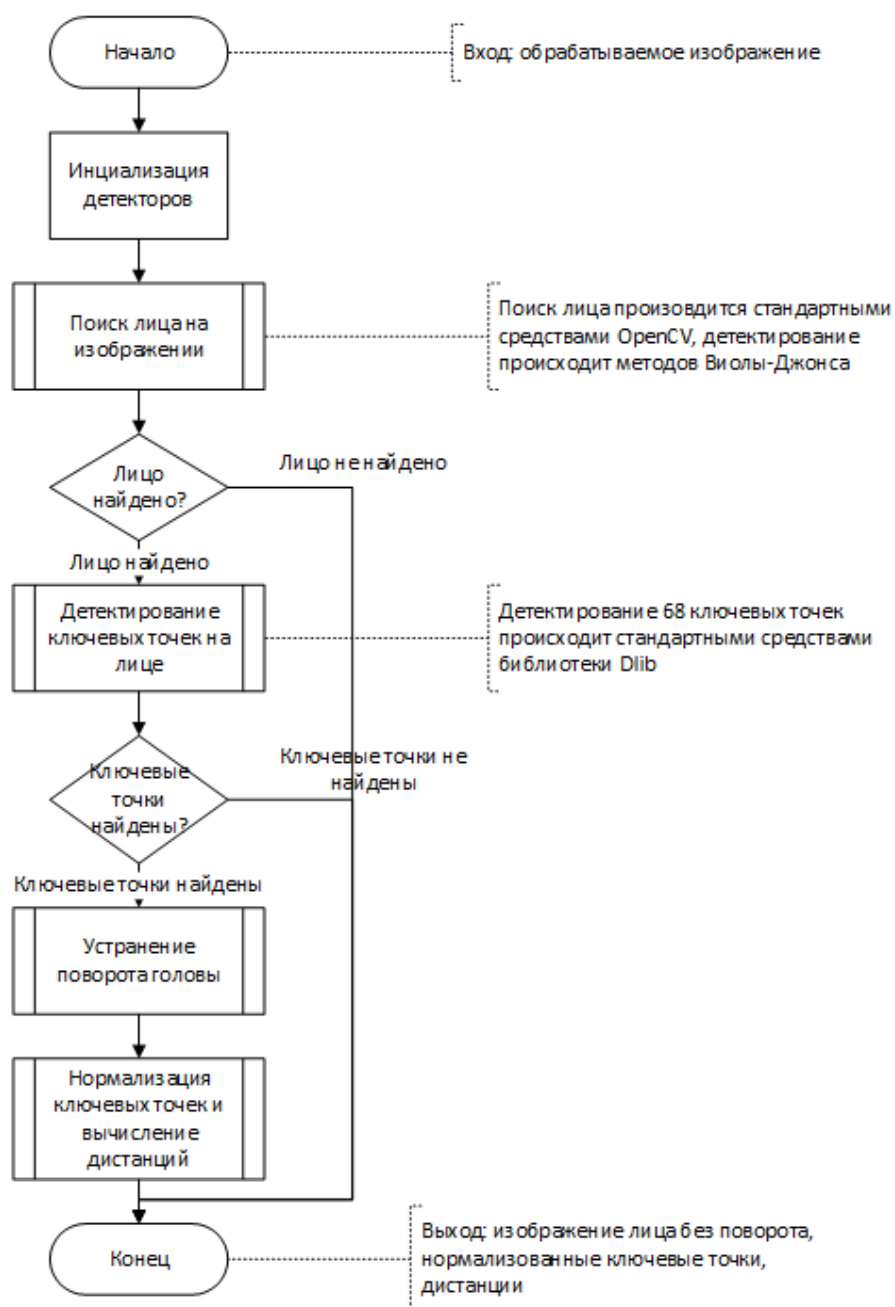


Рис. 1. Основной алгоритм распознавания эмоций

## 2. Подготовка выборки для обучения

Для обучения алгоритмов машинного обучения была использована выборка TheExtended-Cohn-KanadeDatabase (СК+) [9], состоящая из 11 061 фотографий, с разрешением 640 x 490 пикселей, в формате \*.png. В базе СК+ размечено 623 структуры с эмоциями. Выборка разбита на 8 классов эмоций: 1 – злость; 2 – презрение; 3 – отвращение; 4 – страх; 5 – счастье; 6 – грусть; 7 – удивление; 8 – нормальное. В дальнейшем, для краткости, классы эмоций будут

обозначаться соответствующими номерами.

Исходная база переработана таким образом, чтобы минимизировать ошибки распознавания, для этого для каждой эмоции и человека была было выбрано изображение с максимально “выраженной” эмоцией и для каждого изображения выполнено зеркальное отображение, для увеличения объема выборки. Результирующий объем переработанной базы составил 2016 фотографий. На рис. 2 представлено распределение объема изображений по каждому классу.

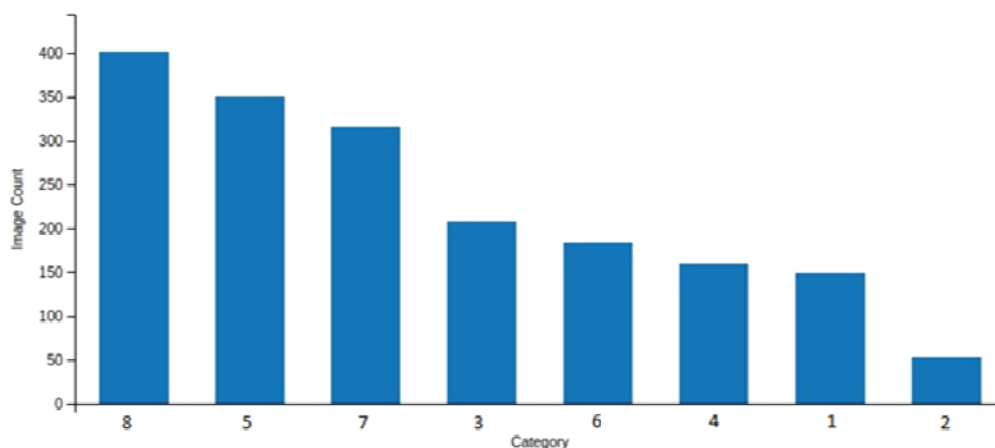


Рис. 2. Диаграмма распределения объема данных по классам



Рис. 3. Пример изображений из базы, классы расположены слева направо (крайнее левое изображение соответствует 1-му классу, крайнее правое – 8-му классу) (TheExtendedCohn-KanadeDatabase)



Рис. 4. Пример изображений из нормализованной базы, классы расположены слева направо (крайнее левое изображение соответствует 1-му классу, крайнее правое – 8-му классу)

Неравномерность распределения изображений по классам связана с ограниченностью объема выборки для каждого класса в исходной базе СК+, классы 5, 7, 8 имеют больший объем данных в исходной базе, чем классы 1, 2, 3, 4, 6. Пример изображений, используемых в базе, приведен на рису. 3.

Для дальнейшей работы выборка была нормализована. Под нормализацией подразумевается изображение, в котором лицо расположено без поворотов, наклонов, и 95 % изображения составляет само лицо.

Пример нормализованных изображений для каждого класса эмоций приведен на рис. 4. Размер изображений после нормализации не фиксирован, он колеблется от 201 x 199 пикселей до 306 x 275 пикселей, тип изображений \*.png.

### 2.1. Система кодирования лицевых движений

Для кодирования лицевых движений используются системы СКЛД (FACS) и ЭСКЛД (Em-FACS). Система кодирования лицевых движений (СКЛД) (FacialActionCodingSystem (FACS)) –

представляет собой систему, для таксономизации выражений лица человека [7]. Данный стандарт является общепринятым для систематической классификации физического выражения эмоций [6].

Эмоциональная система кодирования лицевых движений (ЭСКЛД) (EmotionFacialAction-CodingSystem (EmFACS)) – данная система рассматривается только кодирования лицевых движений, связанных с эмоциями [8].

Приведенные системы разработаны Полам Экманом и Уолессом Фризенем в 1978 году.

С использованием СКЛД можно вручную закодировать практически любое, анатомически возможное выражение лица, конструируя его из действий конкретных единиц действия и требуемого ими времени для воспроизведения того или иного выражения лица. СКЛД определяет единицы действия, которые сокращают или расслабляют одну, или более мышц.

Данная система позволяет поставить в соответствие, какие ключевые точки задействуются при лицевых движениях. Пример кодирования лицевых движений приведен на рис. 5.







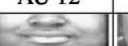
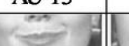


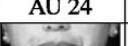
Upper Face Action Units					
AU 1	AU 2	AU 4	AU 5	AU 6	AU 7
					
Inner Brow Raiser	Outer Brow Raiser	Brow Lowerer	Upper Lid Raiser	Cheek Raiser	Lid Tightener
*AU 41	*AU 42	*AU 43	AU 44	AU 45	AU 46
					
Lid Droop	Slit	Eyes Closed	Squint	Blink	Wink
Lower Face Action Units					
AU 9	AU 10	AU 11	AU 12	AU 13	AU 14
					
Nose Wrinkler	Upper Lip Raiser	Nasolabial Deepener	Lip Corner Puller	Cheek Puffer	Dimpler
AU 15	AU 16	AU 17	AU 18	AU 20	AU 22
					
Lip Corner Depressor	Lower Lip Depressor	Chin Raiser	Lip Puckerer	Lip Stretcher	Lip Funneler
AU 23	AU 24	*AU 25	*AU 26	*AU 27	AU 28
					
Lip Tightener	Lip Pressor	Lips Part	Jaw Drop	Mouth Stretch	Lip Suck

Рис. 5. Кодирование лицевых движений в системе FACS

## 2.2. Ключевые точки

Для процесса выделения ключевых точек на лице использовалась сторонняя библиотека Dlib, которая позволяет на изображении найти 68 лицевых ключевых точек.

В соответствии с СКЛД для обучения из 68 ключевых точек, были выбраны 44 точки, описывающие лицевые движения, для этого были исключены точки, описывающие контур лица (точки 0–16), которые по системе emFACS не влияют на описание лицевых движений. Следующим этапом для каждого изображения из выборки сформировано два набора данных: нормализованные ключевые точки и дистанции между ключевыми точками.

К нормализованному изображению лица применяются методы детектирования ключевых точек, в результате чего на выходе получаются 68 ключевых точек в системе координат нормализованного изображения. Для нормализации данных все координаты приводятся к диапазону [0, 1].

Вычисление нормализованных ключевых точек производилось по формуле:

$$x'_i = \frac{x_i}{width}; y'_i = \frac{y_i}{height}. \quad (1)$$

Вычисление дистанций между ключевыми точками производилось по формуле:

$$d_i = \sqrt{(x_c - x'_i)^2 + (y_c - y'_i)^2}. \quad (2)$$

### 2.3. Обучение системы

Обучение производилось при помощи встроенных методов машинного обучения в библиотеке OpenCV.

Для обучения алгоритмов подготовленная база была разбита на две части: тренировочная и тестовая. Под тестирование было выделено 15 % от общего объема выборки, что составляет 272 изображения, тренировочная база состоит из 1 744 изображений.

Для обучения SVM использовался тип C\_SVC, который позволяет проводить классификацию на 8 классов используя мультипликатор C со значением равным 0,5. Тип ядра был выбран полиномиальный с параметрами: degree равным 0,001, coef0 равным 0,1, gamma равным 0,00015.

Архитектура сети для обучения метода ANN на нормализованных ключевых точках состоит из

4 слоев: входной слой из 44 нейронов, два промежуточных слоя по 88 нейронов каждый и выходной слой из 8 нейронов. Используется сигмоидальная функция активации, обучение сети производится методом обратного распространения ошибки с параметром scale равным 0,1. Максимальное количество итераций было задано 1000. Подбор параметров для обоих методов машинного обучения является эмпирическим.

### 3. Результаты эксперимента

Работа методов машинного обучения SVM и ANN проводилась на двух наборах данных: нормализованные ключевые точки и дистанции между ключевыми точками. Результаты экспериментов проведенные для каждого метода машинного обучения с разными наборами данных приведены в табл. 1–4.

Таблица 1

Результат тестирования метода SVM на нормализованных ключевых точках

Ожидаемая эмоция	Распознанная эмоция							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	<b>30.62</b>	0.00	22.50	0.00	0.00	31.25	0.00	15.62
2	3.70	<b>0.00</b>	3.70	0.00	16.66	11.11	0.00	64.81
3	0.00	0.00	<b>31.77</b>	0.00	17.77	14.77	0.00	35.69
4	0.00	0.00	0.00	<b>37.07</b>	17.53	0.00	12.69	32.69
5	0.00	0.00	3.33	0.00	<b>93.33</b>	0.00	0.00	3.33
6	0.00	0.00	9.37	6.13	9.37	<b>48.88</b>	0.00	26.25
7	0.00	0.00	0.00	4.16	0.00	4.17	<b>91.67</b>	0.00
8	0.00	0.00	0.56	1.11	4.33	1.67	0.00	<b>90.94</b>

Таблица 2

Результат тестирования метода SVM на данных дистанции

Ожидаемая эмоция	Распознанная эмоция							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	<b>28.13</b>	0.00	15.63	0.00	3.13	31.25	0.0	21.88
2	1.85	<b>0.00</b>	12.96	1.85	1.85	1.11	0.00	70.37
3	0.00	0.00	<b>50.00</b>	0.00	50.00	0.00	0.00	100
4	0.00	0.00	0.00	<b>69.23</b>	7.69	19.23	3.85	0.00
5	3.33	0.00	6.67	3.33	<b>76.67</b>	3.33	0.00	6.67
6	3.13	0.00	15.63	6.25	3.13	<b>56.25</b>	0.00	15.63
7	0.00	0.00	0.00	12.50	12.50	4.17	<b>70.83</b>	0.00
8	1.72	0.00	8.33	1.39	2.94	1.33	0.00	<b>86.28</b>



Таблица 3

## Результат тестирования ANN на нормализованных координатах

Ожидаемая эмоция	Распознанная эмоция							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	<b>37.50</b>	0.00	3.12	0.00	9.37	21.87	28.12	0.00
2	0.00	<b>27.78</b>	0.00	1.85	7.40	33.30	29.62	0.00
3	0.00	0.00	<b>21.30</b>	0.00	0.00	34.80	21.70	22.20
4	0.00	3.84	0.00	<b>54.10</b>	3.84	5.380	23.80	9.04
5	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>50.00</b>	16.40	14.50	19.10
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>71.87</b>	8.12	20.00
7	0.00	0.00	0.00	3.33	0.00	4.20	<b>77.91</b>	14.36
8	0.00	1.38	0.00	4.17	2.70	0.00	3.61	<b>88.14</b>

Таблица 4

## Результат тестирования метода ANN на данных дистанции

Ожидаемая эмоция	Распознанная эмоция							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	<b>41.87</b>	0.00	0.00	0.00	6.25	12.5	18.75	20.62
2	0.00	<b>38.51</b>	0.00	1.85	1.85	14.81	11.11	21.85
3	0.00	0.00	<b>50.00</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	50.00
4	0.00	0.00	0.00	<b>58.46</b>	0.00	11.53	16.92	13.07
5	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>60.00</b>	0.00	13.33	26.67
6	0.00	0.00	0.00	0.00	3.12	<b>60.62</b>	9.37	26.87
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>87.50</b>	12.50
8	0.00	1.38	0.00	0.00	0.00	4.16	16.66	<b>77.77</b>

В табл. 5 представлен сравнительный анализ полученных результатов.

Таблица 5

## Сводная таблица результатов тестирования

Метод	Данные	Точность распознавания, %
SVM	Ключевые точки	52.50
	Дистанции	54.67
ANN	Ключевые точки	53.50
	Дистанции	60.00

Таким образом, проанализировав данные, полученные по каждому тестовому примеру, можно сделать вывод о том, что методы SVM и ANN показали очень близкие результаты по точности классификации эмоций. Но метод ANN показал большую точность распознавания, чем метод SVM на данных дистанции на 5,33 %, а на данных ключевых точек на 1 %.

Как можно заметить, точность классификации увеличивается, если использовать для обу-

чения данные основанные на дистанции между ключевыми точками. Для метода SVM точность увеличилась на 2,67 %, а для метода ANN точность увеличилась на 6,50 %.

## Заключение

В работе была произведена проверка методов машинного обучения ANN и SVM на наборе данных из нормализованных ключевых точек и дистанций между ними. Оба метода имеют приемлемый уровень обнаружения. Однако в ходе исследования было выявлено, что метод ANN на наборе данных дистанций показал наилучший результат.

Оба эти метода могут быть использованы в интерфейсе интеллектуальной системы для создания условий естественного и интуитивного человеко-машинного взаимодействия.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Задача создания системы автоматизированного распознавания эмоций / А. В. Заболеева-Зотова [и др.] // Открытые семантические технологии проектирования интел-

лектуальных систем : мат-лы Междунар. науч.-техн. конф. OSTIS-2012 (Минск, 16–18 февраля 2012 г.) / БГУИР. – Минск, 2012. – С. 347–350.

2. Девятков, В. В. Распознавание манипулятивных жестов / В. В. Девяткин, А. Н. Алфимцев // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2007. – Т. 68, вып. 3. – С. 56–75.

3. Дементенко, В. В. Физические принципы построения систем безопасного мониторинга состояния человека-оператора : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В. В. Дементенко. – М., 2010. – 38 с.

4. Caifeng Shan, Shaogang Gong, Peter W. McOwan.: Facial expression recognition based on Local Binary Patterns: A comprehensive study. Image and Vision Computing (2008).

5. Enikolopov S.N., Kusnetsova Yu.M.: The Task of Recognition of Violent Situations Using Automatic Systems and Methods of Artificial Intelligence.. Journal of Psychology and Law, vol 2, pp 1–16. Moscow psychological and pedagogical University, Moscow (2011).

6. Jizheng Yi, Xia Mao, Lijiang Chen, YuliXue, Angelo Compare: Facial expression recognition considering individual differences in facial structure and texture. IET Computer Vision 2014, Vol. 8, pp. 429–440. The Institution of Engineering and Technology (2014).

7. LeCun, Y. Convolutional Networks for Images, Speech, and Time Series / Y. LeCun, Y. Bengio // The Handbook of Brain Theory and Neural Networks. – USA : MIT Press, 2002. – P. 276–279.

8. Panagiotis Perakis, Georgios Passalis, Theoharis Theoharis, Ioannis A. Kakadiaris.: 3D Facial Landmark Detection & Face Registration. Department of Informatics and Telecommunications University of Athens, Greece (2010).

9. The Extended Cohn-Kanade Dataset (CK+) : A complete dataset for action unit and emotion-specified expression / P. Lucey [et. al.] // Proceedings of IEEE CVPR Workshop on Biometrics, 13–18 Jun 2010, San Francisco, CA, USA / IEEE Computer Society. – San Francisco, 2010. – P. 94–101.

УДК 004.912:81'32:347.214.2

**И. С. Зеленский<sup>1</sup>, Д. С. Донченко<sup>1</sup>, Д. С. Парыгин<sup>1</sup>, Д. Р. Дегтяренко<sup>2</sup>, Т. М. Петрова<sup>2</sup>**

# **ИЗВЛЕЧЕНИЕ СТРУКТУРИРОВАННОГО ОПИСАНИЯ ОБЪЕКТОВ НЕДВИЖИМОСТИ ИЗ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ЗАПИСЕЙ НА ЕСТЕСТВЕННОМ ЯЗЫКЕ\***

<sup>1</sup> Волгоградский государственный технический университет

<sup>2</sup> Волгоградский государственный социально-педагогический университет

ilyhaspmarine@gmail.com, dmitrydonchenko92@gmail.com,  
dparugin@gmail.com, 46.08dmitriy@mail.ru, profptm@gmail.com

Приведен обзор существующих технологий семантического анализа неструктурированного текста на естественном языке. Описан подход к разработке алгоритма для получения структурированной фактической информации об объектах недвижимости из пользовательских записей с сетевых ресурсов. Определены основные проблемы интерпретации ключевой информации в описании объекта недвижимости. Описывается реализация модуля для извлечения данных об объектах недвижимости на основе технологии Томита-парсер от компании Яндекс и инструментария формальных грамматик.

**Ключевые слова:** пользовательская запись, объект недвижимости, естественный язык, семантический анализ, Томита-парсер, интерпретация фактов, структурированное описание.

**I. S. Zelenskiy<sup>1</sup>, D. S. Donchenko<sup>1</sup>, D. S. Parygin<sup>1</sup>, D. R. Degtyarenko<sup>2</sup>, T. M. Petrova<sup>2</sup>**

# **EXTRACTING A STRUCTURED DESCRIPTION OF REAL ESTATE OBJECTS FROM USER POSTS IN NATURAL LANGUAGE**

<sup>1</sup> Volgograd State Technical University

<sup>2</sup> Volgograd State Socio-Pedagogical University

A review of existing technologies for the semantic analysis of unstructured text in natural language is given. The approach to developing an algorithm for obtaining structured factual information about real estate objects from user records from network resources is described. The main problems of interpretation of key information in an real estate object description are identified. The implementation of the module for extracting data on real estate objects based on the Tomita-parser technology from Yandex and the tools of formal grammars is described.

**Keywords:** user post, real estate object, natural language, semantic analysis, Tomita-parser, interpretation of facts, structured description.

## **Введение**

Жизнедеятельность человека в городе в первую очередь связана с определением места его проживания [1]. Подбор приемлемых вариантов для покупки или аренды квартиры, дома или иного объекта недвижимости связан с анализом

значительного количества источников информации. Однако если жители решают эту проблему в меру доступных средств, то, для использования этих данных в целях развития городской среды, требуется разработка инструментов автоматизации исследования данных [2].

Для реализации комплексного информационно-аналитического решения [3] в первую очередь требуются инструменты сбора открытых данных о состоянии городской территории и расположенных на ней объектах [4]. При этом приходится учитывать, что наиболее подробная и проверенная информация по недвижимости содержится в неструктурированном виде в пользовательских описаниях объектов [5] на сайтах объявлений о продаже-аренде, а также в записях в социальных сетях [6].

В связи с этим была поставлена задача по извлечению данных об объектах недвижимости из их описания в текстах на естественном языке. Тестовая выборка таких описаний была получена из тематических групп в социальной сети ВКонтакте [7]. Соответственно необходимо выбрать технологию семантического анализа содержащейся в них информации и разработать алгоритм ее структуризации.

#### **1. Обзор технологий семантического анализа неструктурированного текста на естественном языке**

В настоящее время широко распространено несколько стандартных подходов для извлечения информации из неструктурированного текста:

1. Подход на основе регулярных выражений.
2. Использование классификаторов:
  - генеративные: наивный классификатор Байеса;
  - линейные классификаторы (логистическая регрессия);
  - статистические модели (скрытая Марковская модель, условная марковская модель, условное случайное поле) [8].

Существуют и другие подходы для извлечения данных. Так, например, гибридные подходы объединяют некоторые из стандартных решений, перечисленных ранее. Тем не менее, из доступного на данный момент множества технологий семантического анализа неструктурированного текста на естественном языке, наиболее популярными свободно распространяемыми являются следующие решения:

1. General Architecture for Text Engineering (GATE) – система обработки естественного языка, включающая в себя систему извлечения информации, называемую ANNIE (A Nearly-New Information Extraction System – «почти новая система извлечения информации»), которая представляет собой набор модулей, включающих токенизатор, справочник географических

названий, разделитель предложений, частеречную разметку и указатель тегов [9].

2. Natural Language Toolkit (NLTK) – представляет собой набор библиотек и программ для символической и статистической обработки естественного языка (NLP). Применим для английского языка, написан на языке программирования Python [10].

3. OpenNLP – представляет собой набор инструментов машинного обучения для обработки текста на естественном языке. Поддерживает наиболее распространенные задачи NLP, такие как токенизация, сегментация предложений, таргетирование на части речи, извлечение именованного объекта, фрагментация, разбор и определение языка. Эти задачи обычно необходимы для создания более совершенных служб обработки текста [11].

4. DeepDive – система, использующая подход на основе создания структурированных данных (таблицы SQL) из неструктурированной информации (текстовые документы) и интегрируя такие данные с существующей структурированной базой данных. DeepDive используется для извлечения сложных отношений между сущностями и делает выводы о фактах, связанных с этими объектами. DeepDive помогает обрабатывать широкий спектр «темных» данных и помещать результаты в базу. DeepDive использует машинное обучение для управления различными формами шума и неточности [12].

Кроме того, известными примерами проприетарного программного обеспечения для решения задач анализа текстов являются такие продукты, как IBM Watson [13], суперкомпьютер, ориентированный на понимание вопросов на естественном языке, и поиск ответов на них, и Wolfram Natural Language Understanding (часть системы Wolfram Alpha) [14].

Одним из общих признаков вышеперечисленных систем является их ориентированность на работу с текстами, написанными на английском языке. Ограниченная поддержка других языков, и в частности русского, является затрудняющим фактором для их применения в задаче извлечения данных о недвижимости из неструктурированных текстов в русскоязычном сегменте сети Интернет.

Еще одним решением является формальный язык описания грамматик Томита, разработанный компанией Яндекс непосредственно для Томита-парсера. Данный язык описания фор-

мальных грамматик поддерживает такие функции, как условия согласованности двух слов в роде, числе или падеже (или по всем трем пунктам сразу), самостоятельное присвоение неизвестным системе словам грамматических характеристик и многое другое [15].

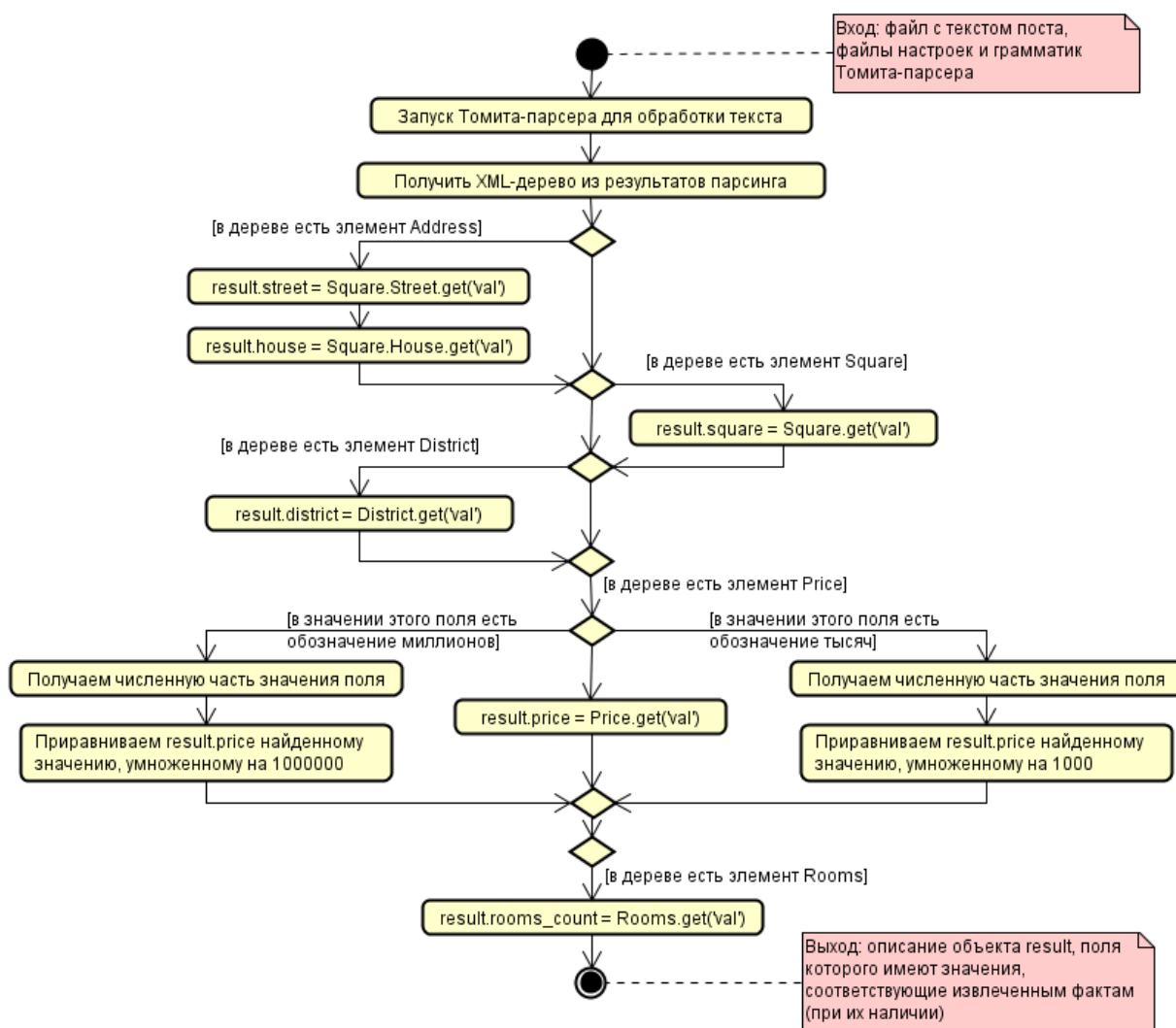
Томи-парсер поставляется в виде исполняемого файла и является программой, созданной для извлечения структурированных данных (фактов) из текстов на естественном языке. Вычленение фактов происходит при помощи контекстно-свободных грамматик и словарей ключевых слов. Парсер позволяет писать свои грамматики и добавлять словари для нужного языка [16].

## 2. Разработка алгоритма извлечения структурированного описания объекта недвижимости с помощью Томи-парсера

Анализ существующих решений показал соответствие технологии, реализованной в Томи-парсере, поставленным задачам извлечения

структурированного описания. В связи с этим алгоритм (см. представленный ниже рисунок), учитывающий его функциональные возможности, должен позволить организовать автоматизированное извлечение фактов из записи на естественном языке в соответствии с имеющимися формальными грамматиками. Полученная из записи информация должна структурироваться. В качестве возвращаемого значения необходимо получать описание объекта с извлеченными из текста фактами.

В процессе разработки алгоритма извлечения описания объектов недвижимости был решен ряд задач по работе со структурой и составом данных в записях. Так, в первую очередь в качестве входных данных было организовано получение предварительно обработанных записей без знаков препинания в виде текстовых файлов, имена которых задаются конфигурационным файлом Томи-парсера «config.proto».



Алгоритм извлечения структурированного описания объекта недвижимости

Анализ примеров записей о продаже либо аренде недвижимости показал, что как таковой четкой структуры у данных записей нет. Следовательно нельзя утверждать, что в записях будут присутствовать определенные факты, так как в ряде случаев записи о продаже жилья предоставляют только минимальную общую информацию о недвижимости и телефон владельца для получения подробностей. Поэтому было предусмотрено, что если в обрабатываемой записи не обнаруживается некоторых фактов, соответствующие им поля объекта сохра-

няют значение по умолчанию: «0» для числовых полей и пустая строка для строчных.

Однако были выделены несколько ключевых фактов, для которых в любом случае необходимо обнаружить значения в записях, чтобы полученное описание объекта было пригодно для дальнейшего анализа. Состав этих фактов приведен в расположенной ниже таблице. Таким образом, далее стояла задача написания формальных грамматик Томита-парсера для определения в тексте записей этих фактов.

**Ключевые факты в структуре записи с объявлением об объекте недвижимости**

Факт	Принимаемые значения
Адрес	Улица, номер дома и корпус (при наличии)
Цена	«Руб», «тыс руб», «млн руб» и т. д.
Площадь	«м2», «кв м», «м кв» и т. д.
Район города	Одно слово из словаря
Количество комнат	Прямое указание количества либо слова типа «двухкомнатная» со всеми возможными вариациями и ошибками написания

### **3. Написание формальных грамматик для ключевых фактов по объектам недвижимости**

На первом этапе была подготовлена формальная грамматика для адресов. Для корневого нетерминала «Address» была предусмотрена возможность вывода цепочек, которые можно идентифицировать как последовательность из названия улицы (нетерминал «Street») и номера дома (нетерминал «House»).

Необходимо учитывать, что в названии улиц могут находиться как существительные, так и прилагательные, согласованные друг с другом в роде, числе и падеже. Кроме того названия могут содержать порядковые номера («51-й Гвардейской Дивизии») или названных в честь некоторой личности («им К. Симонова»).

Номером дома с точки зрения данной грамматики является цифра, либо цифра с буквенным индексом, идущие непосредственно после названия улицы. Между названием улицы и номером дома возможно также наличие ключевого слова-дескриптора «д» либо «дом». Также данная грамматика извлекает информацию о корпусе дома при наличии (нетерминал «Korpus»). Все нетерминалы интерпретируются грамматикой как соответствующие факты.

Далее необходимо было написать формальную грамматику для цен, площадей и количест-

ва комнат. При этом грамматики для цен и площадей интерпретирует цепочки, представляющие собой числа с идущими после них ключевыми словами-дескрипторами типа «руб», «р», «тыс р» и «м2», «кв м», «метров квадратных» соответственно. Грамматика для количества комнат интерпретирует цепочки вида «двухкомнатная», «четырёхкомнатная» и т. д. включая возможные альтернативные варианты написания (через дефис, через пробел и прочее).

Для тестирования интерпретации районов города были подготовлены словарь и формальная грамматика на примере города Волгограда. Соответственно данная грамматика интерпретирует цепочки, представляющие собой одно слово из словаря. При этом была предусмотрена обработка просторечных названий районов с заменой их при выдаче в качестве результата на полные. Так, «ТЗР» из записи при выдаче в XML-файл попадает как «Тракторозаводский».

Кроме того, была добавлена грамматика для контактной информации. Цепочки, удовлетворяющие регулярному выражению для мобильных телефонов, интерпретируются как телефон владельца недвижимости. Извлекаемые факты о контактах, связанных с объектом недвижимости, не участвуют непосредственно в анализе ценообразования, однако применимы для проверки записей на уникальность и достоверность.

#### 4. Реализация программного модуля для парсинга данных об объектах недвижимости из записей пользователей с сетевых ресурсов

Для вызова Томита-парсера и обработки полученных от него результатов интерпретации фактов об объектах недвижимости необходимо было разработать модуль обертки. При реализации использовался высокоуровневый язык программирования общего назначения Python [17] версии 3.6, а также его библиотеки для работы с регулярными выражениями «RE» [18], порождения процессов из программы «Subprocess» [19] и парсинга XML-файлов, являющихся результатом работы Томита-парсера, «XML.etree.ElementTree» [20].

Реализованная функция «post\_parse()» запускает процесс Томита-парсера с соответствующими параметрами (файл конфигурации «config.proto»). Томита-парсер обрабатывает указанный в конфигурации текстовый файл с записью и помещает извлеченные факты в файл «output.xml» в соответствующем формате.

Для парсинга таких фактов, как, например, количество комнат и цены были написаны функции «rooms\_parse(val)» и «price\_parse(val)» соответственно. Функции принимают в качестве входных данных строку val из обрабатываемого XML-файла, полученного в результате работы Томита-парсера. В дальнейшем с помощью регулярных выражений осуществляется обработка этих строк и возвращение в качестве результата соответствующего целого числа. Так, например, при подаче на вход функции price\_parse(val) строки «20 т р», функция вернет число 20 000, а функция rooms\_parse(val) при подаче на вход строки «двухкомнатная» вернет число 2.

Для парсинга XML-файла, получаемого в результате работы Томита-парсера, была написана функция «xml\_parse()». Данная функция осуществляет считывание и парсинг XML-дерева из файла «output.xml» с последующей его обработкой и структуризацией описания объекта для возвращения результата своей работы.

В «xml\_parse()» определялись поля, поиск которых проводился в файле. В случае обнаружения поля, его значение помещается в соответствующее поле объекта-результата. В противном случае значение поля объекта-результата сохранит значение по умолчанию.

#### Заключение

Разработанный алгоритм может быть преобразован для обработки наборов записей за один проход путем перенастройки Томита-

парсера на работу с папкой вместо конкретного файла с текстом записи. При таком подходе в результирующем XML-дерева будут присутствовать несколько ветвей извлеченных фактов, по одной на каждую из записей. Для их обработки описанный алгоритм помещается в цикл по ветвям XML-дерева, и возвращает уже массив описаний объектов.

При этом необходимо отметить, что в результате проведенного исследования был выявлен ряд проблем интерпретации фактов и написания формальных грамматик. Так, например, удаление на первом этапе знаков пунктуации, изменяет смысл записи цен, имеющих изначально цифры после запятой. В связи с этим для таких значений должен быть организован новый подход для их распознавания и учета. В тоже время для масштабирования задачи интерпретации районов в различных городах России необходима разработка подхода к заполнению словаря районов на основе государственных классификаторов административного деления.

В целом же пользовательские записи могут содержать обширные описания обстановки, ремонта и прочих внешних и внутренних характеристик объектов недвижимости. И совокупность этих данных, представленная в структурированном виде, представляет интерес для дальнейших исследований в рамках комплексной оценки влияния различных факторов на стоимость недвижимости и общий уровень развития городских территорий.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Парыгин, Д. С. Информационные средства обеспечения жизнедеятельности человека в условиях городской среды : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.01 : 05.13.10 : защищена 18.12.13 / Д. С. Парыгин. – Волгоград, 2013.
2. Парыгин, Д. С. Информационно-аналитическая поддержка задач управления городом : моногр. / Д. С. Парыгин, Н. П. Садовникова, О. А. Шабалина ; ВолгГТУ – Волгоград, 2017. – 116 с.
3. Geoanalytical system for support of urban processes management tasks / S. Ustugova, D. Parygin, N. Sadovnikova, V. Yadav, I. Prikhodkova // CIT&DS 2017 : Proceedings of the Second International Conference on Creativity in Intelligent Technologies & Data Science, Volgograd, Russia, 12–14 September 2017. – Springer IPS, 2017. – CCIS 754. – P. 430–440.
4. Комплекс инструментов интеллектуального анализа данных Strategway для поддержки принятия решений по управлению развитием инфраструктуры города / Н. П. Садовникова, М. В. Щербаков, Д. С. Парыгин, К. С. Солнушкин, А. В. Голубев, И. А. Четкин // Развитие средних городов: замысел, модели, практика : мат-лы III Междунар. науч.-практич. конф., Волжский, 8–9 окт. 2015 г. / ВПИ (филиал) ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – С. 147–150.

5. Партиципативное управление развитием города. Механизмы реализации на основе информационных технологий / Н. П. Садовникова, Б. Х. Санжапов, Д. С. Парыгин, Е. П. Гнедкова // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – 2013. – № 3 (июль – сентябрь). – С. 80–85.
6. Разработка системы поддержки управления развитием территорий с учетом предпочтений жителей / Я. Г. Мильчук, М. К. Мартынова, Д. С. Парыгин, О. А. Шабалина // Известия Волгоградского государственного технического университета : серия Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах / ВолгГТУ. – Волгоград : ИУНЛ ВолгГТУ, 2016. – № 11 (190). – С. 44–50.
7. Социальная сеть ВКонтакте [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://vk.com>
8. *Peng, F.* Information extraction from research papers using conditional random fields / F. Peng, A. McCallum // Information Processing & Management – 2006. – P. 56–77.
9. GATE: A Framework and Graphical Development Environment for Robust NLP Tools and Applications / H. Cunningham, D. Maynard, K. Bontcheva, V. Tablan // Proc. of the 40th Anniversary Meeting of the Association for Computational Linguistics. – 2002. – P. 145–158.
10. *Bird, S.* Natural Language Processing with Python / S. Bird, E. Klein, E. Loper // O'Reilly Media Inc. – 2009.
11. Apache OpenNLP library [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://opennlp.apache.org/>
12. DeepDive [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://deeplive.stanford.edu/>
13. IBM Watson [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.ibm.com/watson/>
14. Wolfram Natural Language Understanding System [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.wolfram.com/natural-language-understanding/>
15. Томита-парсер, руководство разработчика [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://tech.yandex.ru/tomita/doc/dg/concept/about-docpage/>
16. Томита-парсер, видеокурс [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://tech.yandex.ru/tomita/doc/video/index-docpage/>
17. Python Software Foundation [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://www.python.org/>
18. Документация библиотеки RE [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://docs.python.org/3/library/re.html>
19. Документация библиотеки Subprocess [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://docs.python.org/3/library/subprocess.html>
20. Документация библиотеки XML [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://docs.python.org/3/library/xml.etree.elementtree.html>

## УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 368.914

*А. Г. Белов, А. Г. Кравец*

### СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ПРЕДПРИЯТИЯ

Волгоградский государственный технический университет

belov.rus@gmail.com, agk@gde.ru

В статье предложена методика и структурно-функциональная модель автоматизированной системы поддержки принятия решений при управлении эффективностью предприятия. Разработка системы поддержки принятия решения опирается на широко описанную в западной литературе концепцию «Управление эффективностью предприятия (корпорации)» – *Enterprise (Corporate) Performance Management (EPM, CPM)*, а также на авторские модель и метод расширенного управления эффективностью бизнеса (*Advanced Business Performance Management – ABPM*). В работе приведен алгоритм методики, а также описано назначение основных функциональных модулей и подсистем. Требования к автоматизированной системе, определенные в настоящей работе, учтены при формировании технического задания на разработку программного решения на платформе 1С:Предприятие 8. Представлен пример реализации предложенных методик в тиражном программном продукте «1С:Управление по целям и KPI».

**Ключевые слова:** управление эффективностью предприятия, ключевые показатели эффективности, усовершенствованное управление эффективностью бизнеса, система поддержки принятия решений, стратегическое управление.

*A. G. Belov, A. G. Kravets*

### STRUCTURAL AND FUNCTIONAL MODEL OF AUTOMATED SYSTEM FOR ENTERPRISE PERFORMANCE MANAGEMENT

Volgograd State Technical University

The paper proposes a structural and functional model of an automated decision support system for enterprise performance management. Developing decision support system is based on the widely described concept of "Enterprise (Corporate) Performance Management" (EPM, CPM), as well as the author's Advanced Business Performance Management model and method (ABPM). An automated system algorithm described, as well as some of the main functional modules and subsystems. An automated system demands were defined, than were included in technical project for develop software on the platform of 1C: Enterprise 8. The implementation instance of the proposed methods in the software "1C: Management by Objectives and KPI" were described.

**Keywords:** enterprise performance management, key performance indicators, advanced business performance management, decision support system, strategic management.

#### Введение

На тему управления эффективностью предприятия (*enterprise performance management – EPM*) за последние несколько десятилетий были сделаны много научных публикаций, как в России, так и за рубежом [1, 2]. Цикл управления эффективностью предприятия представляет собой ряд типовых этапов, включающих планирование, измерение, выполнение и анализ [3]. Значительная часть авторов рассматривает уп-

равление эффективностью в первую очередь как подход позволяющий сделать стратегические приоритеты предприятия явными и структурированными, а также обеспечить согласованность операционного управления в соответствии с обозначенными стратегическими приоритетами [4]. Автоматизированные системы поддержки принятия решений (СППР), ориентированные на эти задачи, позволяют предприятиям измерять, контролировать и анализиро-



вать эффективность работы на разных организационных уровнях [5]. В этом контексте потребность лиц принимающих решения (ЛПР) сводится в первую очередь к систематизации и определению влияния тех или иных факторов на зависимые (целевые) переменные, характеризующие результативность и эффективность предприятия как системы [6].

Применение автоматизированных систем (АС), способных обрабатывать значительные объемы корпоративной информации, позволяет по-новому взглянуть на разработанные ранее методики управления эффективностью [7,8]. Наиболее перспективным представляется применение инструментов бизнес-анализа для решения отдельных функциональных задач, а также разработка предсказательных аналитик и создание на их основе инструментов прогнозирования.

Результаты исследования [9] свидетельствуют о том, что имеющиеся на рынке автоматизированные системы поддержки принятия решений не позволяют в полной мере удовлетворить спрос потребителей при решении задач управления эффективностью предприятий. Для решения указанной проблемы были разработаны модель и метод расширенного управления эффективностью бизнеса [10]. В настоящей публикации представлена структурно-функциональная модель автоматизированной системы управления эффективностью предприятия, разработанная на основе указанного модели и метода.

### 1. Методика управления эффективностью

Первым шагом методики (рис. 1) предусмотрено формирование карты целей для предприятия с определением показателей, измеряемых количественно и портфеля стратегических проектов.

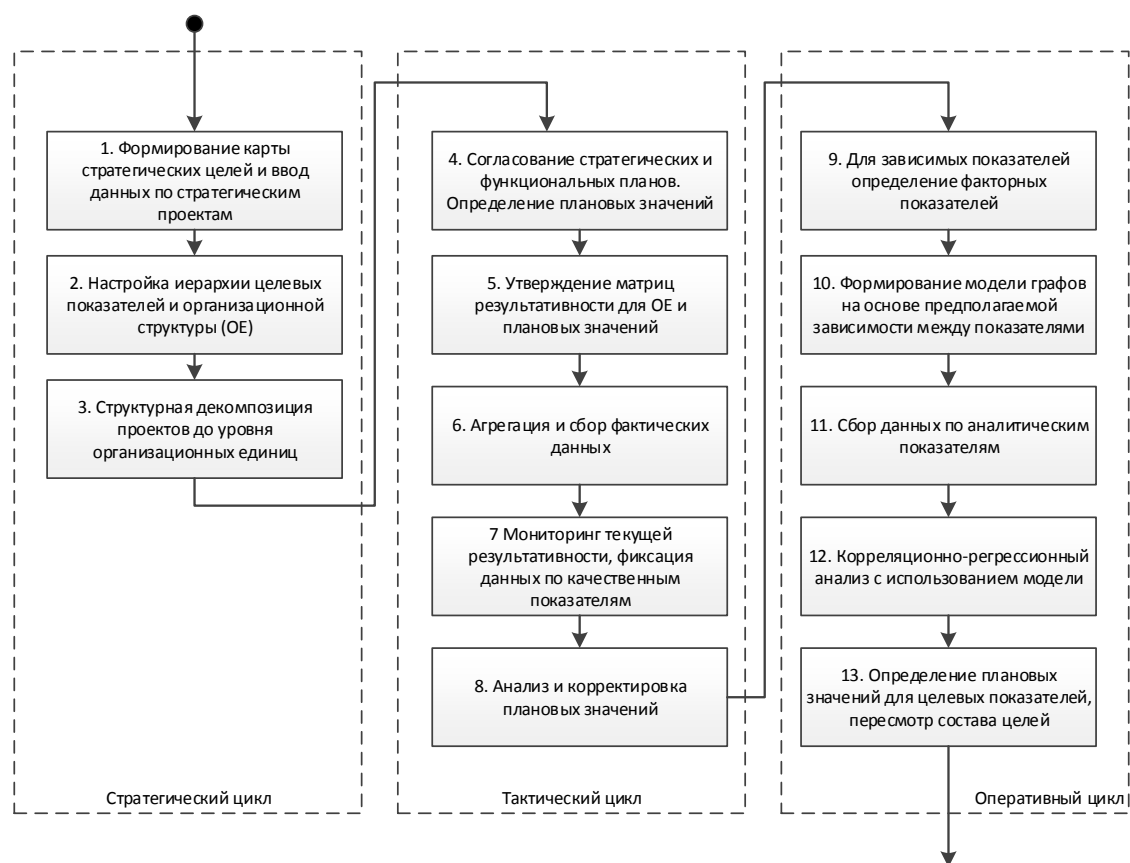


Рис. 1. Алгоритм методики управления эффективностью

В методике используются организационная структура (иерархия организационных единиц – ОЕ) и набор количественных показателей, которые будут использован для отслеживания достижения целей, определенных на первом этапе.

За счет использования метода обратных вычислений и методики согласованного планирования в автоматизированной системе формируются функциональные планы для подразделений, а также матрицы результативности для соответствующих подразделений и сотрудни-

ков. Функциональный план формируется как:

$$I(A1_j, A2_m, A3_z, P) = R,$$

где  $I$  – показатель планирования;  $A1, A2, A3$  – виды (разрезы) аналитики показателя планирования;  $A1_j, A2_m, A3_z$  – значения показателя планирования;  $P$  – период планирования;  $R$  – плановое значение показателя.

Функциональные планы (бюджеты) формируются через определение плановых значений показателей с детализацией по различным аналитикам, и могут быть представлены в виде матрицы. Расчет агрегированных значений плана с учетом суммирования значений по различным аналитикам реализуется следующим образом:

$$I(A1, P) = \sum_1^j I(A1_j, P)$$

На 10-м шаге алгоритма, опираясь на мнение эксперта, формируется граф, описывающий зависимость между аналитическими показателями и ключевыми показателями деятельности. Ребрами графа будут являться предполагаемые связи, а вершинами – соответствующие пока-

затели, имеющие аналитические разрезы:

$$G = (I_1, I_2, C),$$

где  $G$  – граф определяющий зависимости между показателями;  $I_1, I_2$  – аналитические показатели или ключевые показатели деятельности;  $C$  – корреляционная связь между парой показателей. Для каждого  $I$  определяется несколько разрезов аналитики ( $A$ ), и с учетом конкретного значения аналитики определяется значение показателя:

$$I(A_1, A_2, A_3, \dots) = R.$$

С использованием инструментария визуализации данных в автоматизированной системе ЛПР получает информацию относительно наличия корреляционных связей между аналитическими и ключевыми показателями деятельности в модели, оформленной в виде графа.

## 2. Структурно-функциональная модель автоматизированной системы

Модель автоматизированной системы (рис. 2) состоит из набора отдельных подсистем (функциональных модулей) и баз данных – БД.

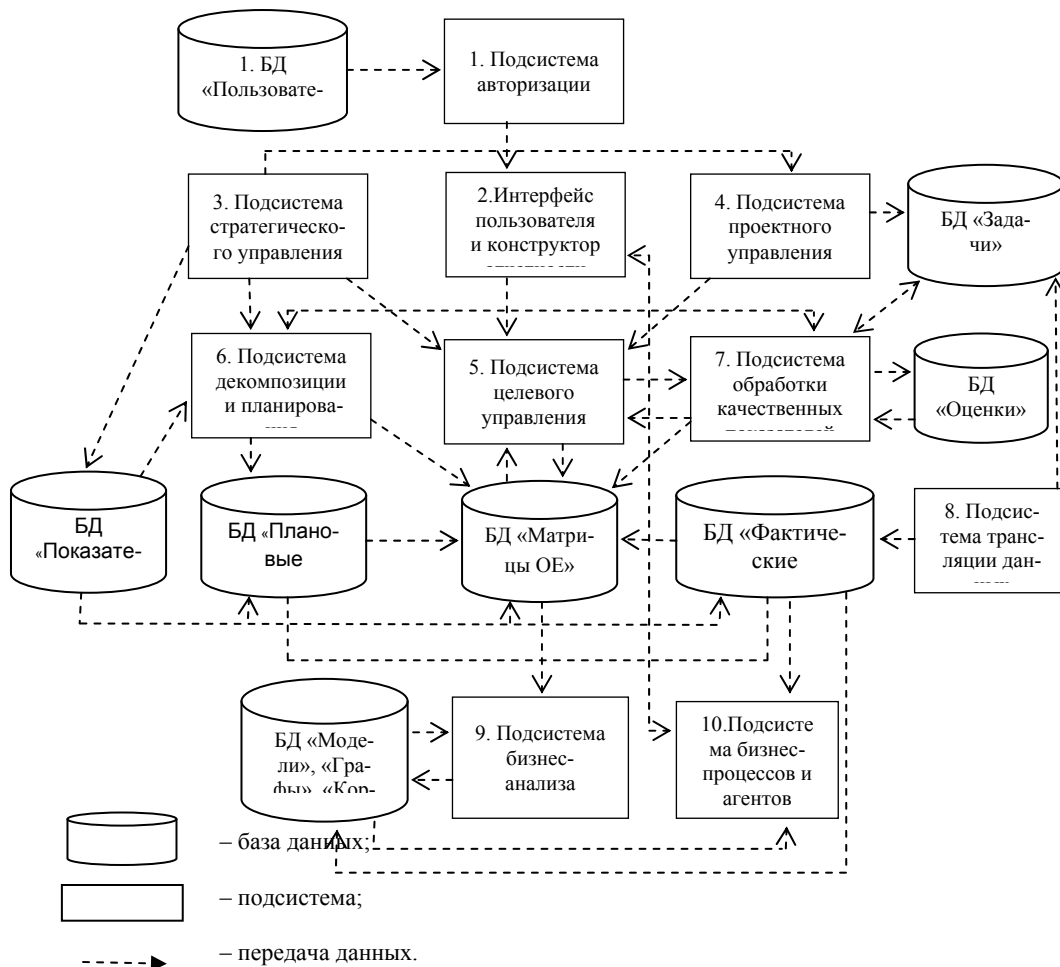


Рис. 2. Структурно-функциональная модель автоматизированной системы

Описание функционального назначения подсистем приведено в табл. 1, описание баз данных с указанием основных реквизитов каждой базы – в табл. 2. Описанная автоматизиро-

ванная система может стать интегрированной информационной средой и инструментом поддержки взаимодействия пользователей при решении задач управления эффективностью [11].

Таблица 1

Описание подсистем автоматизированной системы управления эффективностью

№	Название подсистемы	Функции и предназначение
1	Подсистема авторизации	Посредством подсистемы авторизации происходит предоставление доступа пользователей к данным автоматизированной системы. Для каждого пользователя назначается набор прав, в зависимости от должностной позиции в организационной структуре и полномочий.
2	Интерфейс пользователя и конструктор отчетности	Интерфейс пользователя определяется набором его прав (п.1). Все интерфейсы строятся динамически с использованием предопределенных «виджетов» (базовых элементов интерфейса с заданной функциональностью). Пользователь самостоятельно конструирует свой интерфейс с использованием «виджетов» в зависимости от выполняемых задач. Интерактивная настройка предопределенных панелей виджетов позволяет получать доступ к информации АС [12]
3	Подсистема стратегического управления	Посредством подсистемы формируются карты стратегических целей [13] для предприятия по различным ОЕ, а также группируется информация по исполнению этих целей.
4	Подсистема проектного управления	Посредством подсистемы происходит ввод информации по реализуемым проектам с детализацией до отдельных задач (декомпозиция).
5	Подсистема целевого управления	Подсистема целевого управления – является ключевой в АС. Посредством ее происходит распределение ответственности за реализацию целей между подразделениями и сотрудниками через формирование «Матриц ОЕ».
6	Подсистема декомпозиции и планирования	Выполняет функцию вертикального согласования стратегического и тактического планирования, а также горизонтального согласования функциональных планов с картами целей отдельных сотрудников [14].
7	Подсистема обработки качественных показателей	Посредством подсистемы происходит ввод информации по качественным критериям достижения целей (формирование и контроль плана мероприятий, а также опрос экспертов, внутренних клиентов и руководителей по степени исполнения регламентов и стандартов)
8	Подсистема трансляции данных	Выполняет функцию трансляции данных из внешних источников и баз данных. За счет алгоритмизации сбора первичных данных возможно обеспечить непрерывный (или итерационный) процесс обмена данными как по количественным, так и качественным показателям. Возможна интеграция с программными продуктами, применяемыми для проектного управления (для переноса данных по задачам и проектам).
9	Подсистема бизнес-анализа	Предназначена для настройки корреляционных моделей, проверка предположений о наличии причинно-следственных связей, проведение исследования данных (визуальное представление данных по показателям, интерактивная фильтрация данных по аналитикам), определения плановых и прогнозных значений показателей [15].
10	Подсистема бизнес-процессов и агентов оповещения	Предназначена для обеспечения коммуникаций между пользователями при выполнении задач целевого управления, а также информирования ЛПР о возникновении значимых событий (попадание значения показателей в определенную зону, наличие просроченных задач, находящихся на контроле, необходимость проведения оценки и т.п.) [16]

Таблица 2

Описание баз данных автоматизированной системы управления эффективностью

№	Название базы данных	Описание	Основные реквизиты
1	Пользователи	В БД хранится информация по пользователям, имеющим доступ к АС и информация о способе идентификации пользователя. Каждый элемент БД описывается набором ролей и интерфейсов, доступных для пользователя.	Физическое лицо, Роль

Окончание табл. 2

№	Название базы данных	Описание	Основные реквизиты
2	Задачи	В БД хранится информация по задачам, сформированым как в рамках стратегических проектов, так и в рамках оперативного планирования. Деление задач осуществляется в привязке к периодам планирования.	Задача, Срок, Период, Вес, Объект управления, Состояние
3	Оценки	В БД хранится информация по субъективным оценкам, применяемым для оценки руководителями и экспертами степени исполнения внутренних регламентов и процедур	Стандарт, Вес, Шкала оценки, Ответственный, Результат оценки
4	Показатели	В БД «Показатели» хранится информация о количественных индикаторах, применяемых для контроля достижения целей, а также о логике расчета плановых и фактических значений	Показатель, Цель, ед. измерения, Формула расчета факта, Аналитика, Источник данных
5	Плановые значения	В БД хранится информация о плановых значениях количественных показателей в разрезе периодов. Данные попадают в БД в результате трансляции функциональных планов, из подсистемы декомпозиции и планирования или посредством ручного ввода	Показатель, Дата, Период, Объект управления, Ключи Аналитики, Плановое значение
6	Матрицы организационных единиц (ОЕ)	В БД хранится информация по утвержденным планам для каждой организационной единицы в виде матрицы, включающей как количественные критерии, так и качественные	Критерий (Показатель, Задача, Оценка), Период, Объект управления, вес, Плановое значение
7	Фактические значения	В БД хранится информация о плановых значениях количественных показателей в разрезе периодов. Данные попадают в БД в результате трансляции данных из транзакционных систем или посредством ручного ввода	Показатель, Дата, Объект управления, Ключи Аналитики, Фактическое значение
8	Модели	В БД хранится информация по существующим версиям моделей, применяемым для бизнес-анализа.	Модель, Версия
9	Графы	В БД хранится информация по ребрам графов, описанных в модели	Модель, Версия, Ребро, Показатель 1, Показатель 2
10	Корреляции	В БД хранится информация по рассчитанным значениям коэффициентов корреляции.	Модель, Граф, Ребро, Ключ Аналитики показателя 1, Ключ Аналитики показателя 2, Значение коэффициента корреляции

### 3. Практическое применение АС управления эффективностью

С использованием предложенной структурно-функциональной модели автоматизированной системы была разработана конфигурация «1С:Управление по целям и КРІ» на платформе «1С:Предприятие». Интерфейс и конструктор отчетности (Подсистема 2) позволяет формировать информационные панели [12] и отчеты,

в соответствии с запросами пользователя. Настройка интерфейса происходит в пользовательском режиме. В зависимости от роли и набора прав каждого пользователя, возможно формирование различных информационных панелей, представляющих лицам, принимающим решения, актуальную информацию по вопросам управления эффективностью деятельности предприятия (рис. 3).

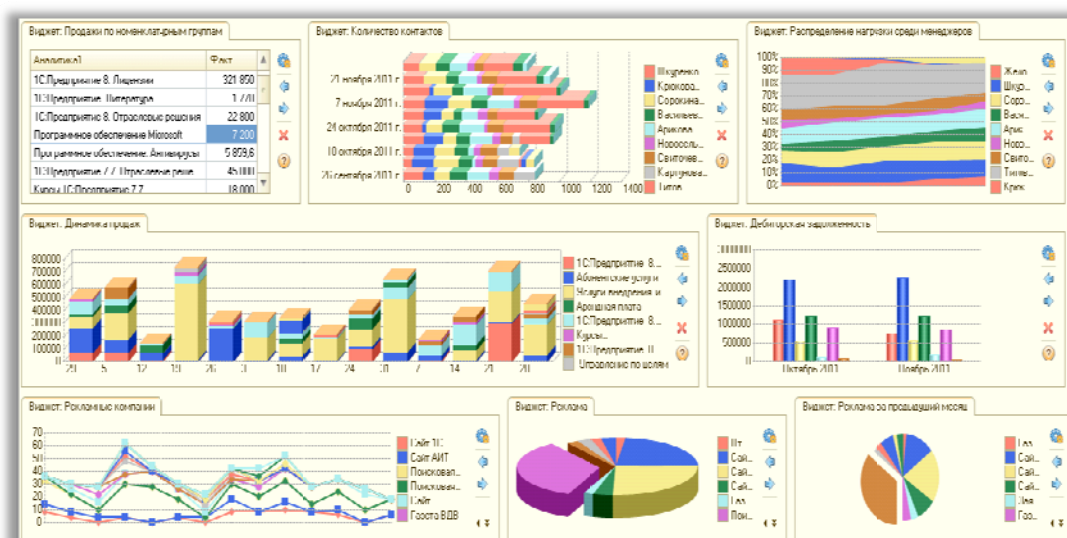


Рис. 3. Информационные панели управления эффективностью деятельности предприятия

Для формирования карты стратегических целей (рис. 4) и их декомпозиции (подсистема 3) используется специализированный инструмент – информационная панель «индикаторы». Посредством его можно обеспечивать контроль реализации стратегических целей.

Подсистема 4 (проектное управление) реализована посредством отдельной информационной панели, в которой пользователь может вносить информацию по планированию и реализации стратегических и текущих проектов, а также контролировать ход исполнения задач в рамках проектов [17]. В подсистеме целевого управления (подсистема 5) для каждого сотрудника и подразделения создается матрица результативности (рис. 5), в которой отображается актуальная информация по ключевым по

казателям деятельности, за которые отвечает соответствующее подразделение.



Стратегическая панель BSC

Рис. 4. Пример карты целей предприятия, оформленной в виде набора индикаторов

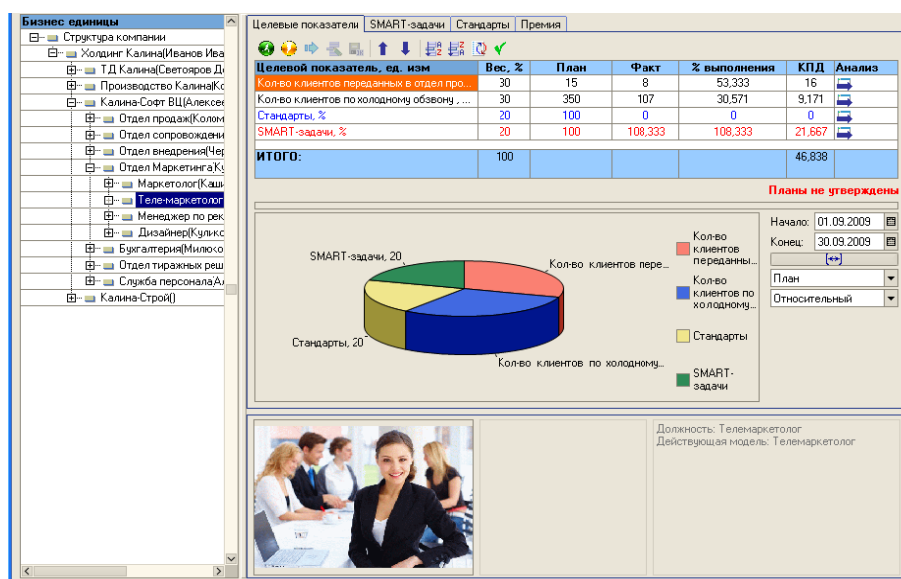


Рис. 5. Пример матрицы результативности сотрудника

# Заключение

Следует отметить, что после разработки АС, она успешно прошла сертификацию «1С:Совместимо» и была внедрена в нескольких сотнях предприятий России и ближнего зарубежья (например, ООО «ТракМоторс», ЗАО «Биокад», ООО «Универсальная финансовая система», ОЭЗ ППТ «АЛАБУГА», ООО «Тюмень-молоко»). По отзывам руководителей предприятий, на которых была внедрена АС, ее использование позволяет решать следующие управленческие задачи:

- каскадирование целей предприятия до подразделений и сотрудников;
- организация взаимодействия руководителей и рядовых сотрудников на предмет достижения целей в едином информационном пространстве;
- обеспечить контроль выполнения стратегических проектов;
- настроить автоматизированный сбор плановых и фактических данных по ключевым показателям деятельности (KPI) из отдельных учетных систем;
- формирование аналитическим департаментом отчетов ряда отчетов по динамике ключевых показателей деятельности и аналитических показателей результативности.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трифонов, Ю.В. Модифицированная концепция построения систем управления эффективностью бизнеса // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского 2013. № 3–1. С. 289–292.
2. Jin Gu Kang. A Business Activity Monitoring System Supporting Real-Time Business Performance Management // Convergence and Hybrid Information Technology 2008. ICCIT '08. Third International Conference on (Volume:1 ). 2008. С. 473–478.
3. Gary Cokins Enterprise Performance Management: Making it Work EDPACS: The EDP Audit, Control, and Security Newsletter, Volume 48, Issue 6, 2013 pages 11–21.
4. Belov A.G. and Kravets A.G. Business Performance Management in Small and Medium Businesses and Functional Automation // World Applied Sciences Journal (WASJ). – 2013. – Vol. 24, Spec. Issue 24: Information Technologies in Modern Industry, Education & Society. – pp. 7–11.
5. Мещеряков, В.А., Суrowицкая, Г.В., Чугунова, В.В. Система диагностики системы менеджмента качества стратегического уровня управления университетом. Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. – 2008. – № 4. – С. 58–65.
6. Белов, А.Г., Кравец, А.Г. Система ключевых показателей эффективности для проекта разработки тиражного

программного обеспечения. Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2014. № 4 (28). С. 11–22.

7. Кравец, А.Г. Models and methods of professional competence level research / А.Г. Кравец, А.Г. Белов, Н.П. Садовникова // Recent Patents on Computer Science. – 2016. – Vol. 9, No. 2. – С. 150–159.

8. Склемин, А.А., Кушников, В.А. Анализ выполнимости планов мероприятий при управлении промышленным предприятием // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 4 (24). – С. 18–28.

9. Управление бизнесом. На пути от измерения к управлению. Результаты опроса генеральных и финансовых директоров ведущих компаний России. Режим доступа : [http://www.pwc.ru/en\\_RU/ru/performance-management/as-sets/erp-survey-2012-rus.pdf](http://www.pwc.ru/en_RU/ru/performance-management/as-sets/erp-survey-2012-rus.pdf) (Дата доступа 01.12.2015).

10. Белов, А.Г., Кравец, А.Г. Автоматизированная система управления эффективностью деятельности промышленного предприятия / Сборник трудов XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых : В 2 т. Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Институт кибернетики (ИК) ; под ред. Т. Е. Мамоновой [и др.]. 2016. – С. 53–54.

11. Иващенко, А.В. Поддержка взаимодействия пользователей интегрированной информационной среды предприятия // Известия высших учебных заведений Поволжский регион. Технические науки. Информатика, вычислительная техника. 2010. № 2 (14). С. 13–20.

12. Белов, А. Г. Разработка панелей бизнес-показателей компании. Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2011. – Т. 11, № 12. – С. 77–81.

13. Белов, А.Г. Проектирование автоматизированной системы управления эффективностью предприятия / А. Г. Белов // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM – 2016) : тр. XVI Междунар. молодежной конф. (г. Москва, 17–19 окт. 2016 г.) / под ред. А.В. Толока ; ФГБУН «Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН», РФФИ (грант № 16-37-10306/16) [и др.]. – М., 2016. – С. 359–363.

14. Одинцов, Б.Е., Романов А.Н. Проблемы создания информационных систем управления эффективностью бизнеса // Вестник Финансового университета. 2014. № 6 (84) . С. 22–36.

15. Turban E., Sharda R., Delen D. Decision Support and Business Intelligence Systems, 2010.

16. Kravets A.G., Gurtjakov A. pp. and Darmanian A. P. Enterprise Intellectual Capital Management by Social Learning Environment Implementation. //World Applied Sciences Journal 23 (7): – 2013, pp. 956–964.

17. Гарин, М.С. Автоматизация бизнес-администрирования в туристической фирме / М.С. Гарин, А.Г. Кравец, Е.В. Романенко // Известия ВолгГТУ. Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». Вып. 10 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – № 3. – С. 100–102.

18. Укустов, С.С. Интеллектуальный подход к проблеме формирования проектной команды с учетом производительности и кооперативного эффекта / С.С. Укустов, А.Г. Кравец // Открытое образование. – 2011. – № 2. – С. 92–95.

УДК 519.23

*И. Э. Симонова, А. Б. Симонов, И. А. Тарасова, В. П. Мишта***ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ К ЗАДАЧАМ УПРАВЛЕНИЯ  
РЕГИОНАЛЬНЫМИ ПРЕДПРИЯТИЯМИ****Волгоградский государственный технический университет**

simonova-vstu@mail.ru, absimonov@gmail.com

В статье проведено статистическое исследование рядов динамики, характеризующих деятельность некоторых региональных предприятий. Построены компьютерные модели. Выявлен ряд статистических закономерностей. Показана возможность их применения в задачах управления предприятием.

*Ключевые слова:* статистические модели, временные ряды, региональные предприятия.

*I. E. Simonova, A. B. Simonov, I. A. Tarasova, V. P. Mishta***APPLICATION OF THE STATISTICAL METHODS  
IN THE TASKS OF THE REGIONAL ENTERPRISES' MANAGEMENT****Volgograd State Technical University**

In this article the statistical investigation of the time series which characterize the activity of some regional enterprises is conveyed. Computer models are constructed. Some statistical conformities are found. Opportunity of their use in the questions of region enterprises' management is shown.

*Keywords:* statistical models, time series, regional enterprises.

**Введение**

В современной экономической деятельности в условиях жесткой конкурентной среды особую важность приобретает задача стратегического управления предприятием. Основой стратегического управления предприятием является анализ, планирование и прогнозирование основных показателей его финансово-экономической и производственной деятельности. В данной работе проведено статистическое исследование ключевых производственных показателей деятельности двух региональных предприятий. Проведен регрессионный и дисперсионный анализ, выявлены сезонные компоненты соответствующих рядов динамики. Для анализа использовалась триальная версия пакета прикладных программ (ППП) Statgraphics Centurion [1].

Современные статистические ППП (Statgraphics, SPSS [2] и др.) широко употребляются в ряде стран как инструмент экономического исследования в коммерческих организациях, банках, правительственных и медицинских учреждениях. С возможностями пакетов и примерами их применения можно ознакомиться на сайтах разработчиков [1] и [2]. В нашей стране статистические программы (в основном узкопрофильные) в последние годы активно внедряются в банках, государственных, медицинских, страховых, учреждениях. Статистические ППП сделали методы анализа данных доступными и наглядными. Они дали возможность

выявлять закономерности на фоне случайностей, делать обоснованные выводы и прогнозы (см., например, [3] и [4]). Методы компьютерного анализа статистических данных широко используются в ВолгГТУ при проведении прикладных исследований (см. [5–8]).

В статье проведен статистический анализ ключевых производственных и финансовых показателей двух региональных предприятий – АО «Себряковцемент» и ООО «ЭкоМастер». Данные предоставлены авторам плановыми отделами этих предприятий. Исследование проводилось с использованием ППП Statgraphics Centurion. Этот пакет широко применяют в современных научных исследованиях при проведении статистического анализа и моделирования. Он предоставляет возможность выявить тренд временного ряда, провести его декомпозицию, вычислить сезонные индексы, провести регрессионный и дисперсионный анализ и использовать построенные модели для дальнейшего прогнозирования.

**Статистическое исследование долгосрочной  
динамики выпуска цемента  
на АО «Себряковцемент»**

За основной исследуемый производственный показатель на АО «Себряковцемент» был взят месячный объем отгрузки цемента ( $Y_t$ , тонн) в 2009–2016 гг. Объем отгруженного цемента напрямую определяет выручку предприятия.

По предприятию решались следующие задачи:

- 1) изучение динамики изменения месячных и годовых показателей работы предприятия;
- 2) построение математических моделей, характеризующих динамику деятельности предприятий, оценка значимости этих моделей;
- 3) прогнозирование ожидаемой выручки от реализации конкретных видов продукции и услуг.

Построение модели ряда динамики – сложный, многоэтапный процесс (подробнее см. [3]). *Первый* этап анализа ряда динамики – его графическое представление и описание поведения. На основе анализа полученного графика (рис. 1) можно увидеть основную тенденцию (тренд). Более очевидны сезонные колебания: динамика отгрузки цемента имеет ярко выраженные годовые циклы.

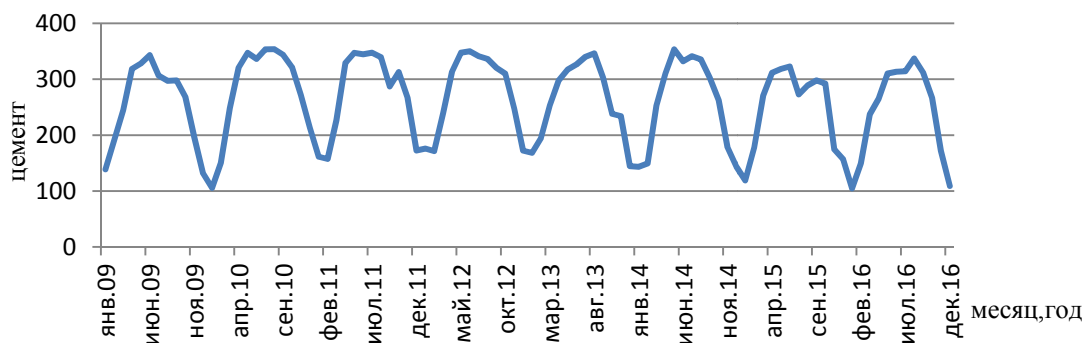


Рис. 1. Отгрузка цемента (по месяцам), 2009–2016 гг.

На *втором* этапе анализа изучается наличие тренда. Специфической особенностью данного ряда является то, что у него для летних и зимних месяцев нет единой тенденции. Летом все годы объем отгружаемого цемента держится на стабильно высоком уровне – около 340 тонн. А для зимних месяцев достаточно благоприятная ситуация в 2011–2014 гг. сменилась уменьшением объема продаж в 2015 и 2016 годах.

Поэтому для выявления общей тенденции приходится перейти к годовым показателям (применен метод укрупнения интервалов). На рис. 2 представлены суммарные годовые показатели по отгрузке цемента ( $G_n$ , тонн). Здесь  $n$  – номер года наблюдения,  $n = 1, 2, \dots, 8$ .



Рис. 2. Годовые показатели за 2009–2016 гг.

Низкое значение  $G_n = 3062$  т. в 2009 г. соответствует периоду экономического кризиса 2008–2009 гг. В 2010–2012 гг. годовой объем отгружаемого цемента держался на достаточно высоком уровне – около 3300 т в год. В 2013–2016 гг. наметилась тенденция к уменьшению объемов продаж цемента. Это снижение соответствует неблагоприятной ситуации в строительной отрасли (основного потребителя продукции), сложившейся в последнее время. Для описания динамики годовых показателей построено несколько регрессионных моделей. Модель линейной регрессии, построенная по данным за все 8 лет, оказалась незначимой. Параболическая модель

$$\hat{G}_n = 30,31 + 147,6 \cdot n - 21,37 \cdot n^2$$

значима, что подтверждает большое значение статистики критерия Фишера  $F\text{-Ratio} = 10,96$ . Она определяет 81 % изменчивости  $G_n$  (коэффициент детерминации равен  $R^2 = 0,81$ ). Однако она мало пригодна для прогнозирования, так как формальный расчет по ней приводит к неоправданно заниженным показателям.

Более адекватной оказывается регрессионная модель, построенная с исключением данных за кризисный 2009 г. Для периода 2010–2016 гг. модель линейной регрессии имеет вид  $\hat{G}_n = 3482,3 - 79,8 \cdot n$ .

Качество этой модели очень хорошее. Она объясняет 94,5 % изменчивости  $G_n$  (коэффициент детерминации равен  $R^2 = 0,945$ ). Большое



значение статистики критерия Фишера  $F\text{-Ratio}=85,52$  свидетельствует об адекватности модели. Прогноз по этой модели на 2017 г. дает значение 2844 т, т. е. прогнозируется небольшое уменьшение годового объема продаж (по сравнению со значением 2891,3 в 2016 г.), что соответствует текущим реальным показателям.

При решении задач управления предприятием следует отметить, что знание тенденции полезно, но недостаточно. Как видно из рис. 1, в динамике отгрузки важную роль играют сезонные колебания, которые изучаются на следующем этапе исследования. При этом летом объемы производства существенно не изменяются, а уменьшение годовых показателей

связано с падением отгрузок в зимние месяцы.

Третий этап исследования – выявление сезонной компоненты. Сезонную компоненту достаточно хорошо видно и на линейной диаграмме (рис. 1), однако для ее лучшей визуализации может использоваться радиальная диаграмма (рис. 3). Она строится в полярной системе координат с целью отражения процессов, ритмически повторяющихся во времени.

Для построения вычерчивается круг, разделенный на 12 секторов. Каждый из 12 радиусов изображает месяц, на нем делается отметка, равная значению  $Y_t$  (в масштабе, показанном на радиусе с номером 1). Затем отметки всех месяцев соединяются отрезками.

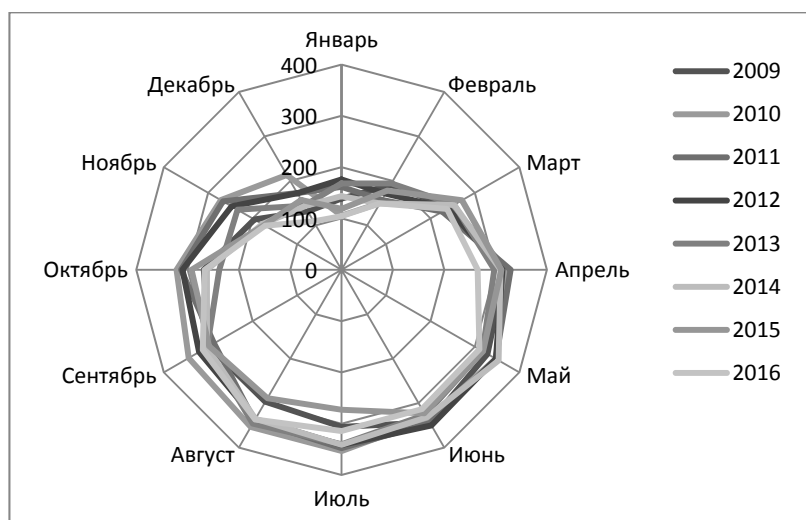


Рис. 3. Радияльная диаграмма отгрузки цемента по месяцам (т)

Видим, что ломаные, соответствующие разным годам, отличаются однотипным поведением, иллюстрирующим заметное снижение объемов продаж в зимние месяцы (особенно в последние два года). Хотя участки, соответствующие летним месяцам, отличаются незначительно.

Для проведения сезонной декомпозиции ряда  $Y_t$  использовался ППП Statgraphics. Декомпозиция ряда проводится для выделения трех основных компонент ряда – тренда ( $tr_t$ ), сезонной и случайной компонент ( $S_t$  и  $e_t$ ). Так как явно выраженный тренд в нашем случае отсутствует, для его аппроксимации был использован метод центрированного скользящего среднего с величиной интервала сглаживания, равной 12 месяцев (подробнее см. [3], гл. 12). Использовалась мультипликативная модель ряда  $Y_t = tr_t \cdot S_t + e_t$ . Поэтому для нахождения

$S_t$  для каждого месяца вычислялось отношение  $Y_t$  к  $tr_t$ . Сезонные индексы  $S_t$  (в процентах) для каждого месяца были получены путем усреднения этих отношений по всем наблюдениям, относящимся к данному месяцу, и умножением на 100.

Результаты представлены в табл. 1. Индексы колеблются в пределах от 52,83 % в январе до 127,15 % в мае, что указывает на сильные сезонные колебания. Поэтому основной задачей стратегического управления является разработка мероприятий, направленных на поиск новых источников спроса в зимние месяцы, изучение возможностей складирования произведенной зимой продукции, планирование кадровой политики, обновления и ремонта основных фондов с учетом их низкой загрузки зимой; а также поддержание достигнутых летних показателей.

Таблица 1

Сезонные индексы

Номер месяца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Сезонный индекс (%)	52,83	62,57	94,21	116,56	127,15	126,54	124,22	124,25	116,71	108,72	84,73	61,49

Знание тренда и сезонной компоненты позволяет построить уравнение эмпирической регрессии  $\hat{Y}_t = tr_t \cdot S_t$ . Его можно использовать для прогнозирования. Однако в меню Forecast ППП Statgraphics имеются более сложные комбинированные модели авторегрессии-скользящего среднего, дающие более точный прогноз. Для ряда  $Y_t$  использовалась модель, автоматически выбранная Statgraphics (ARIMA (0,0,2)  $\times$   $\times$  (2,1,2)). По ней был рассчитан прогноз на январь ( $t = 95$ ) 2017 г. и получено значение  $Y_{95}^* = 127$ . При сравнении нашего прогноза с реальными данными за январь оказалось, что погрешность прогноза не превышает 10 % для января, что говорит о достаточно хорошем качестве модели.

В процессе нашего исследования изучалась также динамика выпуска по отдельным видам продукции на АО «Себряковцемент» и валовая выручка. Основные аспекты динамики этих показателей те же, что и для объема отгруженного цемента.

#### Статистическое исследование динамики текущих показателей ООО «ЭкоМастер»

Задачи исследования динамики социально-экономических явлений возникают в самых различных областях – в производстве, сфере обслуживания и др. Для некоторых предприятий наиболее важными показателями их деятельности являются их годовые или месячные показатели. На других предприятиях при решении задач стратегического управления приходится анализировать изменчивость их показателей по дням

недели. В качестве примера рассмотрим деятельность компании ООО «ЭкоМастер». «ЭкоМастер» – это многопрофильная экологическая организация, осуществляющая деятельность по вывозу и утилизации отходов на территории всего Волгограда. У предприятия два основных направления работы. Первое из них – по долгосрочным договорам. Доходы от этих договоров имеют относительно устойчивый характер. Второе направление – обслуживание предприятий и частных лиц по разовым договорам. Доходы от этих услуг на первый взгляд имеют хаотический характер. На рис. 4 представлена выручка от выполнения разовых договоров  $Q$  (в ценах на начало 2016 г., начиная с 1.04.2016). По оси абсцисс отложен номер дня наблюдения.

Выявление скрытых закономерностей в таких данных представляет особый интерес. Хаотическая компонента ряда слишком велика и разнородна, поэтому традиционные методы выявления тренда и сезонной компоненты здесь не подходят. Однако визуальный анализ графика  $Q$  позволяет выделить в апреле и начале мая период увеличения объема услуг, вызванный весенними работами по уборке и благоустройству города. На этот же период приходится наибольшее значение выручки 16,1 тыс. руб. (5 мая, 35-й день наблюдения). Отметим еще два выделяющихся больших наблюдения, приходящихся на 27 апреля и 17 июня (27-й и 78-й день, 13,27 и 14,72 тыс. руб. соответственно). Они же выделены на рис. 5 как самые верхние значения.

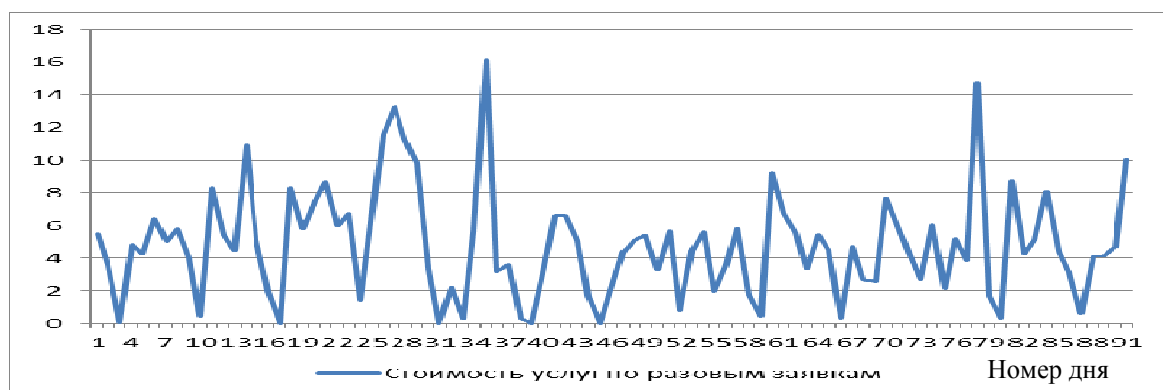


Рис. 4. График выручки ООО «ЭкоМастер» от разовых заявок (тыс. руб.)

С другой стороны, на графике видим 11 дней, когда выручка от разовых заявок близка к нулю. Действительно, разброс значений  $Q$  очень велик и хаотичен, однако некоторые закономерности удается выявить.

Для дальнейшего анализа ряда динамики  $Q$  применим однофакторный дисперсионный анализ. В качестве фактора были взяты значения дней недели  $days = 1, \dots, 7$ , в качестве показателя – выручка  $Q$  (income) в эти дни. На рис. 5 представлен график «ящик с усами» (Box-and-Whisker Plot), показывающий результаты расчленения данных по 7 дням недели (уровням фактора). На графике визуальна проявлена различная статистическая информация. «Ящик с усами» для каждого из семи дней ограничен значениями верхней и нижней квартилей и содержит 50 % «средних» наблюдений. Средние значения для каждого уровня изображены точками внутри «ящичков» и приведены в табл. 2. Горизонтальными линиями обозначены медианы. «Резко выделяющиеся» наблюдения изображены точками, они удалены от границ

«ящичка» более чем на полтора интерквартильных интервала (ширины «ящичка»). «Усы» тянутся до наибольшего и наименьшего значений выручки (для каждого из 7 дней), если эти значения не являются «резко выделяющимися».

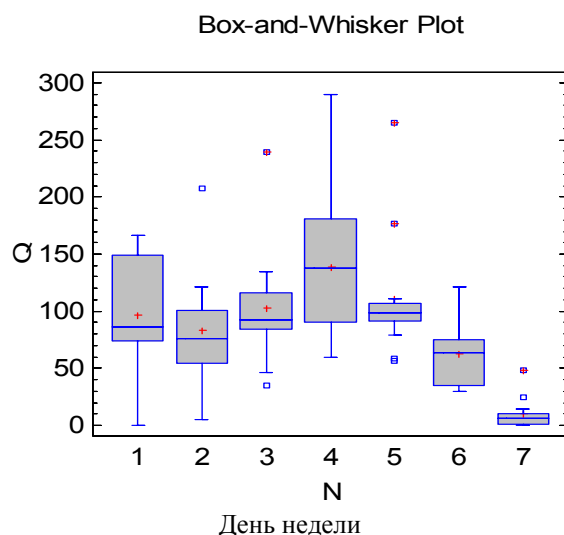


Рис. 5. Результаты факторного анализа

Таблица 2

Средняя выручка по дням недели

Номер дня	1	2	3	4	5	6	7	В среднем
Средняя выручка	5,382	4,618	5,690	7,727	6,155	3,511	0,560	4,806

Однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) позволил выявить существенную разницу между показателями для разных дней недели. Значение статистики критерия Фишера, по которому проверялась гипотеза об отсутствии влияния фактора «день недели» на  $Q$ , равно  $F\text{-Ratio}=9,71$ . Тем самым между выручкой в разные дни недели выявлено существенное отличие, показанное на рис. 5. Анализ графика и табл. 2 показывает, что в будние дни предприятие активно работает по разовым заявкам и получает среднюю выручку в пределах 4,6–7,7 тыс. руб. Наибольшее среднее значение выручки 7,7 тыс.руб. приходится на четверг, ее значение на 125 % и более превышает среднее для других дней. В субботу средний объем услуг заметно ниже и составляет 3,5 тыс. руб. В воскресенье заявок очень мало. Кроме того, выявлены «резко выделяющиеся» наблюдения.

По результатам этого исследования были даны рекомендации по организации процесса управления на ООО «Экомастер». Они касались планового увеличения количества работа-

ющих по четвергам машин и уменьшению количества задействованных машин по субботам. Выполнение услуг в воскресные дни малоэффективно, возможно, их следует переносить на понедельник.

### Выводы

Широкое использование статистических ППП при анализе хозяйственной деятельности предприятий является мощным инструментом и средством управления стратегическим потенциалом региона. Приведенные в статье результаты статистического анализа деятельности двух региональных предприятий могут быть использованы при формировании долгосрочного комплекса управленческих решений с целью улучшения деятельности этих предприятий, а примененные методы могут использоваться в планировании и управлении на макро- и микроуровне.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Statgraphics 18 centurion [Электронный ресурс] // URL: [www.statgraphics.com](http://www.statgraphics.com) (дата обращения 22.10.2017).

2. IBM SPSS Software centurion [Электронный ресурс] // URL: [ibm.com/spss](http://ibm.com/spss) (дата обращения 22.10.2017).

3. Тюрин, Ю.Н. Статистический анализ данных на компьютере / Ю.Н. Тюрин, А.А. Макаров. – М.: ИНФРА-М. 1998. – 528 с.

4. Бююль, А. SPSS: искусство обработки информации : пер. с нем. / А. Бююль, П. Цефель. – М.-СПб. : ДиаСофт. 2002. – 602 с.

5. Камаев, В.А. Анализ социально-экономического развития муниципальных образований на примере Волгоградской области с использованием моделей DATA MINING / В.А. Камаев, М.В. Щербаков, А.С.Ал.-Катабери // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2010. Т. 8. № 6(66). С. 103–106.

6. Исследование динамики изменения количества иностранных студентов, обучающихся в ВолгГТУ /

А.Е. Годенко, И.Э. Симонова, В.П. Мишта, Т.Р. Игонина // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2015. Т. 8. № 6(163). С. 112–115.

7. Лунева, И.Г. Основные направления компьютеризации математического образования будущего инженера: компетентностный подход / И.Г. Лунева, И.Э. Симонова // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2012. – № 1. – С. 55–58.

8. Савченко, О. А. Применение методов анализа рядов динамики в стратегическом управлении предприятием / О.А.Савченко, А.Б. Симонов, И.Э. Симонова // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях : Сб. науч. ст. IV Междунар. науч.-практ. конф. (Россия, г. Курск, 04–05 июня 2014 г.) / Курск, Юго -Запад. ГУ, 2014. – С. 273–277.

УДК 004.942

*Я. А. Швецов, В. И. Аверченков*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕДАЧИ, ОБРАБОТКИ И ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ О КОТИРОВКАХ ФОНДОВОЙ БИРЖИ

Брянский государственный технический университет

yshvetsov1491@yandex.ru, aver@tu-bryansk.ru

В статье описано современное состояние информационного обеспечения в сфере обработки биржевой информации. Представлена схема работы социально-экономических институтов, чья деятельность непосредственно связана с рассматриваемой в статье сферой. Предложена функциональная схема информационной системы по сбору статистических данных. Предоставлены примеры работы программы «Фондовая аналитика», а также описаны преимущества ее алгоритма работы в сравнении с классическими методами получения и обработки информации.

**Ключевые слова:** модели информационных потоков, фондовая биржа, котировки, статистическая обработка данных, курс акций, компьютерная обработка биржевых котировок.

*Y. A. Shvetsov, V. I. Averchenkov*

## RESEARCH OF TRANSMISSION, PROCESSING AND STORAGE PROCESSES OF STOCK EXCHANGE QUOTATIONS INFORMATION

Bryansk State Technical University

The current state of information support in the sphere of processing of exchange information is described in the article. The scheme of work of social and economic institutes whose activity is directly connected with the considered sphere is submitted in the article. The function chart of an information system on collecting statistical data is offered. We describe the examples of working of the Share Analytics program and the advantages of its algorithm of work in comparison with classical methods of receiving and information processing.

**Keywords:** models of information streams, stock exchange, quotations, statistical data processing, share price, computer processing of exchange quotations.

Фондовый рынок является одним из важнейших звеньев современной экономики, в том числе и в России. Среди огромного количества выполняемых этим институтом функций, можно выделить несколько основных [1]:

- перераспределение финансовых средств;
- финансирование дефицита бюджета;
- централизация капитала;
- учет крупных сделок между фирмами;
- стимулирование производства.

Фондовая биржа является вторичным рынком для ценных бумаг, то есть на ней проводятся сделки по приобретению или продаже ценных бумаг, уже находящихся в обращении и побывавших в собственности владельцев за пределами выпустившей их компании. Обычно у них уже имеется некая рыночная стоимость, колеблющаяся в определенных пределах и называемая котировкой акции. Механизмы организованной торговли вторичного рынка служат

для перераспределения ценных бумаг как между крупными инвестиционными консорциумами, так и более мелкими инвестиционными компаниями, а также частными инвесторами. Наличие достаточного количества таких вкладчиков позволяет экономике эффективно функционировать, привлекая денежные средства для решения насущных проблем [1].

Фондовая биржа позволяет компаниям проводить крупные сделки по покупке сырьевых товаров (меди, никеля, нефти и др.) и обмену денежных средств на валюты других государств. Как и в случае заключения договоров по продаже акций, цена на товары и курсы валют обновляются в реальном времени, позволяя предприятиям и инвесторам незамедлительно вкладывать средства в интересующие их отрасли.

Очевидно, что при столь интенсивном обороте денежных средств, встает вопрос об эффективном обмене данными с учетом объема и характера проведенных сделок за определенный период времени. Разработка информационной системы для обработки этих статистических данных позволит значительно упростить работу лиц, принимающих управленческие решения в российских социально-экономических системах, ведь значение котировок ценных бумаг, товаров и валют является отражением текущего состояния экономических субъектов.

Для исследования закономерностей в движении котировок фондового рынка используется так называемый технический анализ. Этот вид исследования заключается в прогнозировании изменений цены в будущем на основе исследования изменений ценовых тенденций прошлого. В основе технического анализа лежит изучение временных рядов цен [2]. Помимо них в техническом анализе используется информация об объемах торгов, а также иные статистические данные, находящиеся в свободном доступе.

Вопросы, касающиеся обработки информации о котировках акций рассматриваются в работах ученых-экономистов: С. Н. Володина [3], Р. Т. Валихметова [4], П. В. Кратовича [5], а также зарубежных специалистов: Дж. Швагера [6], Г. Марковица [7] и др. Тем не менее, интенсивное развитие исследования в этой области в последние десятилетия позволило взглянуть на описанные ими проблемы сквозь призму современных научно-исследовательских достижений [8].

Изучением котировок фондового рынка занимается целая группа экономических субъек-

тов, именуемых инвестиционными фондами. Структура работы инвестиционного фонда показана на рис. 1. С учетом анализа современного состояния фондового рынка была предложена диаграмма потоков данных (Data Flow Diagram, рис. 2) для детального описания протекающих там процессов.

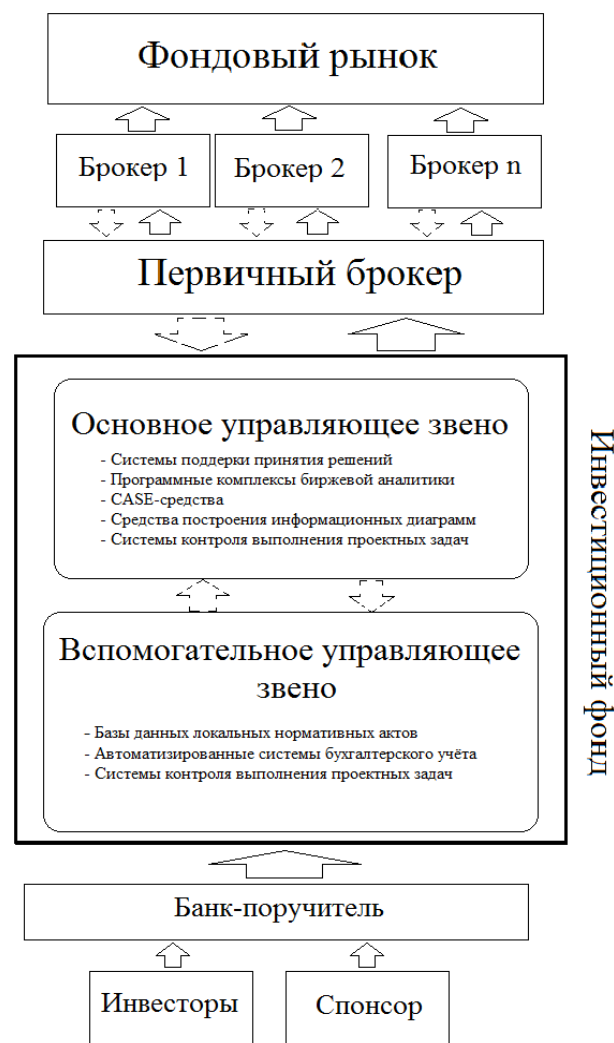


Рис. 1. Типовая структура работы инвестиционного фонда

Кроме того, менеджеры инвестиционных фондов не всегда занимаются административными функциями. Поэтому ряд профессиональных услуг, связанных с расчетами по сделкам, депозитарными услугами, операционной поддержкой, управлением рисками оказывают первичные брокеры [10]. Во вспомогательную управляющую структуру как правило выделяются те звенья управляющей цепи, которые значительно упрощают работу инвестиционного фонда, но не являются обязательными для

исполнения его первичных функций. Обычно к таким элементам относятся администраторы, аудиторы и юридические консультанты. Они

напрямую не влияют на выбор инвестиционной стратегии, но значительно упрощают работу компании.

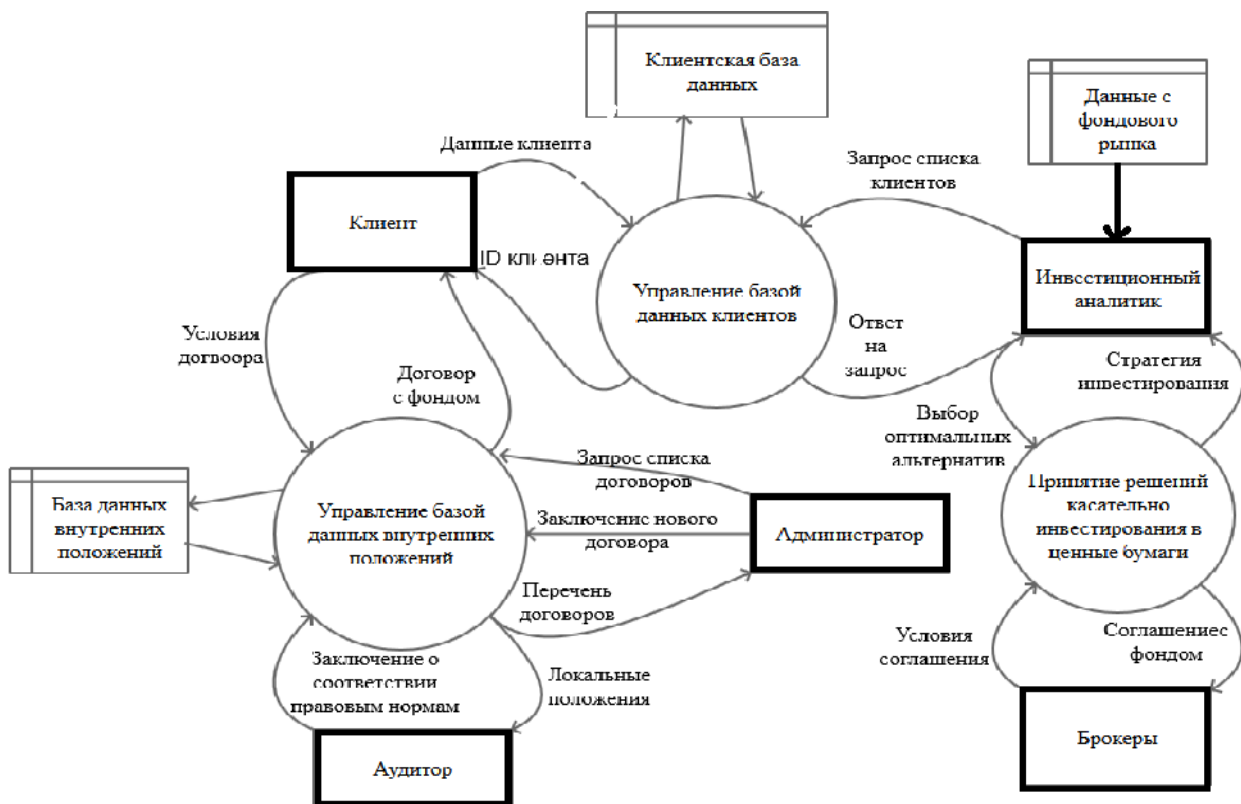


Рис. 2. Диаграмма движения информационных потоков в процессе анализа альтернатив для размещения инвестиций

Кроме того, менеджеры инвестиционных фондов не всегда занимаются административными функциями. Поэтому ряд профессиональных услуг, связанных с расчетами по сделкам, депозитарными услугами, операционной поддержкой, управлением рисками оказывают первичные брокеры [10]. Во вспомогательную управляющую структуру как правило выделяют те звенья управляющей цепи, которые значительно упрощают работу инвестиционного фонда, но не являются обязательными для исполнения его первичных функций. Обычно к таким элементам относятся администраторы, аудиторы и юридические консультанты. Они напрямую не влияют на выбор инвестиционной стратегии, но значительно упрощают работу компании.

Как видно из предоставленной на рис. 2 диаграммы в инвестиционных фондах ведется интенсивная работа с клиентской базой. В то же время, изучением ценовой динамики на рынке занимается исключительно инвестиционный

аналитик. В его обязанности входит принятие решения относительно выбора оптимальной стратегии по распределению финансовых средств. Очевидно, что классическая схема, при которой информация с фондового рынка напрямую поступает в распоряжение аналитика, не является эффективной [11]. Массив данных из нескольких тысяч объектов, которые в свою очередь обладают десятками числовых характеристик не воспринимается человеком в необработанном виде. Отсюда проистекает невозможность проследить за всеми закономерностями в динамике изменения котировок на фондовой бирже, ведь первичный информационный поток, указанный на DFD-диаграмме темной стрелкой, не проходит значимую обработку и сортировку прежде чем поступить в распоряжение пользователей. Естественно, для повышения эффективности получения и обработки котировок акций необходимо создать методы, охватывающие весь рынок ценных бумаг целиком, а не отдельные его участки.



Современные подходы к обработке информации фондовой биржи направлены в первую очередь на максимизацию прибыли и для проведения углубленного анализа полученных данных, для которого необходимо применять иные методы. При исследовании состояния экономических субъектов эффективной является интеллектуальная обработка данных, позволяющая выявить закономерности в изменении стоимости активов различных секторов производства и обслуживания [8].

Исходя из вышеизложенного, был предложен алгоритм описания обобщенной функциональной схемы процесса получения и обработки данных с фондового рынка (рис 3). При этом субъектами доступа выступают пользователи, а объектами являются информационные потоки, передаваемые с сервера фондовой биржи в клиентское приложение.

Используемый в большинстве случаев под-

ход к получению данных предполагает последовательную обработку загруженного с сервера массива котировок. Информация по каждому запрошенному пользователем объекту поступает в программу лишь когда завершена работа над предыдущим блоком данных. Выходная информация представляет собой массив данных с размерностью, равной количеству загруженных в систему акций, товаров или ценовых пар, а потому восприятия столь внушительного объема информации затрудняется [11].

Эффективность получения и обработки данных может быть значительно увеличена, если применять методы статистической и интеллектуальной обработки данных ко всему массиву информации. В этом случае информационная система самостоятельно синтезирует обобщенные технические показатели финансовой привлекательности и устойчивости эмитентов, что, в свою очередь, значительно ускорит обработку данных.

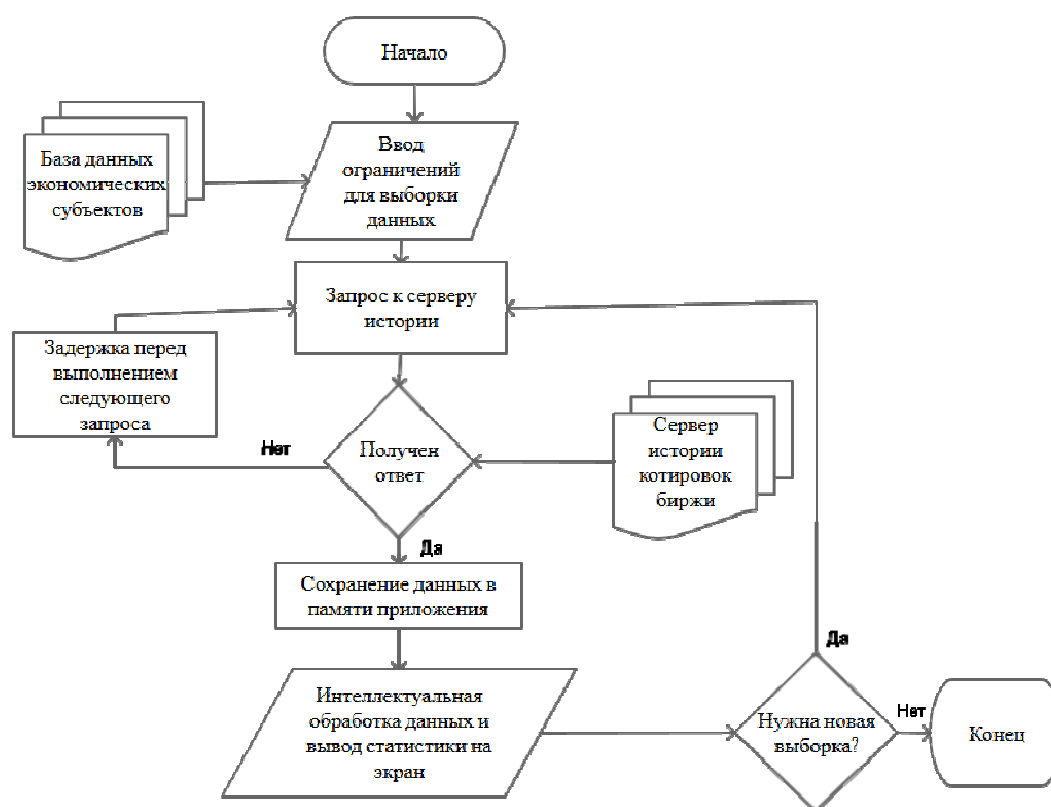


Рис. 3. Схема работы информационной системы для получения и обработки котировок фондовой биржи

На рис. 4 и 5 представлены возможности, реализованные в программном комплексе под рабочим названием «Фондовая аналитика». Так, классический подход предполагает получение и обработку лишь информации по отдельным экономическим субъектам, в то время как сбор статистических данных позволяет изучить со-

стояние целых групп эмитентов ценных бумаг. Система гибких запросов к серверу не только значительно упростит работу с биржевой информацией тех специалистов, чья работа так или иначе связана с рынком ценных бумаг, но и позволит использовать статистические данные в областях, ранее не занимавшихся сбором

таких данных в связи со сложностью их получения и обработки. Предлагаемый механизм оперативного мониторинга состояния экономической сферы страны заметно уменьшит неопределенность в процессе принятия решений [12].

На рис. 5 показан принцип вывода статистических данных. В рассматриваемом случае пользователю предоставляется информация об объеме совершенных сделок, а компании-эмитенты ценных бумаг представлены на этой диаграмме через уникальные идентификаторы, присвоенные им на фондовой бирже. В качестве примера взят объем сделок по акциям Сбербанка (SBER), Газпрома (GAZP), Лукойла (LKOH) и Яндекса (YNDX)

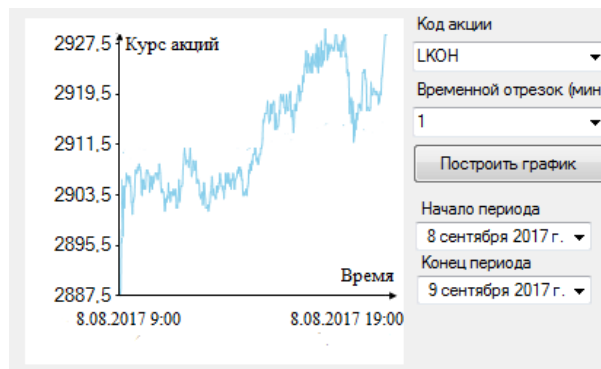


Рис. 4. Классический подход к получению фондовой информации



Рис. 5. Сбор статистических данных, реализованный в программе «Фондовая аналитика»

В рамках исследования была разработана методика анализа динамики котировок акций, на основе обработки данных о совершенных на сделках по купле-продаже ценных бумаг. Предложенная система обладает следующими функциями:

1. Построение графиков изменения курса акций, сырьевых товаров и зарубежной валюты за любой доступный период времени.

2. Сбор и предоставление пользователю статистической информации о заключении сделок на московской фондовой бирже.

3. Интеллектуальная обработка биржевых котировок: кластеризация объектов ценовых отношений фондового рынка и прогнозирования движения стоимостных характеристик.

Исходя из представленного описания работы прототипа системы, можно сделать вывод об эффективности предлагаемого подхода по получению и обработке биржевой информации. Описанное в статье современное состояние предметной области, в свою очередь, позволяет оценить научную актуальность поставленной задачи.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Булатов, В.В. Фондовый рынок в структурной перестройке экономики / В.В. Булатов. – М.: Наука, 2008. – 416 с.
2. Chan, E. Algorithmic Trading: Winning Strategies and Their Rationale / E. Chan – New Jersey: Wiley, 2013. – 224 p.

3. Володин, С.Н. Сравнение эффективности технического анализа на валютном и фондовом рынках / С.Н. Володин, Б.Р. Бинашев // Аудит и финансовый анализ. – 2016. – № 2. – С. 408–415.
4. Бахтадзе, Н.Н. Применение моделей ассоциативного поиска для прогнозирования в задачах трейдинга / Н.Н. Бахтадзе, Р. Т. Валиахметов // Проблемы управления. – 2007. – № 6. – С. 15–20.
5. Кратович, П.В. Нейросетевая модель прогнозирования временных рядов финансовых данных / П.В. Кратович // Программные продукты и системы. – 2010. – № 1(89). – С. 132–134.
6. Швагер, Дж. Технический анализ : Полный курс / Дж. Швагер. – М.: Альпина Паблишер, 2016. – 804 с.
7. Markowitz H. Mean-Variance Analysis in Portfolio Choice and Capital Markets [Текст] / H. Markowitz – Hoboken: Wiley 2000. – 399 p.
8. Швецов, Я.А. Использование методов параллельных вычислений для математического анализа состояния фондовых рынков / Я.А. Швецов, Н.Н. Ивкина // Рыбница : Научный журнал. – 2015. – № 4. – С. 37–41.
9. Радыгин, А.Д. Экономика инвестиционных фондов // А.Д. Радыгин, А.Е. Абрамов. – М.: Дело РАНХиГС, 2015. – 720 с.
10. Аюпов, А.А. Рынок ценных бумаг / А.А. Аюпов, М.Е. Иванов, М.А. Белобородова. – Казань : Отечество, 2013. – 274 с.
11. Shvetsov, Y.A. The computer handling of quotations of the stock market based on methods of decision support / Y.A. Shvetsov, V.I. Averchenkov // The 5th International Scientific-Practical Conference «Education Transformation Issues» – London : Scuero, 2017, 17–26 p.
12. Лисьев, Г.А. Технологии поддержки принятия решений / Г.А. Лисьев, И.В. Попова. – М.: ФЛИНТА, 2011. – 133 с.



## АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

УДК 621.9.06-529.1

*А. А. Яковлев<sup>1</sup>, Е. Г. Крылов<sup>1</sup>, Н. В. Козловцева<sup>2</sup>, А. В. Капитанов<sup>2</sup>*

### ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НЕДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИИ В ГИБКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМАХ

<sup>1</sup> Волгоградский государственный технический университет  
app@vstu.ru

<sup>2</sup> Московский государственный технологический университет «Станкин»  
a.kapitanov@stankin.ru

Для оперативного управления гибкими производственными системами, построенными на базе станков с ЧПУ, предложено использовать специальные алгоритмы, позволяющие решать технологические задачи в условиях неопределенности информации.

*Ключевые слова:* гибкие производственные системы, планирование действий, условия неопределенности.

*A. A. Yakovlev<sup>1</sup>, E. G. Krylov<sup>1</sup>, N. V. Kozlovtsava<sup>2</sup>, A. V. Kapitanov<sup>2</sup>*

### SEARCH FOR OPTIMAL TECHNOLOGICAL SOLUTIONS IN FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEMS UNDER UNCERTAIN INFORMATION CONDITIONS

<sup>1</sup> Volgograd State Technical University

<sup>2</sup> Moscow State Technological University «Stankin»

It is proposed to use special algorithm to manage flexible manufacturing systems built on the basis of CNC machines, which allow solve technological tasks quickly and efficiently even under information uncertainty.

*Keywords:* flexible manufacturing systems, action-planning, uncertainty conditions.

Производственная система предприятия характеризуется совокупностью способов организации производственных процессов, таких как управление закупками, выполнение рабочих операций, управление материальными потоками, обслуживание оборудования, управление качеством. Поскольку производственная система охватывает все стадии конструкторско-технологической и маркетинговой деятельности, поэтому от ее эффективности зависят производительность работы оборудования, качество продукции и, в конечном счете, конкурентоспособность производства. В настоящее время мировым стандартом производительности и качества является японский опыт организации производственных систем, основанный на исключении «лишних» затрат из производственного процесса. Элементы этого опыта в течение последних 25–30 лет распространяются на промышлен-

ных концернах США и Западной Европы. Для российских заводов модернизация производственных систем выступает в качестве одного из способов повышения конкурентоспособности за счет внутренних резервов, без привлечения масштабных инвестиционных ресурсов.

В настоящее время предприятия машиностроительной отрасли ориентированы на выпуск продукции единичного и серийного производства. Для правильного подбора оборудования, приспособлений, распределения деталей по участкам и формирования оптимального графика запуска деталей на обработку необходим тщательный анализ чертежей деталей, технологических процессов и организации производственных подразделений. В этих условиях для гибких производственных систем (ГПС), сформированных на базе обрабатывающего оборудования с ЧПУ и промышленных робо-

тов, возникает значительное количество неопределенной информации, которую можно разделить на «внешнюю» и «внутреннюю» [1, 2].

К внешним неопределенностям можно отнести изменение объема заказов, номенклатуры и требований качества продукции. Их прогнозирование осуществляется на основе использования метода доверительных вероятностей и доверительных интервалов [3].

Внутренние неопределенности можно учитывать с помощью интегральных коэффициентов использования, определяемых при производственных исследованиях для различных типов оборудования и видов производств. Среди причин, вызывающих внутренние неопределенности, следует выделить простои оборудования, наладки для освоения ранее не изготавливавшихся деталей и «возвратные» переналадки.

Выделяют также следующие неопределенности: вероятностные, лингвистические, интервальные, параметрические, структурные, ситуационные, устранимые и неустраиваемые [4]. Наличие большого числа неопределенностей повышает требования к гибкости средств автоматизации программирования, которым в значительной мере удовлетворяют системы интеллектуального планирования действий (СИПД) с продукционными базами знаний.

Продукционные модели – одни из наиболее популярных средств представления знаний в современных интеллектуальных системах. Продукции позволяют не только наглядно отображать знания, классические логические исчисления, но и благодаря своей близости к логическим моделям, позволяют организовать эффективные процедуры вывода.

В самом общем виде продукция представляет выражение вида:

$$(i); Q; P; A \Rightarrow B; N,$$

где  $i$  – идентификатор продукции, необходим для поиска нужной продукции в базе знаний. В качестве идентификатора может выступать как некоторая лексема, ссылающаяся на содержание продукции, например «замена инструмента», так и порядковый номер;  $Q$  – сфера применения продукции;  $A \Rightarrow B$  – правило, составляющее ядро продукции. Интерпретация правила продукции зависит от того, что выражают символы  $A$  и  $B$ . Обычно прочтение ядра продукции выглядит следующим образом: ЕСЛИ  $A$ , ТО  $B$ . Допускается альтернативный выбор, например, ЕСЛИ  $A_1$  ТО  $B_1$ , ИНАЧЕ  $B_2$ .

Секвенция может представлять как знак логического следования  $B$  из  $A$  (для случая, если  $A$  ложно, об истинности  $B$  сказать ничего нельзя), так и другие интерпретации правила продукции, например, в  $A$  содержится необходимое условие для совершения  $B$ ;

$P$  – условие применимости ядра продукции. Обычно  $P$  представляется в виде предиката. Когда  $P$  истинно, применяется правило, в ином случае продукция не может быть реализовано. Например, если в продукции “НАЛИЧИЕ ИНСТРУМЕНТА  $X$  В МАГАЗИНЕ; ЕСЛИ НЕОБХОДИМ ИНСТРУМЕНТ  $X$ , ТО СМЕНИ ТЕКУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ НА  $X$ ” условие применимости ядра ложно (инструмента  $X$  нет), применить ядро продукции невозможно;

$N$  – постусловие продукции. Оно работает только, если правило продукции реализовалось. В постусловии описываются процедуры и действия, которые необходимо выполнить после реализации  $B$ . Например, после поломки инструмента можно занести сведения о его стойкости в базу.

Все ядра продукций делятся на два больших типа: детерминированные и недетерминированные.

В детерминированных ядрах секвенция ( $\Rightarrow$ ) реализуется с необходимостью, а в недетерминированных – с возможностью.

Детерминированные ядра могут быть однозначными и альтернативными. Во втором случае в правой части ядра указываются альтернативные возможности выбора, которые оцениваются специальными весами выбора. В качестве таких весов могут использоваться оценки разных типов:

– вероятностные (ЕСЛИ  $A$ , ТО С ВЕРОЯТНОСТЬЮ 0.3 НАДО ДЕЛАТЬ  $B_1$ , А С ВЕРОЯТНОСТЬЮ 0.7  $B_2$ );

– лингвистические (ЕСЛИ  $A$ , ТО ЧАЩЕ НАДО ДЕЛАТЬ  $B_1$ , РЕЖЕ  $B_2$ ).

Возможность реализации в недетерминированных ядрах определяется оценками реализации ядра: ЕСЛИ  $A$ , ТО ВОЗМОЖНО  $B$ .

Оценки могут быть:

– вероятностные (ЕСЛИ  $A$ , ТО С ВЕРОЯТНОСТЬЮ 0.8 НАДО ДЕЛАТЬ  $B$ );

– лингвистические (ЕСЛИ  $A$ , ТО С БОЛЬШОЙ ДОЛЕЙ УВЕРЕННОСТИ  $B$ ).

Выделяются также прогнозирующие продукции, описывающее последствия, ожидаемые после реализации  $A$ : ЕСЛИ  $A$ , ТО С ВЕРОЯТНОСТЬЮ  $p$  МОЖНО ОЖИДАТЬ  $B$ .

СИПД предназначены для решения задач преобразования ситуаций, в которых исходная и целевая структуры данных, представляющие ситуации в среде и набор операторов (моделей допустимых действий) для преобразования этих структур описаны в терминах объектов, их свойств, состояний и связей (реализаций отношений). На основе данного набора операторов СИПД формирует план, т. е. алгоритмы преобразования исходной структуры данных о среде в целевую.

Планировать действия в реальной среде необходимо в общем случае с учетом обратной связи между уровнями управления ГПС. Часть общей проблемы учета обратной связи может быть решена на верхнем уровне управления путем разработки программных средств, позволяющих планировать действия в условиях неопределенности знаний о реальной среде. Учет различных неопределенностей приводит к ветвлению планов действий, к появлению в них циклов и условных переходов. Конкретные ветви плана должны выбираться автоматически в процессе его выполнения на основе оперативной информации о среде, в которой функционирует производственное оборудование [5].

Под неопределенностью будем понимать такое состояние модели проблемной среды, при котором решающая система имеет некоторое множество  $D^*$  вариантов принятия решений, но не имеет достаточных критериев или данных, позволяющих ей обоснованно предпочесть один из вариантов  $d_i^* \in D^*$ . При планировании существует два основных вида неопределенностей, связанных с отсутствием достаточной информации о реализуемости принимаемых решений (моделируемых действий), или с отсутствием достаточной стратегической информации, позволяющей оценить степень приближения к цели в результате выбора каждого из альтернативных вариантов принятия решений [6,7]. Из альтернативных планов при помощи условных переходов возможно создать один ветвящийся алгоритм. При выполнении такого алгоритма ситуации, прогнозировавшиеся в процессе планирования, становятся реальными, тем самым многие неопределенности исчезают, и выбор действий в ветвящемся алгоритме становится детерминированным.

Рассмотрим общую схему формирования ветвящихся алгоритмов в СИПД, позволяющую единым образом учитывать оба указанных вида неопределенностей. Схема ветвящегося планирования разработана в рамках детерминированного

подхода, т. е. при отсутствии статистических данных и вероятностных оценок, позволяющих сравнивать варианты операторов (моделей действий) СИПД с точки зрения их реализации и приближения к цели. Схема ветвящегося планирования в СИПД показана на рисунке.

Модель проблемной среды СИПД при детерминированном подходе включает в себя неопределенные описательные выражения двух видов:

- неконкретизированные выражения с элементами типа переменных;
- выражения, относительно истинности которых существует сомнение, но численной (вероятностной) оценки этого сомнения нет.

Такому выражению соответствует исключаящая дизъюнкция, первым членом которой является само выражение, а вторым – его отрицание.

Введем множества:

- 1)  $D_c^i$  – множество применимых операторов СИПД в ситуации  $S_i$ ;
- 2)  $D_r^i$  – множество равноценных операторов или вариантов операторов.

Для элементов множества  $D_r^i \subseteq D_c^i$  значения функции полезности  $\varphi(D_c^i)$ , используемой для выбора операторов, находятся в заданных пределах, в частности

$$\forall i, j (\varphi(d_{ri}) = \varphi(d_{cj})).$$

При наличии в описаниях операторов из  $D_c^i$  одинаковых неопределенных элементов соответствующие операторы считаются равноценными, независимо от их оценок по  $\varphi(D_c^i)$ .

Положим, что  $D_r^{*i}$  – множество наилучших операторов, т. е. такое множество равноценных между собой операторов  $D_r^{*i} \subseteq D_c^i$ .

Для него справедливо:

$$\exists d_{ri}^* \in D_r^{*i} (\forall j \in J(\varphi(d_{ri}^*) > \varphi(q_j))),$$

либо  $\varphi(d_{ri}^*) < \varphi(q_j)$ , что зависит от вида  $\varphi$ , где  $Q = D_c^i - D_r^{*i}; q_j \in Q$ .

Узлам ветвления в плане  $A$ , который может быть выдан СИПД на одном из проблемно-ориентированных языков программирования, соответствуют операторы условных переходов.

Во избежание многократного планирования операций над однотипными данными необходимо иметь средства анализа элементов модели среды  $M_o$  на однотипность, проводимого в ходе планирования. Установление однотипности дан-

ных путем построения и анализа полного неитеративного плана может оказаться практически нереализуемой процедурой, если количество однотипных элементов  $M_o$  очень велико или неоп-

ределено. Анализа на однотипность элементов  $M_o$  в ситуации  $S_o$  может быть недостаточным, если преобразования выполняемые над  $M_o$  приводят к появлению новых однотипных элементов.

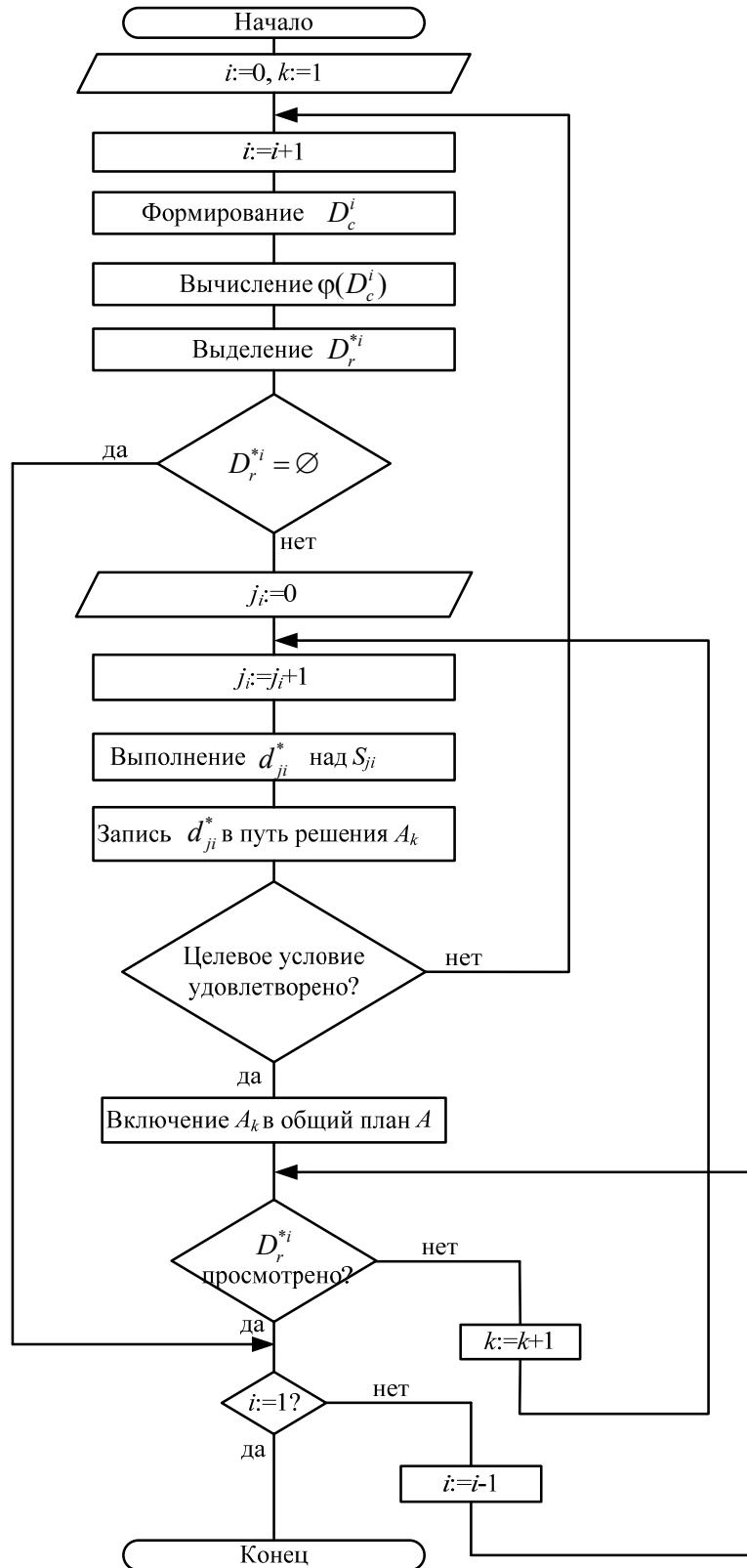


Рис. 1. Алгоритм ветвящегося планирования

Пусть  $G^j = \{g_i^j\}, i = \overline{1, n}$  множество недостигнутых подцелей  $j$ -го уровня поискового графа  $G$ , отражающего переходные состояния модели среды, возникающие в процесса поиска решения,  $i$  – номер подцели; значение  $j$  равно количеству вершин  $G$ , лежащих на пути от данной вершины  $g_i^j \in G^j$  до целевой вершины  $S_g$  включительно.

Обобщение операторов при построении циклов (переход от конкретных реализаций операторов к их исходной обобщенной форме с элементами типа переменных) и определенная организация их использования придают формируемому плану  $A$  алгоритмическое свойство массовости. В этом случае план  $A$ , построенный для преобразования конкретной исходной структуры  $S_o$ , оказывается пригодным для соответствующих преобразований любого множества подструктур данной структуры  $S_o$ , определяемых однотипными элементами. Из описанной схемы планирования видно, что если однотипные подцели возникают на промежуточных этапах планирования, то могут образоваться вложенные циклы.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Крылов, Е. Г. Повышение эффективности функционирования инструментальных систем автоматизированного станочного оборудования : монография / Е. Г. Крылов, Ю. П. Сердобинцев. – Старый Оскол : Тонкие наукоемкие технологии (ТНТ), 2016. – 316 с.
2. Капитанов, А. В., Митрофанов, В. Г. Анализ закономерностей развития переналаживаемых производственных систем многономенклатурного производства // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2016. № 5 (184). С. 61–66.
3. Волчков, И. Л. Основы расчета необходимого количества оборудования с учетом факторов производственной неопределенности // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2014. № 2. С. 13–23.
4. Васильев, Ф. П. Методы оптимизации / Ф. П. Васильев. – М. : Факториал пресс, 2002. – 824 с.
5. Митрофанов, В. Г., Капитанов, А. В., Омельченко, И. С. Структурный анализ автоматизированных технологических систем // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2015. № 4. С. 130–135.
6. Моделирование и оценка эффективности системы инструментального обеспечения многоцелевых станков / Е. Г. Крылов [и др.] // Вестник машиностроения. 2017. № 5. С. 66–71.
7. Крылов, Е. Г., Макаров, А. М., Козловцева, Н. В., Капитанов, А. В. Выявление критических состояний технологической системы с использованием таблиц решений // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2017. № 5(200). С. 68–70.

## ПОСТРОЕНИЕ СЕТЕЙ И ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.491.22

*M. E. Burlakov*

### RESEARCH THE DYNAMIC OF THREAT PUBLICATIONS IN PUBLIC AND PRIVATE SOURCES

**Samara University**

burlakov@ssau.ru

The paper is aimed at researching the dynamic of objects publications in question of threats activity. Analysis of the author activities is lied in public and private sources like the Internet or the shadow global networks like TOR, VPN, Socks, Proxy and Mesh. Besides, there is overview the dynamic of vulnerability publications in mobile operating systems and mobile messengers. In paper there are analysis the 10 most popular software are used for Windows operation system for desktop platforms and the most popular messengers in Android and iOS operating systems on mobile platforms.

*Keywords:* information threats; vulnerabilities publication; open data sources; private data.

*М. Е. Бурлаков*

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПУБЛИКАЦИЙ УЯЗВИМОСТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОТКРЫТЫХ И ЗАКРЫТЫХ ИСТОЧНИКОВ ДАННЫХ

**Самарский национальный исследовательский университет**

В статье исследуется динамика активности публикации угроз в открытых и закрытых источниках данных. Рассматривается динамика публикации угроз в операционных системах и программах мобильных приложений с выделением наиболее активных источников данных.

*Ключевые слова:* информационные угрозы, публикация уязвимостей, открытые источники данных, закрытые источники данных.

Today, there are many problems associated with the detection of threats and vulnerabilities in information technologies and software systems. Users faced with the threats either on desktop platforms (like Windows [1], Solaris or Linux operation systems) or mobile platforms (Android or iOS operation systems). More over the level of security risks is growing when the users use the extended software. According to the Hewlett Packard company report [2], there are more than 500 different classes of vulnerabilities in Windows software.

The most common vulnerabilities are shown by TeamSHATTER command [3]. Such as:

1. the presence of specialized username and password (by default, easily bruteforced);
2. SQL injection in various implementations interaction databases;
3. incorrectly issued executive rights for user, errors in setting group privileges;

4. weak desired functionality for administration configuration of databases;
5. incorrect settings for all type of configurations;
6. the buffer overflow (stack);
7. privilege escalations;
8. denial of service attack (DDoS);
9. the lack of a timely update database security component;
10. non secure data storage, etc.

Usually the distribution of intruder's attention is proportional the software propagation. This paper is devoted to analyze both the dynamic of threats publication most used operation systems (on desktop platform - Windows, on mobile platform - Android and iOS) plus it's extension software and the authors which create it's activities.

There are many sources when the hackers or security specialists can find the information about any threat of any software. But, all this sources can-

by generally categorized by two types: public and private. "Private source" means that access to information is limited by various kinds of software and hardware solutions. Such as:

- Authentication process limitation:
  - basic authentication;
  - authentication confirmation (email, phone, etc.);
  - two-factor authentication with reference to the phone;
  - other authentication variation, etc.
- Limitation by technologies :
  - virtual private networks;
  - Proxy and Socks servers;
  - Mesh networks;
  - TOR networks (more can be found in [4]);
  - access through a communication channel with the use of special certificates;
  - other technological limitations.
- Other solutions, limiting access to information about threats and vulnerabilities.

"Public sources" means that the source is not private.

In public and private sources both hackers and developers are exchange information through the messages and reports. They become the authors of these messages and reports about discovered threats and vulnerabilities. These reports and messages are the signals or indicators for computer security specialists of existing for definite software some problems. This paper attempts to research the authors of the threats with making some conclusions.

#### Data analyzing the Windows OS platform with the most popular software

The 10 most popular software which running on Windows operation system are selected for the researches (Table 1). The selection is m

Table 1

TOP-10 the most popular software in Windows OS

№	Software	№	Software
1	uTorrent	6	Whatsapp
2	SHAREit	7	Google Chrome
3	VLC media player	8	Adobe Reader
4	UC Browser	9	Adobe Flash Player
5	Mozilla Firefox	10	Internet Downloader Manager

The complex SCAN Project v.1.9.5 (hereinafter SCAN) was used as a tool for research. This complex was developed thanks to R&D project by "Academy Infotecs". It has the number of functions. Such as:

1. the automated collection of information about threats and vulnerabilities in software systems;
2. the allocation of information about the time of threats and vulnerabilities assigned;
3. the release of information about the authors, announced of threats and vulnerabilities.

The analyzed software is shown in Table 1 and the basic OS was selected Windows OS with versions (Windows XP, Windows 7, Windows 8 and Windows 10). The data analysis was conducted for receiving information with the time interval from 1991 to present.

The numbers of analyzed private and public sources are shown in Table 2.

Table 2

Public and private sources

Name of source	Link	Type
Security Lab	<a href="http://www.securitylab.ru/">http://www.securitylab.ru/</a>	public
Exploit-DB	<a href="https://www.exploit-db.com/">https://www.exploit-db.com/</a>	public
CVE Detail	<a href="http://www.cvedetails.com/">http://www.cvedetails.com/</a>	public
Malwarebytes.org	<a href="https://ru.malwarebytes.com/trial/">https://ru.malwarebytes.com/trial/</a>	private
Htbridge.com	<a href="https://htbridge.com">https:// htbridge.com</a>	private
web.nvd.nist.gov	<a href="https://nvd.nist.gov/">https://nvd.nist.gov/</a>	private
0 day	Onion TOR	private
Seclists.org	<a href="http://seclists.org/">http://seclists.org/</a>	private
Stackoverflow	<a href="https://stackoverflow.com">Stackoverflow.com</a>	public

The total numbers of threats are equal to 269419. The total number of vulnerabilities with the authorship is 124049.

The total number of authors who have declared about the vulnerabilities is 24975 (averaging out at 5 threats for each author). The numbers of authors have declared at least one threat - 18704. Thus, there are near 75% of all threats are declared by different authors (the difference in terms of logins under the author reserved the information). So, the personalization is very high in finding the vulnerabilities. From these calculations it follows that the 6271 author stated threats 105345, an average of 16.7 each. Thus 33.5% of authors responsible for the 84.9% declared threats that logically corresponds the Pareto principle. There is system work which means that when the author find the one vulnerability there is high probability to find several vulnerabilities.

In Table 3 there are the top 10 most active authors which declared about submitted software vulnerabilities.

Table 3

## TOP-10 authors declared the submitted software vulnerabilities

№	Author	Numbers of vul.	Author information	Country
1	CONFIRM	16295	The numbers of developers which founded themselves vulnerable and declared about them.	-
2	BID	10001	Non-commercial community of information security specialists named <i>SecurityFocus</i> , engaged in the search for vulnerabilities and threats to further declaring to developers. Site: <a href="http://www.securityfocus.com">http://www.securityfocus.com</a> .	USA
3	XF	9227	The specialists of IBM X-Force Research team from IBM company which provide services in information security. Site: <a href="http://www-03.ibm.com/security/xforce/">http://www-03.ibm.com/security/xforce/</a>	USA
4	MISC	7864	Private community of experts in information security called <i>LEGAL HACKERS</i> which deal with issues of information security, "ethical" hacking and penetration testing of information systems. Site: <a href="http://legalthackers.com/">http://legalthackers.com/</a>	-
5	BUGTRAQ	5680	The mailing list of vulnerabilities called <i>Bugtraq Mailing List</i> . It's free information source. It's aggregate the information from other sources. Site: <a href="http://seclists.org/bugtraq/">http://seclists.org/bugtraq/</a>	USA
6	VUPEN	3445	The commercial structure, which is a leading provider of defensive and offensive technologies for exploration in cyber security. Site: <a href="http://vupen.com">http://vupen.com</a>	USA
7	SECTRAK	2848	The commercial structure called <i>SecurityTracker</i> , which develops and provides the information security software (Vulnerability Notification Service). Site: <a href="http://securitytracker.com/">http://securitytracker.com/</a>	USA
8	MLIST	1980	The public community of developers and information security specialists called <i>Openwall</i> . Site: <a href="http://www.openwall.com/">http://www.openwall.com/</a>	-
9	MILWORM	1826	The public community of information security researches (hackers). The aggregator of other sources. Site: <a href="http://www.milw0rm.com/">http://www.milw0rm.com/</a>	-
10	MS	1567	The center of security by Microsoft company called TechCenter. Separate unit created to investigate and detect threats associated with the Windows OS. Site: <a href="https://technet.microsoft.com">https://technet.microsoft.com</a>	USA

Thus, the 6 from 10 authors (companies) have private structure with the location from USA. The

Fig. 1 shows the distribution the number of threats detected among the top 50 authors.

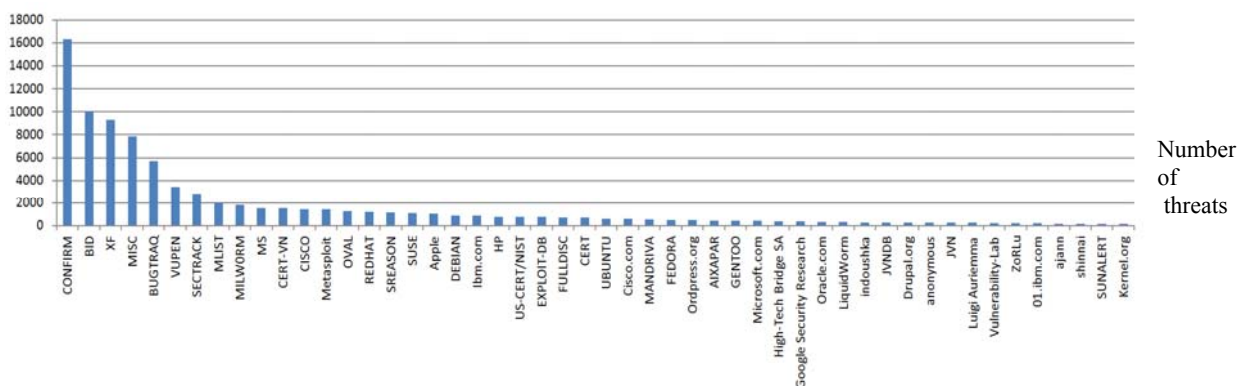


Fig. 1. TOP-50 authors threats destibution

The Table 4 shows the top 10 most active authors in the last 5 years.



Table 4

TOP-10 the most active authors with the count of declared threats

2012	2013	2014	2015	2016
CONFIRM(1493)	CONFIRM(1611)	CONFIRM(2082)	CONFIRM(2587)	CONFIRM(3210)
MISC(782)	MISC(429)	MISC(1665)	MISC(808)	MISC(390)
XF(531)	CISCO(330)	CERT-VN(765)	MS(425)	MS(365)
BID(490)	XF(300)	Ibm.com(598)	CISCO(400)	CISCO(268)
MLIST(340)	MLIST(213)	BID(594)	SECTRACK(262)	Google Security Research(213)
Metasploit(231)	SUSE(212)	XF(423)	APPLE(262)	MLIST(197)
Ordpress.org(175)	BID(206)	MLIST(328)	MLIST(259)	BID(159)
SECTRACK(174)	REDHAT(199)	SECTRACK(268)	Google Security Research(164)	APPLE(114)
OVAL(167)	Metasploit(193)	Cisco.com(223)	BID(158)	SUSE(105)
Drupal.org(134)	OVAL(193)	MS(207)	BUGTRAQ(140)	SECTRACK(101)

Based on these data, the 4 communities maintain a constant work in researching of vulnerabilities and threats: CONFIRM, MISC, BID and MLIST (fig. 2 and fig. 3).

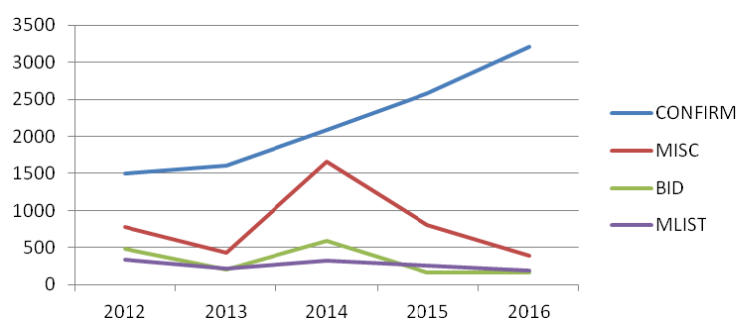


Fig. 2. The number of threats founded by CONFIRM, MISC, BID and MLIST

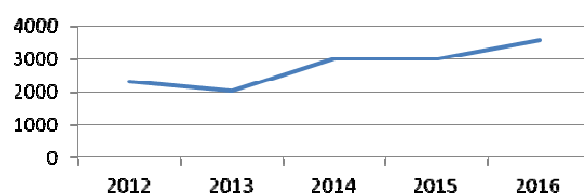


Fig. 3. The total count of threats founded by CONFIRM, MISC, BID and MLIST

#### Data analyzing the Android and iOS mobile platforms with the most popular software

Today the software market of mobile operations systems has oligopoly structure. The statistic

of distribution the mobile operation systems between 2 last quarters of 2015 and 2 first quarters of 2016 is shown in Table 5 [6].

Table 5

The distribution of mobile operation systems

Period	Android	iOS	Windows Phone	Others
2015Q3	84.3%	13.4%	1.8%	0.5%
2015Q4	79.6%	18.6%	1.2%	0.5%
2016Q1	83.4%	15.4%	0.8%	0.4%
2016Q2	87.6%	11.7%	0.4%	0.3%

The most popular mobile operation systems are Android and iOS. This OS are most popular for security specialists and hackers too. That's why the most information about threats are about this OS. More over for any mobile phone the ability of OS protection is a necessary, but insufficient condition for creating really secure mobile infrastructure. It is necessary to consider the software run under the mobile OS for having complete information about

mobile security. Often, the presence of threats and vulnerabilities allows hackers to obtain rights and privileges within the whole OS [7].

One of the most popular categories of software are communication tools (messengers (4ig. 4)) [8]. Such as: Whatsapp, Facebook Messenger, QQ Mobile, WeChat, Skype, Viber, LINE, BlackBerry Messenger (BBM), Telegram, Kakaotalk etc.

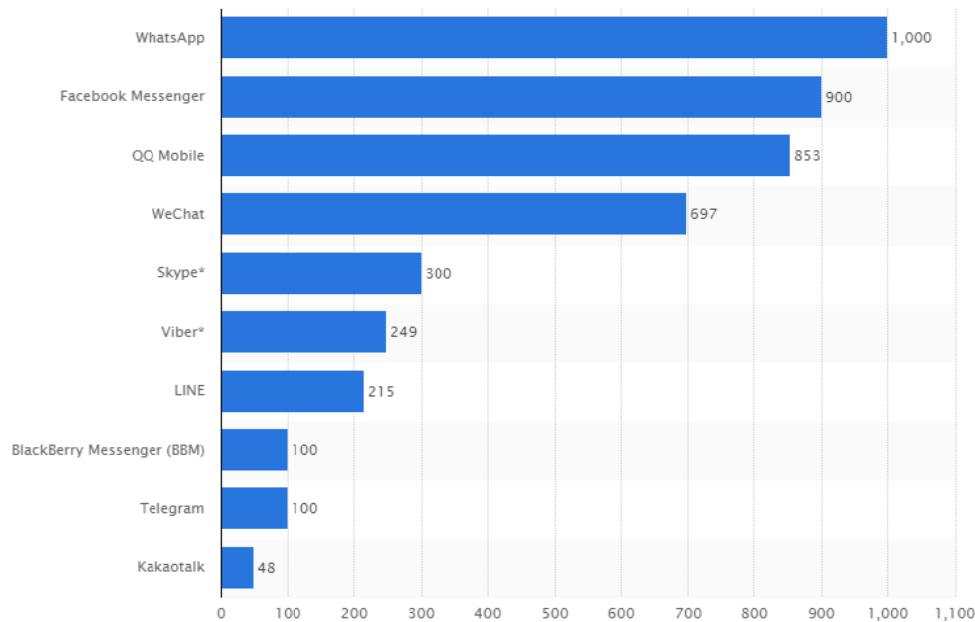


Fig. 4. The total count of users in messengers

The public and private sources are taken from Table 2. The 5 years period interval is taken for analysis the threats. The total number of reported

vulnerabilities for the Android OS is 2956. The fig. 5 shows its distribution.

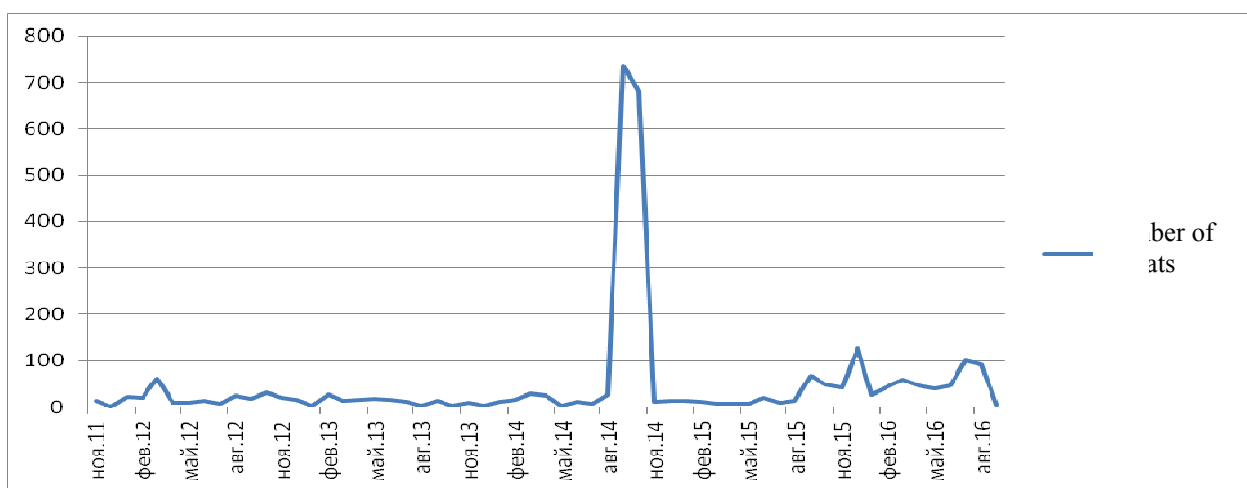


Fig. 5. The dynamics of distributions of declared threats for Android for the last 5 years

It is easy to check that there are that two peaks of vulnerability detection are clearly allocated in September and October 2014. During this period,

Android 4.1 / 4.2 / 4.3 "Jelly Bean" versions were on smartphones. There were multiple vulnerabilities in protocol working and data parsing. For ex-

ample, there was a gross error with the OpenSSL protocol in 4.3.4 version. After the October 2014 the number of threats is decreased and no longer

takes such critical values. The average number of threats is 43 before the peak and 65 after the peak.

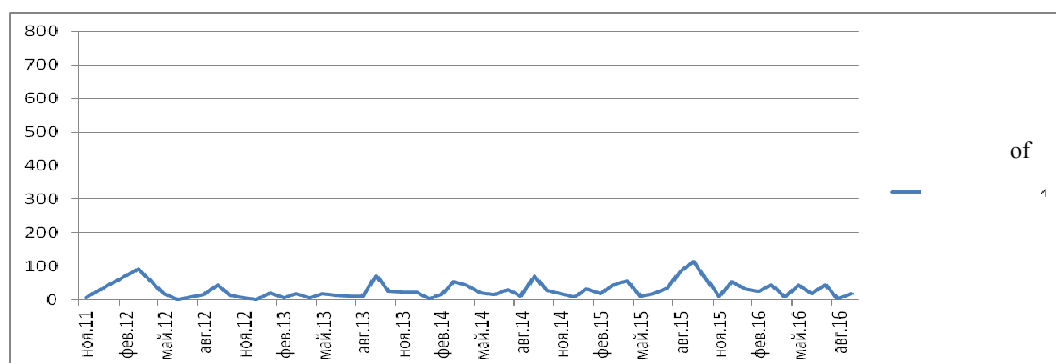


Fig. 6. The dynamics of distributions of declared threats for iOS for the last 5 years

The another situation in iOS security. The total number of reported vulnerabilities is 2198. This is 26% less than the Android. The fig. 6 shows the distribution of iOS threats and vulnerabilities.

The average number of threats is 76. The average number of threats and vulnerabilities is higher by 29% than the Android. There are 5 peaks (fig. 6). Such as: March 2012 (iOS v 5.x), September 2013 (iOS v 5.x), September 2014 (iOS v 6.x), August 2015 (iOS v 8.x) and September 2015 (iOS v 8.x). The fig. 6 looks periodicity, i.e. both maxima and minima appear at approximately equal intervals. This

is a clear distinctive feature of analyzing the threats and vulnerabilities of the iOS over the Android.

On the one hand, this may be due to the fact that the number of updates released by Google (Android developer) is greater than that of Apple (iOS developer) and the speed of their application is more rapid and adaptive [9,10].

The most popular messenger solutions in Russia taken for analysis. Such as: Whatsapp, Viber, Telegram and Skype [11]. In table 6 the threats and vulnerabilities announced over the past 5 years are shown.

Table 6

The distribution of threats in mobile messengers

№	Messenger	The count of threats	Publication date
1	Whatsapp	5	12.2011, 01.2012, 04.2014, 12.2014, 05.2015
2	Viber	2	08.2015, 07.2016
3	Telegram	5	06.2016
4	Skype	17	09-12.2015, 04.2016, 08.2016

The most vulnerable software for messaging is Skype, whereas the most secure is Viber. This conclusion is strange because the Skype began to be developed long before the appearance of other messengers.

### Conclusion

There are definite conclusions based on getting data. Such as:

1. The number of threats is increased from year to year. It indicates the systemic problems in software development and shows the growth of qualification of hackers.

2. The 6 of 10 communities which found the maximum number of threats in 2016 are the private companies from USA.

3. The number of developers which are not involved in analysis of vulnerability at the community is large, but it does not have a decisive impact on the number of detected threats.

4. The impact of public community is large and the number of declared threats is growing.

5. The corporate sector (Microsoft, IBM, etc.) develop the security information and auditing of computer networks and software systems branch actively.

6. The number of detected threats for Android is greater than for iOS. The speed of bug fixing of Android is higher. The most vulnerable messenger is Skype and the most secure messenger is Viber.

## REFERENCES

1. W3Schools. OS Platform Statistics [Electronic resource]. – Access mode: [http://www.w3schools.com/browsers/browsers\\_os.asp](http://www.w3schools.com/browsers/browsers_os.asp) (30.01.2017)
2. HP. The collateral damage of cybercrime [Electronic resource]. – Access mode: <http://www8.hp.com/us/en/software-solutions/cyber-risk-report-security-vulnerability/> (30.01.2017)
3. Trinidad Mark. Top 10 Database Vulnerabilities and Vulnerabilities and Misconfigurations [Electronic resource]. – Access mode: [http://www.sifma.org/uploadedfiles/societies/sifma\\_internal\\_auditors\\_society/top10-database-vulnerabilities-and-misconfigurations.pdf](http://www.sifma.org/uploadedfiles/societies/sifma_internal_auditors_society/top10-database-vulnerabilities-and-misconfigurations.pdf) (30.01.2017)
4. Applebaum, J. A Model of Outbound Client Traffic on The Tor Anonymity Network / J. Applebaum // Wesleyan University. – 2013. – P. 54–58.
5. Softonic. Top downloads [Electronic resource]. – Access mode: <http://en.softonic.com/windows/top-downloads> (30.01.2017)
6. Smartphone OS Market Share, 2016 Q2 [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.idc.com/prodserv/smartphone-os-market-share.jsp> (01.03.2017).
7. New Android Vulnerabilities in Over 900 Million Devices [Electronic resource]. – Access mode: <http://blog.checkpoint.com/2016/08/07/quadrooter/> (02.03.2017).
8. Most popular mobile messaging apps worldwide as of April 2016, based on number of monthly active users (in millions) [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.statista.com/statistics/258749/most-popular-global-mobile-messenger-apps/> (02.03.2017).
9. Burlakov, M. E., Osipov, M. N. Research the behavior of elements in artificial immune system for intrusion detection systems in information networks. / M. E. Burlakov, M. N. Osipov. – Samara: ITNT, 2016. – 901 p.
10. Сорокин А. А., Ахмат Юссуф. Модель для поддержки принятия решений в процессе проектирования структурных элементов инфокоммуникационных систем // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2016. № 11(190). С. 141–145.
11. To messengers [Electronic resource]. – Access mode: [http://gdetraffic.com/Analitika/Issledovanie\\_App\\_Annie\\_samye](http://gdetraffic.com/Analitika/Issledovanie_App_Annie_samye) (04.03.2017).

УДК 621.371.3:628.518

*Н. Б. Догадин*

**ПРИМЕНЕНИЕ УСТРОЙСТВ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ  
ДЛЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ГРАНИЦЫ  
САНИТАРНО-ЗАЩИТНОЙ ЗОНЫ БАЗОВОЙ СТАНЦИИ СЕТИ WI-FI**

**Муниципальное учреждение «Центр по работе с подростками  
и молодежью "Ровесник"» Краснооктябрьского района Волгограда**  
dogadin@vspu.ru

Рассмотрены особенности использования устройств мобильной связи для инструментального контроля границы санитарно-защитной зоны базовой станции сети Wi-Fi. Показаны возможности их применения для прямых и косвенных измерений плотности потока энергии, а также контроля изменения электромагнитного поля, создаваемого антенной базовой станции. Приведенные сведения полезны при эксплуатации сетей Wi-Fi и позволяют предотвратить неблагоприятное влияние на здоровье человека электромагнитных полей, создаваемых базовыми станциями этих сетей.

*Ключевые слова:* инструментальный контроль, сети Wi-Fi, базовая станция, электромагнитное поле, плотность потока энергии, прямые измерения, косвенные измерения, санитарно-защитная зона.

*N. B. Dogadin*

**THE APPLICATION OF THE DEVICES OF MOBILE COMMUNICATION FOR  
THE INSTRUMENTAL CONTROL OF THE HYGIENIC PROTECTIVE  
ZONE FRONTIERS OF BASE STATIONS OF THE WI-FI NETWORK**

**Municipal institution "Center for the teenagers and young people  
"Rovesnik" of Krasnooktyabsky district, Volgograd**

The peculiarities of the use of mobile communication devices for the instrumental control of the hygienic protective zone frontiers of base station of the Wi-Fi network are considered. The possibilities of their application for the direct and indirect methods of measurement of the flux density of electromagnetic energy, and also for the measurement of the electromagnetic field build up with the antenna of the base-station are shown. The provided data are useful for the operation of the Wi-Fi networks and allow to prevent the adverse influence of the electromagnetic field build up with the Base Stations of these Wi-Fi networks on human health.

*Keywords:* instrumental control, Wi-Fi networks, Base Station, electromagnetic field, flux density of electromagnetic energy, direct methods of measurement, indirect methods of measurement, hygienic protective zone.

Базовая станция (БС) сети Wi-Fi и ее приемопередающая антенна служат источником электромагнитных излучений, которые могут оказать неблагоприятное воздействие на организм человека. Для предотвращения этого вокруг излучающего оборудования необходимо установить санитарно-защитную зону (СЗЗ), выделяющую пространство, за границей которого воздействия физических факторов на человека не превышают предельно допустимые уровни (ПДУ).

Выделение СЗЗ особенно важно при организации сети Wi-Fi в закрытых помещениях, где приемопередающая антенна и человек могут располагаться в непосредственной близости друг к другу. В таких помещениях распространение радиоволн, как правило, многолучевое, характеризуемое их многократным переотражением от различных поверхностей: стен, пола, крупной мебели и т. п., что затрудняет аналитический учет всех особенностей этого распространения, поэтому для него возможен лишь прогнозирующий расчет расстояния от излучающей антенны до границы СЗЗ.

Для определения ее реального расположения необходим инструментальный контроль уровня плотности потока энергии (ППЭ). К сожалению, рекомендуемые для этого средства измерения имеют значительную стоимость, поэтому их используют редко, особенно в условиях лишь эпизодической организации сетей Wi-Fi, что приводит к неточности указания границы СЗЗ, а значит, снижает уровень безопасности людей, неосознанно располагающихся внутри СЗЗ.

Широкое распространение сетей Wi-Fi привело к тому, что необходимым для них оборудованием радиодоступа беспроводной передачи данных оснащают устройства мобильной (например, сотовой) связи. Эти устройства, как правило, компактны, их применение в сетях Wi-Fi повлекло разработку и использование программных средств, предназначенных для определения параметров сети, в том числе, позволяющих оценить мощность радиосигнала в месте расположения устройства, на котором

установлены такие программы. Все это приводит к целесообразности рассмотрения возможности применения устройств мобильной связи для оперативного инструментального контроля ППЭ, создаваемой антенной БС сети Wi-Fi, позволяющего оценить расположение границы СЗЗ и стабильность излучения БС.

В настоящее время известно несколько таких программ, различающихся между собой набором функциональных возможностей, дизайнерскими, эргономическими и сервисными особенностями, однако они лишь отображают текущие режимы аппаратуры, поэтому только она определяет потенциальные возможности программ. Это позволяет рассматривать не конкретные реализации программ, а обобщенно их предельные возможности как индикаторов измерительного устройства.

Основным параметром, определяющим возможность применения устройства для измерения ППЭ, служит максимальный уровень входного сигнала его приемника, технические требования к которому, обязательные для использования в таких устройствах различных стандартов, приведены в [1]. Мобильные аппаратные средства оснащены, как правило, внутренними антеннами, поэтому значения уровней, установленные в [1], учитывают и параметры антенно-фидерного устройства, входящего в состав такого оборудования. Часто этот показатель (как и показатели, воспроизводимые программными средствами) указывают в логарифмических единицах, поэтому в приведенных ниже формулах индексы таких величин приведены составными, вторая часть которых показывает общепринятое базовое значение этой величины.

На анализ возможности измерения мобильным устройством ППЭ на границе СЗЗ условия распространения радиоволн не влияют, поэтому рассмотрим расположение приемопередающей антенны БС и границы СЗЗ на расстоянии прямой видимости, что упрощает приведенные формулы. Значение мощности принимаемого радиосигнала ( $P_{\text{пр,дБм}}$ ) может быть определено по формуле, приведенной в [2], которая в данном случае примет вид

$$P_{\text{пр,дБм}} = P_{\text{пер,дБм}} + G_{\text{пер,дБи}} + F_{\text{пер,дБ}}(\alpha) + F_{\text{пер,дБ}}(\varphi) + \eta_{\text{пер,дБ}} + k_{\text{ф,дБ}} + \lambda_{\text{дБ}} - 20 \lg(4\pi) - R_{\text{дБ}}, \quad (1)$$

где  $P_{\text{пер,дБм}}$  – выходная мощность радиопередатчика БС (для нее, как и мощности принимаемого радиосигнала, базовое значение составляет 1 мВт);  $G_{\text{пер,дБи}}$  – коэффициент усиления

по мощности передающей антенны относительно изотропного излучателя (для которого  $G = 1$ );  $F_{\text{пер,дБ}}(\alpha)$  и  $F_{\text{пер,дБ}}(\varphi)$  – нормированные относительно максимальных значения диа-

граммы направленности антенны по мощности для углов, образованных ее главным лепестком и направлениями на точку наблюдения соответственно в вертикальной и горизонтальной плоскостях (их максимальные значения  $F_{\text{ПЕРМАХ}}(\alpha) = F_{\text{ПЕРМАХ}}(\varphi) = 1$ );  $\eta_{\text{ПЕР,дБ}}$  – коэффициент, учитывающий потери антенно-фидерного тракта радиопередатчика (для идеального тракта  $\eta_{\text{ПЕР}} = 1$ );  $k_{\text{Ф,дБ}}$  – коэффициент, характеризующий условия распространения радиосигнала (для идеальных условий  $k_{\text{Ф}} = 1$ , и в логарифмических единицах  $k_{\text{Ф,дБ}} = 20 \lg k_{\text{Ф}}$ ). Базовое значение длины излученной радиоволны  $\lambda_{\text{дБ}}$

и расстояния от центра антенны до места определения мощности принятого радиосигнала  $R_{\text{дБ}}$  должно быть одинаковым: его значение примем равным дольной единице длины  $l = 1$  см, тогда  $\lambda_{\text{дБ}} = 20 \lg (\lambda/l)$ , а  $R_{\text{дБ}} = 20 \lg (R/l)$ .

Согласно нормативным документам (например, [3]) значение ППЭ на границе СЗЗ не должно превышать предельно допустимый уровень  $П_{\text{ПДУ}} = 10,0$  мкВт/см<sup>2</sup>. В этом случае, как показано в [4], расстояние от центра приемопередающей антенны до границы СЗЗ ( $R_{\text{СЗЗ,дБ}}$ ) можно рассчитать по формуле

$$R_{\text{СЗЗ,дБ}} (\text{исх. } 1 \text{ см}) = P_{\text{ПЕР,дБм}} + G_{\text{ПЕР,дБ}} + F_{\text{ПЕР,дБ}}(\alpha) + F_{\text{ПЕР,дБ}}(\varphi) + \eta_{\text{ПЕР,дБ}} + k_{\text{Ф,дБ}} + 9 \text{ дБ}. \quad (2)$$

Для исключения неоднозначности здесь и далее положительные значения логарифмических величин обозначены без знака, а отрицательные – словом «минус». Из сопоставления (1) и (2) следует, что на границе СЗЗ значение мощности принятого мобильным устройством радиосигнала  $P_{\text{ПР СЗЗ,дБм}} = \lambda_{\text{дБ}} - 20 \lg (4\pi) - 9$  дБ. В настоящее время для организации сетей Wi-Fi используют диапазон 2,4 ГГц (полоса радиочастот 2400...2483,5 МГц), для которого это значение можно принять  $P_{\text{ПР СЗЗ,дБм}} = \text{минус } 9$  дБ, и диапазон 5 ГГц (полосы радиочастот 5150...5350 МГц и 5650...5850 МГц), в котором среднее значение близко к  $P_{\text{ПР СЗЗ,дБм}} = \text{минус } 16$  дБ.

Как уже указывалось, требования к параметрам оборудования, применяемого при организации сети Wi-Fi различных стандартов, приведены в [1]. Установленные там максимальные уровни входного сигнала для оборудования диапазона 2,4 ГГц составляют: для стандартов IEEE 802.11, IEEE 802.11.g и IEEE 802.11.n – не менее минус 20 дБм, а для IEEE 802.11.b – не менее минус 4 дБм (при скорости передачи 2 Мбит/с) и минус 10 дБм (при скорости передачи 11 Мбит/с). Для аппаратуры стандартов IEEE 802.11.a, IEEE 802.11.n и IEEE 802.11.ac, использующей диапазон 5 ГГц, максимальный уровень входного сигнала установлен не менее минус 30 дБм. Этими значениями ограничены уровни воспринимаемого мобильной аппаратурой входного сигнала, и программные средства, предназначенные для использования с ней, должны иметь предельные значения шкал измерения, соответствующие установленным параметрам аппаратуры.

Сопоставление значений максимальных уровней входного сигнала аппаратуры и мощности радиосигнала, которую должно воспри-

нять мобильное устройство на границе СЗЗ, показывает, что проведение прямых измерений этой мощности возможно только с помощью устройств, соответствующих стандарту IEEE 802.11.b для скорости передачи 2 Мбит/с. Использование для этого устройств, соответствующих другим стандартам, требует дополнительного ослабления принимаемого ими сигнала. Одной из возможностей такого ослабления служит размещение мобильного устройства в радиозащищенном футляре, изготовленном с использованием выпускаемых отечественной промышленностью специализированных материалов, в том числе, применение экранирующих чехлов для мобильных телефонов. Технические параметры, приведенные, например, в [5, 6] показывают, что такие изделия вносят затухание, составляющее минус 15 дБ и более, что обеспечивает проведение необходимых измерений.

Без дополнительного ослабления сигнала, рассматриваемые устройства мобильной связи могут быть использованы для определения расстояния от центра антенны до границы СЗЗ только косвенным методом измерений, при котором это расстояние определяют с использованием результатов прямых измерений уровней входного сигнала, не превышающих максимально допустимых для аппаратуры, и расстояния от нее до центра антенны. Такая возможность существует, если условия распространения радиоволны на всем протяжении пути до места измерения можно принять неизменными, например, при беспрепятственном распространении радиоволны или размещении антенны над подстилающей поверхностью на высоте, обеспечивающей границу СЗЗ на расстоянии 2 м от этой поверхности [3]. В этом случае, как правило, антенна расположена значительно

выше установленного на поверхности оборудования, что существенно уменьшает влияние отражения от него на распределение излучения между антенной и местом измерения.

Сопоставление (1) и (2) показывает, что при таких условиях измерение мощности радиосигнала ( $P_{\text{пр изм, дБм}}$ ), принимаемого мобильным устройством на расстоянии  $R_{\text{изм, дБ}}$  от центра приемопередающей антенны, позволяет рассчитать расстояние от этого центра до границы СЗЗ

$$R_{\text{СЗЗ, дБ}} = R_{\text{изм, дБ}} + P_{\text{пр изм, дБм}} - P_{\text{пр СЗЗ, дБм}} \quad (3)$$

Напомним, что для перевода расстояния из логарифмических единиц в абсолютные следует воспользоваться формулой:  $R_{\text{СЗЗ}} = 10^{R_{\text{СЗЗ, дБ}}/20}$ . Если на индикаторе мобильного устройства значение измеренной мощности сигнала приведено в абсолютной величине, то удобнее пользоваться формулой

$$R_{\text{СЗЗ}} = k_{\text{д}} R_{\text{изм}} (P_{\text{пр изм}})^{1/2}, \quad (4)$$

где  $R_{\text{СЗЗ}}$  и  $R_{\text{изм}}$  измерены в абсолютных величинах длины;  $k_{\text{д}}$  – коэффициент пропорциональности, определяемый диапазоном использованных частот: для диапазона 2,4 ГГц  $k_{\text{д}} = 2,82$ , а для диапазона 5 ГГц  $k_{\text{д}} = 6,31$ ;  $P_{\text{пр изм}}$  – величина мощности сигнала, измеренная на расстоянии  $R_{\text{изм}}$  от центра приемопередающей антенны, значение которой в (4) должно быть приведено в дольной единице – милливатт. Если на индикаторе мобильного устройства мощность принятого сигнала приведена в логарифмических единицах, то для перевода их в абсолютные следует использовать формулу:

$$P_{\text{пр изм}} = 10^{P_{\text{пр изм, дБм}}/10}$$

Например, пусть на расстоянии 260 см (48,3 дБ) от центра антенны измерение, выполненное для диапазона частот 2,4 ГГц, показало уровень принятого сигнала – минус 26 дБм. тогда, пересчитывая это значение в единицы измерения мощности, получаем  $P_{\text{пр изм}} = 2,51$  мВт, и расчет по (3) или (4) показывает, что расстояние от центра антенны до границы СЗЗ  $R_{\text{СЗЗ}} = 36,7$  см (31,3 дБ).

Еще одним способом применения мобильного устройства служит контроль изменения электромагнитной обстановки в пространстве вокруг антенны, вызванного, например, изменением рабочих режимов БС или ее управления, при которых возможно увеличение мощности излучения антенны. Для такого контроля необходимо после установления границы СЗЗ

периодически измерять уровень излучения в одном и том же месте пространства. При этом следует выбрать место контроля от центра антенны на расстоянии, при котором показания индикатора мобильного устройства меньше максимально допустимого уровня входного сигнала его приемника (напомним, что для диапазона 2,4 ГГц – это минус 20 дБ, а для диапазона 5 ГГц – минус 30 дБ).

Недостатком типового мобильного устройства с установленной в нем программой, позволяющей воспроизводить значение уровня сигнала, принимаемого в данном месте пространства, служит отсутствие у него нормированных метрологических характеристик. Это не позволяет с точностью, определенной нормативными документами, установить результат измерения и его погрешность, а значит, рассматривать такое устройство как средство измерений. Использование мобильного устройства для ориентировочной оценки уровня принимаемого сигнала возможно только при определении его систематической погрешности и величины необходимой поправки для воспроизводимых показаний (т. е. выполнении калибровки устройства).

Для выявления неизменных систематических погрешностей конкретного устройства и введения соответствующих поправок в оценку наблюдаемого значения величины наиболее предпочтительно сопоставление показаний мобильного устройства со специализированным средством измерения, прошедшим поверку. При отсутствии такой возможности для уменьшения постоянной систематической погрешности целесообразно применить метод рандомизации, при котором измерение одной и той же величины производят несколькими однотипными устройствами, считая, что в этом случае их систематические погрешности в отношении друг к другу становятся случайными. Применяя затем обработку результатов показаний устройств рекомендованными статистическими методами [7], можно рассчитать общее среднее значение (математическое ожидание) всей совокупности результатов и принять его за действительное значение исследуемой величины. Разность между ним и средним значением показаний каждого из устройств в дальнейшем можно рассматривать как систематическую погрешность, вносимую таким устройством.

Таким образом, проведение прямых измерений мощности радиосигнала на границе СЗЗ возможно только устройствами, соответствующими

щими стандарту IEEE 802.11.b для скорости передачи 2 Мбит/с. Ограниченные значения максимального уровня входного сигнала мобильных устройств, соответствующих другим стандартам Wi-Fi, не позволяет непосредственно применить их для измерения ППЭ на границе СЗЗ, и такое измерение возможно лишь при использовании радиоэкранирующих средств.

При неизменности условий распространения радиоволны на всем протяжении пути до места измерения, в котором уровень сигнала не превышает максимально допустимый, расстояние от центра приемопередающей антенны до границы СЗЗ можно оценить косвенно. Для этого в таком месте достаточно измерить уровень сигнала и расстояние от антенны до него и по ним, используя (3) или (4), рассчитать значение расстояния от центра антенны до границы СЗЗ.

Для проведения измерений мобильным устройством следует оценить вносимую им систематическую погрешность, сопоставляя показания устройства со специализированным средством измерения, прошедшим поверку, или применяя статистические методы обработки результатов измерений.

Мобильное устройство целесообразно использовать и для периодического контроля изменения электромагнитной обстановки в пространстве вокруг антенны БС сети Wi-Fi, что создает возможность выявления и своевременного предотвращения расширения СЗЗ, вызванного изменением рабочих режимов БС. Такое применение устройств мобильной связи позволяет снизить неблагоприятное воздействие из-

лучения антенной БС на здоровье человека и полезно при эксплуатации сетей Wi-Fi.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Приказ Минкомсвязи России от 14.09.2010 N 124 (ред. от 22.04.2015) «Об утверждении Правил применения оборудования радиодоступа. Часть I. Правила применения оборудования радиодоступа для беспроводной передачи данных в диапазоне от 30 МГц до 66 ГГц» [Электронный ресурс]. URL : [http://www.consultant.ru/cons/rtfcache/LAW179832\\_0\\_20170405\\_141531\\_54515.rtf](http://www.consultant.ru/cons/rtfcache/LAW179832_0_20170405_141531_54515.rtf) (дата обращения: 07.05.2017).
2. *Догадин, Н.Б.* Особенности выбора технических параметров оборудования сети WiFi и расчета зоны обслуживания в закрытых помещениях образовательных организаций // Информатизация образования и науки. – 2016. – № 3(31). – С. 76–92.
3. СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383-03 Гигиенические требования к размещению и эксплуатации передающих радиотехнических объектов (ред. от 19.12.2007 г.). [Электронный ресурс]. URL : <http://ivo.garant.ru/#/document/12131290/paragraph/1073742237:0> (дата обращения: 07.05.17).
4. *Догадин, Н.Б.* Особенности прогнозирующего расчета границы санитарно-защитной зоны при размещении базовых станций сетей Wi-Fi в закрытых помещениях // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2017. № 8(203). С. 103–107.
5. Ткани для защиты от электромагнитных излучений [Электронный ресурс]. URL : <http://www.teks-centre.ru/materialy-i-tehnologii/katalog/tkani-dlya-zashchity-ot-elektromagnitnykh-izlucheniya/> (дата обращения: 07.05.2017).
6. *Коваленко, В.Н. Владимиров, Д.Н., Хандогина, Е.Н.* Многофункциональные мобильные экранированные объемы [Электронный ресурс]. URL : <http://ckbrm.ru/index.php?page=20> (дата обращения: 07.05.2017).
7. ГОСТ Р 8.736-2011 Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения [Электронный ресурс]. URL : <http://www.elec.ru/files/2014/01/13/GOST-R-8736-2011-Gosudarstvennaya-sistema.pdf> (дата обращения: 07.05.2017).

УДК 658.51

*А. А. Сорокин, Н. И. Шапошникова*

#### МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ СЕТЕЙ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ

**Астраханский государственный технический университет**

[alsorokin.astu@mail.ru](mailto:alsorokin.astu@mail.ru), [nshaposhnikova.astu@mail.ru](mailto:nshaposhnikova.astu@mail.ru),

Предложена методика определения оценки технического состояния базовых станций сетей мобильной связи. Методика заключается в формировании базы данных параметров базовой станции и поэтапной обработке собранной информации для получения промежуточных оценок за контрольные периоды времени, и в завершении выполняется формирование интегрированной оценки базовой станции. Для обработки информации в процессе получения промежуточных и окончательных оценок используются искусственные нейронные сети.

*Ключевые слова:* базовая станция, сеть сотовой связи, оценка состояния, нейронная сеть, принятие решений, обработка информации.



*A. A. Sorokin, N. I. Shaposhnikova*

## **METHODOLOGY FOR ESTIMATING THE STATE OF BASE STATIONS OF MOBILE COMMUNICATION NETWORKS**

**Astrakhan State Technical University**

A technique for estimating the technical state of base stations of mobile communication networks is proposed. The method consists in forming a database of parameters of a base station and step-by-step processing of the collected information to obtain intermediate estimates for control periods of time, and in the end, an integrated estimation of the base station is formed. To process information in the process of obtaining intermediate and final estimates, artificial neural networks are used.

*Keywords:* base station, cellular network, state estimation, neural network, decision making, information processing.

В настоящее время завершился роста рынка сотовой связи за счет привлечения новых абонентов. Следствием этого стало изменение концепции развития операторов от «борьбы» за привлечение новых клиентов, в «борьбу» за сохранение абонентской базы. В результате одной из важных составляющих «борьбы» за сохранение абонентской базы является обеспечение качества предоставляемых оператором услуг при условии возрастания нагрузки на сетевую инфраструктуру [1]. Базовые станции (БС) являются одним из ключевых элементов в процессе оказания услуг абонентам. В результате сбора информации о базовой станции формируются рекомендации лицу, принимающему решения (ЛПР) о выполнении определенного набора действий по сохранению БС в заданном состоянии или выполнению операций по ее ремонту (или модернизации). Обработка информации и выработка рекомендаций производится программным обеспечением, которое сигнализирует о нештатных ситуациях и экспертной группой, которая по совокупности параметров, определяет состояние БС и рекомендует меры по профилактике аварийных ситуаций и модернизации определенного сегмента сети [2]. Учитывая, что количество БС на сети федерального оператора может превышать несколько тысяч использование экспертных групп ограничивается возможностью привлечения большого количества квалифицированных специалистов и согласованием экспертных оценок. Таким образом, необходима дальнейшая разработка методик по оценке состояния БС систем мобильной связи.

Цель работы: разработка методики оценивания базовых станций сетей оператора мобильной связи на основании анализа собираемой информации об их состоянии.

БС систем мобильной связи – это многокомпонентные объекты. В число компонентов входят оборудование для приема и обработки сигналов, антенно-фидерные тракты, системы

поддержания микроклимата, различные комплексы по охране и ограничения доступа к оборудованию. В процессе эксплуатации БС подвергаются различным видам воздействий: изменение трафиковой нагрузки, вызываемое особенностями спроса абонентов на различные виды телекоммуникационных услуг; изменение состояния оборудования по причине его износа; климатические воздействия из-за смены сезонов и возникновения природных аномалий; разрушения от вандалов, проникающих на объекты связи. Методики компенсации или предотвращения воздействий от вандалов или климата заключаются в принятии ряда организационных мер по усилению средств защиты от природных и других видов воздействий [2,3]. Тогда как для контроля работоспособности и поддержки в принятии решений по развитию БС как структурных элементов сетей связи в условиях изменения трафиковой нагрузки и износа оборудования остается ряд трудностей. Одной из причин трудностей являются сложности обработки информации о состоянии оборудования.

Практический опыт показал, что системы сбора и обработки информации о состоянии оборудования оператора представляют собой автоматизированные системы. В подобных системах отработаны методы получения, сбора и хранения информации, а также принятия решений касающихся идентификации относительно несложных аварийных ситуаций. Под несложными ситуациями, в рамках исследований, понимается информирование оператора о выходе из строя или перегрузке модулей оборудования, а также рекомендации или выполнение действий по запуску резервных элементов для дублирования необходимого модуля оборудования.

Формирование решений связанных с необходимостью модернизации БС или ее замене связано с обработкой потока разнородной информации, которая оказывает различный уровень влияния на итоговый результат. Одним из

методов обработки разнородной информации стало использование групп экспертов, которые формируют решение на основании собственного опыта. Задачи, касающиеся идентификации общего состояния оборудования, в частности БС, и формирование рекомендаций по его модернизации, преимущественно, производится на основании экспертного анализа. Анализ работ по обработке информации и разработке систем поддержки при принятии решений показывает, что методы, основанные на использовании экспертного анализа, имеют ряд ограничений, которые связаны [4]:

- со сложностями формирования групп, которые будут обладать необходимым уровнем компетентности в определенной области знаний;
- подверженность экспертов влиянию мнений "авторитетов";
- сложности формирования группы, которая будет сочетать глубокое знание в предметной области с отсутствием у экспертов опыта работы друг с другом и отсутствием конфликтов интересов между собой;
- сложности формирования решений, если эксперты одинакового уровня компетентности формируют противоречивые высказывания.

Для компенсации ограничений, связанных с формированием рекомендаций ЛПР разработаны методы обработки разнородной информации, основанные на использовании нечеткой логики (НЛ) или искусственных нейронных сетей (ИНС). Как показал анализ работ [5-7], применение НЛ оправданно во время обработки информации, представленной в качественной или

интегрированной формах. В случае, если объект описывается большим количеством переменных, имеющих количественную форму записи, то целесообразно использование ИНС [8,9].

Оценка состояния БС –  $m_{BS}$  является зависимостью от множества значений ее технических параметров –  $P_{BS}$ , что можно представить в виде:

$$F(P_{BS}) = m^{BS} : m^{BS} \subset M_{BS}, \quad (1)$$

где  $M_{BS}$  – множество оценок состояния БС. Элементы  $M_{BS}$  представляют собой действительные числа, с точностью до второго знака и условия, что  $m^{BS} \in (0,5]$ . При принятии решения предлагается использовать следующие значения интервальных оценок:

- $m^{BS} = m_1^{BS} \in (0, 2.5)$ ,
- $m^{BS} = m_2^{BS} \in [2.5, 3.5)$ ,
- $m^{BS} = m_3^{BS} \in [3.5, 4.5)$ ,
- $m^{BS} = m_4^{BS} \in [4.5, 5]$ .

Каждому из значений оценок соответствует свой набор характеристик общего состояния БС –  $ch_{i_{ch}}$  и рекомендаций  $r_{i_r}$  для действия ЛПР, где  $i_{ch}$  и  $i_r$  количество характеристик состояния БС и рекомендаций:

$$\forall m_{i_m}^{BS} \subset M_{BS} \exists \{ch_{i_{ch}}\} \text{ и } \exists \{r_{i_r}\} \quad (2)$$

где  $i_m$  – число элементов множества  $M_{BS}$ .

Перечень характеристик оценки и набор рекомендаций по выполнению действий относительно БС в обобщенном виде представлен в табл. 1.

Таблица 1

**Перечень характеристик оценки и набор рекомендаций по выполнению действий относительно оцениваемой базовой станции**

Значение $m_{i_m}^{BS}$	Описание $ch_{i_{ch}}$	Описание $r_{i_r}$
$m_1^{BS} \in (0, 2.5)$	Состояние базовой станции плохое, базовая станция не позволяет качественно обслуживать абонентов	Требуется срочная замена или модернизация базовой станции целиком или отдельных наиболее критичных компонентов
$m_2^{BS} \in [2.5, 3.5)$	Базовая станция справляется с решением поставленных задач, но состояние базовой станции приближаются к критическому	Модернизацию желательно провести в течение ближайшего полугодия или года
$m_3^{BS} \in [3.5, 4.5)$	Базовая станция в целом справляется с возложенными задачами, при этом в среднесрочной перспективе трудности могут возникнуть	Модернизация может потребоваться через 1–2 года эксплуатации
$m_4^{BS} \in [4.5, 5]$	Базовая станция справляется с возложенными задачами	Модернизация может потребоваться на сроке более 2-х лет эксплуатации

Особенностью эксплуатируемых БС является возможность поддерживать стандарты сотовой связи со 2-го по 4-е поколение. Поэтому

следует учитывать, что для оценки состояния каждой единицы оборудования, поддерживающего обслуживание абонентов сетей различных

стандартов, используются различные наборы параметров. Таким образом, множество  $P_{BS}$  целесообразно представить в виде подмножеств:

$$P_{BS} = P_{BS}^{2G} \cup P_{BS}^{3G} \cup P_{BS}^{4G}, \quad (3)$$

где  $P_{BS}^{2G}$ ,  $P_{BS}^{3G}$ ,  $P_{BS}^{4G}$  – подмножества оценочных характеристик БС сетей сотовой связи 2-го – 4-го поколений. С учетом мнения экспертов в области эксплуатации БС в табл. 2 приведен перечень и наименования элементов подмножеств  $P_{BS}^{2G}$ ,  $P_{BS}^{3G}$ ,  $P_{BS}^{4G}$ .

Учитывая, что наборы параметров для оценки оборудования различных стандартов различаются по количественному и качественному составу, то целесообразно для каждого типа оборудования использовать отдельный метод оценки. Для случая если одна БС поддерживает несколько стандартов, использовать дополнительный метод для получения итоговой оценки из промежуточных оценок, по каждому из поддерживаемых стандартов. В качестве методов контроля за результатами предлагается использование действующих нормативных и руководящих документов.

Таблица 2

Перечень характеристик оценки БС 2-го – 4-го поколений

Наименование подмножества	Обозначение элемента подмножества	Наименование и единицы измерения элемента подмножества
$P_{BS}^{2G}$	$P_{1\_BS}^{2G}$	Процент успешно установленных соединений, %
	$P_{2\_BS}^{2G}$	Процент обрыва соединений, %
	$P_{3\_BS}^{2G}$	Процент блокированных вызовов в час наибольшей нагрузки (ЧНН), %
	$P_{4\_BS}^{2G}$	Трафик в каналах ТСН, Эрланг
	$P_{5\_BS}^{2G}$	Процент доступности сети, %
	$P_{6\_BS}^{2G}$	Процент успешных назначений TBF (Traf Berst Freim), %
	$P_{7\_BS}^{2G}$	Процент обрывов TBF, %
	$P_{8\_BS}^{2G}$	Процент отказов из-за перегрузки при запросах на установление TBF в ЧНН, %
$P_{BS}^{3G}$	$P_{1\_BS}^{3G}$	Процент успешности установленных, голосовых соединений, %
	$P_{2\_BS}^{3G}$	Процент обрывов голосовых соединений, %
	$P_{3\_BS}^{3G}$	Процент блокированных вызовов, по причине перегрузок в режиме передачи голосового трафика в ЧНН, %
	$P_{4\_BS}^{3G}$	Голосовой трафик, Эрланг
	$P_{5\_BS}^{3G}$	Процент доступности сети, %
	$P_{6\_BS}^{3G}$	Процент успешности установления сессий пакетной передачи данных, %
	$P_{7\_BS}^{3G}$	Процент обрывов соединений пакетной передачи данных, %
	$P_{8\_BS}^{3G}$	Процент блокировок по причине перегрузок в режиме передачи данных в ЧНН, %
	$P_{9\_BS}^{3G}$	Пользовательский трафик на радиointерфейсе, кбайт
	$P_{10\_BS}^{3G}$	Среднесуточная скорость передачи данных в сети, кбит/с
$P_{BS}^{4G}$	$P_{1\_BS}^{4G}$	Процент успешно установленных соединений, %
	$P_{2\_BS}^{4G}$	Процент обрывов установленных соединений, %
	$P_{3\_BS}^{4G}$	Пользовательский трафик на радиointерфейсе, Гбайт
	$P_{4\_BS}^{4G}$	Среднесуточная скорость передачи данных, Мбит/с
	$P_{5\_BS}^{4G}$	Процент доступности сети
	$P_{6\_BS}^{4G}$	Процент успешных внутрисетевых хендверов, %

С учетом мнения экспертов составлена IDEF0 диаграмма процесса получения интегрированной оценки состояния БС, которая показана на рис. 1. На рис. 1 приняты обозначения:  $m_{i\_week}^{BS\_nG}$  – оценка работы БС стандарта  $N$  за неделю  $i$ ;  $m_{BS\_nG}^{BS\_nG}$  – оценка БС стандарта  $n$  за месяц; общая оценка БС

по всем стандартам  $m^{BS\_All}$ ; операторы для обработки информации о состоянии БС, за соответствующие периоды времени –  $F_{week}^{nG}$ ,  $F_{month}^{nG}$  для каждого из стандартов в отдельности,  $F_{month}^{All}$  – общий для получения оценки по всем стандартам.

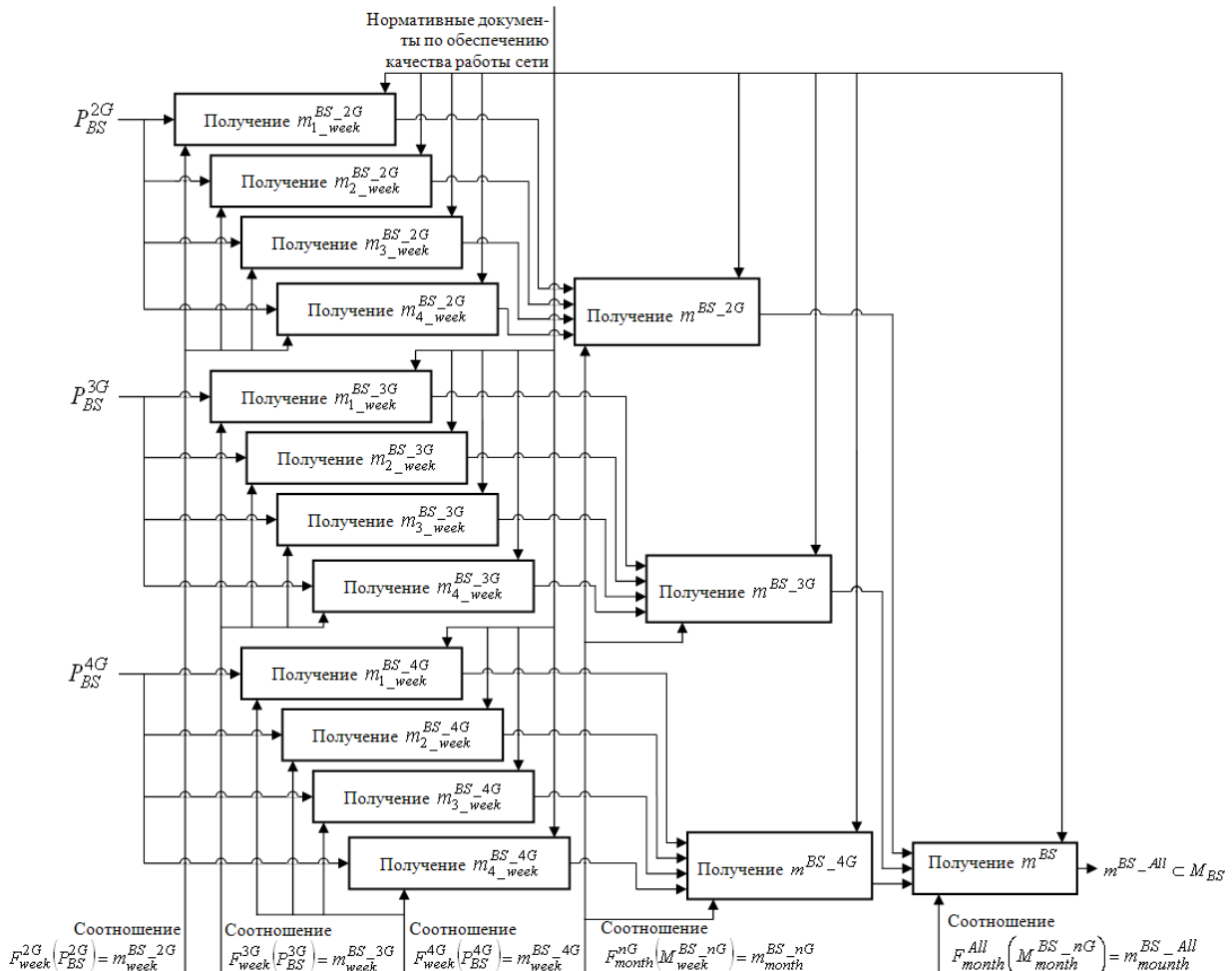


Рис. 1. IDEF0 диаграмма процесса формирования оценки состояния базовой станции, поддерживающей работу в сетях нескольких стандартов

Для удобства восприятия механизмы выполнения процессов, показанных на рис. 1, в обобщенном виде представлены в виде соотношений:

$$F_{week}^{2G}(P_{BS}^{2G}) = m_{week}^{BS\_2G} \quad (4)$$

$$F_{week}^{3G}(P_{BS}^{3G}) = m_{week}^{BS\_3G} \quad (5)$$

$$F_{week}^{4G}(P_{BS}^{4G}) = m_{week}^{BS\_4G} \quad (6)$$

$$F_{month}^{nG}(M_{week}^{BS\_nG}) = m_{month}^{BS\_nG} \quad (7)$$

$$F_{month}^{All}(M_{month}^{BS\_nG}) = m_{month}^{BS\_All} \quad (8)$$

Соотношения (4)–(6) используются для определения оценки элементов БС, поддержи-

вающих стандарты второго – четвертого поколений; (7) – для оценки работы элементов БС в течение месяца; (8) – для общей оценки БС, если она поддерживает работу в нескольких стандартах одновременно.

С учетом того, что элементы подмножеств  $P_{BS}^{2G}$ ,  $P_{BS}^{3G}$ ,  $P_{BS}^{4G}$ , описываются численными параметрами имеющими различные шкалы оценки и уровни влияния на итоговые и промежуточные оценки, а также результаты анализа методов обработки информации для получения интегрированных оценок, целесообразно для методов получения оценок, показанных на рис. 1 использовать ИНС.

ИНС можно описать в виде совокупность подмножеств:

- входных нейронов –  $N_{neur}^{in}$ , которым поставляются значения входных переменных;
- скрытых нейронов –  $N_{neur}^{hid}$ , в которых происходит преобразование информации за счет использования функции активации –  $\varphi_{n_\sigma}^\sigma$ , где  $\sigma$  – номер слоя нейронов, а  $n_\sigma$  – номер нейрона в пределах слоя;
- выходных нейронов –  $N_{neur}^{out}$ , используются для получения выходных данных.

При поступлении информации из  $N_{neur}^{in}$  на входы  $N_{neur}^{hid}$  она подвергается преобразованию, которое можно описать в виде:

$$v_{in} = \sum_m \eta_m \cdot \xi_m, \quad (9)$$

где  $\eta_m$  – значение переменной, подаваемой на вход нейрона, если рассматриваются нейроны из первого уровня скрытого слоя, то это значения входных переменных;  $\xi_m$  – веса синапсов, соединяющие заданный нейрон с нейроном предыдущего слоя;  $m$  – количество нейронов, из которых поступает сигнал. После получения значение  $\chi_{in}$  с учетом (9) оно подвергается преобразованию при помощи функции активации, в результате формируется выходное значение нейрона –  $\chi_{out}$ :

$$\chi_{out} = \varphi_{n_\sigma}^\sigma(\chi_{in}). \quad (10)$$

После формирования структуры ИНС производится ее обучение для адаптации под условия, определяемые задачей. В рамках разрабатываемой методики оценивания состояния БС адаптация ИНС производится при помощи обучения с последующим контролем результатов.

Обучение сети производится с использованием выборки сформированной на основе ретроспективной информации полученной ранее. В рассматриваемом случае это информация полученная системами сбора данных о состоянии модулей БС. Обучающую выборку можно представить в виде множества:

$$S = L \cup V \cup T, \quad (11)$$

где  $L$  – подмножество исходных данных, которые используются для обучения,  $V$  – подмножество исходных данных которые используются для определения ошибки ИНС в процессе обучения и определения момента времени, когда обучение может быть остановлено;  $T$  – тестовые данные, которые не используются в обучении и с их помощью осуществляется проверка работоспособности сети. Рекомендуемый объем выборок для  $L$ ,  $V$  и  $T$  составляет 70, 15 и 15 % от объема множества  $S$ . В свою очередь, каждый элемент подмножеств представляется кортежем вида:

$$l_{n_l} = \langle \lambda_1^{n_l}, \lambda_2^{n_l}, \dots, \lambda_q^{n_l} \rangle \quad (12)$$

$$v_{n_v} = \langle v_1^{n_v}, v_2^{n_v}, \dots, v_q^{n_v} \rangle \quad (13)$$

$$t_{n_t} = \langle \tau_1^{n_t}, \tau_2^{n_t}, \dots, \tau_q^{n_t} \rangle \quad (14)$$

где  $\lambda^{n_l}$ ,  $v^{n_v}$  и  $\tau^{n_t}$  – значения элементов кортежей в виде информации, поступающей с модулей БС, а  $q$  – их количество, которое рекомендуется экспертом в области эксплуатации БС. Пример фрагмента обучающей выборки для оценки БС стандарта 2G приведен в табл. 3. Для БС стандартов 3-го и 4-го поколений обучающие выборки отличаются набором входных параметров. Учитывая, что общий объем выборки равен 200, то с учетом пояснений к (11)  $n_l = 140$ ,  $n_v = 30$ ,  $n_t = 30$ .

Таблица 3

Фрагмент исходных значений для оценки сектора 2G

$n_l$	$p_{1.BS}^{2G} \sim \lambda_1^{n_l}$	$p_{2.BS}^{2G} \sim \lambda_2^{n_l}$	$p_{3.BS}^{2G} \sim \lambda_3^{n_l}$	$p_{4.BS}^{2G} \sim \lambda_4^{n_l}$	$p_{5.BS}^{2G} \sim \lambda_5^{n_l}$	$p_{6.BS}^{2G} \sim \lambda_6^{n_l}$	$p_{7.BS}^{2G} \sim \lambda_7^{n_l}$	$p_{8.BS}^{2G} \sim \lambda_8^{n_l}$
1	99,45	0,87	0	267,35	100	99,13	0,55	0
2	95,08	6,08	0	778,26	95,54	94,54	2,38	0,48
3	99,34	0,16	0	1704,28	100	99,13	2,05	0
4	99,87	0,47	0	1875,51	100	98,97	0,85	0,01
5	99,28	0,55	0	386,43	99,01	99,01	0,97	0,01
6	95,7	5,84	0	437,15	98,76	94,88	4,25	0,85
7	99,15	0,65	0	176,68	99,76	98,13	2,05	0
8	99,85	0,12	0	181,58	100	99,45	0,81	0,17
9	97,25	3,71	2,41	390,41	94,34	91,27	7,57	5,01
...	...	...	...	...	...	...	...	...
140	95,65	4,65	0	679,9	95,96	95,19	3,29	0,44

Реализация ИНС проведена в программе MATLAB при помощи библиотеки Neural Networks. Решение о выборе количества нейронов принималось на основании анализа результатов моделирования с учетом среднеквадратичной погрешности. Обучение сети с учетом работ [8–10] проводилось по алгоритму Левенберга – Марквардта с обратным распространением ошибки. Обучение ИНС останавливалось, если ее обобщающая способность переставала улучшаться. Применительно к данным, приведенным в табл. 3, результат обучения ИНС приво-

дится на графике, показанном на рис. 2, а, на рис. 2, б и 2, в показаны результаты обучения ИНС для анализа технического состояния БС стандартов 3G и 4G.

Результат обучения ИНС для оценивания БС по итогам месячной работы по каждому из стандартов показан на рис. 3, а, а на рис. 3, б показан результат обучения ИНС для получения общей оценки БС по всем стандартам.

Результаты обучения ИНС, на которых обучение было признано наиболее результативным, приведены в табл. 4.

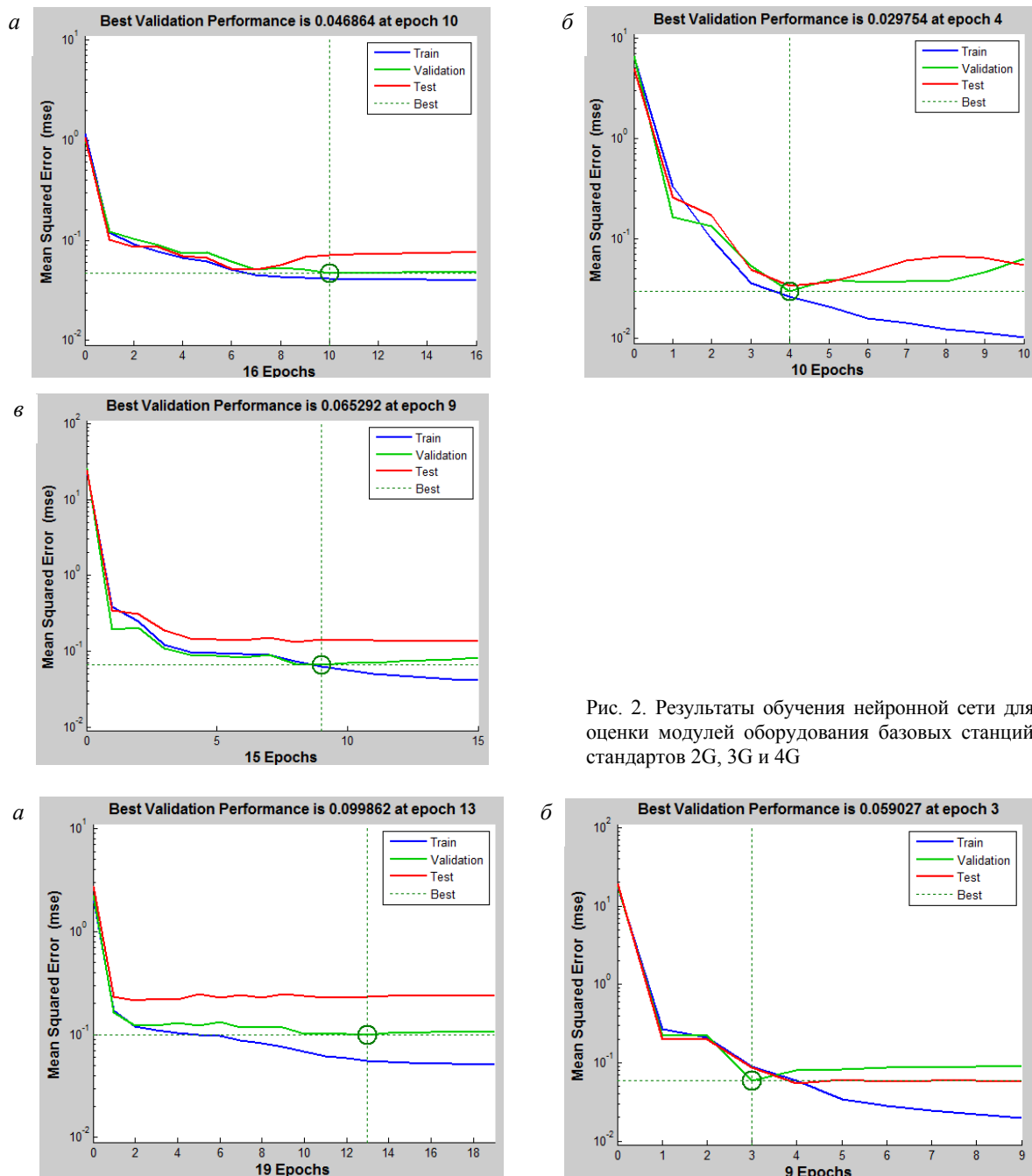


Рис. 2. Результаты обучения нейронной сети для оценки модулей оборудования базовых станций стандартов 2G, 3G и 4G

Рис. 3. Результаты обучения ИНС для получения интегрированной оценки БС по группе стандартов

Таблица 4

## Результаты обучения нейронных сетей для оценивания базовых станций различных стандартов

Наименование используемой нейронной сети	Число нейронов с скрытым слое	Число итераций для обучения	Средняя квадратичная ошибка
НС для анализа базовых станций стандартов 2 G за неделю	10	10	$\approx 0,046$
НС для анализа базовых станций стандартов 3 G за неделю	15	4	$\approx 0,029$
НС для анализа базовых станций стандартов 4 G за неделю	15	9	$\approx 0,065$
НС для анализа состояния базовых станций по каждому из стандартов за месяц	15	13	$\approx 0,099$
НС для общего анализа базовой станций за месяц	15	3	$\approx 0,059$

В табл. 5 показаны результаты работы ИНС по оценке БС, поддерживающей работу абонентского оборудования сетей мобильной связи стандартов второго поколения.

Таблица 5

## Результаты тестирования нейронной сети

№ оцениваемой БС	$P_{1.BS}^{2G}$	$P_{2.BS}^{2G}$	$P_{3.BS}^{2G}$	$P_{4.BS}^{2G}$	$P_{5.BS}^{2G}$	$P_{6.BS}^{2G}$	$P_{7.BS}^{2G}$	$P_{8.BS}^{2G}$	Оценка БС
	% установленных соединений	% обрывов соединений	% блокированных вызовов	Трафик на каналах, Эрл	% доступности сети радиодоступа	% успешных назначений TBF	% обрывов	% отказов	
1	99,45	0,87	0	267,35	100	99,13	0,55	0	4,63
2	95,08	6,08	0	778,26	95,54	94,54	2,38	0,48	2,98
3	99,34	0,16	0	1704,28	100	99,13	2,05	0	4,05
4	97,25	3,71	2,41	390,41	94,34	91,27	7,57	5,01	1,95

Аналогично получается массив оценок БС поддерживающих работу в других стандартах. По результатам оценки формируются рекомендации для принятия решений направленных на модернизацию отдельных модулей или БС в целом.

Таким образом, предложенная методика оценки базовых станций позволяет проводить идентификацию состояния базовых станций сетей мобильной связи различных стандартов для последующего формирования рекомендаций по проведению их модернизации. Сущность методики заключается в последовательном использовании нескольких нейронных сетей для промежуточной и окончательной обработки информации о технических характеристиках базовых станций. Использование предложенной методики открывает возможности дальнейшей автоматизации процессов управления структурой сетей операторов связи.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сорокин, А.А., Горюнов, А.А. Система сбора и идентификации текущей и ретроспективной информации о зоне покрытия сети оператора мобильной связи // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2016. № 4. С. 74–86.

2. Бондаренко, А.С. Комплексный мониторинг, безопасность, управление и учет ресурсов на сетях связи // Вестник связи. 2011. № 4. С. 72–74.

3. Пицин, О.Н., Сергеева, Е.В. Повышение качества предоставления услуг в подвижных системах радиосвязи // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2013. № 1. С. 126–132.

4. Орлов, А.И. Организационно-экономическое моделирование: теория принятия решений – М.: КНОРУС, 2010. – 568 с.

5. Сорокин, А.А., Юссуф, А., Ахмат М.С., Маличенко, А.С. Разработка алгоритмов обработки информации для получения интегральных оценок проектов в области телекоммуникаций // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2017. № 2 (38). С. 88–104.

6. Чертина, Е.В. Квятковская, И.Ю. Комплексная количественная оценка инновационных ИТ-проектов на основе нечетко-множественных описаний // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2016. № 1 (33). С. 50–62.

7. Шакиров, В.А., Фадеев, В.А. Модель анализа развития генерирующих мощностей с использованием нечеткого вывода // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. Т. 18. № 22 (125). С. 90–96.

8. Паклин, Н.Б., Орешков, В.И. Бизнес-аналитика: от данных к знаниям. – СПб.: Питер, 2013. – 704 с.

9. Пархоменко, С.С., Леденёва, Т.С. Обучение нейронных сетей методом Левенберга-Маквардта в условиях большого количества данных // Вестник ВГУ. Сер.: Системный анализ и информационные технологии. 2014. № 18. С. 98–106.

10. Гумеров, В.Г. Нейросетевой подход к моделированию сложных эколого-экономических систем // Новые технологии. Майкоп. ФГБОУ ВО МГТУ. № 3. 2007. С. 128–130.

## РОБОТОТЕХНИКА

УДК 629.1.03

*Е. С. Брискин, И. С. Пеньшин, Л. Д. Смирная, Н. Г. Шаронов*

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ В ДВИЖИТЕЛЯХ ЯКОРНО-ТРОСОВОГО ТИПА\*

Волгоградский государственный технический университет  
dtm@vstu.ru

Рассматривается задача определения усилий в тросах якорно-тросовых движителей, управление длиной которых обеспечивает поступательное движение робототехнической грузовой платформы.

*Ключевые слова:* движитель, грузовая подводная робототехническая платформа.

*E. S. Briskin, I. S. Penshin, L. D. Smirnaya, N. G. Sharonov*

### DEFINITION OF EFFORT IN THE PROPULSION OF THE ANCHOR-ROPE TYPE

Volgograd State Technical University

The problem of determining the efforts of the ropes anchor-tether propulsion, length control of which provides the translational motion of the cargo underwater robotic platform are considered.

*Keywords:* propulsive device, cargo underwater robotic platform.

#### Введение

Для перемещения объектов в плотных средах, например, воде, используют обычно винтовые движители. Однако, известны и другие способы перемещения, в частности, перемещение с помощью якорей [1] применяется, например, для позиционирования земснарядов при выполнении технологических операций. В отличие от перемещения с помощью известных шагающих движителей [2] этот способ перемещения не связан с решением задач профильной проходимости и может быть развит при исследовании перемещения подводных робототехнических платформ.

Для перемещения груза, предлагается использование якорно-тросовых движителей, взаимодействующих с неподвижным грунтом посредством якорей, положение которых изменяется дискретно за счет их управляемого переноса в новое положение. Применение такого типа движителей позволяет осуществлять непрерывное перемещение под водой робототехнической платформы с положительной плавучестью.

#### Постановка задачи

Ставится задача определения усилий в приводах, обеспечивающих поступательное движение подводной платформы посредством управления длиной тросов, неподвижно закрепленных на твердой поверхности (рис. 1).

Характеристиками рассматриваемой системы являются массово-геометрические параметры платформы и места закрепления натянутых на ней тросов. Особенностью работы рассматриваемой системы управления длиной тросов, и, следовательно, позиционирования груза является возможность работы троса только на растяжение, что накладывает дополнительные условия при определении требуемых управляющих воздействий.

Рассматривается квазистатический режим поступательного движения подводной платформы с положительной плавучестью посредством изменения длин тросов. Решается задача определения действующих на объект сил  $T_i$  со стороны каждого из  $N$  тросов в зависимости от параметров исследуемой системы, расчетная схема которой представлена на рис. 2. Положение натянутых тросов относительно перемещаемого объекта определяется углами  $\alpha_i$  и расстояниями  $b_i$  точек крепления тросов от центра масс объекта, неподвижные якоря находятся на грунте на глубине  $h_i$  при длине троса  $l_i$ . Учитывая квазистатический характер движения, действующие на груз силы со стороны плотной среды (воды) моделируются горизонтальной силой сопротивления движению  $Q$  и вертикальной выталкивающей силой  $\Phi$ , приложенной со смещением от центра масс объекта весом  $G$  на расстояние  $a$ .



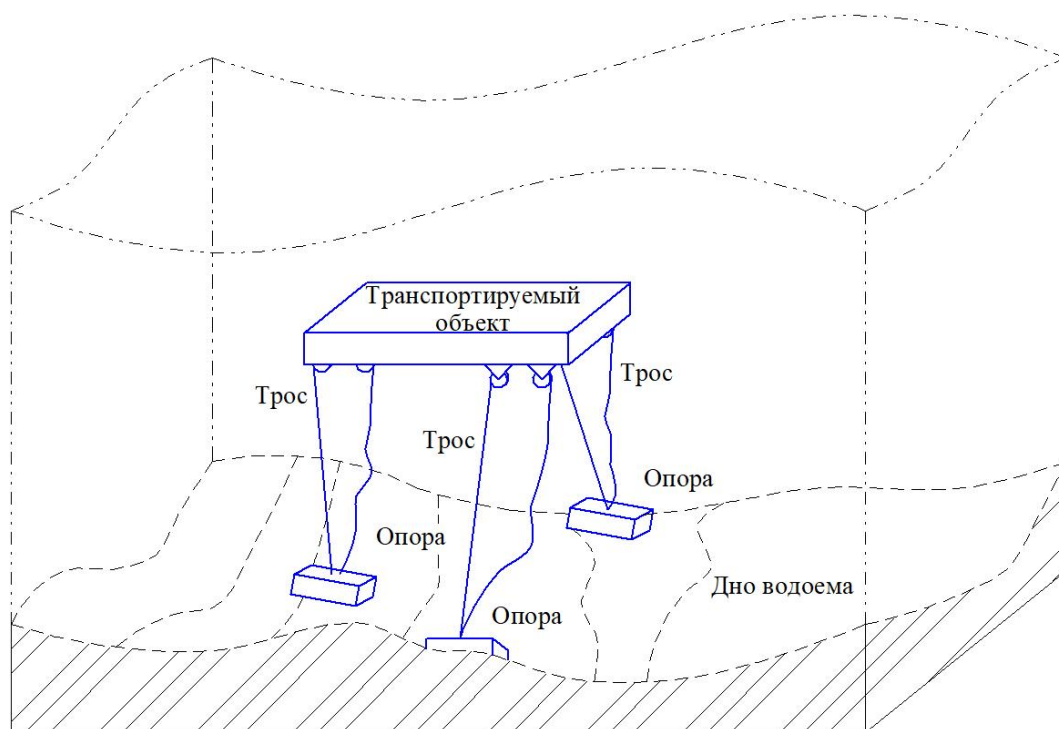


Рис. 1. Перемещение подводной платформы с положительной плавучестью

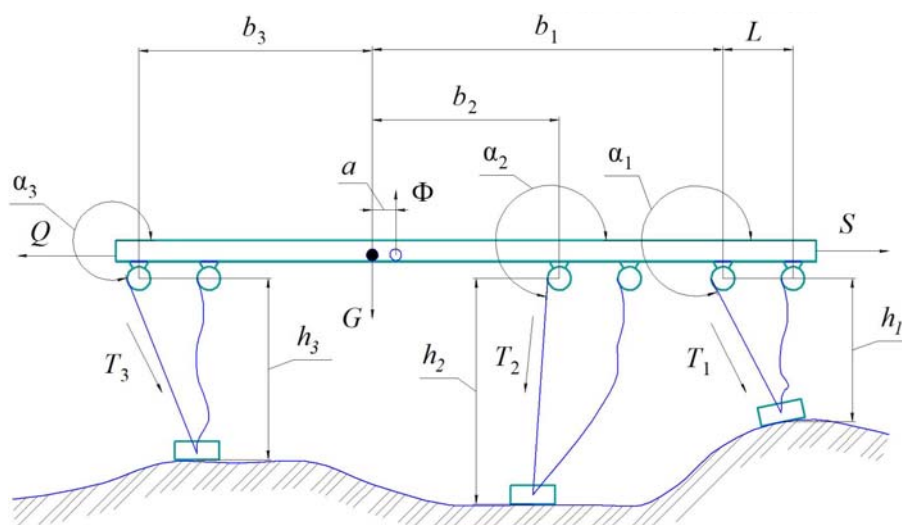


Рис. 2. Расчетная схема поступательного перемещения груза

При движении объекта с неизменными положениями опор (якорей) на грунте значения углов  $\alpha_i$  можно выразить в виде функции параметра  $S$ , характеризующего поступательное движение перемещаемого объекта:

$$\alpha_i = \frac{3\pi}{2} + \arctg\left(\frac{l_i - S}{h_i}\right). \quad (1)$$

Задача решается при выполнении условия, ограничивающего непрерывный характер взаимодействия якоря с грунтом:

$$S_0 \leq S \leq S_k, \quad (2)$$

где  $S_0$  и  $S_k$  – положения объекта, при котором происходит перенос одной из опор (якоря). Выражение (2) можно трактовать как условие дискретного перемещения (переступания) неподвижной опоры (якоря) натянутого троса.

#### Метод решения

Записывая уравнения поступательного движения перемещаемого объекта (подводной роботизированной платформы) с учетом его квазистатического характера движения получим систему из трех, линейных относительно сил натяжения тросов  $T_i$ , уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N T_i \cos \alpha_i - Q = 0 \\ \sum_{i=1}^N T_i \sin \alpha_i - G + \Phi = 0 \\ \sum_{i=1}^N b_i T_i \sin \alpha_i + \Phi a = 0 \end{cases} \quad (3)$$

В общем случае, при  $N \geq 3$ , задача является статически неопределимой. При трех натянутых тросах исследуемая задача равновесия объекта является статически определимой. В развернутой форме систему уравнений (3) можно записать в виде:

$$\begin{cases} T_1 \cos \alpha_1 + T_2 \cos \alpha_2 + T_3 \cos \alpha_3 - Q = 0 \\ T_1 \sin \alpha_1 + T_2 \sin \alpha_2 + T_3 \sin \alpha_3 - G + \Phi = 0 \\ b_1 T_1 \sin \alpha_1 + b_2 T_2 \sin \alpha_2 + b_3 T_3 \sin \alpha_3 + \Phi a = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Учитывая (1), полученная система линейных уравнений позволяет определить усилия в тросах в зависимости от положения  $S$  объекта.

#### Результаты расчетов

Моделирование квазистатического режима поступательного движения рассматриваемой системы проведено при значении параметров рассматриваемой системы, приведенных в таблице. Выбор параметров обусловлен ориентацией на реальную проектируемую подводную платформу.

Значения параметров моделируемой системы

Параметр	Значение
$a$ , м	1
$b_1$ , м	15
$b_2$ , м	4
$b_3$ , м	-8
$G$ , кН	400
$\Phi$ , кН	500
$L$ , м	3
$h_1$ , м	5
$h_2$ , м	5
$h_3$ , м	5
$l_1$ , м	3
$l_2$ , м	0
$l_3$ , м	2,5

При проведении расчетов в соответствии с (4) и с учетом (1), перемещение объекта увеличивалось до тех пор, пока одна из сил  $T_1, T_2, T_3$  становилась меньше либо равной нулю, что соответствовало максимальному перемещению  $S$  подводной платформы при неизменном положении опор на грунте. Результаты расчетов сил натяжения тросов  $T_1, T_2, T_3$  от пройденного платформой расстояния  $S$  при различных значениях силы  $Q$  приведены на рис. 3.

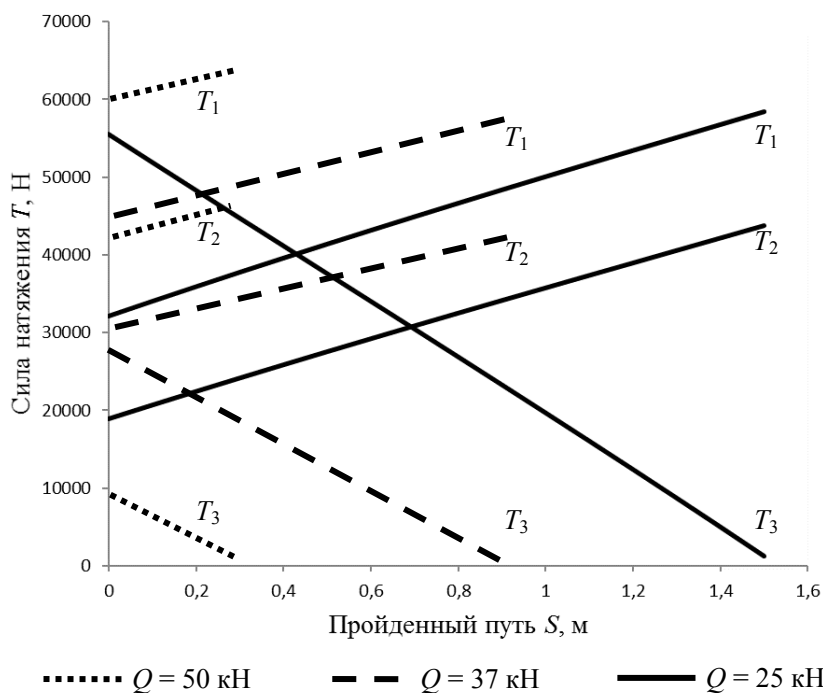


Рис. 3. Зависимость сил натяжения тросов от перемещения груза  $S$

Максимальное поступательное перемещение платформы за один «шаг» составляет 0,28 метра при значении силы сопротивления  $Q = 50$  кН, при уменьшении силы сопротивления  $Q$  до 37 кН пройденный платформой путь составляет 0,9 м, а при силе сопротивления  $Q = 25$  кН пройденный путь за один «шаг» составил 1,5 м.

Анализ полученных результатов показывает, что при возрастании силы сопротивления движению (что соответствует повышению скорости движения груза или плотности среды), необходимо чаще дискретно изменять положения опор якорно-тросовых движителей («шагать»). Усилия в тросах при поступательном перемещении подводной платформы изменяются по закону близкому к линейному.

#### Выводы

Обоснована возможность применения квазистатической математической модели для определения усилий в тросах якорно-тросовых движителей при малых скоростях поступательного движения подводной робототехнической платформы.

**Определен** вид массово-геометрических параметров подводной робототехнической платформы, совершающей поступательное движение, влияющих на величину усилий в тросах, как коэффициентов в уравнениях (3, 4).

**Установлены** закономерности уменьшения длины шага переноса опор якорно-тросовых движителей с ростом скорости и изменения усилия в тросах в процессе движения.

**На практике** предложенная методика расчета позволяет проектировать роботизированные подводные платформы, удовлетворяющие техническим заданиям и определять оптимальные режимы их поступательного движения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кульмач, П.П. Якорные системы удержания плавучих объектов. – Л.: Судостроение, 1980. 336 с.
2. Разработки, исследования и проблемы управления движением мобильных роботов с шагающими движителями / Е.С. Брискин, В.В. Жога, В.Е. Павловский, А.К. Платонов, В.А. Шурыгин // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (г. Казань, 20–24 авг. 2015 г.): сб. тр. / Казанский (Приволжский) федеральный ун-т, Ин-т механики и машиностроения КазНЦ РАН, Казанский нац. исслед. техн. ун-т им. А.Н. Туполева [и др.]. – Казань, 2015. – С. 582–584.

УДК 62-185.3

*А. Е. Гаврилов<sup>1</sup>, С. Б. Хантимирова<sup>1</sup>, О. А. Мишустин<sup>1</sup>, П. А. Побегайло<sup>2</sup>, Д. М. Селюнин<sup>1</sup>*

#### УНИВЕРСАЛЬНАЯ ШАГАЮЩАЯ ИНСЕКТОМОРФНАЯ ПЛАТФОРМА «AG» С ЭКСКАВАТОРНЫМ МОДУЛЕМ\*

<sup>1</sup>Волгоградский государственный технический университет

<sup>2</sup>Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН

[gavrilov@vstu.ru](mailto:gavrilov@vstu.ru)

В работе описывается конструкция роботизированной транспортной платформы, в которой для перемещения используется инсектоморфный шагающий движитель. Приводятся основные сведения о теоретическом методе получения алгоритма движений. Описывается возможность установки на платформу, в качестве навесного оборудования, экскаваторного модуля.

**Ключевые слова:** шагающий инсектоморфный движитель, роботизированная платформа, алгоритмы перемещения, экскаваторный модуль.

*A. E. Gavrilov<sup>1</sup>, S. B. Hantimirova<sup>1</sup>, O. A. Mishustin<sup>1</sup>, P. A. Pobegaylo<sup>2</sup>, D. M. Selunin<sup>1</sup>*

#### MULTIPURPOSE WALKING INSECT-LEGGED PLATFORM «AG» WITH EXCAVATOR MODULE

<sup>1</sup>Volgograd State Technical University

<sup>2</sup>Mechanical Engineering Research Institute  
of the Russian Academy of Sciences

The paper describes the construction of a robotic transport platform in which an insect walking mover is used to move. The basic information about the theoretical method of obtaining the algorithm of motions is given. The possibility of installing an excavator module on a platform, as an attachment, is described.

**Keywords:** walking insect mover, robotic platform, displacement algorithms, excavator module.

В результате повышения мощности современных вычислительных систем стало возможно осуществлять точное управление сложными исполнительными механизмами. В результате чего большое количество сложных задач выполняется с помощью роботов. Применение робототехнических средств имеет ряд преимуществ, роботы выполняют работу быстрее и с большей точностью, чем человек, с меньшими затратами, и с большей эффективностью. По причине этого, внедрение автоматических роботизированных систем для реализации различных задач становится приоритетным направлением развития [1].

Использование шагающих движителей в мобильных роботах дает качественный рост ряда основных показателей по сравнению с транспортными средствами, использующими колесный и гусеничный способы передвижения. Мобильные роботы с шагающими движителями имеют высокие возможности по адаптации к неровностям опорной поверхности, большую профильную проходимость и маневренность, допускающую в большинстве случаев перемещение робототехнической платформы

в произвольном направлении. У таких движителей существует возможность осуществления разворота на месте и возможность проводить работы на неустойчивых грунтах, а также возможность проведения стабилизации по углам крена, тангажа и рысканья в пределах своих кинематических параметров. Профильная проходимость шагающих роботов зависит от типа шагающего движителя, а также его габаритов и конструкции. Значительным преимуществом всех типов шагающих движителей в вопросе профильной проходимости является дискретность взаимодействия с опорной поверхностью. Благодаря дискретному взаимодействию универсальной шагающей инсектоморфной платформы «AG» с опорной поверхностью, отсутствует колея, что позволяет снизить отрицательное воздействие на грунт при движении, а так же, за счет этого, шагающая платформа может реализовывать различные виды походок, а также прыгать и переступать через препятствия подобно представителям фауны.

Кинематическая схема универсальной шагающей инсектоморфной платформы «AG» представлена на рис. 1.

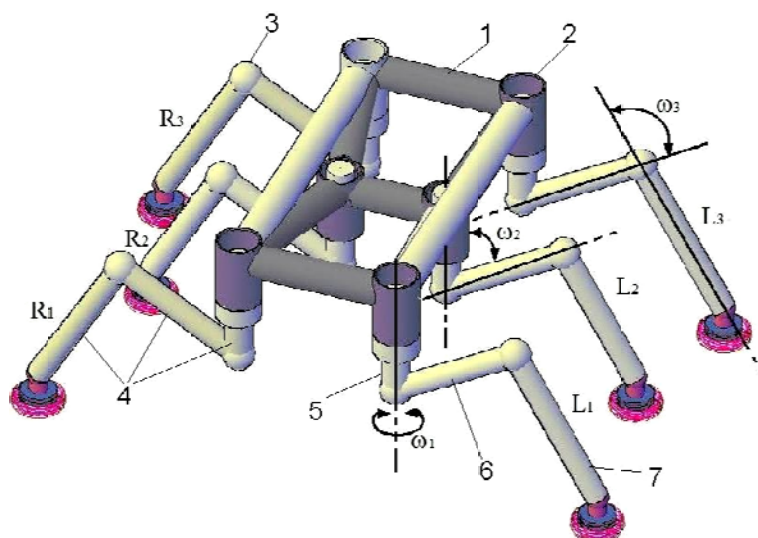


Рис. 1. Кинематическая схема универсальной шагающей инсектоморфной платформы «AG»:

1 – несущая рама; 2 – цилиндрические втулки; 3 – вращательная пара пятого класса; 4 – конечность инсектоморфного движителя; 5 – первое звено опоры; 6 – второе звено опоры; 7 – третье звено опоры;  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$  – угловые перемещения звеньев конечности

При создании универсальной шагающей инсектоморфной платформы «AG» с инсектоморфным шагающим движителем применен блочно-модульный принцип построения электромеханических структур на базе унифицированных автоматизированных электроприводов с программируемыми микроконтроллерами. Блочно-модульный принцип позволяет повы-

сить ремонтпригодность системы в целом, быстро заменять вышедшие из строя унифицированные модули, модифицировать их структуру, создавать робототехнические схемы с гибкими функциональными возможностями, обеспечивающие рациональное использование информационных и энергетических ресурсов. В рамках существующей робототехнической системы

все блоки выполняются совместимыми по интерфейсу, т. е. совместимыми по параметрам и характеристикам носителей информации, похожими по конструктивному исполнению, с унифицированными устройствами коммутации. Блоки создаются посредством монтажа и коммутации отдельных модулей, которые, в свою очередь собираются из отдельных деталей и узлов [2].

Каждая нога инсектоморфного движителя является пространственным механизмом, состоящим из нескольких базисных звеньев соединенных между собой шарнирами с разным числом степеней подвижности и одного для каждой ноги свободного концевой звена. За счет наличия свободного звена появляется возможность выбора мест постановки опорных стоек в пределах зоны достижимости механизма ноги. Это расширяет адаптационные возможности мобильных робототехнических систем построенных на базе шагающего инсектоморфного движителя. Звенья связаны между собой вращательными парами пятого класса. Относительное перемещение звеньев платформы происходит за счет управляемого движения приводных электродвигателей с передаточными механизмами, выполненными в виде модуля

содержащего в себе электродвигатель, редуктор, набор датчиков обратной связи и управляющий микроконтроллер. Каждый модуль управляется посредством электронно-вычислительного блока, который рассчитывает программные движения для каждого привода в зависимости от задаваемого оператором маршрута движения на основании информации полученной от системы датчиков обратной связи.

Для шестиопорных шагающих роботов подобной конструкции наиболее распространены являются походки типа «галоп» или «трешки» [3].

Походка «галоп» представляет собой походку, при которой опоры передвигаются поочередно, парами [4]. В табл. 1 и 2 указано распределение конечностей роботов по фазам при перемещении робота «галопом» и «трешками».

При этом матрица походки будет иметь вид:

$$G = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Таблица 1

Распределение фаз походки «галоп»

№ ноги \ № фазы	1	2	3	1	2	3
R <sub>1</sub>						
R <sub>2</sub>						
R <sub>3</sub>						
L <sub>1</sub>						
L <sub>2</sub>						
L <sub>3</sub>						

– фаза переноса  
 – фаза опоры

Матрица походки «трешки» имеет вид:

$$G = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Таблица 2

Распределение фаз походки «трешки»

№ ноги \ № фазы	1	2	3	1
R <sub>1</sub>				
R <sub>2</sub>				
R <sub>3</sub>				
L <sub>1</sub>				
L <sub>2</sub>				
L <sub>3</sub>				

– фаза переноса  
 – фаза опоры

Применение походки «галоп», по сравнению с походкой «трешки» имеет некоторую особенность. Согласно исследованиям, проведенным в Федеральной политехнической школе Лозанны, если конечности опор обладают адгезивными способностями, то наибольшую эффективность имеет походка типа «трешки». Однако, в случае когда конечность опоры не обладает адгезивными свойствами, походка «трешки» серьезно уступает в энергоэффективности и скорости передвижения походке типа «галоп» [5].

Для обеспечения координации движения опор был проведен следующий кинематический анализ. Если принять за  $k$  число звеньев механизма, то общее количество степеней свободы до соединения в кинематическую цепь равно  $6k$ . При обозначении имеющих кинематических пар одного класса как  $p_i$  ( $i$  – номер класса), то число накладываемых условий связи  $\sum_{i=1}^5 ip_i$ , а число степеней свободы будет

$$N = 6k - \sum_{i=1}^5 ip_i. \quad (3)$$

Если одно из звеньев считается неподвижным, то число степеней свободы будет равно

$$N = 6n - \sum_{i=1}^5 ip_i, \quad (4)$$

где  $n = k - 1$  – число подвижных звеньев;  $k$  – число звеньев кинематической цепи, число обобщенных координат определяется структурной формулой (4). Таким образом, число степеней свободы каждой механической конечности будет равным

$$N = 6k - \sum_{i=1}^5 ip_i = 6 \cdot 2 - (4 + 5) = 3. \quad (5)$$

Кинематика движения ноги универсальной шагающей инсектоморфной платформы «AG» рассчитывается с помощью методов теоретической механики. При перемещении каждой из шести ног, кинематическая схема инсектоморфного движителя допускает бесконечное число алгоритмов перемещения опорной точки

концевого звена шагающего аппарата между двумя точками пространства. В связи с этим встает вопрос выбора алгоритма перемещения с точки зрения различных критериев оптимальности. Например, в качестве такого критерия может служить критерий, отвечающий за непроизводительные потери в электродвигателях, связанные с нагревом обмоток. Нагрев двигателя, а следовательно, тепловые потери пропорциональны квадрату тока якоря, и, следовательно, пропорциональны квадрату нагрузки на электродвигатель. В случае, когда известны граничные условия на обоих концах искомой функции, т. е. граничные условия, при перемещении опорной точки ноги шагающего аппарата такой функционал можно представить в виде:

$$I = \alpha \int_{t_1}^{t_2} [F_{\partial s}^2(t)] dt, \quad (6)$$

где  $I$  – критерий оптимальности;  $\alpha$  – коэффициент пропорциональности;  $F_{\partial s}$  – усилие в приводном электродвигателе.

Задача отыскания искомой функции доставляющей минимум данному функционалу решается методами классического вариационного исчисления, при этом, в зависимости от граничных условий движения, возможно получение различных законов при перемещении опорного звена между двумя точками пространства.

Схема математической модели универсальной шагающей инсектоморфной платформы «AG» представлена на рис. 2. Общее число степеней свободы механизма при оснащении универсальной шагающей инсектоморфной платформы «AG» шестью опорами будет равно 18. Подобная конструкция робота с инсектоморфным шагающим движителем может быть представлена как многозвенная механическая система.

Математическая модель универсальной шагающей инсектоморфной платформы «AG» представляется в виде многозвенной механической системы расположенной относительно неподвижной системы координат  $OXYZ$ , с геометрическим центром корпуса платформы связана система координат  $Ox_1y_1z_1$ .





применения стандартного экскаватора, повышение проходимости и маневренности, а также, возможность применения на топких, болотистых грунтах [6]. Появляется возможность использовать комплекс в составе разведывательных геологических экспедиций, в сложных эксплуатационных условиях. Дискретность взаимодействия опор универсальной шагающей инсектоморфной платформы позволяет более широко применять данный комплекс в ходе спасательных операций, и ликвидации последствий катастроф различного характера.

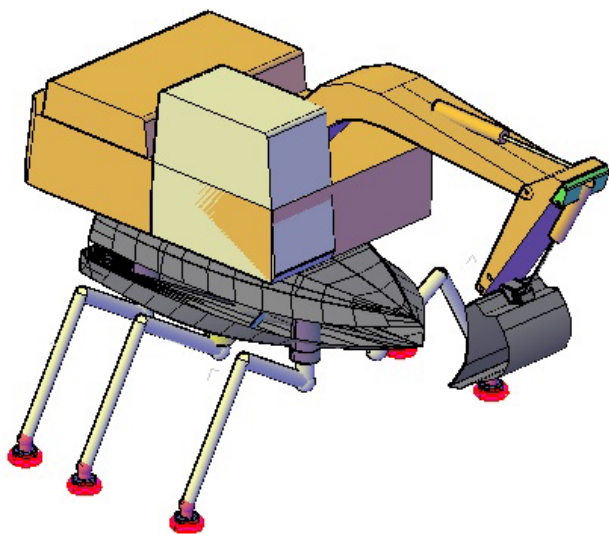


Рис. 3. Общий вид концепции шагающей инсектоморфной платформы «AG» с элементами экскаватора ЭО-5126

Разработки шагающих машин и роботов затруднены сложностью динамических взаимосвязей составляющих движения шагающего робота со многими приводами, отсутствием мобильных энергетических установок небольшой массы, а также с отсутствием теории оптимального движения шагающих аппаратов.

Однако, шагающие инсектоморфные движители являются новой и перспективной, областью техники, которая в настоящее время является не раскрытой полностью. Роботизированные платформы, оснащенные движителями подобной конструкции перспективны для применения в составе многофункциональных наземных и подводных транспортно-технологических комплексах, а также применения в космической технике.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гаврилов, А. Е. Автономная роботизированная шагающая платформа для мониторинга окружающей среды / А. Е. Гаврилов, А. С. Даншин, А. А. Бурханов // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2014. Т. 21. № 12(139). С. 153–157.
2. Составной шагающий инсектоморфный движитель / А. Е. Гаврилов, О. А. Мишустин, Д. М. Селюнин, С. Б. Хантимирова // Автоматизация технологических процессов механической обработки, упрочнения и сборки в машиностроении : сб. науч. ст. междунар. науч.-техн. конф. (3–5 ноября 2016 г.) / редкол.: А. Н. Гречухин (отв. ред.) [и др.] ; Юго-Западный гос. ун-т [и др.]. – Курск, 2016. – С. 66–70.
3. Лапшин, В. В. Механика и управление движением шагающих машин / В. В. Лапшин. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. – 199 с. : ил.
4. Алгоритмы перемещения шагающего робота-гексапода / А. Е. Гаврилов, С. Б. Хантимирова, О. А. Мишустин, Д. М. Селюнин // XXVIII Международная инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС-2016) : сб. тр. конф. (г. Москва, 7–9 декабря 2016 г.) / редкол.: Н. А. Татусь (отв. ред.) [и др.] ; РАН, Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН, Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, РФФИ (Грант № 16-38-10255\_мол\_г). – М., 2017. – С. 232–235.
5. Climbing favours the tripod gait over alternative faster insect gaits / P. Ramdya, [and oth.] // Nature Communications. – 2017. – 17 Feb. – V. 8. – art. num. 14494.
6. Чернышев, В. В. Оценка экологичности и энергоэффективности шагающего движителя на грунтах с низкой несущей способностью / В. В. Чернышев // Вестник Саратов. гос. техн. ун-та. – 2012. Т. 4. № 1. С. 283–287.

УДК 681.51, 004.31

**В. А. Егунов, М. К. Петросян**

#### РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНОГО РОБОТА-ГЕКСАПОДА НА БАЗЕ ДАТЧИКОВ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ

Волгоградский государственный технический университет

vegunov@mail.ru, mih95@inbox.ru

Рассматривается вопрос использования акселерометра и гироскопа при построении инерциальной навигационной системы мобильного робота-гексапода. Описывается способ обработки данных датчиков в системе управления устройства, разработанного авторами.

**Ключевые слова:** акселерометр, гироскоп, инерциальная навигация, мобильный робот, робот-гексапод, дискретное интегрирование, комплементарный фильтр, фильтр низких частот, фильтр высоких частот.



*V. A. Egunov, M. K. Petrosyan*

# DEVELOPMENT OF A CONTROL SYSTEM OF A MOBILE ROBOT-HEXAPOD BASED ON INERTIAL NAVIGATION SENSORS

Volgograd State Technical University

Discusses the use of accelerometer and gyroscope when constructing the inertial navigation system of a mobile robot-hexapod. Describes a method of processing sensor data in control system developed by the authors.

**Keywords:** accelerometer, gyroscope, inertial navigation, mobile robot, robot-hexapod, discrete integration, complementary filter, low pass filter, high pass filter.

Для решения задачи стабилизации объекта в пространстве необходимо определять положение этого объекта относительно горизонта. Другими словами, необходимо постоянно анализировать углы наклона объекта относительно продольной и поперечной оси, так называемые крен и тангаж, соответствующие углам Эйлера, задающим ориентацию объекта относительно нормальной системы координат. Стабилизация важна как для летательного аппарата, так и для балансирующего робота. Она позволяет машине всегда оставаться в нужном положении, несмотря на силы, действующие на нее извне. В общем случае, для решения задачи стабилизации, необходимо выполнить следующие действия:

- определить углы наклона объекта;
- вычислить его отклонения от требуемого положения;
- привести объект в необходимое положение путем передачи сигналов на исполнительные механизмы, меняющие ориентацию объекта, в частности мобильного робота, в пространстве.

Некоторые подходы к построению системы управления мобильным роботом описаны, например, в [1–4]. В данной работе описывается проект, выполненный авторами в рамках разработки системы навигации и управления мобильным роботом-гексаподом, в части решения задачи стабилизации робота при его перемещении.

Для решения задачи определения углов наклона базовой платформы робота необходимо использовать инерциальные датчики, такие как гироскоп и акселерометр. Гироскоп представляет собой устройство, реагирующее на изменение углов ориентации тела относительно инерциальной системы отсчета. Он позволяет определять все параметры устройства, связанные с изменением углов Эйлера, в т.ч. крен, тангаж и рыскание объекта. При использовании гироскопа соответствующие углы определяется с помощью дискретного интегрирования данных, возвращаемых гироскопом.

Однако у данного сенсора есть ощутимые недостатки. Первый из них связан с дрейфом нуля. Дрейф нуля гироскопа происходит от из-

менения температуры, движения и просто со временем. Любая система навигации должна учитывать данный факт. Кроме того, MEMS – датчики (Micro Electrical Mechanical System – микромеханические электронные системы), использующиеся в большинстве приложений из-за своей относительной дешевизны с одной стороны, и достаточно высокой точностью измерений с другой стороны, все-таки выполняют измерения с некоторой ощутимой ошибкой. Интегрирование ошибок измерения приводит к накоплению ошибки в вычислении ориентации объекта. Таким образом, гироскопы, сами по себе, не могут обеспечить точное измерение ориентации, что повлечет за собой некорректную стабилизацию объекта, в данном случае мобильного робота.

Акселерометр представляет собой прибор, определяющий проекции кажущегося ускорения, т. е. разницы между истинным ускорением объекта и гравитационным ускорением. Используя данное устройство, определить угол наклона можно, применив простые геометрические преобразования к его показаниям.

Однако, данное устройство позволяет определить точные углы наклона только в состоянии покоя. В данных условиях, пока на прибор не действуют внешние силы, акселерометр будет показывать значение проекции ускорения свободного падения на наблюдаемую ось. Если рассмотреть идеальный случай, то вычисления проекции силы гравитации на ось X будет вычисляться следующим образом

$$A_x = g * \sin(\alpha), \quad (1)$$

где  $\alpha$  – угол между осью акселерометра и горизонтом.

В результате для определения угла наклона получим следующую формулу:

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{A_x}{g}\right). \quad (2)$$

Таким образом, отклонения можно рассчитывать и с помощью акселерометра, однако любое воздействие внешней силы будет вносить в вычисления ошибку. Существуют различные подходы для устранения данной ошиб-

ки, например, использование фильтра низких частот может частично уменьшить влияние данного воздействия, однако, это может повлечь за собой другую проблему – задержка выдачи актуального угла.

Таким образом, использование одного из инерциальных датчиков, гироскопа или акселерометра, для построения инерциальной навигационной системы мобильного робота, не является эффективным. Гораздо эффективнее использование обоих датчиков одновременно, причем ориентация объекта в пространстве определяется путем объединения данных гироскопа и акселерометра.

Ниже описано, как была решена задача построения навигационной системы мобильного робота-гексапода с использованием описанных выше инерциальных датчиков.

На первом этапе необходимо считать показания датчиков. При этом необходимо учитывать смещение нуля, которое может быть определено экспериментальным путем, а также масштаб получаемых значений, который необходимо учитывать при переводе в требуемые единицы измерения. В проекте использовались акселерометр ADXL345 и гироскоп ITG-3200.

$$\text{acc} = (\text{float}) (\text{acc\_АЦП} - \text{acc\_смещ}) * \text{acc\_масш}; \quad (3)$$

$$\text{gyro} = (\text{float}) (\text{gyro\_АЦП} - \text{gyro\_смещ}) * \text{gyro\_масш}; \quad (4)$$

Объединить показания двух датчиков можно, используя различные способы, рассмотрим несколько из них:

Наиболее очевидный метод объединения показаний датчиков может выглядеть следующим образом:

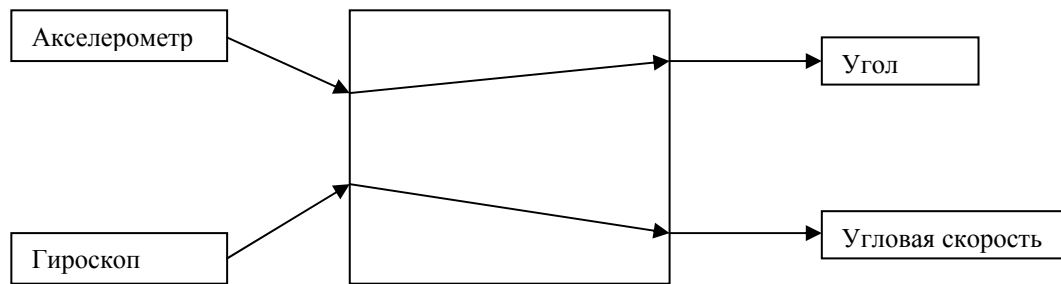


Рис. 1. Метод прямого считывания показаний датчиков

Акселерометр используется для определения углов Эйлера (2), гироскоп используется для определения угловой скорости.

Данный метод является интуитивно понятным, его легко запрограммировать, при этом стоит отметить, что гироскоп обеспечивает быстрое и точное измерение угловой скорости. Однако данному методу присущ очень серьезный недостаток – высокий уровень шума.

Также данный метод обладает большой погрешностью определения угла при внешнем

воздействию, как у же упоминалось выше. Так, вдоль оси X любое воздействие будет трактоваться как изменение угла. Допустим, что платформа горизонтальна, но двигатели заставляют ее двигаться с ускорением. Один акселерометр не сможет отличить это от действия силы тяжести к наклоненной платформе,

Следующий метод назовем «быстрая коррекция» – применение фильтра низких частот к показаниям акселерометра

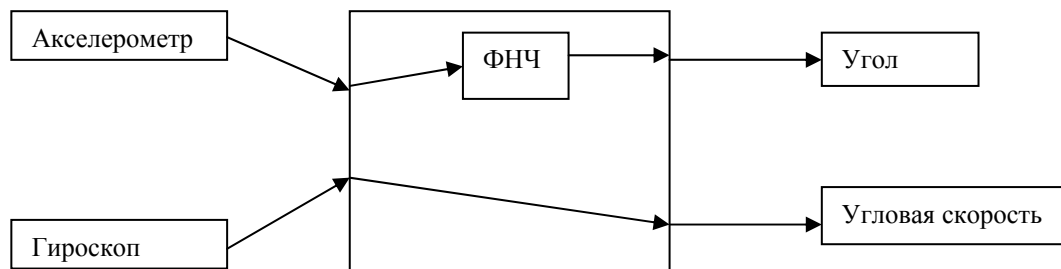


Рис. 2. Метод с применением ФНЧ к показаниям акселерометра

Метод похож на предыдущий, однако показания акселерометра в данном случае преобразуются с помощью фильтра низких частот.

К достоинствам предыдущего метода, т. е. простоте понимания и относительной простоте разработки программы можно добавить некоторое улучшение характеристик, связанное с тем, что отфильтровываются кратковременные ускорения. Однако, при длительном ускоренном дви-

жении, вычисленные углы не будут являться адекватными; кроме того, измерение угла будет отставать из-за необходимости усреднения результата. Чем больше будет ширина окна фильтра, тем больше будет отставание, что отрицательно сказывается на стабильности системы.

Как указывалось выше, для построения инерциальной навигационной системы может использоваться всего один датчик – гироскоп.

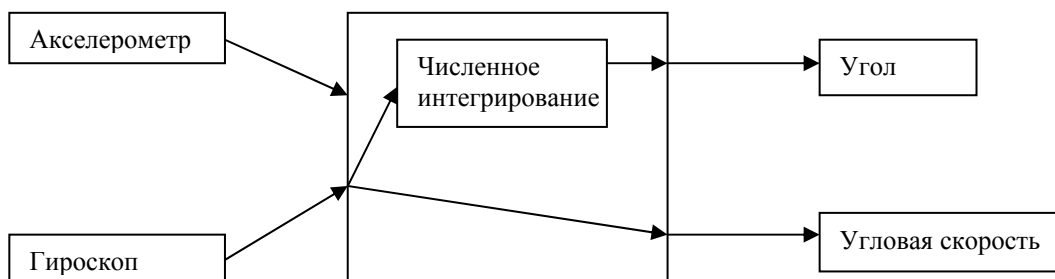


Рис. 3. Метод обработки данных только с гироскопа

При этом угол определяется методом интегрирования (5).

$$\text{угол} = \text{угол} + \text{гиро} * dt, \quad (5)$$

где гуго – считанные показания гироскопа.

Очевидно, что так как результат вычисляется с использованием накопления, требуется задать начальные условия, например, «платформа горизонтальна» или любое другое положение платформы робота, относительно которого в дальнейшем будет вычисляться отклонение. Задание подобных начальных условий может стать непростой задачей в любой обстановке, кроме лабораторной, что в конечном итоге скажется на результате. Кроме того, данному методу присуще накопление ошибки в процессе интегрирования. Дрейф нуля акселерометра также внесет свой вклад в итоговую ошибку. К достоинствам данного подхода можно отнести необходимость использования только одного датчика, простоту программи-

рования, а также малое время отклика системы, что является немаловажным при проектировании систем управления на базе встраиваемых систем [5, 6].

Таким образом, анализируя систему управления на базе инерциальных датчиков, можно отметить, что в случае использования гироскопа точность снижается из-за дрейфа нуля и накопления ошибок интегрирования, акселерометр оказывается чувствительным к внешним воздействиям. Объединив показания двух датчиков с помощью простого комплементарного фильтра (6), можно избавиться от перечисленных выше недостатков:

$$\text{угол} = K * (\text{угол} + \text{гиро} * dt) + (1-K) * (\text{асс}). \quad (6)$$

Здесь асс – показания, считанные с акселерометра; гуго – показания, считанные с гироскопа.

Структурная схема системы будет выглядеть следующим образом.

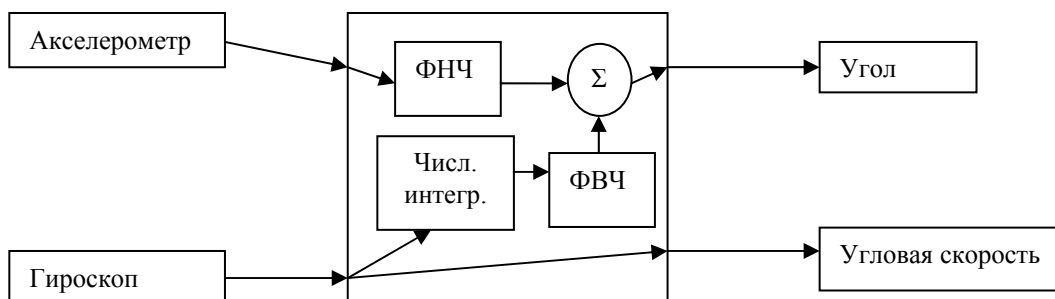


Рис. 4. Метод с применением комплементарного фильтра

Итоговая величина угла наклона здесь определяется как сумма интегрированного значения гироскопа и мгновенного значения акселерометра, причем значения датчиков используются с определенными весами.

Рассмотренные первые три варианта построения инерциальной системы навигации могут применяться для малоподвижных нединамичных систем. Например, при мониторинге зданий и сооружений, измерения динамики наклона стен, опор мостов (и т. д.), в самом простом случае может использоваться один акселерометр. В случае с мобильным роботом гораздо более эффективным является совместное использование двух датчиков.

Авторами при разработке системы навигации мобильного робота-гексапода был использован подход комплементарной фильтрации данных с акселерометра, пропущенных через фильтр низких частот, и интегрированных данных гироскопа, обработанных фильтром высоких частот (рис. 4).

При разработке мобильного робота были использованы:

- микрокомпьютер Raspberry Pi 3;
- плата расширения Multiservo Shield;
- 18 сервоприводов MG996R
- акселерометр ADXL345;
- гироскоп ITG-3200.

Фотографии разработанного устройства приведены на рис. 5, а и 5, б.



а



б

Рис. 5. Внешний вид разработанного мобильного робота-гексапода

Испытание разработанной системы дало удовлетворительные результаты. Стоит отметить, что конструкция была разработана и напечатана на 3D-принтере кафедрой ЭВМ и систем ВолгГТУ магистрантом кафедры А. Л. Качаловым в рамках подготовки выпускной работы бакалавра в 2017 году.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Егунов, В.А. Трехуровневая архитектура мобильных робототехнических комплексов / В.А. Егунов, М.И. Потапов // Известия ВолгГТУ. Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». Вып. 13 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – № 4 (91). – С. 159–161.
2. Synthesis of Control Algorithm and Computer Simulation of Robotic Manipulator-Tripod / И.А. Несмиянов, В.В. Жога, В.Н. Скаунов, С.Е. Терехов, В.А. Егунов, Н.С. Воробьева, В.В. Дяшкин-Титов, Ф.А.Х. Аль-Хадша // Creativity in Intelligent Technologies and Data Science. CIT&DS 2015 : First Conference (Volgograd, Russia, September 15–17, 2015) : Proceedings / ed. by A. Kravets, M. Shcherbakov, M. Kultsova, O. Shabalina. – [Switzerland] : Springer International Publishing, 2015. – P. 391–403. – (Ser. Communications in Computer and Information Science. Vol. 535).
3. Егунов, В.А. Об использовании линейных преобразований в управлении мобильным роботом / В.А. Егунов, С.В. Артюх // Известия ВолгГТУ. Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». Вып. 17 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – № 14 (117). – С. 82–84.
4. Егунов, В.А. Разработка мобильного робота с навигационной системой на базе одометрии / В.А. Егунов, А.А. Лебедь // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий (ИНФО-2013) : мат-лы X Междунар. науч.-практ. конф., г. Сочи, 1–10 окт. 2013 г. / МИЭМ НИУ ВШЭ [и др.]. – М., 2013. – С. 417–418.
5. Егунов, В.А. Моделирование системы управления на базе микроконтроллера / В.А. Егунов, А.Р. Джакияев // Известия ВолгГТУ. Сер. «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». – Волгоград, 2015. – № 2 (157). – С. 24–27.
6. Егунов, В.А. Robotic Complex Central Processing Node Performance Requirements Assessment / В.А. Егунов, С.И. Кириносенко, А.Е. Андреев // World Applied Sciences Journal (WASJ). – 2013. – Vol. 24, Spec. Issue 24 : Information Technologies in Modern Industry, Education & Society. – С. 37–42.

УДК 519.8

В. А. Кобышев

КАЧЕСТВЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ  
С ТРЕМЯ ОСОБЫМИ ТОЧКАМИ

Волгоградский государственный технический университет

Kobyshev40@mail.ru

В статье предлагается метод построения области, содержащей предельный цикл на фазовой плоскости динамической системы, обладающей тремя особыми точками.

**Ключевые слова:** математическая модель, динамическая система, фазовая плоскость, особая точка, предельный цикл, системный анализ.

V. A. Kobyshev

A QUALITATIVE RESEARCH OF A DYNAMIC SYSTEM  
WITH THREE SINGULAR POINTS

Volgograd State Technical University

The article proposes a method of constructing a region containing a limit cycle in a phase plane of a dynamic system with three singular points.

**Keywords:** mathematical model, dynamic system, phase plane, singular point, limit cycle, system analysis.

При исследовании технического объекта используют математическую модель, которая описывает его характерные свойства [3].

Качественные свойства дифференциальных уравнений имеют важное значение в таких областях, как системный анализ и математическое моделирование. Рассмотрение структуры фазового пространства является актуальной задачей в указанных областях. Рассмотрим математическую модель колебательного процесса, задаваемого дифференциальным уравнением вида:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + f(x)\frac{dx}{dt} + g(x) = 0.$$

Произведем замену переменных, предложенную Льенаром [1], [2]:

$$\frac{dx}{dt} = v, \quad y = v + F(x),$$

где  $F(x) = \int_0^x f(x)dx$ .

Приходим к динамической системе

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = y - F(x) \\ \frac{dy}{dt} = -g(x) \end{cases} \quad (1)$$

Поставим вопрос о существовании у системы (1) предельных циклов.

**Теорема.** Система (1) имеет предельный цикл, если выполнены следующие условия:

1) условия существования и единственности решения при любых значениях  $x$  и  $y$ ;

2)  $F(x)$  и  $g(x)$  – нечетные функции, такие, что  $xF(x) > 0$  при  $|x| > 0$ , а  $xg(x) > 0$  при  $|x| > M$  и  $xg(x) < 0$  при  $|x| < M$ , где  $M = \text{const} > 0$ ;

$$3) \int_0^x g(x)dx \xrightarrow{x \rightarrow \infty} +\infty;$$

4)  $F(x)$  однозначно определена в интервале  $-\infty < x < +\infty$  и, кроме того, существует такое число  $K > 0$ , что  $\begin{cases} F(x) \geq K, & \text{если } x > M, \\ F(x) \leq -K, & \text{если } x < -M; \end{cases}$

5) функции  $g(x)$  и  $F(x)$  обладают производными любого порядка в окрестностях точек  $(0;0)$ ,  $(-M;F(-M))$ ,  $(M;F(M))$ , причем  $F'(M) < 0$ ;

6) нет траекторий, для которых точка  $(0; 0)$  была бы и  $\alpha$ - и  $\omega$ -предельной.

**Доказательство**

Заметим, что система (1) имеет три особые точки:  $(0;0)$ ,  $(-M;F(-M))$ ,  $(M;F(M))$ . Действительно, так как функции  $F(x)$  и  $g(x)$  непрерывны, то из условия (2) теоремы следует, что  $F(0) = 0$ ,  $g(0) = 0$ ,  $g(-M) = 0$ ,  $g(M) = 0$ . Отсюда следует, что правые части системы (1) обращаются в нуль в вышеуказанных точках.

Далее, так как  $F(x)$  непрерывна на промежутке  $-M \leq x \leq M$ , то можно найти такое положительное число  $D$ , что  $|F(x)| < D$  для  $-M \leq x \leq M$ ; кроме того будем предполагать,

что  $D > K$  и  $-D < -K$ . Изучим поведение интегральных дуг, начинающихся в точках прямой  $x = 0$  и имеющих ординаты, превосходящие по абсолютной величине  $D$ .

Рассмотрим сначала точку  $P$  на прямой  $x = 0$ , ордината которой  $y_P > D$  (рис. 1). Пусть сначала  $t$  меняется в отрицательном направлении. Так как для  $-M \leq x \leq 0$   $\frac{dx}{dt} = y - F(x) > \gamma > 0$ ,  $\frac{dy}{dt} = -g(x) \leq 0$  (здесь  $\gamma$  — некоторое положительное число), то при убывании  $t$  интегральная кривая пойдет вверх налево и вследствие наличия неравенства  $\frac{dx}{dt} = y - F(x) > \gamma$  выйдет на прямую  $x = -M$

в некоторой точке  $U$ . Пусть теперь  $t$  меняется в положительном направлении, тогда в полосе  $0 \leq x \leq M$  будем иметь  $\frac{dx}{dt} = y - F(x) > \beta > 0$ ,

$\frac{dy}{dt} = -g(x) \geq 0$  (здесь  $\beta$  — положительное число). Отсюда видим, что при положительном изменении  $t$  интегральная кривая пойдет вверх направо и вследствие наличия неравенства  $\frac{dx}{dt} = y - F(x) > \beta$  выйдет на прямую  $x = M$  в некоторой точке  $Q$ . Если теперь  $t$  возрастает, то в начале движения  $\frac{dx}{dt} > 0$ ,  $\frac{dy}{dt} < 0$  и, следовательно, интегральная кривая пойдет направо вниз. Эта кривая обязательно достигнет графика функции  $F(x)$ . Действительно,

$\frac{dy}{dx} = \frac{-g(x)}{y - F(x)}$  и так как вдоль интегральной кривой, пока она выше графика функции  $y = F(x)$ , знаменатель дроби положителен, функция  $g(x)$  положительна,  $F(x) \geq K$ ,  $y$  убывает, то есть любое  $y < y_Q$ , то  $\frac{dy}{dx} < -\frac{g(x)}{y_Q - K}$ .

Интегрируя в пределах от  $M$  до  $x$ , получим неравенство  $y - y_Q < -\frac{1}{y_Q - K} \int_M^x g(x) dx$  или

$$y < y_Q - \frac{1}{y_Q - K} \int_M^x g(x) dx, \quad (2)$$

причем  $\int_M^x g(x) dx \xrightarrow{x \rightarrow \infty} +\infty$  согласно условию 3 теоремы.

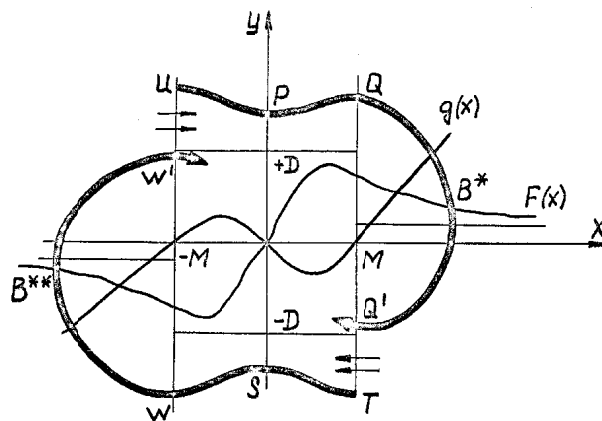


Рис. 1

Допустим теперь, что при  $x \rightarrow \infty$  интегральная кривая остается выше графика  $F(x)$ . Тогда неравенство (2) должно соблюдаться для всех  $x$ , что невозможно, так как при достаточно

большом  $x$  правая часть неравенства (2) становится отрицательной. Итак, интегральная дуга, вышедшая из  $Q$ , достигает графика функции  $y = F(x)$  в некоторой точке  $B^*$  и, согласно равенству  $\frac{dy}{dx} = \frac{-g(x)}{y - F(x)}$ , будет иметь в этой точке

касательную, направленную вертикально вниз. При дальнейшем продолжении интегральная кривая будет находиться ниже графика  $y = F(x)$ , никогда не выходя на этот график. Так как для точек, расположенных ниже  $F(x)$ ,  $\frac{dx}{dt} < 0$ ,  $\frac{dy}{dt} < 0$ , то интегральная кривая будет двигаться влево вниз и через некоторый промежуток времени она пересечет прямую  $x = M$  в некоторой точке  $Q'$ , расположенной ниже графика  $y = F(x)$ .

Рассмотрим теперь точку  $S$  на оси  $y$ , расположенную ниже прямой  $y = -D$ , ордината которой  $y_S < y_{Q'}$ . Проведем через эту точку траекторию. Так как при  $0 \leq x \leq M$   $\frac{dx}{dt} = y - F(x) < -\delta$ ,  $\delta > 0$ ,  $\frac{dy}{dx} = -g(x) \geq 0$ , то при убывании  $t$  интегральная кривая будет идти направо вниз и вследствие неравенства  $\frac{dx}{dt} = y - F(x) < -\delta < 0$  пересечет прямую  $x = M$  в некоторой точке  $T$ , ордината которой  $y_T < y_{Q'}$ . При возрастании  $t$  в полосе  $-M \leq x \leq 0$  след-

ствие наличия неравенств  $\frac{dx}{dt} = y - F(x) < -\sigma < 0$ ,

$\sigma > 0$ ,  $\frac{dy}{dt} = -g(x) \leq 0$  интегральная кривая будет двигаться влево вниз и пересечет прямую  $x = -M$  в некоторой точке  $W$ . Пусть далее опять время  $t$  возрастает. Тогда в начале движения  $\frac{dx}{dt} = y - F(x) < 0$ ,  $\frac{dy}{dt} = -g(x) > 0$  и, следовательно, интегральная кривая пойдет влево вверх. Эта кривая обязательно достигнет графика функции  $F(x)$ . В самом деле,

$$\frac{dy}{dx} = \frac{-g(x)}{y - F(x)},$$

и так как вдоль интегральной кривой, пока она ниже графика  $y = F(x)$ , знаменатель дроби отрицателен,  $g(x)$  отрицательна,  $F(x) \leq -K$  и  $y$  возрастает, то есть любое  $y > y_W$ , то  $\frac{dy}{dx} > \frac{-g(x)}{y_W + K}$ . Интегрируя в пределах от  $-M$  до  $x$ , получим неравенство

$$y - y_W > -\frac{1}{y_W + K} \int_{-M}^x g(x) dx \text{ или}$$

$$y > y_W - \frac{1}{y_W + K} \int_{-M}^x g(x) dx, \quad (3)$$

причем  $\int_0^x g(x) dx \xrightarrow{x \rightarrow \infty} +\infty$  согласно условиям

2 и 3 теоремы.

Допустим теперь, от противного, что при  $x \rightarrow -\infty$  интегральная дуга остается ниже графика  $F(x)$ . Тогда неравенство (3) должно соблюдаться для всех отрицательных  $x$ , однако это невозможно, так как при достаточно большом  $|x|$  правая часть неравенства (3) становится положительной. Итак, интегральная дуга, вышедшая из точки  $W$ , достигает графика  $y = F(x)$  в некоторой точке  $B^{**}$  и, согласно равенству

$\frac{dy}{dx} = \frac{-g(x)}{y - F(x)}$ , будет иметь в этой точке касательную, направленную вертикально вверх. При дальнейшем продолжении интегральной кривая будет находиться выше графика функции  $y = F(x)$ , никогда не выходя на этот график. Так как для точек, расположенных выше графика функции  $y = F(x)$ ,

$\frac{dx}{dt} = y - F(x) > 0$ ,  $\frac{dy}{dt} = -g(x) > 0$ , то интегральная кривая будет двигаться направо вверх и че-

рез некоторый промежуток времени она пересечет прямую  $x = -M$  в некоторой точке  $W'$  выше графика  $y = F(x)$ . Возможно одно из двух расположений построенных нами интегральных дуг  $UPQQ'$  и  $TSWW'$ . Именно, точка  $W'$  может оказаться ниже или выше точки  $U$ .

Если точка  $W'$  окажется ниже точки  $U$ , то построенные дуги и отрезки  $Q'T$  и  $W'U$  образуют область  $G$ , в которую положительные полутраектории могут только входить. В самом деле, отрезок  $Q'T$  расположен в полуплоскости

$x > 0$  и  $\frac{dx}{dt} = y - F(x) < 0$  на нем, а отрезок  $W'U$  расположен в полуплоскости  $x < 0$  и  $\frac{dx}{dt} = y - F(x) > 0$  на нем.

Рассмотрим теперь второе возможное расположение точки  $W'$  выше точки  $U$ . Тогда продолжаем положительную полутраекторию из точки  $W'$  до пересечения с осью  $y$ . Пусть эта точка пересечения будет  $P'$  (рис. 2). Рассмотрим область, ограниченную дугами  $PQQ'$ ,  $TWW'P'$ , отрезками оси  $y$   $PP'$  и  $Q'T$ . Положительные полутраектории могут войти в эту область только через отрезок  $Q'T$ , и их дальнейшие продолжения остаются внутри этой области или могут выйти из нее через отрезок  $PP'$ , то есть в этом случае попадают на положительную часть оси  $y$  в точке, расположенной ниже, чем  $P'$ . Действительно, на отрезке  $PP'$  имеем:

$$\frac{dx}{dt} = y - F(0) > 0$$

и, следовательно, при возрастании  $t$   $x$  тоже возрастает.

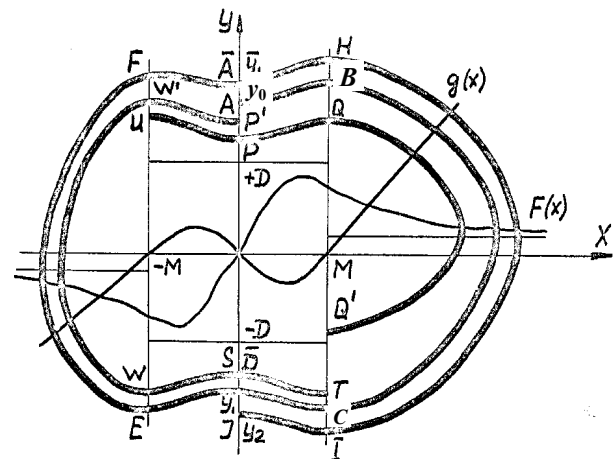


Рис. 2

В качестве точки  $A$  мы теперь выберем точку, расположенную выше  $P'$ . Обозначим ординату точки  $A$  через  $y_0$ . Положительная полутраектория  $f(A, t)$  будет вести себя аналогично построенным предохранительным дугам и, следовательно, выйдя из точки  $A$ , она пересечет  $x = M$  в точке  $B$ , снова вернется на  $x = M$  в точке  $C$ . Далее пересечет ось  $y$  в точке  $\bar{D}$ , ординату которой обозначим  $y_1$ , затем пересечет прямую  $x = -M$  в точке  $E$ , снова вернется на нее в точке  $F$ , наконец, вернется на ось  $y$  в точке  $\bar{A}$ , ординату которой обозначим  $\bar{y}_1 > D$ . Докажем, что в этом случае  $\bar{y}_1 < y_0$ .

Если точка  $C$ , расположенная ниже точки  $Q'$ , окажется на  $TQ'$ , то положительная полутраектория войдет в область, ограниченную дугами траекторий  $PQQ'$  и  $TSWW'P'$ , а также отрезками оси  $y$   $PP'$  и отрезком  $Q'T$  прямой  $x = M$ . Далее, либо полутраектория останется внутри этой области, либо снова пересечет ось  $y$  ниже  $P'$ , то есть ниже, чем  $A$ .

Допустим теперь, что точка  $C$  оказалась ниже точки  $T$ , и пусть, вопреки доказываемому, точка  $\bar{A}$  оказалась выше точки  $A$ . Пусть  $H$  – точка пересечения нашей полутраектории с прямой  $x = M$ . Точку вторичного пересечения с ней обозначим  $I$ , а точку пересечения с осью  $y$  – через  $J$ , и пусть ее ордината есть  $y_2$ . Со-

гласно нашему предположению,  $y_2 < y_1 < 0$ . Рассмотрим на плоскости  $x, y$  семейство вложенных друг в друга замкнутых кривых, окружающих начало координат:

$$\lambda(x, y) = \frac{1}{2}y^2 + \int_0^x g(x)dx = C.$$

Возрастанию  $C$  соответствует переход от внутренних к внешним кривым семейства.

Подсчитаем изменение параметра  $\lambda$  вдоль интегральных кривых. Вдоль интегральной кривой имеем:

$$\frac{d\lambda}{dy} = \frac{\partial \lambda}{\partial y} + \frac{\partial \lambda}{\partial x} \frac{dx}{dy} = y + g(x) \frac{y - F(x)}{-g(x)} = F(x).$$

Обозначим через  $\lambda_R$  значение параметра на кривой семейства  $\lambda(x, y) = C$ , проходящей через точку  $R$ . Имеем:

$$\lambda_C - \lambda_B = \int_B^C F(x)dy = - \int_C^B F(x)dy \leq -k(y_B - y_C),$$

$$\lambda_F - \lambda_E = \int_E^F F(x)dy \leq -k(y_F - y_E).$$

Чтобы подсчитать изменения параметра  $\lambda$  на остальных участках, покажем сначала, что изменения  $\lambda$ , а значит и изменения  $y$  вдоль интегральной кривой на участках в каждой из полос  $0 < x < M$ ,  $-M < x < 0$  ограничены. В самом деле,

$$\frac{d\lambda}{dx} = \frac{\partial \lambda}{\partial y} \frac{dy}{dx} + \frac{\partial \lambda}{\partial x} = y \frac{dy}{dx} + g(x) = y \frac{-g(x)}{y - F(x)} + g(x) = \frac{-g(x)F(x)}{y - F(x)}$$

вдоль интегральной кривой.

Рассмотрим дуги  $PQ$ ,  $TS$ ,  $SW$ ,  $UP$  и определим постоянные  $L_{PQ}$ ,  $L_{TS}$ ,  $L_{SW}$ ,  $L_{UP}$  составленные одним и тем же способом, например:

$$L_{PQ} = \int_P^Q \frac{g(x)F(x)}{|y_{PQ} - F(x)|} dx. \text{ Пусть } L_1 \text{ равно наи-}$$

большей из этих четырех постоянных. Тогда

$$|\lambda_B - \lambda_A| = \left| \int \frac{-g(x)F(x)}{y_{AB} - F(x)} dx \right| \leq L_1, \text{ потому}$$

что  $y_{AB} > y_{PQ}$  и, следовательно,

$$|y_{PQ} - F(x)| \leq |y_{AB} - F(x)|.$$

Итак,  $L_1$  ограничивает по абсолютной величине изменения  $\lambda$  вдоль любой интегральной дуги, проходящей в полосе  $-M \leq x \leq M$  вне области, ограниченной предохранительны-

ми дугами, а тогда изменение  $y$  вдоль подобных интегральных дуг тоже ограничено. Действительно,  $\bar{\lambda} - \bar{\bar{\lambda}} = \frac{1}{2}\bar{y}^2 - \frac{1}{2}\bar{\bar{y}}^2 + \int_0^{\bar{x}} g(x)dx - \int_0^{\bar{\bar{x}}} g(x)dx$

$$\text{или } \bar{y}^2 - \bar{\bar{y}}^2 = 2(\bar{\lambda} - \bar{\bar{\lambda}}) + 2 \int_{\bar{\bar{x}}}^{\bar{x}} g(x)dx. \text{ Следова-}$$

тельно,  $|\bar{y}^2 - \bar{\bar{y}}^2| \leq 2|\bar{\lambda} - \bar{\bar{\lambda}}| + 4M \max |g(x)| \leq 2L_1 + 4M \max |g(x)|$ , то есть

$$|\bar{y} - \bar{\bar{y}}| \leq \frac{2L_1 + 4M \max |g(x)|}{|\bar{y} + \bar{\bar{y}}|}.$$

Так как на каждой из исследуемых дуг  $\bar{y}$  и  $\bar{\bar{y}}$  – одинаковых знаков и превосходят по абсолютной величине  $D$ , то

$$|\bar{y} - \bar{\bar{y}}| \leq \frac{2L_1 + 4M \max |g(x)|}{2D} = N.$$



Обозначим через  $\lambda_1$  значение параметра  $\lambda$  в точке с ординатой  $y_1$ , а через  $\lambda_2$  значение параметра  $\lambda$  в точке с ординатой  $y_2$ . Тогда, с одной стороны,  $\lambda_2 > \lambda_1$ , а, с другой стороны, разность  $\lambda_2 - \lambda_1$  может быть оценена с помощью сложения неравенств:

$$\lambda_E - \lambda_1 \leq L_1, \lambda_F - \lambda_E \leq -k(y_F - y_E) < -ky_0,$$

$$\lambda_H - \lambda_F \leq 2L_1,$$

$$\lambda_I - \lambda_H \leq -k(y_H - y_I) < -ky_0, \lambda_2 - \lambda_I \leq L_1.$$

Складывая все эти неравенства, получим:

$$\begin{aligned} \lambda_E - \lambda_1 + \lambda_F - \lambda_E + \lambda_H - \lambda_F + \lambda_I - \lambda_H + \lambda_2 - \lambda_I < \\ < L_1 + 2L_1 - ky_0 - ky_0 + L_1, \\ \lambda_2 - \lambda_1 < 4L_1 - 2ky_0. \end{aligned}$$

Следовательно, если  $y_0 > \frac{2L_1}{K}$ , то

$$\lambda_2 - \lambda_1 < 0, \text{ то есть } \lambda_2 < \lambda_1.$$

Полученное противоречие показывает, что если  $y_0 > \frac{2L_1}{K}$ , то  $\bar{y}_1 < y_0$ . Если же это так, то интегральная кривая, выходящая из  $y$  в положительном направлении, войдет после точки  $\bar{y}_1$  в ограниченную область, граница которой – дуга интегральной кривой  $y_0\bar{y}_1$  и отрезок оси  $y$  от  $y_0$  до  $y_1$ . Интегральные кривые не могут выйти из этой области, так как через отрезок  $y_0\bar{y}_1$  все интегральные кривые входят в эту область. Обозначим только что построенную область через  $\Gamma$  (рис. 3).

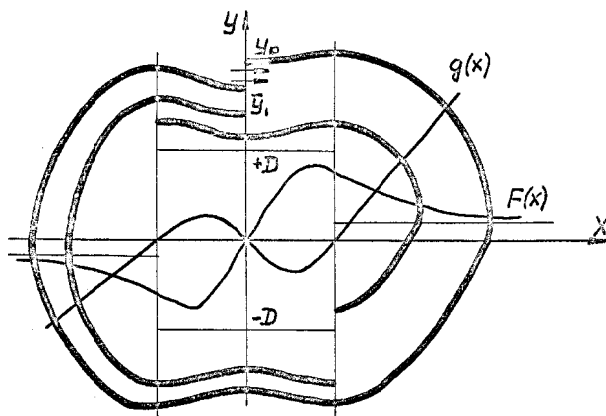


Рис. 3

Итак, можно построить область, в которую интегральные кривые могут входить при воз-

растании времени, а войдя в эту область, покинуть ее при возрастании времени не могут (это области  $G$  и  $\Gamma$ ).

Теперь установим типы особых точек  $(0;0)$ ,  $(-M; F(-M))$ ,  $(M; F(M))$ . Представим исходную систему (1) в виде:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = y - F' \cdot x + F_1(x), \\ \frac{dy}{dt} = -g' \cdot x + g_1(x). \end{cases} \quad (4)$$

Здесь  $F' = F'(0)$ ,  $g' = g'(0)$ , а  $F_1(x)$  и  $g_1(x)$  есть разложения функций  $F(x)$  и  $g(x)$  в окрестности начала координат, начинающиеся со членов не ниже второго порядка. Выясним тип особой точки  $(0; 0)$ , для чего рассмотрим укороченную систему:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = y - F' \cdot x \\ \frac{dy}{dt} = -g' \cdot x \end{cases} \quad (5)$$

Составим характеристическое уравнение и найдем его корни:

$$\begin{vmatrix} -F' - \lambda & 1 \\ -g' & -\lambda \end{vmatrix} = 0,$$

$$\lambda^2 + F' \cdot \lambda + g' = 0, \quad \lambda = \frac{-F' \pm \sqrt{(F')^2 - 4g'}}{2}.$$

Так как  $F'(0) > 0$ , а  $g'(0) < 0$ , то начало координат для системы (5) является особой точкой типа «седло».

Заметим, что поскольку обе функции  $g(x)$  и  $F(x)$  нечетные, то правая часть уравнения  $\frac{dy}{dx} = \frac{-g(x)}{y - F(x)}$  есть функция четная и, следова-

тельно, интегральные кривые ведут себя вблизи симметричных относительно начала координат точек  $(-M; F(-M))$  и  $(M; F(M))$  аналогичным образом. Поэтому достаточно выяснить тип особой точки  $(M; F(M))$ . Для этого введем новые переменные  $\xi$  и  $\eta$ , характеризующие отклонение изображающей точки от состояния равновесия:  $x = M + \xi$ ,  $y = F(M) + \eta$ .

Разлагая в ряды функции  $P(x, y)$  и  $Q(x, y)$  в окрестности точки  $(M; F(M))$  по степеням отклонений  $\xi$  и  $\eta$ , будем иметь:

$$P(x, y) = P(M, F(M)) + P'_x(M, F(M))\xi + P'_y(M, F(M))\eta + P_1(\xi, \eta),$$

$$Q(x, y) = Q(M, F(M)) + Q'_x(M, F(M))\xi + Q'_y(M, F(M))\eta + Q_1(\xi, \eta).$$

Здесь  $P(x, y)$  и  $Q(x, y)$  – это правые части системы (1), то есть  $P(x, y) = y - F(x)$ ,  $Q(x, y) =$

$= -g(x)$ , а  $P_1(\xi, \eta)$  и  $Q_1(\xi, \eta)$  – функции, в которые  $\xi$  и  $\eta$  входят в степени не ниже второй.

$$\begin{aligned} P'_x(M, F(M)) &= -F'(M), \quad P'_y(M, F(M)) = 1, \quad Q'_x(M, F(M)) = -g'(M), \\ Q'_y(M, F(M)) &= 0, \quad P(M, F(M)) = 0, \quad Q(M, F(M)) = 0. \end{aligned}$$

Система (1) примет вид:

$$\begin{cases} \frac{d\xi}{dt} = -F'(M) \cdot \xi + \eta + P(\xi, \eta), \\ \frac{d\eta}{dt} = -g'(M) \cdot \xi + Q_1(\xi, \eta). \end{cases} \quad (6)$$

Отбрасывая в (6) функции  $P_1(\xi, \eta)$  и  $Q_1(\xi, \eta)$ , получим линейную систему с постоянными коэффициентами:

$$\begin{cases} \frac{d\xi}{dt} = -F'(M) \cdot \xi + \eta, \\ \frac{d\eta}{dt} = -g'(M) \cdot \xi. \end{cases} \quad (7)$$

Характеристическое уравнение системы (7) имеет вид:

$$\begin{vmatrix} -F'(M) - \lambda & 1 \\ -g'(M) & -\lambda \end{vmatrix} = 0,$$

или  $\lambda^2 + F'(M)\lambda + g'(M) = 0$ .

Отсюда

$$\lambda = \frac{-F'(M) \pm \sqrt{(F'(M))^2 - 4g'(M)}}{2}.$$

Так как  $g'(M) > 0$ , а  $F'(M) < 0$ , то оба корня либо равны и положительны, когда дискриминант равен нулю, либо комплексно сопряженные с положительной вещественной частью, когда дискриминант меньше нуля. Во всех этих случаях особая точка  $(M, F(M))$  является либо неустойчивым узлом, либо неустойчивым фоку-

сом. В силу сделанных выше замечаний, особая точка  $(-M, F(-M))$  тоже будет либо неустойчивым узлом, либо неустойчивым фокусом. Мы выяснили типы особых точек для уравнений первого приближения. На основании теоремы Пуанкаре заключаем, что особые точки будут того же типа и для исходных уравнений.

Рассмотрим теперь одну из сепаратрис, для которой точка  $(0, 0)$  является  $\alpha$ -предельной. При возрастании времени сепаратриса не может покинуть построенную выше область. Значит, она устойчива по Лагранжу, а следовательно, имеет  $\omega$ -предельные точки. Ни одна из особых точек не может быть  $\Omega$ -предельной, так как точки  $(M, F(M))$  и  $(-M, F(-M))$  неустойчивы, а для точки  $(0, 0)$  это исключено условием теоремы. Отсюда заключаем, что существует замкнутая траектория, которая является  $\Omega$ -предельной для нашей сепаратрисы. Теорема доказана.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Немыцкий, В. В. Качественная теория дифференциальных уравнений / В. В. Немыцкий, В. В. Степанов. – М., Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1949. – 551 с.
2. Трикоми, Ф. Дифференциальные уравнения / Ф. Трикоми. – М.: Издательство иностранной литературы, 1962. – 352 с.
3. Кобышев, В. А. Подход к поиску решения линейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами в задачах моделирования / В. А. Кобышев, А. А. Кобышев // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2015. Т. 23. № 2(157). С. 28–29.

УДК 519.71+ 531.32+62-529+629+ 623.1/.7:623.41

*А. В. Леонард, И. А. Горбов, С. А. Твердохлебов*

#### СИНТЕЗ ЗАКОНОВ ДВИЖЕНИЯ НАЗЕМНЫМ РОБОТОМ ПРИ ОБХОДЕ СТАЦИОНАРНОГО ПРЕПЯТСТВИЯ\*

Волгоградский государственный технический университет

alex-leonard@yandex.ru, gorbovigor34@yandex.ru, tverdohlebov.sergey.vstu@gmail.com

В статье рассматривается вопрос разработки алгоритма для синтеза законов движения системой планирования беспилотного транспортного средства (БТС) при обходе препятствия. Синтез законов движения базируется на использовании интегрального критерия – целевой функции в виде линейной свертки частных показателей с весовыми коэффициентами, которая отражает проектируемую специфику работы БТС.

**Ключевые слова:** локальное планирование движения БТС, вариационное исчисление, база знаний робота, недетерминированная среда.

*A. V. Leonard, I. A. Gorbov, S. A. Tverdokhlebov*

# SYNTHESIS MOTION LAWS BY GROUND ROBOT WHEN IT OVERCOMING AN STATIC OBSTACLE

**Volgograd State Technical University**

The article deals with the algorithm of the motion law synthesis by the unmanned vehicle planning system while robot overcoming an obstacle. The synthesis of motion laws is based on the using the integral criterion-the objective function in the linear convolution form of partial indices with weight coefficients that reflects the projected specificity the unmanned vehicle work.

**Keywords:** local motion planning, unmanned vehicle, calculus of variations, robot knowledge base, nondeterministic environment.

## Введение

При планировании своего движения робот должен:

1. Иметь возможность получать от оператора цель своего движения.

2. Быть способным оценить состояние окружающей среды, в которой он находится, что достигается за счет использования необходимого числа сенсоров (датчиков) [1], интегрированных в систему управления.

3. В соответствии с целью своего движения и состоянием окружающей среды самостоятельно осуществить планирование движения на основе, заложенной в его бортовой или удаленной части системы управления, базы знаний (алгоритмов) [2].

В этом смысле можно говорить об интеллектуализации транспортного средства, как о способности им самостоятельно перемещаться [3], [4], [5], [6] в не детерминированной среде.

На сегодняшний день исследования по планированию движения роботов ведутся многими научными коллективами. Предлагаются различные методы: на основе графов видимости, диаграмм Вронского, неинформированный поиск, эвристический поиск, Алгоритм Lifelong Planning A\*, Visibility PRM, Vertex Enhancement, Нить Ариадны, Rapidly-Exploring random trees, RRT и др. Но аналитический обзор литературных источников порядка 300-сот наименований [7] (в том числе по запросам в отечественной наукометрической базе elibrary) показывает, что предлагаемые методы ориентированы на синтез пути следования робота в детерминированной (не детерминированной) среде, а вопрос реализации этих траекторий по

существо не затрагивается. Иными словами в этих методах (сэмплирования, дискретизации пространства сцены) задача планирования движения в лучшем случае сводится к постановке оптимизационной задачи с целевой функцией, но эта функция во многих работах соответствует минимальной длине маршрута и (или) максимальной удаленности перемещаемого объекта от препятствий. А формирующиеся траектории, на основе этих методов, за исключением методов гравитирующих сил (потенциальных полей) [8], представляют собой кусочные функции с разрывами первого рода. Что на практике, даже если законы движения будут сформированы другими подходами, проблематично реализуемо [9] или потребует дополнительных мер по сглаживанию маршрута [10]. Поэтому задача комплексного планирования движения: совместного формирования законов движения и изначально гладкой траектории, огибающей препятствия, является актуальной задачей и обладает определенной новизной.

В данной работе авторы ставят задачу: разработать метод оптимального планирования законов движения БТС для обхода протяженных статичных препятствий в заранее недетерминированной среде, если робот моделируется материальной точкой на плоскости.

## 1. Теоретическая проработка метода

Формирование начальной базы знания БТС. Действия оператора:

1. Выбирает одну из возможных целевых функций [11], [12], [13] – критерий, отражающий будущую специфику поведения робота при обходе препятствия из пункта старта в пункт назначения:

$$I = k_1 \int_0^{\tau} (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) dt - k_2 \int_0^{\tau} (\sqrt{x^2 + y^2} - R) dt + k_3 \int_0^{\tau} (\ddot{x}^2 + \ddot{y}^2) dt \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $x, y$  – координаты;  $\dot{x}, \dot{y}, \ddot{x}, \ddot{y}$  – линейные скорости и ускорения в декартовой системе ко-

ординат центра масс (характерной точки корпуса);  $R$  – расстояние от начала системы коор-

динат до границы препятствия, моделируемого на плоскости окружностью;  $\tau$  – времени следования из пункта старта в пункт назначения характерной точки корпуса;  $k_{1(2,3)}$  – весовые коэффициенты, отражающие значимость частных показателей.

По критерию (1) робот должен быть способен минимизировать квадрат скорости, квадрат ускорения и максимизировать расстояние до препятствия [14], [15] в каждый момент времени синтезируемого движения.

2. Задаются условиями экстремума соответствующего порядка в виде уравнений Эйлера – Пуассона [16], [17], [18], [19]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Phi}{\partial x} - \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}} \right) + \frac{d^2}{dt^2} \left( \frac{\partial \Phi}{\partial \ddot{x}} \right) = 0, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial y} - \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{y}} \right) + \frac{d^2}{dt^2} \left( \frac{\partial \Phi}{\partial \ddot{y}} \right) = 0, \end{cases} \quad (2)$$

откуда определяются оптимальные законы движения в дифференциальной форме:

$$\begin{cases} x^{IV} = \frac{k_1}{k_3} \ddot{x} + \frac{k_2}{2k_3} (x^2 + y^2)^{-0.5} x; \\ y^{IV} = \frac{k_1}{k_3} \ddot{y} + \frac{k_2}{2k_3} (x^2 + y^2)^{-0.5} y. \end{cases} \quad (4)$$

3. Программирует дифференциальные уравнения (4) и методы их численного интегрирования или расчета постоянных интегрирования для аналитической формы в системе самоуправления робота (базе знаний робота);

4. Задаёт возможность ввода начальных или граничных условий по четыре для каждого уравнения (4) из 16 возможных:  $x_0, y_0, \dot{x}_0, \dot{y}_0, \ddot{x}_0, \ddot{y}_0, \ddot{x}_\tau, \ddot{y}_\tau, \dot{x}_\tau, \dot{y}_\tau, \ddot{x}_\tau, \ddot{y}_\tau$ , и время  $\tau$ , тем самым определяя роботу цель его движения в недетерминированных условиях;

5. Кодирует алгоритм определения параметра  $R$  по значениям расстояний до поверхности препятствия, поступающих от лазерных дальномеров;

6. Например, для цели движения – перемещения из пункта расположения в пункт назначения:  $\tau, x_0, y_0, \dot{x}_0, \dot{y}_0, x_\tau, y_\tau, \dot{x}_\tau, \dot{y}_\tau$ , программирует метод выбора коэффициентов  $k_{1(2,3)}$  и определения начальных параметров

где

$$\Phi = k_1 (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) - k_2 (\sqrt{x^2 + y^2} - R) + k_3 (\ddot{x}^2 + \ddot{y}^2).$$

3. Осуществляет преобразования:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial x} &= -k_2 (x^2 + y^2)^{-0.5} x; \quad \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}} = 2k_1 \dot{x}; \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \ddot{x}} &= 2k_3 \ddot{x}; \quad \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}} \right) = 2k_1 \ddot{x}; \\ \frac{d^2}{dt^2} \left( \frac{\partial \Phi}{\partial \ddot{x}} \right) &= 2k_3 x^{IV}; \\ \frac{\partial \Phi}{\partial y} &= -k_2 (x^2 + y^2)^{-0.5} y; \quad \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{y}} = 2k_1 \dot{y}; \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \ddot{y}} &= 2k_3 \ddot{y}; \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{y}} \right) &= 2k_1 \ddot{y}; \quad \frac{d^2}{dt^2} \left( \frac{\partial \Phi}{\partial \ddot{y}} \right) = 2k_3 y^{IV}, \end{aligned} \quad (3)$$

$\ddot{x}_0, \ddot{y}_0, \ddot{x}_\tau, \ddot{y}_\tau$ , необходимых для интегрирования уравнений (4), траектория которых не пересекает обнаруженное препятствие.

В результате предложенной последовательности действий оператора осуществляется перенос функций планирования движения в систему управления робота. Робот становится способным планировать свое движение самостоятельно.

Действия БТС в соответствии с запрограммированной базой знания:

В процессе движения БТС лазерные дальноммеры с заданным интервалом времени осуществляют поиск препятствия перед роботом.

1. По заданной оператором системе уравнений (4), соответствующих целевой функции (1) и цели движения, например, переместится из пункта А в пункт В:  $x_0, y_0, \dot{x}_0, \dot{y}_0, x_\tau, y_\tau, \dot{x}_\tau, \dot{y}_\tau$ , за время  $\tau$ , осуществляет построение законов движения. Если препятствие до начала движения не обнаружено, то в дифференциальных уравнениях (4):  $k_2 = 0$ , тогда

$$\begin{cases} x^{IV} = \frac{k_1}{k_3} \ddot{x}; y^{IV} = \frac{k_1}{k_3} \ddot{y} \Leftrightarrow \\ \begin{cases} x = A_1 + A_2 t + A_3 e^{\sqrt{\frac{k_1}{k_3}} t} + A_4 e^{-\sqrt{\frac{k_1}{k_3}} t}; \\ y = B_1 + B_2 t + B_3 e^{\sqrt{\frac{k_1}{k_3}} t} + B_4 e^{-\sqrt{\frac{k_1}{k_3}} t} \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

В соответствии с целью движения система управления БТС должна рассчитать  $A_i$ ,  $B_j$  согласно следующим системам уравнений

$$\begin{cases} x_0 = A_1 + A_3 + A_4; \\ x_\tau = A_1 + A_2\tau + A_3e^{\sqrt{\frac{k_1}{k_3}}\tau} + A_4e^{-\sqrt{\frac{k_1}{k_3}}\tau}; \\ \dot{x}_0 = A_2 + A_3\sqrt{\frac{k_1}{k_3}} - A_4\sqrt{\frac{k_1}{k_3}}; \\ \dot{x}_\tau = A_2 + A_3\sqrt{\frac{k_1}{k_3}}e^{\sqrt{\frac{k_1}{k_3}}\tau} - \sqrt{\frac{k_1}{k_3}}A_4e^{-\sqrt{\frac{k_1}{k_3}}\tau}; \end{cases}$$

$$\begin{cases} y_0 = B_1 + B_3 + B_4; \\ y_\tau = B_1 + B_2\tau + B_3e^{\sqrt{\frac{k_1}{k_3}}\tau} + B_4e^{-\sqrt{\frac{k_1}{k_3}}\tau}; \\ \dot{y}_0 = B_2 + B_3\sqrt{\frac{k_1}{k_3}} - B_4\sqrt{\frac{k_1}{k_3}}; \\ \dot{y}_\tau = B_2 + B_3\sqrt{\frac{k_1}{k_3}}e^{\sqrt{\frac{k_1}{k_3}}\tau} - \sqrt{\frac{k_1}{k_3}}B_4e^{-\sqrt{\frac{k_1}{k_3}}\tau}; \end{cases}$$

одним из методов решения системы алгебраических уравнений (например, методом Гаусса). Для более сложных критериев необходим численный поиск неизвестных констант интегрирования с использованием заданных граничных условий. Построение законов осуществляется в неподвижной системе координат, связанной с начальным положением характерной точки корпуса БТС.

2. Запускает программу практической реализации синтезированных законов движения (5) и их стабилизации (формирует управляющие сигналы для приводов и минимизирует возникающие отклонения выходных параметров).

3. В случае, если препятствие обнаружено, происходит перепланирование движения в соответствии с системой (4) ( $k_2 \neq 0$ ), для которой определяются свои граничные условия из системы (5) путем подстановки в нее  $\tau_1$  – времени обнаружения препятствия, или путем опроса датчиков; При этом осуществляется перерасчет координат, входящих в граничные условия, так

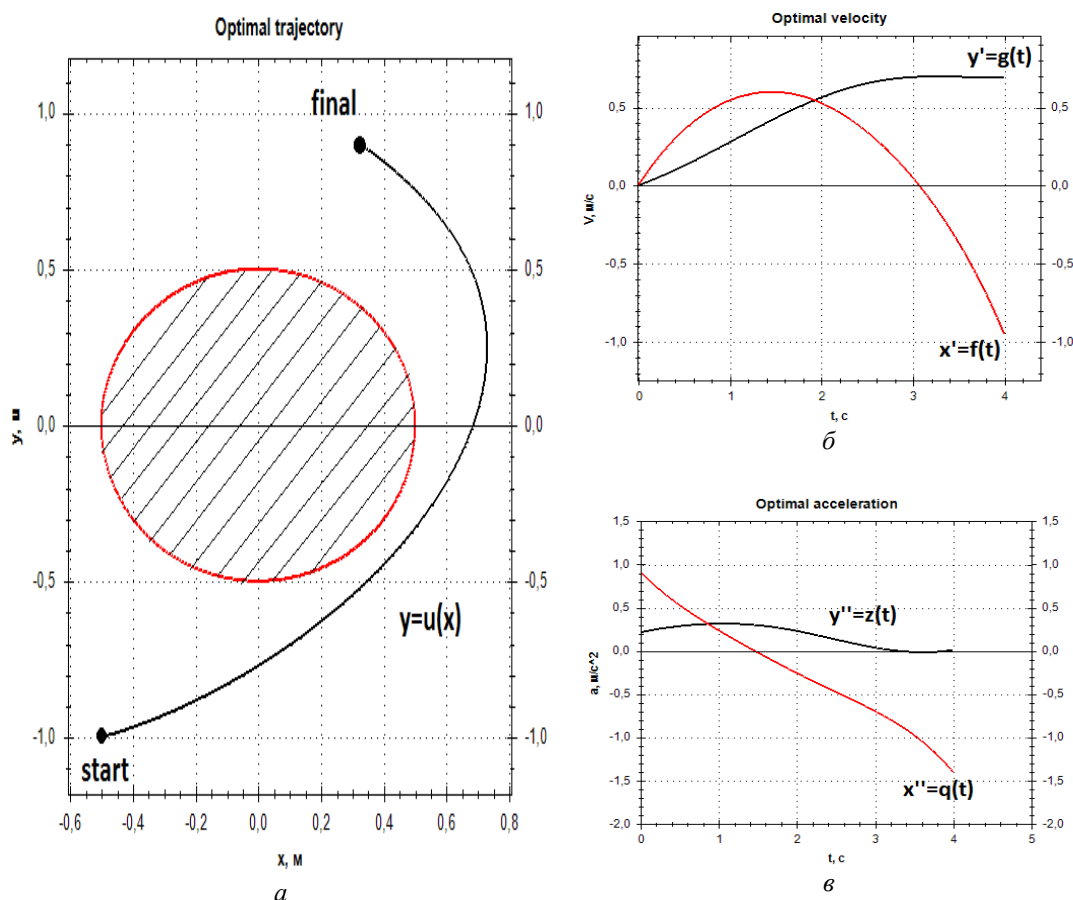


Рис. 1. Имитация работы системы планирования движения БТС

как начало неподвижной системы координат смещается в центр окружности, моделирующей препятствие. Запускается численный метод поиска  $\ddot{x}_0, \ddot{y}_0, \ddot{x}_0, \ddot{y}_0$ , включающий в себя численное интегрирование уравнений (4) на интервале  $0 \leq t \leq \tau - \tau_1$  и проверку отсутствия пересечения синтезируемой траекторией контуров препятствия

$$\sqrt{x^2 + y^2} - R > 0 \quad (6)$$

на каждом шаге интегрирования.

Пример численного синтеза законов движения БТС в случае изначального обнаружения препятствия проиллюстрирован на рис. 1: на рис. 1, а представлена траектория центра масс БТС для обхода препятствия, моделируемого окружностью; рис. 1, б и в отражают изменение линейных скоростей и ускорений центра масс робота во времени в проекции на неподвижные оси декартовой системы координат. Расчет проводился при  $x_0 = -0.5$  м,  $y_0 = -1$  м,  $x_\tau = 0.34$  м,  $y_\tau = 0.9$  м,  $\tau = 4$  с,  $k_{1(2,3)} = 1$ .

## 2. Некоторые аспекты практической реализации метода

Практическая отработка метода планируется на лабораторной модели БТС (рис. 2), которая представляет собой колесную платформу без поддрессирования с системой поворота задних колес сходной автотранспортной (наличие рулевой трапеции) и передним приводом. При этом на платформе установлена сенсорная группа, состоящая из трех лазерных дальномеров, для детектирования расстояний до поверхности препятствия. Как устройство поворота колес, так и тяговый электропривод оснащены угловыми энкодерами. Все сенсоры



Рис. 2. Лабораторная модель БТС

и датчики интегрированы с бортовой частью системы управления, реализованной на RaspberryPi. Обмен информацией между бортовой и удаленной частями системы управления осуществляется через Wi-Fi-канал связи.

Лабораторная модель обладает протяженностью в отличие от материальной точки, характеризующейся в пространстве числовыми координатами. Но представление БТС в виде материальной точки и решение задачи отсутствия столкновений корпуса робота с поверхностью препятствия совместно возможны. Для этого в центре масс робота строится окружность радиуса  $R_1$ , полностью охватывающая корпус БТС без пересечения. При обнаружении препятствия в виде трех отраженных сигналов лазерной группы, трем точкам поверхности препятствия ставится в соответствие окружность радиуса  $R_2$ . Затем радиусы  $R_1$  и  $R_2$  суммируются:  $R = R_1 + R_2$ , а их суммарное значение используется в формулах, содержащих переменную  $R$ . То есть границы окружности, моделирующей препятствие, искусственно расширяются, тем самым, при выполнении условия (6), гарантируя отсутствие столкновений. Данный подход может быть использован и для планирования движения шагающих машин [20], [21], [22], в том числе и для аппарата «Циклон». Необходимость в рассмотрении БТС как твердого тела (системы твердых тел, обладающих массами и моментами инерции) возникает в том случае, когда конструкция накладывает ограничения на физическую реализацию траекторий движения, а количество неизвестных силовых факторов (управляющих сил и реакций) превышает значение два. Что имеет место быть для лабораторной модели. Задача определения управляющих сил (напряжений) необходима для экспериментальной отработки движения, но представляет собой вопрос, требующий отдельного детального рассмотрения. Современный уровень развития цифровой техники, позволяет систему управления (СУ) робота разделить на две составляющие: бортовую СУ [23] и удаленную, обменивающие между собой управляющей информацией. При этом комплекс расчетов, связанный с планированием движения самим роботом, можно реализовывать на удаленной ЭВМ со значительной оперативной памятью, а для бортовой СУ оставить отработку сформированных управляющих сигналов.

### Заключение

При построении критерия оптимальности, входящего в базу знаний робота [24], [25], [26] в виде дифференциальных уравнений движения, для реального движения БТС потребуются учет конструктивных особенностей робота таких, как минимально допустимый радиус поворота или «разрешенное изменение в пространстве» вектора скорости центра масс БТС. Введение подобных частных показателей будет усложнять вид дифференциальных уравнений движения, поэтому необходимо исследовать вопрос корректной применимости численных методов при синтезе законов движения по заданным оператором граничным условиям. Следующим шагом по интеллектуализации БТС в рамках предлагаемого подхода по самопланированию движения может стать автоматизация получения дифференциальных законов движения самим БТС по заданному оператором критерию – целевой функции, которая своей структурой и набором параметров отражает специфику планируемого поведения робота. При этом специфика поведения робота, как было показано в статье, зависит от значений весовых коэффициентов, которые меняются самой машиной при изменении условий среды, а по необходимости и при синтезе законов движения.

Авторы статьи не претендуют на полноту предлагаемого метода. По мере получения новых теоретических выводов и экспериментальных результатов метод будет совершенствоваться и распространяться как на класс статических препятствий сложной конфигурации, так и на класс динамических препятствий. Что потребует использование более мощной сенсорной базы класса LIDAR.

В статье, для иллюстрации работы системы управления БТС (рис. 1), использовалась авторская программа, разработанная на языке VisualC++ в среде разработки Microsoft Visual Studio 2010. Предварительный расчет параметров осуществлялся в лицензионной программе MathCadEducation (в рамках закупки программного обеспечения по программе подготовки кадров для ОПК инфраструктурного конкурса МИНОБРНАУКИ от 2014 г.).

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Юревич, Е.И. Интеллектуальные роботы. – М.: Машиностроение, 2007.
2. Михайлов, Б.Б., Назарова, А.В., Ющенко, А.С. Автономные мобильные роботы – навигация и управление // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 2(175). С. 48–67.
3. Lin Rui, Du Zhijiang and Sun Lining Moving Object Tracking based on Mobile Robot Vision // ICMA. – 2009.
4. Darintsev, O. V. and Migranov, A. B. Genetic Algorithms-Based Path- Planning System for the Motion of a Group of Mobile Micro-robots // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2007. – Vol. 46, No. 3.
5. Hiroshi Koyasu and Jun Miura Mobile robot motion planning considering path ambiguity of moving obstacles // Intelligent Autonomous Systems. – 2006. – No. 9.
6. Eiji Uchibe, Masakazu Yanase, and Minoru Asada Behavior generation for a mobile robot based on the adaptive fitness function // IAS-6. – 2000.
7. Казаков, К.А., Семенов, В.А. Обзор современных методов планирования движения // Труды Института системного программирования РАН. 2016. Т. 28. № 4. С. 241–294.
8. Khatib, O. Real time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. International Journal of Robotics and Research, vol. 5, № 1, 1986, pp. 90–98.
9. Мартыненко, Ю.Г. Управление движением мобильных колесных роботов // Фундаментальная и прикладная математика. 2005. Т. 11. № 8. С. 29–80.
10. Лавренов, Р.О., Афанасьев, И.М., Магид, Е.А. Планирование маршрута для беспилотного наземного робота с учетом множества критериев оптимизации // Третий Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта» (БТС-ИИ-2016, 22–23 сентября 2016 г., г. Иннополис, Республика Татарстан, Россия) : Труды семинара. – М. : Перо, 2016. – С. 10–20.
11. Васильев, Е.М. Система оптимального управления подвешенным грузом // Вестник ВГТУ. – 2012. – № 1.
12. Жога, В.В., Гаврилов, А.Е., Еременко, А.В. Оптимальный закон горизонтального перемещения мобильного робота с ортогональными шагающими движителями // Известия ВолгГТУ. – 2010. – № 8.
13. Statnikov, R.B., Matusov, J.B. Multicriteria Optimization and Engineering. – Springer, 1995.
14. Охоцимский, Д.Е., Энеев, Т.М. Некоторые вариационные задачи, связанные с запуском искусственного спутника Земли // Успехи физических наук. – 1957.
15. Брискин, Е.С., Калинин, Я.В. Об энергетически эффективных алгоритмах движения шагающих машин с цикловыми движителями // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления – 2011. – № 2.
16. Briskin, E.S., Kalinin, Ya. V., Maloletov, A. V., Chernyshev, V.V. On the energy efficiency of cyclic mechanisms // Mechanics of Solids. – 2014. – Vol. 49, No. 1.
17. Ловейкин, В.С., Шевчук, О.Г. Влияние параметров крановой тележки с гибким подвесом груза на оптимальный динамический режим движения // Вестник ХНАДУ. – 2014. – № 65–66.
18. Леонард, А.В. Цикловый шагающий движитель с направляющими. Свойства. Управление. Пути совершенствования // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. Т. 16. № 8(111). С. 81–85.
19. Briskin, E.S., Shurygin, V.A., Chernyshev, V.V., Maloletov, A.V., Sharonov, N.G., Kalinin, Ya.V., Leonard, A.V., Serov, V.A., Mironenko, K.B., Ustinov, S.A. Problems of Increasing Efficiency and Experience of Walking Machines Elaborating // ROMANSY 2014.
20. Briskin, E.S., Zhoga, V.V., Chernyshev, V.V., Maloletov, A.V., Kalinin, Ya.V., Sharonov, N.G. Walking machines (elements of theory, experience of elaboration, application) // CLAWAR 2010. – 2010.
21. Briskin, E.S., Leonard, A.V. Stability of translational motion of a walking machine with cyclic drives // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2013. – Vol. 52, No. 6.



22. Briskin, E.S., Chernyshev, V.V., Maloletov, A.V. Power efficiency and control algorithms of walking machine with cycle propellers // CLAWAR 2003. – 2003.

23. Павловский, В.Е., Кий, К.И., Орлов, И.А., Алисейчик, А.П. Информационная система интеллектуального беспилотного автомобиля «АВТОНИВА» // Третий Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта» (БТС-ИИ-2016, 22-23 сентября 2016 г., г. Иннополис, Республика Татарстан, Россия) : Труды семинара. – М.: Перо, 2016. – С. 88–97.

24. Леонард, А.В., Горбов, И.А., Калинин, Я.В., Брискин, Е.С. Интеллектуализация системы управления робота, моделируемого материальной точкой на плоскости //

Известия Волгоградского государственного технического университета. 2015. № 14(178). С. 140–143.

25. О влиянии «характера» группы роботов на их движение / А.В. Леонард, Е.С. Брискин, И.А. Горбов // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2017. № 1(196). С. 116–120.

26. Walking robot «character» as element of intelligent system / Е.С. Брискин, А.В. Малолетов, Н.Г. Шаронов, Я.В. Калинин, А.В. Леонард, В.А. Серов, В.А. Шурыгин // Advances in Cooperative Robotics : Proceedings of the International Conference on CLAWAR 2016 (London, UK, 12-14 September 2016) / ed. by Mohammad O. Tokhi, Gurvinder S. Virk. – [Published by World Scientific Publishing Co. ; printed in Singapore, 2016]. – P. 386–394.

УДК 519.71+ 531.32+ 62-529+629+ 623.1/.7:623.41

*А. В. Леонард, С. А. Твердохлебов, И. А. Горбов*

### СИНТЕЗ РАЦИОНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С ДУБЛИРОВАННЫМИ ЛИНЕЙНЫМИ ПРИВОДАМИ\*

**Волгоградский государственный технический университет**

Alex-Leonard@yandex.ru, Tverdohlebov.Sergey.vstu@gmail.com, gorbovigor34@yandex.ru

Проводится кинематический и силовой анализ подъемного устройства со сдвоенными линейными приводами, а также синтезируется их рациональное совместное управление для квазистатического режима функционирования.

*Ключевые слова:* подъемный механизм, силовой анализ, синтез управления.

*A. V. Leonard, S. A. Tverdokhlebov, I. A. Gorbov*

### THE RATIONAL SYNTHESIS OF MANIPULATION CONTROL SYSTEM WITH DUAL LINEAR ACTUATORS

**Volgograd State Technical University**

The paper deals with kinematic and force analysis of the lifting device with dual linear actuators, and synthesized their rational joint control for the quasi-static regime of operation.

*Keywords:* lifting mechanism, force analysis, control synthesis.

#### Введение

В сфере ремонта и обслуживания автомобилей распространено применение гидроподъемных устройств с выносной кран-балкой (рис. 1).

Данные устройства характеризуются про-

стойкой использования и ремонтпригодностью, но при существующих кинематических схемах обладают недостатком: малый угловой диапазон обслуживания в вертикальной плоскости, что сужает область их применения, как универсального подъемного оборудования.



Рис. 1. Гидравлические краны, применяемые в автосервисе

© Леонард А. В., Твердохлебов С. А., Горбов И. А., 2017

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ: грант № 16-38-60086 мол\_а\_дк.



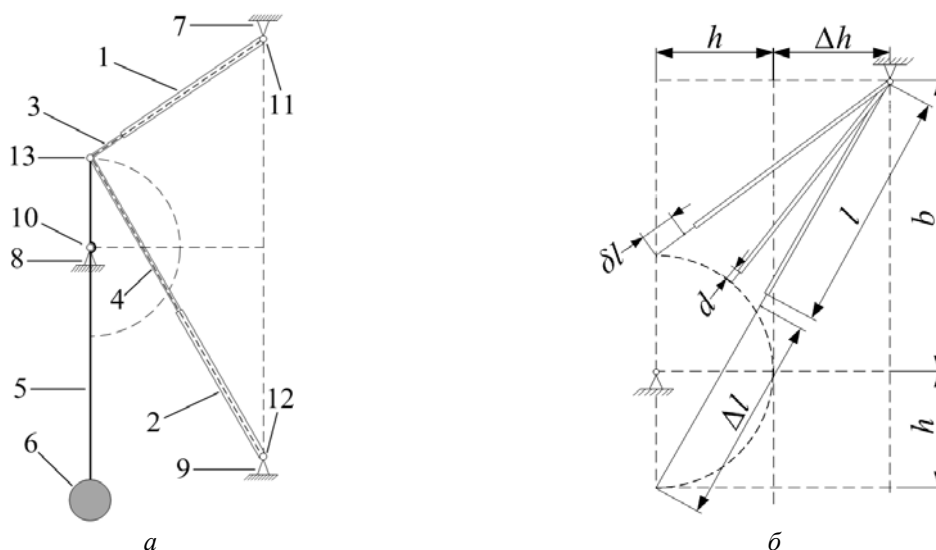


Рис. 2. Кинематическая схема подъемного механизма

Актуальным вопросом также является разработка манипуляционных систем [1, 2] для мобильных, автономных и интеллектуальных роботов [3] с развитой зоной обслуживания.

Для экстремальных условий важным свойством является живучесть робототехнической системы специального назначения и ее подвижность при решении особых задач. Поэтому необходимым представляется разработка подъемных механизмов с дублированной системой линейных приводов – механизмов параллельной структуры [4–7]. Предлагается для исследования следующая кинематическая схема подъемного устройства (рис. 2, а), где 1, 2 – цилиндры; 3, 4 – штоки; 5 – кран-балка; 6 – груз; 7, 8, 9 – неподвижные опоры; 10, 11, 12, 13 – цилиндрические шарниры.

### 1. Постановка задачи

Исследовать распределение нагрузок между линейными приводами: звенья 1 и 3 – I, 2 и 4 – II, а также синтезировать их рациональное совместное управление для квазистатического режима функционирования [8].

### 2. Геометрические связи, налагаемые на кинематику механизма

Для описания связей следует рассмотреть рис. 2, б, где  $l$  – длина цилиндра;  $\Delta l$  – максимальное выдвижение штока;  $d$  – длина свободной части штока;  $\delta l$  – выдвижение штока в нижнем положении груза б;  $h$  – плечо кран-балки 5, к которой прикладываются усилия линейных приводов: I, II, в шарнире 13,  $\Delta h$  и  $b$  геометрические параметры, определяющие по-

ложение шарниров 11 и 12 при их симметричном расположении. В соответствии с расчетной схемой (рис. 2, б) и не показанной частью нижнего привода, между геометрическими параметрами устанавливаются следующие связи:

$$\begin{cases} 2d(\Delta l - \delta l) + \Delta l^2 - \delta l^2 + 2l(\Delta l - \delta l) = 4bh, \\ 2hd + 2hl + d^2 + 2dl + l^2 = b^2 + 2h\Delta h + \Delta h^2. \end{cases} \quad (1)$$

Исходя из практики проектирования линейных приводов, можно задать линейные соотношения между параметрами  $d$  и  $l$ ,  $\Delta l$  и  $l$  в следующей форме:

$$d = \alpha_1 l, \Delta l = \alpha_2 l, \quad (2)$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – коэффициенты, назначаемые конструктором из опыта работы и технологических нормативов. В соответствии с (2) связи (1) примут следующий вид:

$$\begin{cases} l^2(2\alpha_1\alpha_2 + \alpha_2^2 + 2\alpha_2) - l(2\alpha_2\delta l + 2\delta l) - \delta l^2 = 4bh, \\ l^2(\alpha_1^2 + 2\alpha_1 + 1) + l(2h\alpha_1 + 2h) = b^2 + 2h\Delta h + \Delta h^2. \end{cases} \quad (3)$$

Таким образом, 7 параметров кинематической схемы подъемного механизма:  $\alpha_1$ ,  $h$ ,  $\Delta h$ ,  $l$ ,  $\alpha_2$ ,  $\delta l$ ,  $b$  ограничиваются двумя связями (3).

### 3. Силовой анализ подъемного механизма в квазистатическом режиме работы

Для исследования характера нагруженности приводов механизма по отдельности рассматривается следующая силовая схема (рис. 3). Для квазистатического режима перемещения кран-балки можно записать уравнение равновесия [9]:

$$\sum_{i=1}^m \delta A_i = 0. \quad (4)$$

В соответствии с (4), требуемые усилия приводов, при их независимой работе, должны подчиняться соотношениям:

$$F_{1,2} = \frac{mgr \sin \varphi}{h \cos \beta_{1,2}}, \quad (5)$$

где  $F_1, F_2$  – усилия, развиваемые приводами I и II;  $m$  – масса груза,  $\beta_1$  – угол между осью верхнего

цилиндра и прямой, перпендикулярной к малому плечу  $h$ ,  $\beta_2$  – угол между осью нижнего цилиндра и прямой, перпендикулярной к малому плечу, а  $\varphi$  – угол между вертикалью и осью кран-балки,  $r$  – плечо кран-балки, к которому прикладывается нагрузка.

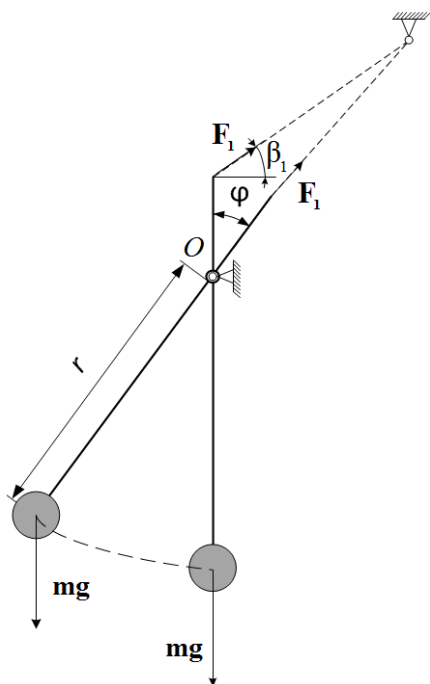


Рис. 3. Силовая схема подъемного механизма

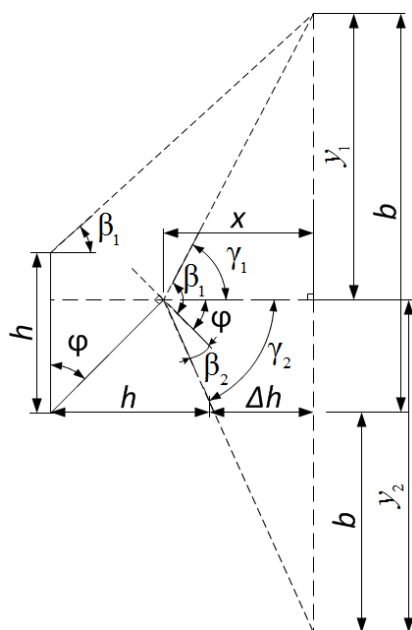
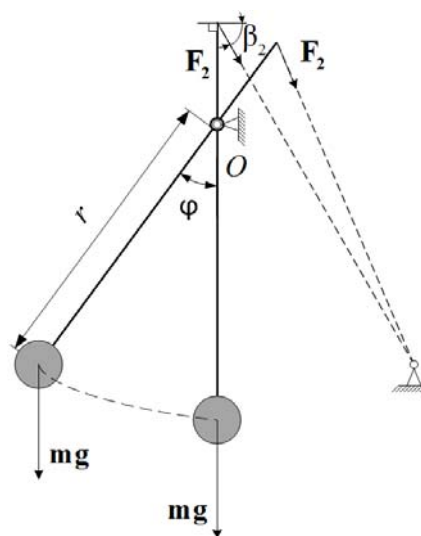


Рис. 4. Расчетная схема для установления дополнительных связей

Для установления связи между параметрами  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  и углом  $\varphi$  применяется следующая расчетная схема (рис. 4), где  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  – углы между осями цилиндров и горизонталью соответственно. Тогда справедливы равенства:

$$\sin \gamma_{1,2} = \frac{b \mp h \cos \varphi}{l + d + \Delta_{1,2} l}, \quad (6)$$

$$(h + \Delta h - h \sin \varphi)^2 + (b \mp h \cos \varphi)^2 = (l + d + \Delta_{1,2} l)^2, \quad (7)$$

где  $\Delta_{1,2} l$  – это удлинения штоков для верхнего I и нижнего 2 цилиндров, а знаки «–» и «+» в выражениях устанавливаются соответствующим образом: верхние знаки используются при описании работы верхнего привода I, нижние – при описании работы нижнего привода II.

В этом случае значения требуемых усилий (5) рассчитываются на основании формул (8), получаемых исходя из соотношений (6) и (7):

$$\cos\beta_{1,2} = \cos(\gamma_1 \pm \varphi) = \cos\left(\arcsin\left[\frac{b \mp h \cos\varphi}{\sqrt{(h + \Delta h - h \sin\varphi)^2 + (b \mp h \cos\varphi)^2}}\right] \pm \varphi\right). \quad (8)$$

Используя совместно формулы (5) и (8), которые устанавливают взаимосвязь между усилиями, генерируемыми приводами при их независимой работе; нагрузкой и параметрами подъемного механизма, определяется диаграмма распределения нагрузок (рис. 5), где  $\varphi_1^k$  и  $\varphi_2^k$  – значения углов, соответствующие переходу через мертвые точки подъемного механизма.

Диаграмма визуально разделится на три характерных участка. На первом участке  $(0, \varphi_1^k)$  усилия принимают положительные значения – штоки: 3 и 4, верхнего и нижнего приводов

в цилиндры: 1 и 2 (см. рис. 2). На втором участке  $(\varphi_1^k, \varphi_2^k)$  происходит смена знаков усилий – шток 4 нижнего привода продолжает вдвигаться в свой цилиндр 2, а шток 3 верхнего цилиндра 1 начинает выдвижение. Причем верхний привод проходит через мертвую точку, интерпретируемую на рис. 5 разрывом кривой. На третьем участке  $(\varphi_2^k, \pi)$  картина повторяется, но в этом случае при переходе через мертвую точку начинает выдвигаться шток 4 нижнего цилиндра 2, а верхний привод продолжает удлинение [5].

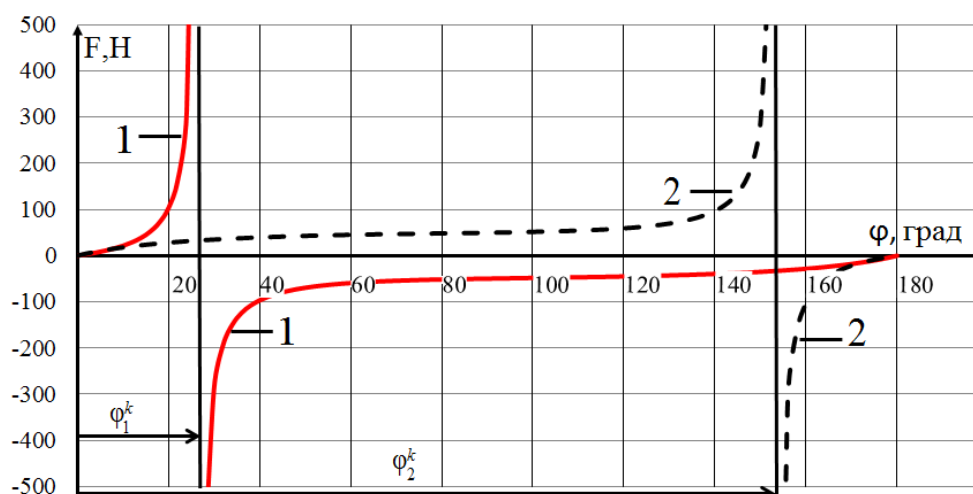


Рис. 5. График зависимости усилий в приводах подъема механизма от угла возвышения:

1 – кривые, описывающие изменение усилий в верхнем приводе I; 2 – кривые, описывающие изменение усилий в нижнем приводе II

#### 4. Совместная работа дублированных приводов

Используя соотношение (4), можно записать условие, описывающее совместное функционирование двух приводов:

$$F_1 h \cos\beta_1 + F_2 h \cos\beta_2 = a \sin\varphi, \quad (9)$$

где  $a$  – это моментная нагрузка, приложенная к кран-балке 5 (см. рис. 2). Дополняя его условием нагружения одного из приводов, например:

$$F_1 h \cos\beta_1 = 0.5a \sin\varphi, \quad (10)$$

можно определить требуемые усилия, обеспечивающие подъем груза до окрестности  $\varphi_1^k - \delta_1 \varphi \leq \varphi < \varphi_1^k + \delta_2 \varphi$ , после окрестности  $\varphi_2^k - \delta_3 \varphi < \varphi \leq \varphi_2^k + \delta_4 \varphi$  и в промежутке между ними  $\varphi_1^k + \delta_2 \varphi \leq \varphi \leq \varphi_2^k - \delta_3 \varphi$  по законам:

$$F_{1,2} = \frac{0.5a \sin\varphi}{h \cos\beta_{1,2}}. \quad (11)$$

При этом в самих окрестностях критических углов расчет для нижнего привода около  $\varphi_1^k$  и верхнего привода около  $\varphi_2^k$  ведется следующим образом:

$$F_{2,1} = \frac{a \sin \varphi}{h \cos \beta_{2,1}}. \quad (12)$$

То есть на развиваемые линейными приводами усилия наложены ограничения. В рассматриваемом примере диаграмма распределения нагрузок между приводами, при одинаковых силовых ограничениях, примет следующий вид (рис. 6). Нагрузка лимитируется пятьюстами ньютонами.

На данной диаграмме отражено беспрепятственное друг другу функционирование линейных приводов – знаки усилий в приводах до  $\varphi_1^k$

и после  $\varphi_2^k$  совпадают, но требуется практически мгновенное изменение генерируемых усилий в них. Это может быть реализовано с достаточной высокой степенью точностью при применении электроцилиндров, управляемых по принципу широтно-импульсной модуляции. При переходе к динамическим режимам работы подъемного механизма (манипуляционной системы) и применении линейного гидропривода, необходим синтез специальных законов управления – распределения усилий между приводами, которые плавно изменяются с течением времени [10].

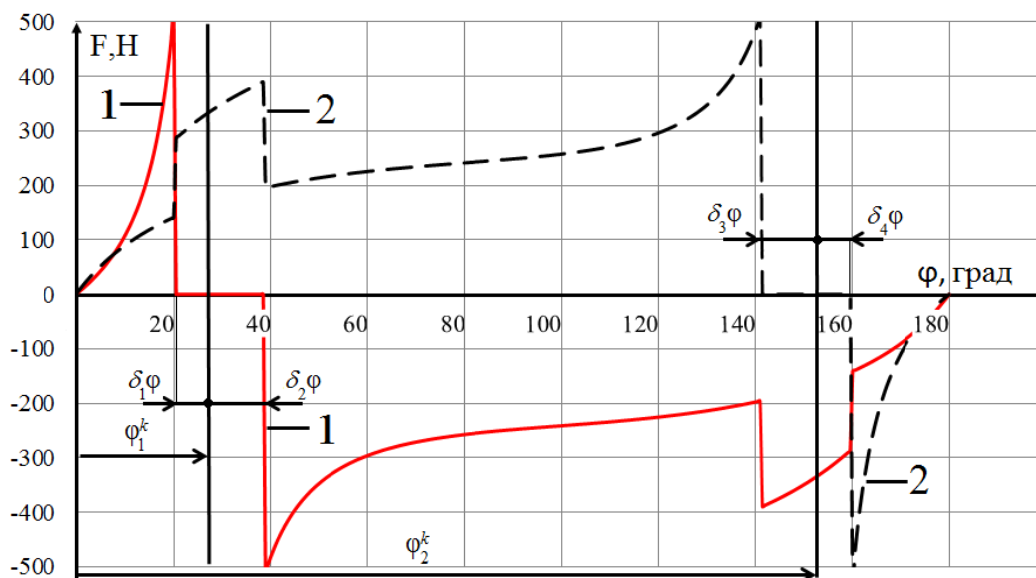


Рис. 6. Согласованное управление приводами

## 5. Синтез рационального управления подъемного механизма

*Первый участок*  $(0, 1.5\varphi_1^k)$ .

Пусть усилие, развиваемое приводом I (см. рис. 2), описывается функцией:

$$F_1^I = F_{\max} \sin(\omega_1 \varphi + \psi_1), \quad (13)$$

где  $\omega_1 = \pi / \varphi_1^k$ ;  $\psi_1 = 0$ , а  $F_{\max}$  подбирается таким образом, чтобы  $F_2^I$ , определяемое из условия совместной работы (9), было так же положительным, как и  $F_2^I$ , до углового значения  $\varphi_1^k$ .

*Третий участок*  $(\pi - 1.5\varphi_1^k, \pi)$ .

Аналогично первому участку, закон изме-

нения усилия в приводе II (см. рис. 2) задается гармонической функцией:

$$F_2^{III} = F_{\max} \sin(\omega_2 \varphi + \psi_2), \quad (14)$$

где  $\omega_2 = \pi / \varphi_1^k$ , а  $\psi_2$  является подбираемым параметром, при этом  $F_1^{III}$  определяется из условия (9).

*Второй участок*  $(1.5\varphi_1^k, \pi - 1.5\varphi_1^k)$ .

Для построения закона регулирования усилий на втором участке необходимо соблюдение граничных условий, возникающих из синтеза управления на первом и втором участках, то есть

$$F_2''(1.5\varphi_1^k) = F_2'(1.5\varphi_1^k),$$

$$F_2''(\pi - 1.5\varphi_1^k) = F_2'''(\pi - 1.5\varphi_1^k),$$

$$\frac{\partial F_2''}{\partial \varphi}(1.5\varphi_1^k) = \frac{\partial F_2'}{\partial \varphi}(1.5\varphi_1^k),$$

$$\frac{\partial F_2''}{\partial \varphi}(\pi - 1.5\varphi_1^k) = \frac{\partial F_2'''}{\partial \varphi}(\pi - 1.5\varphi_1^k).$$

Поэтому достаточно ввести функцию в виде полинома третьей степени:

$$F_2'' = c_0 + c_1\varphi + c_2\varphi^2 + c_3\varphi^3 \quad (16)$$

и определить постоянные коэффициенты  $c_i$  по соотношениям (14). Значение усилия  $F_1$  рассчитывается по формуле (9). Таким образом, результатом синтеза является диаграмма, представленная на рис. 7.

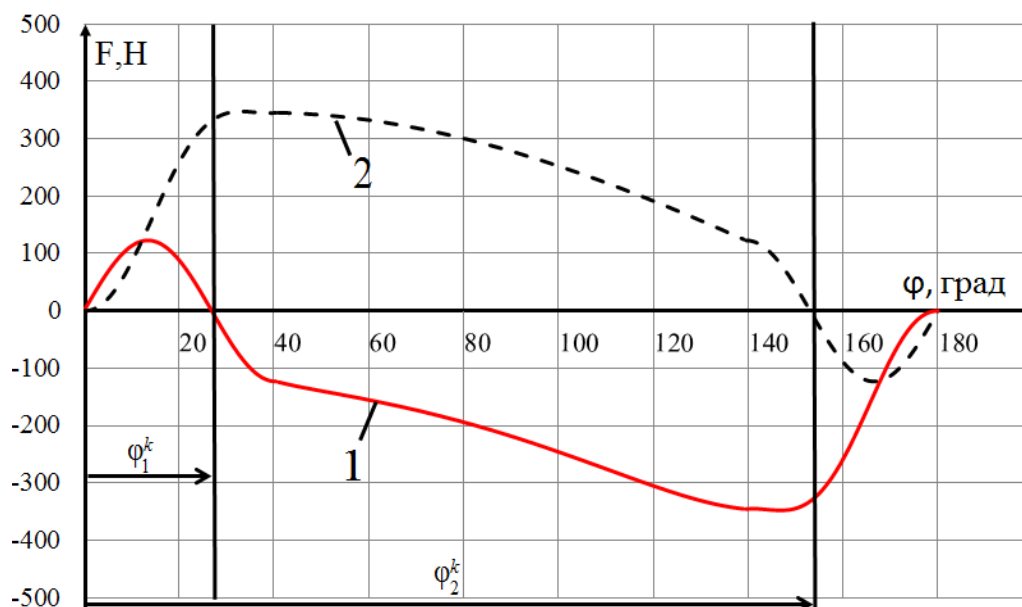


Рис. 7. Рационально синтезированное регулирование приводами

### Заключение

Полученные геометрические связи для подъемного механизма позволят корректно сконфигурировать его конструкцию под конкретную техническую задачу. В ходе исследования предложенной кинематической схемы подъемного устройства установлено, что механизм с дублированными приводами при своей работе проходит через две мертвые точки. Поэтому для предотвращения противодействия приводов устройства при их совместном функционировании синтезировано специальное регулирование, которое так же исключает ударные нагрузки на элементы конструкции манипуляционной системы. Теоретические результаты позволяют синтезировать систему управления рассмотренного подъемного механизма.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Лагерева, И.А.* Оценка нагруженности при оптимальном проектировании крана-манипулятора машины для сварки трубопроводов // Наука и современность. 2011. № 8-2. С. 174–178.
2. *Гурко, А.Г.* Математическая модель манипулятора экскаватора с обратной лопатой // Вестник ХНАДУ. 2011. В. 55. С. 79–89.
3. *Леонард, А.В., Горбов, И.А., Калинин, Я.В., Брискин, Е.С.* Интеллектуализация системы управления робота, моделируемого материальной точкой на плоскости // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2015. № 14(178). С. 140–143.
4. *Густыря, С.С., Яглинский, В.П.* Механизмы параллельной структуры в современном машиностроительном производстве // Технологічні комплекси. 2010. № 2. С. 25–35.
5. MERLET J.P. Parallel Robots. Second Edition. Berlin: Springer. 2006.
6. *Siciliano, B., Khatib, O.* Handbook of robotics. Berlin: Springer. 2008.
7. *Dolga, V., Dolga, L.* The structural synthesis of the parallel robots // MECHANIKA. 2011. 17(3). P. 288–295.
8. *Брискин, Е.С., Леонард, А.В.* Устойчивость поступательного движения шагающей машины с цикловыми движителями // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2013. № 6. С. 131.
9. *Брискин, Е.С., Леонард, А.В., Малолетов, А.В.* Синтез циклового шагающего механизма с направляющей и критерии его оценки // Теория механизмов и машин. 2011. Т. 9. № 17. С. 14–24.
10. *Брискин, Е. С., Леонард, А.В.* О безударном режиме движения шагающей машины со сдвоенным поворотным движителем // Мехатроника, автоматизация, управления. 2013. № 11. С. 25–27.

Редактор  
**Л. Н. Рыжих**

Компьютерная верстка:  
**Е. В. Макарова**

---

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77–61113 от 19 марта 2015 г.  
Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий  
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

---

Адрес редакции и издателя: 400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28.  
Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)  
Телефон: гл. редактор – (8442) 24-80-00  
**E-mail:** president@vstu.ru

---

Темплан 2017 г. Поз. № 8ж. Подписано в печать 25.12.2017 г. Формат 60 x 84 1/8.  
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл. печ. л. 13,95. Уч.-изд. л. 14,45.  
Тираж 80 экз. Свободная цена. Заказ №  
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены РИО ИУНЛ ВолГТУ  
400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28, корп. 7.  
Отпечатано в типографии ИУНЛ ВолГТУ  
400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28, корп. 7.

## К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

---

В журнале «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 журнала, 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 компакт-дисках (CD) в полном соответствии с распечатанным оригиналом. Диск должен быть вложен в отдельный конверт, на этикетке диска 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, на 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, номера служебного и домашнего телефонов, E-mail); документация, подтверждающая возможность ее открытого опубликования.