

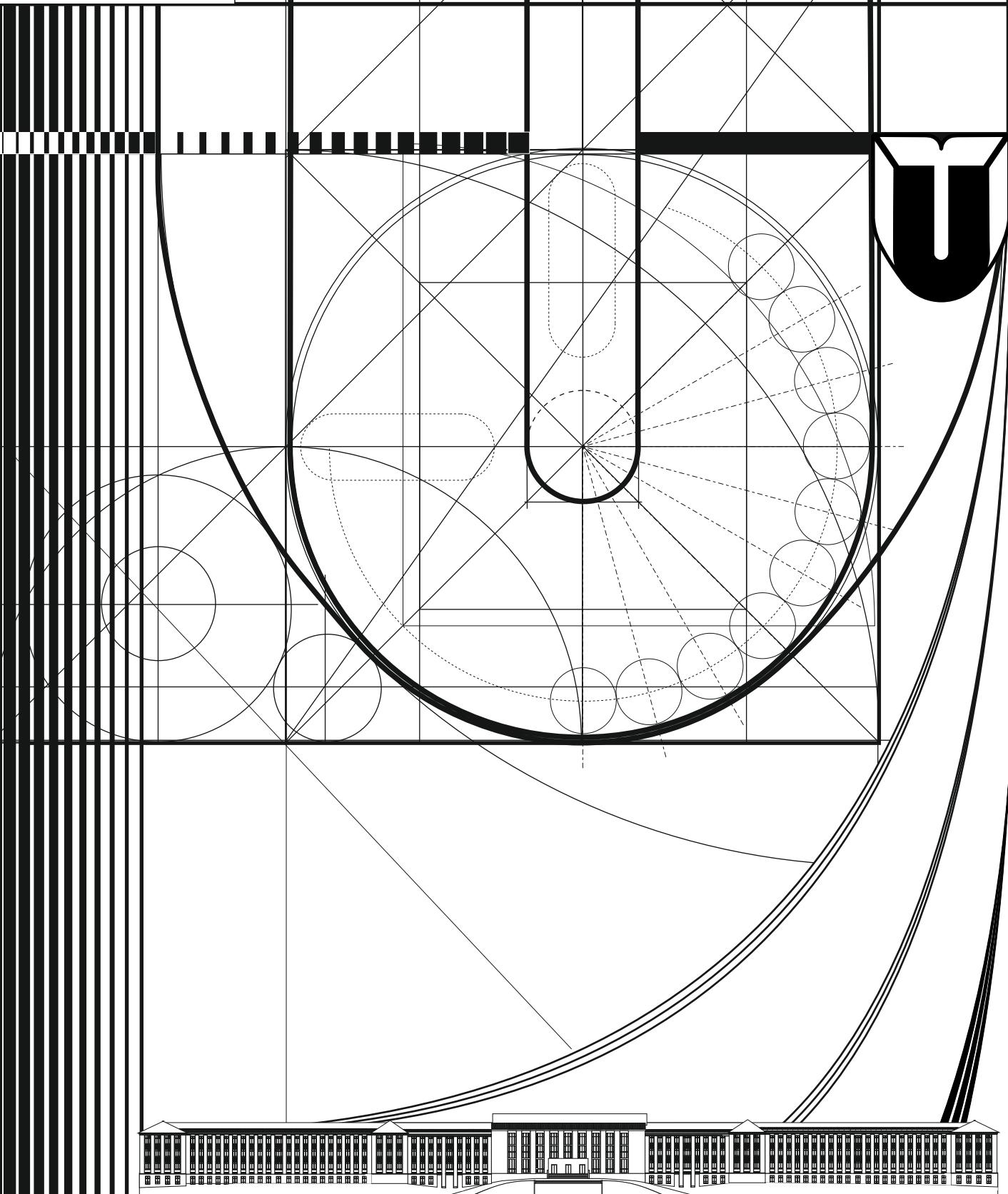


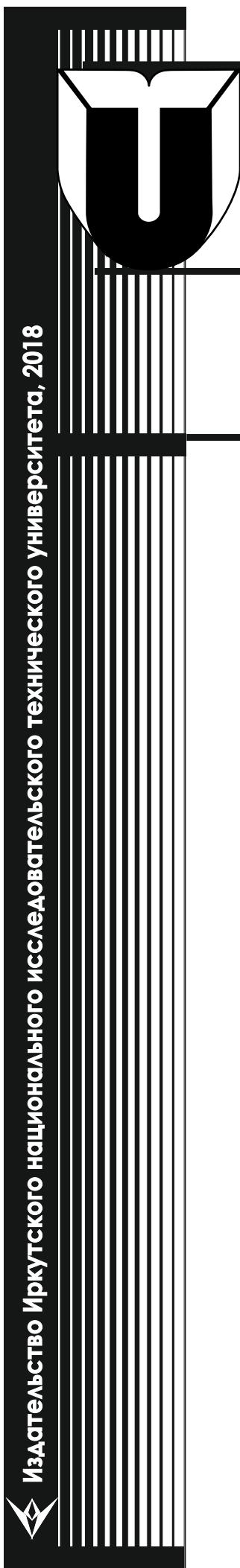
Том 22, № 4  
2018

ISSN 1814-3520 (print)  
ISSN 2500-1590 (online)

# ВЕСТИК

Иркутского Государственного Технического Университета





МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

# ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2018

Том 22, № 4

2018

# ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Том 22, № 4  
2018

## Редакционная коллегия

**СУСЛОВ К.В.**, кандидат технических наук, профессор Иркутского национального исследовательского технического университета, главный редактор (г. Иркутск, Россия)  
**НЕМЧИНОВА Н.В.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой металлургии цветных металлов Иркутского национального исследовательского технического университета, заместитель главного редактора (г. Иркутск, Россия)

**АЗАРОВ В.Н.**, доктор технических наук, профессор Московского института электроники и математики Национального исследовательского университета Высшей школы экономики (г. Москва, Россия)

**БАЖИН В.Ю.**, доктор технических наук, декан факультета переработки минерального сырья Санкт-Петербургского горного университета (г. Санкт-Петербург, Россия)

**БОРОВИКОВ Ю.С.**, доктор технических наук, проректор Национального исследовательского Томского политехнического университета (г. Томск, Россия)

**ВОРОПАЙ Н.И.**, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, научный руководитель Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)

**ЗАЙДЕС С.А.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машиностроительных технологий и материалов Иркутского национального исследовательского технического университета (г. Иркутск, Россия)

**МАМЯЧЕНКОВ С.В.**, доктор технических наук, профессор Уральского Федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург, Россия)

**ПАНТЕЛЕЕВ В.И.**, доктор технических наук, профессор Сибирского федерального университета (г. Красноярск, Россия)

**ПЕТРОВ А.В.**, доктор технических наук, профессор Иркутского национального исследовательского технического университета (г. Иркутск, Россия)

**СИТНИК Л.Е.**, доктор-инженер, профессор, заведующий кафедрой Транспортной техники Вроцлавского политехнического университета (Польша)

**СТЫЧИНСКИ З.А.**, профессор Университета Отто-фон-Герике (г. Магдебург, Германия)

**ТИХОМИРОВ А.А.**, доктор экономических наук, профессор университета ИНХА (г. Инчон, Республика Корея)

**ФЕДОТОВ А.И.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автомобильного транспорта Иркутского национального исследовательского технического университета (г. Иркутск, Россия)

**ШОЛЬТЕС Бертхольт**, директор Института металловедения Кассельского университета (г. Кассель, Германия)

Журнал основан в 1997 г.

Периодичность издания – ежемесячно

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

Свидетельство ПИ № ФС77-62813 от 18 августа 2015 г.

Учредитель Иркутский национальный исследовательский технический университет

Подписной индекс в Каталоге российской прессы – 38237

Адрес редакции, учредителя и издателя:  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.  
e-mail: [vestnik@istu.edu](mailto:vestnik@istu.edu)

# PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Vol. 22, No. 4  
2018

Publishers of Irkutsk National Research Technical University

## Editorial board

**SUSLOV K.V.**, Candidate of technical sciences, Professor of Irkutsk National Research Technical University, Editor-in-Chief (Irkutsk, Russia)  
**NEMCHINOVA N.V.**, Doctor of technical sciences, Professor, Head of the Department of Non-Ferrous Metals Metallurgy of Irkutsk National Research Technical University, Deputy Editor in Chief (Irkutsk, Russia)

**AZAROV V.N.**, Doctor of technical sciences, Professor of Moscow Institute of Electronics and Mathematics of Higher School of Economics National Research University (Moscow, Russia)

**BAZHIN V.Y.**, Doctor of technical sciences, Dean of the Faculty of Mineral Raw Materials Processing of the St. Petersburg Mining University (Saint Petersburg Mining University) (Saint Petersburg, Russia)

**BOROVIKOV Y.S.**, Doctor of technical sciences, Pro-Rector of National Research Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russia)

**VOROPAI N.I.**, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of technical sciences, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Scientific Advisor of Melentiev Energy Systems Institute SB RAS (Irkutsk, Russia)

**ZAIDES S.A.**, Doctor of technical sciences, Professor, Head of the Department of Machine-Building Technologies and Materials of Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

**MAMYACHENKOV S.V.**, Doctor of technical sciences, Professor of the Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russia)

**PANTELEEV V.I.**, Doctor of technical sciences, Professor of Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)

**PETROV A.V.**, Doctor of technical sciences, Professor of Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

**SITNIK L.E.**, Doctor-Engineer, Professor, Head of the Department of Transport Technology of Wroclaw University of Science and Technology (Poland)

**STYCHINSKI Z.A.**, Professor of the Otto von Guericke University (Magdeburg, Germany)

**TIKHOHOMIROV A.A.**, Doctor of Economics, Professor of the INHA University (Incheon, Republic of Korea)

**FEDOTOV A.I.**, Doctor of technical sciences, Professor, Head of the Department of Automobile Transport of Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

**SCHOLTES BERTHOLT**, Director of the Institute of Metallurgy of the University of Kassel (Kassel, Germany)

The Journal was founded in 1997  
Frequency of publication – monthly  
The journal is registered with the Federal Agency for  
Supervision of Communications, Information Technologies  
and Mass Media (Roskomnadzor).

Certificate of registration № ПИ № ФС77-62813  
of 18 August, 2015.

Founder: Irkutsk National Research Technical University

Subscription index in the Catalog  
of the Russian Press – 38237

Address of the editorial Board, founder and publisher:  
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074  
e-mail: [vestnik@istu.edu](mailto:vestnik@istu.edu)

## СОДЕРЖАНИЕ



### Машиностроение и машиноведение

- |   |    |
|---|----|
| ◎ <b>Анцупов А.В. (мл), Анцупов А.В., Анцупов В.П., Слободянский М.Г.</b> Проектная аналитическая оценка ресурса подшипников качения по критерию контактной выносливости..... | 10 |
| ◎ <b>Исаченко А.С., Казимиров Д.Ю.</b> Унификация наладки концевого инструмента по длине вылета при контурном фрезеровании плоскостей оснастки.....                           | 21 |
| ◎ <b>Лойко А.М., Бойко А.Ф.</b> Исследование многофакторной зависимости разбивки отверстий при электроэррозионной прошивке микроотверстий.....                                | 35 |
| ◎ <b>Осокин А.В.</b> Разработка математической модели движения гранулируемого материала в фильтерах плоскоматричного гранулятора....  | 43 |
| ◎ <b>Пономарев Б.Б., Нгуен Ши Хьен.</b> Алгоритм разбиения поверхностей свободной формы по значениям кривизны при подготовке управляющих программ для станков с ЧПУ.....      | 62 |



### Информатика, вычислительная техника и управление

- |   |     |
|---|-----|
| ■ <b>Иваньо Я.М., Петрова С.А., Полковская М.Н.</b> Вероятностная оценка повторяемости засух и определение рисков аграрного производства..... | 73  |
| ■ <b>Маршалов Е.Д., Тверской Ю.С.</b> Разработка способа оптимизации расходной характеристики канала регулирования в системе управления.....  | 83  |
| ■ <b>Митин К.В.</b> Моделирование потоков заряженных частиц применительно к технологическим процессам.....                                    | 93  |
| ■ <b>Носков С.И., Базилевский М.П.</b> Множественное оценивание параметров и критерий согласованности поведения в регрессионном анализе.....  | 101 |



### Энергетика

- |  |     |
|--|-----|
| ■ <b>Буякова Н.В., Закарюкин В.П., Крюков А.В.</b> Моделирование магнитных полей, создаваемых подземной кабельной линией электропередачи.....                  | 111 |
| ■ <b>Илюшин П.В.</b> Комплексное моделирование электрических режимов в сетях внешнего и внутреннего электроснабжения предприятий с собственной генерацией..... | 122 |
| ■ <b>Павлов В.Е.</b> Исследование режимов пуска электропривода ленточного конвейера методом компьютерного моделирования.....                                   | 136 |





# ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

## СОДЕРЖАНИЕ

2018

Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2018



### Энергетика

- |   |  |     |
|---|--|-----|
| ■ | Петров В.В. Разработка алгоритма поиска уровней напряжений в контрольных узлах, обеспечивающих снижение недопустимого значения сальдо-перетока активной мощности в контролируемом сечении.....           | 148 |
| ■ | Свеженцева О.В., Умнова М.О., Бутьков В.А. Разработка средств интегрирования различных вычислительных сред.....  | 158 |
| ■ | Сулайманова В.А., Гусев А.С., Киевец А.В., Андреев М.В. Проблема адекватного анализа устойчивости узлов двигательной нагрузки систем электроснабжения, условий ее обеспечения и средства ее решения..... | 172 |



### Металлургия и материаловедение

- |   |  |     |
|---|--|-----|
| ■ | Патрушов А.Е., Немчинова Н.В., Черных В.Е., Тютрин А.А. Современные методы переработки техногенного сырья электросталеплавильного производства.....  | 183 |
| ■ | Саламатов В.И., Саламатов О.В. Исследование кинетики процессов сгущения и промывки красных шламов из низкокремнистых бокситов.....   | 191 |
| ■ | Шепелев И.И., Сахачев А.Ю., Жижаев А.М., Дашкевич Р.Я., Головных Н.В. Извлечение ценных компонентов из алюмосиликатных природных и техногенных материалов при получении глинозема способом спекания..... | 203 |



### Транспорт

- |   |  |     |
|---|--|-----|
| ■ | Демьянов В.В., Имарова О.Б., Скоробогатов М.Э. Состояние проблемы и методы обеспечения безопасности движения на железнодорожных переездах.....                                 | 215 |
| ■ | Мельниченко О.В., Иванов В.С. Анализ применения преобразователей в силовых схемах отечественного моторвагонного подвижного состава переменного тока.....                       | 231 |
| ■ | Трофимова Л.С., Певнев Н.Г. Математическая модель функционирования автотранспортного предприятия при перевозке грузов в междугородном сообщении для текущего планирования..... | 243 |
| ■ | Шаров М.И., Булдакова В.С., Боброва А.М. Анализ мирового опыта оценки качества работы пассажирского транспорта в городах.....  | 253 |



# PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Vol. 22, No. 4  
2018

## CONTENTS



### Mechanical Engineering and Machine Science

- |  |  |    |
|--|--|----|
| ✉ <b>Antsupov A.V.(Jr), Antsupov A.V., Antsupov V.P., Slobodianskii M.G.</b> | Project analytical estimation of rolling bearing life by back-to-back endurance criterion.....   | 10 |
| ✉ <b>Isachenko A.S., Kazimirov D.Yu.</b>                                     | End mill tooling setup unification by extension length under contour milling of production tool planes.....                                    | 21 |
| ✉ <b>Loyko A.M., Boyko A.F.</b>  | Studying multifactorial dependence of hole overcut at microhole EDM.....   | 35 |
| ✉ <b>Osokin A.V.</b>   | Development of the mathematical model of granulated material movement in flat matrix granulator spinnerets.....                                | 43 |
| ✉ <b>Ponomarev B.B., Hyen Sh. Nguyen</b>                                     | An algorithm for free form surface partitioning based on surface curvature values under control program development for CNC machine-tools..... | 62 |



### Information Science, Computer Engineering and Management

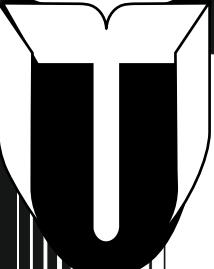
- |   |  |     |
|---|--|-----|
| ✉ <b>Ivanyo Ya.M., Petrova S.A., Polkovskaya M.N.</b> | Probabilistic estimation of drought frequency and determination of agricultural production risks.... | 73  |
| ✉ <b>Marshalov E.D., Tverskoy Yu.S.</b>               | Development of a method to optimize the control channel flow characteristic in a control system..... | 83  |
| ✉ <b>Mitin K.V.</b>                                   | Modeling of charged particle currents as applied to technological processes.....                     | 93  |
| ✉ <b>Noskov S.I., Bazilevsky M.P.</b>                 | Multiple parameter estimation and behavior consistency criterion in regression analysis.....         | 101 |



### Power Engineering

- |   |   |     |
|---|---|-----|
| ✉ <b>Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V.</b> | Modeling underground cable power line magnetic fields.....  | 111 |
| ✉ <b>Ilyushin P.V.</b>                                | Complex modeling of electrical modes in external and internal power supply networks of enterprises with own generation..... | 122 |
| ✉ <b>Pavlov V.E.</b>                                  | Research of belt conveyor electric drive start modes by a computer simulation.....  | 136 |





# PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

## CONTENTS



### Power Engineering



- |  |     |
|--|-----|
| ■ <b>Petrov V.V.</b> Development of a search algorithm of control node voltage levels ensuring active power flow balance reduction in a controlled section.....                    | 148 |
| ■ <b>Svezhentseva O.V., Umnova M.O., Butkov V.A.</b> Developing integration tools for various computing environments.....  | 158 |
| ■ <b>Sulaymanova V.A., Gusev A.S., Kieverts A.V., Andreev M.V.</b> Problem of adequate analysis of PSS motor load node stability, its provision conditions and solution tools..... | 172 |



### Metallurgy and Materials Science



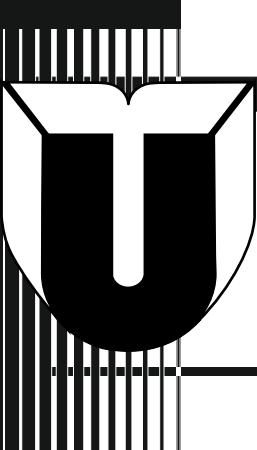
- |  |     |
|--|-----|
| ■ <b>Patrushov A.E., Nemchinova N.V., Chernykh V.E., Tyutrin A.A.</b> Modern processing methods of technogenic raw materials of electric furnace steelmaking.....  | 183 |
| ■ <b>Salamatov V.I., Salamatov O.V.</b> Study of thickening and washing kinetics of red muds from low-silica bauxites.....   | 191 |
| ■ <b>Shepelev I.I., Sakhachev A.Y., Zhyzhaev A.M., Dashkevich R.Ya., Golovnykh N.V.</b> Extraction of valuable components from aluminosilicate natural and technogenic materials under alumina production by sintering.. | 203 |



### Transport



- |  |     |
|--|-----|
| ■ <b>Demyanov V.V., Imarova O.B., Skorobogatov M.E.</b> State of the problem and methods of traffic safety provision on railroad crossings.....                    | 215 |
| ■ <b>Melnichenko O.V., Ivanov V.S.</b> Analysis of converter application in power circuits of domestic AC multiple unit rolling stock.....                         | 231 |
| ■ <b>Trofimova L.S., Pevnev N.G.</b> Mathematical model of motor transport enterprise operation under long distance cargo transportation for current planning..... | 243 |
| ■ <b>Sharov M.I., Buldakova V.S., Bobrova A.M.</b> Analysis of world experience in urban public transport quality evaluation.....                                  | 253 |



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

# ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2018

## Уважаемые читатели!

Предлагаем вашему вниманию очередной выпуск научного журнала «Вестник Иркутского государственного технического университета».

Журнал включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, утвержденный ВАК Минобразования России.

«Вестник ИрГТУ» включен в международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», в базу данных EBSCO, в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлен в электронной библиотеке “Cyberleninka”, рассыпается в Российскую книжную палату, ВИНИТИ РАН, каждой статье присваивается цифровой индикатор DOI.

«Вестник ИрГТУ» реферируется и рецензируется.

### Приглашаем вас к активному творческому сотрудничеству по научным направлениям:

- Машиностроение и машиноведение
- Информатика, вычислительная техника и управление
- Энергетика
- Металлургия и материаловедение
- Транспорт

Редакция



# PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

## Dear Readers!

We would like to bring to your attention the next issue of the scientific journal "Proceedings of Irkutsk State Technical University". The journal is included in the list of the leading scientific journals and publications, where the key scientific results of doctoral (candidate's) theses approved by the State Commission for Academic Degrees and Titles of the Russian Ministry of Education are to be published.

Proceedings of Irkutsk State Technical University ("Vestnik IrGTU") is included in the "UlrichsPeriodicals Directory", EBSCO database, Scientific electronic library (eLIBRARY.RU). It is presented in the e-library "Cyberleninka". It is sent to the Russian Book Chamber and All-Russian Institute for Scientific and Technical Information (VINITI) RAS. Each article is assigned a digital indicator DOI.

The journal "Proceedings of Irkutsk State Technical University" is abstracted and reviewed.

**• You are welcome for active and creative collaboration in the following fields:**

- Mechanical Engineering and Machine Science
- Information Science, Computer Engineering and Control
- Power Engineering
- Metallurgy and Materials Science
- Transport

**Editorial Board**





Оригинальная статья / Original article

УДК 621.822.6 : [001.66 : 658.512.23]

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-10-20>

## ПРОЕКТНАЯ АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЕСУРСА ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ ПО КРИТЕРИЮ КОНТАКТНОЙ ВЫНОСЛИВОСТИ

© А.В. Анцупов (мл.)<sup>1</sup>, А.В. Анцупов<sup>2</sup>, В.П. Анцупов<sup>3</sup>, М.Г. Слободянский<sup>4</sup>

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,  
455000, Российская Федерация, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38.

**РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ.** Разработка кинетической модели отказов подшипников качения по энергетическому критерию контактной прочности (выносливости) элементов и теоретическая оценка влияния температурно-силовых параметров на их долговечность. **МЕТОДЫ.** При построении модели параметрических отказов использованы методы анализа и синтеза физической теории надежности технических объектов и термодинамической концепции прочности твердых тел. При проведении теоретических исследований применяли методы математического моделирования процесса повреждаемости и разрушения наиболее нагруженных объемов материала поверхностных слоев элементов подшипников качения без проведения дополнительных модельных или натурных экспериментов. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** В качестве примера показана постановка краевой задачи для подшипников с вращающимся внутренним кольцом. При постановке задачи учитывается влияние на ресурс исследуемых подшипников основных параметров, характеризующих геометрию элементов, силовые и температурные условия, микрогеометрию контактирующих поверхностей, условия смазывания, величину контактных напряжений, свойства материала элементов и др. Аналитическое решение задачи представлено для краевых условий шариковых однорядных подшипников № 309. Теоретические исследования в частности показали, что изменение только температуры в рамках рабочего диапазона может привести к изменению их ресурса, рассчитанного по известной зависимости, более чем на два порядка. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Сформулирована методика построения моделей отказов подшипников качения по энергетическому критерию контактной выносливости на основе современных достижений физической теории надежности деталей машин и кинетического подхода к повреждаемости и разрушению конструкционных материалов. При построении моделей параметрической надежности учитываются все основные конструктивные и технологические эксплуатационные параметры, а также свойства материалов элементов подшипников. Пример реализации модели отказов шариковых подшипников показал, что возможность теоретического исследования влияния различных параметров на величину их проектного ресурса без проведения дополнительных экспериментов выгодно отличает предложенный кинетический подход от известной однозначной экспериментальной зависимости.

**Ключевые слова:** подшипники качения, кинетическая модель отказов, долговечность, ресурс, прогнозирование, энергетический критерий, контактная выносливость.

**Информация о статье.** Дата поступления 30 января 2018 г.; дата принятия к печати 18 февраля 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2018 г.

<sup>1</sup>Анцупов Алексей Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования и эксплуатации металлургических машин и оборудования; e-mail: a.antsupov@gmail.com

Aleksei V. Antsupov, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Metallurgical Machines and Equipment Design and Operation, e-mail: a.antsupov@gmail.com

<sup>2</sup>Анцупов Александр Викторович, доктор технических наук, профессор кафедры машин и технологии обработки давлением и машиностроения; e-mail: antsupov.alexander@gmail.com

Aleksandr V. Antsupov, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Machines and Metal Forming Technologies, e-mail: antsupov.alexander@gmail.com.

<sup>3</sup>Анцупов Виктор Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры проектирования и эксплуатации металлургических машин и оборудования; e-mail: antsupov.vp@gmail.com

Viktor P. Antsupov, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Metallurgical Machines and Equipment Design and Operation, e-mail: antsupov.vp@gmail.com.

<sup>4</sup>Слободянский Михаил Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования и эксплуатации металлургических машин и оборудования; e-mail: m.slobodianskii@gmail.com

Mikhail G. Slobodianskii, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Metallurgical Machines and Equipment Design and Operation, e-mail: m.slobodianskii@gmail.com



**Формат цитирования.** Анцупов А.В. (мл.), Анцупов А.В., Анцупов В.П., Слободянский М.Г. Проектная аналитическая оценка ресурса подшипников качения по критерию контактной выносливости // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 4. С. 10–20. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-10-20

## PROJECT ANALYTICAL ESTIMATION OF ROLLING BEARING LIFE BY BACK-TO-BACK ENDURANCE CRITERION

**A.V. Antsupov (Jr.), A.V. Antsupov, V.P. Antsupov, M.G. Slobodianskii**

Nosov Magnitogorsk State Technical University,  
38, Lenin pr., Magnitogorsk, 455000, Russian Federation

**ABSTRACT.** The **PURPOSE** of the paper is development of a kinetic model of rolling bearing failures based on the energy criterion of contact strength (life) of elements and a theoretical evaluation of the temperature-strength parameter effect on their durability. **METHODS.** The methods of analysis and synthesis of the physical theory of technical object reliability and the thermodynamic concept of solids strength are used when constructing a model of parametric failures. The theoretical studies employ the methods of mathematical modeling of damage and destruction processes of the most loaded volumes of surface layer material in rolling bearings elements without additional model or full-scale experiments. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The paper demonstrates the setting of the boundary-value problem for bearings with a rotating inner ring as an example. The formulation of the problem takes into account the effect of the main parameters characterizing geometry of the elements, operation and temperature conditions, contacting surface microgeometry, lubrication conditions, magnitude of contact stresses, properties of element material, etc. on the bearing life. The analytical solution of the problem is presented for the boundary conditions of single-row ball bearings no. 309. The theoretical studies have shown that variation of the temperature only within the operating range can result in the alteration of their service life calculated based on the known dependence by more than two orders of magnitude. **CONCLUSION.** The methodology for constructing the models of rolling bearing failure by the energy criterion of back-to-back endurance is formulated on the basis of modern achievements in the physical theory of machine part reliability and the kinetic approach to the damageability and destruction of structural materials. When constructing the models of parametric reliability all the main design and technological performance parameters as well as the properties of the bearing element materials are taken into account. An implementation example of the model of ball bearing failures has shown that the possibility of the theoretical study of the influence of various parameters on the value of their project life without any additional experiments distinguishes the proposed kinetic approach from the known identical experimental dependence.

**Keywords:** *rolling bearings, kinetic model of failures, durability, service life, forecasting, energy criterion, back-to-back endurance*

**Information about the article.** Received January 30, 2018; accepted for publication February 18, 2018; available online April 30, 2018.

**For citation.** Antsupov A.V.(Jr.), Antsupov A.V., Antsupov V.P., Slobodianskii M.G. Project analytical estimation of rolling bearing life by back-to-back endurance criterion. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 4, pp. 10–20. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-10-20

### Введение

В настоящее время более 50% опор вращающихся деталей, валов и осей разнообразных машин и механизмов составляют подшипники качения (ПК)<sup>5</sup>, которые стандартизованы в широком диапазоне типоразмеров<sup>6</sup>. Как показывает практика, основным дефектом ПК в нормальных условиях эксплуатации является выкрашивание рабочих поверхностей. Поэтому для его предупреждения на стадии конструирования подшипниковых опор выполняют проверку работоспособности выбранных подшипников по долговечности или заданному ресурсу  $[L]$  в виде<sup>7</sup>:

<sup>5</sup>Когаев В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин: учеб. пособие для машиностр. спец. вузов. М.: Высш. шк., 1991. 319 с. / Kogaev V.P., Drozdov Yu.N. Strength and wear resistance of machine parts: Learning aids for Machine-building specialties of universities. M: Higher School, 1991. 319 p.

<sup>6</sup>ГОСТ 3395-89 Подшипники качения. Типы и конструктивные исполнения. Введ. 21.12.89. Москва: Изд-во стандартов, 1994, 56 с. / GOST 3395-89 Roller bearings. Types and designs. Introduced 21 December 1989. Moscow: Standards Publ., 1994, 56 p.

<sup>7</sup>Иванов М.Н., Финогенов В.А. Детали машин: учебник для машиностроительных специальностей вузов. 12-е изд. испр. М.: Высш. шк., 2008. 408 с. / Ivanov M.N., Finogenov V.A. Machine parts: textbook for Machine-building specialties of universities. 12th edition. Revised. M: Higher school, 2008. 408 p.



$$L_n \geq [L].$$

Модифицированный ресурс  $L_n$  в часах рассчитывают по стандартной эмпирической зависимости в функции эквивалентной динамической нагрузки  $P_{экв}$  в кН и постоянной частоты  $n$  вращения одного из колец подшипника в об/мин<sup>7,8</sup>:

$$L_n = a_1 \cdot a_{23} \cdot (C / P_{экв})^p \cdot (10^6 / (60 \cdot n)), \quad (1)$$

где  $a_1$  – коэффициент модификации ресурса по вероятности безотказной работы, зависящий от заданного значения вероятности безотказной работы  $\gamma$  (при  $\gamma = (90...99,95)\%$ ,  $a_1 = 1...0,077$ ,  $n = 100 - \gamma = 10...0,05$ );  $a_{23}$  – коэффициент совместного влияния качества металла, технологии изготовления, конструкции и условий эксплуатации<sup>7</sup> (системный коэффициент модификации  $a_{23} = a_{ISO}$ )<sup>8</sup>;  $C$  – базовая динамическая грузоподъемность в кН, величина которой для каждого подшипника определена на основе статистической обработки результатов стендовых испытаний и приводится в каталогах с  $\gamma = 90\%$ ;  $p$  – эмпирический коэффициент ( $p = 3$  для шариковых и  $p = 3,33$  для роликовых ПК).

Зависимость (1) получена статистической обработкой результатов испытаний, условия которых в стандарте строго не определены. Сообщается только, что различные подшипники «...из широко используемых материалов хорошего качества, при хорошем качестве исполнения испытывали в нормальных условиях эксплуатации...»<sup>8</sup>. Поэтому уравнение (1) не учитывает многие количественные характеристики, незначительное изменение которых может привести к существенному изменению ресурса  $L_n$ . К ним следует отнести параметры, характеризующие температурные условия, условия смазывания, состояние загрязненности, распределение контактных напряжений, свойства материалов элементов, рассеяние геометрических и микрогеометрических характеристик и др.

Согласно ГОСТ 18855-2013<sup>8</sup>, при изменении условий эксплуатации необходимы дополнительные эксперименты для определения соответствующих эмпирических коэффициентов и введения их в зависимость (1). В частности, введением коэффициента  $a_{23} = a_{ISO}$  учитывается влияние условий смазки и загрязнений на расчетный ресурс. Очевидно, что многократное расширение экспериментальных исследований существенно увеличивает материальные и временные затраты на этапах разработки подшипниковых опор и снижает точность расчетов. Ресурс подшипников партии одного типоразмера до появления первых признаков усталости может отличаться более чем в тридцать раз<sup>9</sup>.

Фактически расчет долговечности ПК по условию (1) выполняется по критерию несущей способности:  $C_{треб} < C$  (здесь  $C_{треб}$  – требуемая динамическая грузоподъемность). Поэтому зависимость (1) не описывает процесс повреждаемости структуры материалов и не позволяет предсказать момент возникновения усталостного разрушения контактных поверхностей ПК. Такие модели в большинстве случаев имеют небольшую практическую ценность, так как отражают результат уже свершившихся событий, когда подшипник выработал свой ресурс. Поэтому для вновь конструируемых опор, предназначенных для эксплуатации в различных условиях, они не

<sup>8</sup>ГОСТ 18855-2013 Подшипники качения. Динамическая грузоподъемность и номинальный ресурс. Введ. 01.07.2015. М.: Стандартинформ, 2014. / Ball bearings. Dynamic load capacity and rated life. Introduced 1 July 2015. M.: Standartinform, 2014.

<sup>9</sup>Прикладная механика: учебное пособие для вузов / под ред. В.М. Осецкого. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., Машиностроение, 1977. 488 с. / Applied Mechanics: Textbook for Universities, under edition of V.M. Osetsky. 2<sup>nd</sup> edition revised and enlarged. M., Mechanical Engineering, 1977. 488 p.



являются достоверными и не подтверждаются в большинстве случаев экспериментально без подбора соответствующих эмпирических коэффициентов<sup>8</sup>. Вопрос о чисто аналитическом прогнозировании ресурса ПК на стадии проектно-конструкторской разработки машины в литературе не рассматривается. Эту проблему, на наш взгляд, можно решить на основе современных достижений физической теории надежности деталей машин [1–3] и кинетической концепции толкования процессов разрушения твердых тел [4–7].

Кинетический подход рассматривает разрушение нагруженной детали как развивающийся во времени процесс повреждаемости атомно-молекулярной структуры материала в виде зарождения и постепенного накопления дефектов различного масштабного уровня [8, 9]. Он представляет кооперацию огромного числа единичных микроскопических элементарных актов атомно-молекулярных перегруппировок. При этом ведущая роль в процессе повреждаемости структуры принадлежит тепловому движению атомов – флюктуациям кинетической энергии. Ввиду большого числа элементарных частиц, а также хаотического характера их колебательного движения, возникают флюктуации тепловой (кинетической) энергии, интенсивность которых возрастает с повышением внутренних напряжений и температуры. Термические флюктуации сопровождаются образованием и накоплением необратимых разрывов межатомных связей – элементарных дефектов структуры, своеобразных флюктуаций потенциальной энергии (ваканции, внедренные атомы, свободные радикалы и др.). Предельная плотность дефектов в некотором локальном объеме приводит к образованию трещины критического размера, способной самопроизвольно распространяться со скоростью звука через зону напряженных объемов материала по механизму Гриффитса. Это приводит либо к объемному, контактному или поверхностному разрушению (изнашиванию) изделия, либо к появлению недопустимой объемной или местной пластической деформации материала.

На основе кинетического подхода разработано множество известных феноменологических теорий разрушения твердых тел по критериям длительной статической, циклической и фрикционной усталостной прочности [9–14]. Одной из экспериментально обоснованных и завершенных комплексных теорий, предложенных в рамках кинетической концепции, является термодинамическая теория прочности В.В. Федорова [5, 9, 13]. Она построена на структурно-энергетическом анализе кинетического процесса повреждаемости и разрушения материалов. В ее основу положены общие законы термодинамики необратимых процессов [15], молекулярно-кинетической теории Я.И. Френкеля [16, 17] и термофлюктуационной концепции прочности материалов С.Н. Журкова [5] с использованием фундаментальной зависимости Аррениуса, а также теории дислокаций в их взаимной диалектической связи на базе основного закона природы – закона сохранения энергии [9, 18].

Однако для ее практического использования при разработке моделей отказов деталей машин также необходимы предварительные экспериментальные исследования для получения ряда параметров. Вопрос о чисто аналитическом описании процесса деградации нагруженных элементов и прогнозирования показателей их долговечности рассмотрен в работах [6, 7]. В ней на основе развития термодинамической теории показан новый аналитический подход к построению моделей отказов деталей машин по энергетическому критерию прочности материалов.

Поэтому целью настоящих исследований является разработка модели отказов подшипников качения по энергетическому критерию контактной прочности элементов и теоретическая оценка влияния ряда параметров на их долговечность.

### **Разработка кинетической модели отказов подшипников качения по энергетическому критерию контактной прочности**

Модель проектного отказа ПК представляет совокупность трех подобных моделей отказов его основных элементов: неподвижного кольца, тел качения и вращающегося кольца, которые отличаются граничными условиями. Для сокращения объема статьи сформулируем одну из них согласно [6, 7], принимая следующие условия и допущения:



– поставим задачу для определения среднего ресурса ПК с вращающимся внутренним кольцом по критерию контактной усталости неподвижного наружного кольца в стационарных условиях нагружения (радиальная нагрузка  $F_r = const$ , частота вращения внутреннего кольца  $n_e = const$ );

– для математического описания процесса повреждаемости, наиболее нагруженного (нулевого)<sup>10</sup> контактного объема кольца в качестве параметра его текущего состояния примем плотность энергии  $u_{et}$  дефектов структуры материала;

– в процессе будущей эксплуатации в стационарных условиях нагружения величина  $u_{et}$  будет возрастать от начального  $u_{e0}$  до критического  $u_{e*}$  значения с некоторой постоянной скоростью  $\dot{u}_e$  по закону:  $u_{et} = u_{e0} + \dot{u}_e \cdot t$ ;

– энергетическое условие разрушения кольца описывает уравнение:  $u_{et} = u_{e0} + \dot{u}_e \cdot t = u_{e*}$ , решение которого относительно  $t = t_*$ , определит ресурс ПК (момент появления выкрашивания).

В этом случае система определяющих уравнений краевой задачи для оценки среднего проектного ресурса ПК примет вид [6, 7]:

$$\left. \begin{array}{l} 1. \text{Уравнение для оценки среднего проектного ресурса ПК:} \\ t_* = (u_{e*} - u_{e0}) / \dot{u}_e; \\ 2. \text{Кинетическое уравнение повреждаемости ПК:} \\ \dot{u}_{ei} = k_{cmp} \cdot \frac{2 \cdot k \cdot T}{h} \cdot U(\sigma_0, T) \cdot \exp\left(-\frac{U(\sigma_0, T) \cdot V_{am}}{k \cdot T}\right) \cdot \operatorname{sh}\left(\frac{A_f^0 \cdot V_{am}}{2 \cdot k \cdot T}\right). \end{array} \right\} \quad (2)$$

Для того, чтобы система (2) оказалась статически определимой, необходимо сформулировать условия однозначности, позволяющие определить параметры, входящие в уравнения системы, и выделить исследуемый подшипник из класса ему подобных. Условия однозначности включают отличительные признаки, начальные и граничные условия.

К отличительным признакам исследуемого ПК относятся: тип, номер, конструктивные особенности и расчетная схема нагружения.

**Начальные условия**, характеризующие состояние ПК в момент времени  $t = 0$ , включают следующие группы задаваемых и рассчитываемых параметров.

**Первая группа.** Геометрические и кинематические характеристики ПК, параметры нагружения.

Задаваемые:  $d$ ,  $D$ ,  $B$  – внутренний и наружный диаметры ПК, его ширина;  $D_w$ ,  $\alpha$  – диаметр тел качения и угол контакта;  $n_e$ , – частота вращения внутреннего кольца;  $F_r$  – радиальная нагрузка;  $T_0$  – исходная температура.

Рассчитанные по справочным зависимостям<sup>7,10</sup>:  $D_0$  – средний диаметр ПК;  $d_e$  и  $d_n$  – диаметры дорожек качения внутреннего и наружного колец;  $\omega_e$  и  $v_e$  – угловая и окружная скорость вращения внутреннего кольца;  $\omega_0$  и  $v_0$  – угловая и окружная скорость сепаратора;  $\omega_w$  – угловая скорость тела качения вокруг своей оси;  $F_0$  – нагрузка в наиболее нагруженном

<sup>10</sup>Перель Л.Я. Подшипники качения: Расчет, проектирование и обслуживание опор: справочник. М.: Машиностроение, 1983. 543 с. / Perel L.Ya. Ball bearings: Calculation, design and maintenance of supports: Handbook. Moscow: Machine-Building, 1983. 543 p.



(нулевом) контакте тел качения с внешним кольцом.

*Вторая группа.* Физико-механические характеристики материала наружного кольца ПК.

$E$  и  $K$  – модуль линейной и объемной упругости;  $G$  – модуль сдвига;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $\rho$  – плотность;  $V_{am}$  – атомный объем;  $HV$  – твердость по Виккерсу;  $HB$  – твердость по Бринеллю;  $\sigma_B$  – предел прочности;  $\sigma_T$  – предел текучести;  $\sigma_r$  – предел выносливости.

*Третья группа.* Термофизические характеристики материала кольца.

Задаваемые:

$\Delta H_{TB}$  – энталпия плавления материала в твердом состоянии;  $c$  – удельная теплоемкость материала;  $\alpha_0$  – коэффициент линейного теплового расширения.

Рассчитаны по уравнениям [6, 7]:

$v_0$  – коэффициент неравномерности распределения плотности внутренней энергии материала в исходном состоянии:

$$v_0 = T_0 / 870. \quad (3)$$

$u_{e0}$  – плотность скрытой энергии дефектов в исходном состоянии:

$$u_{e0} = \left( (0,071 \cdot HV)^{1,2} \cdot k_\sigma \right)^2 / (6 \cdot G). \quad (4)$$

$k_\sigma$  – комплексный структурный параметр:

$$k_\sigma = (6,47 \cdot 10^{-6} \cdot HV + 0,12 \cdot 10^{-2})^{-1}. \quad (5)$$

$\varphi_\sigma$  – коэффициент перенапряжения на межатомных связях:

$$\varphi_\sigma = k_\sigma \cdot v_0^{0,5}. \quad (6)$$

$U(p_{T_0})$  – начальная энергия активации разрушения структуры материала при  $T = T_0$  и  $F_0 = 0$ :

$$\begin{aligned} U(p_{T_0}) = & (-2,415 \cdot 10^{-28} \cdot T_0^3 + \\ & + 5,955 \cdot 10^{-25} \cdot T_0^2 + 0,0121 \cdot 10^{-20} \cdot T_0 + . \\ & + 12,286 \cdot 10^{-20}) / V_{am}. \end{aligned} \quad (7)$$

*Четвертая группа.* Физические константы.

$k$  – постоянная Больцмана;  $h$  – постоянная Планка.

**Границные условия**, характеризующие взаимодействие контактного объема наружного кольца с окружающей средой, должны включать следующие группы рассчитываемых параметров.

*Первая группа.* Параметры напряженного и теплового состояния, наиболее нагруженного (нулевого) контактного объема наружного кольца.

Рассчитанные по справочным зависимостям<sup>7,9</sup> [19] для выбранного типа подшипника:



$\sigma_{\max}$  – максимальное контактное напряжение;  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  – главные напряжения;  $\sigma_0$  – гидростатическое напряжение;  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений.

Рассчитаны по уравнениям [6]:

$T_*$  – локальная температура на контакте:

$$T_* = T_0 \cdot (3 \cdot \sigma_T)^2 / ((3 \cdot \sigma_T)^2 - \sigma_{\max}^2). \quad (8)$$

$T_f$  – средняя температура деформируемого объема:

$$T_f = T_0 + (T_* - T_0) / (44 \cdot v_0). \quad (9)$$

*Вторая группа.* Свойства материала наружного кольца в функции температуры.

Рассчитаны по известным уравнениям [6] при  $T = T_f > 100^\circ C$ :  $E(T)$ ,  $K(T)$ ,  $G(T)$ ,  $\mu(T)$ ,  $HB(T)$ ,  $HV(T)$ ,  $\sigma_B(T)$ ,  $\sigma_T(T)$ ,  $\sigma_r(T)$ .

*Третья группа.* Энергетические характеристики.

Рассчитаны по уравнениям [6, 7]:

$M_r$  – коэффициент эквивалентности циклического и статического напряженного состояния:

$$M_r = [\sigma_T(T) \cdot (65 + 0,46 \cdot HV(T)) / \sigma_r^2(T)]^{0,5}. \quad (10)$$

$A_V^0$  – удельная энергия изменения объема в условиях эквивалентного статического нагружения:

$$A_V^0 = M_r^2 \cdot \varphi_\sigma^2 \cdot \sigma_0^2 / (2 \cdot K(T)). \quad (11)$$

$A_f^0$  – удельная энергия формоизменения в условиях эквивалентного статического нагружения:

$$A_f^0 = M_r^2 \cdot A_f. \quad (12)$$

$\Delta U_T$  – изменение энергии активации от температуры саморазогрева от  $T = 0^\circ C$  до  $T = T_f^\circ C$ :

$$\Delta U_T = 1,5 \cdot \alpha_0 \cdot K(T) \cdot T. \quad (13)$$

$U(\sigma_0, T)$  – энергия активации процесса с учетом удельной работы изменения объема:

$$U(\sigma_0, T) = U(p_{T,0}) - \Delta U_T - A_V^0. \quad (14)$$

$u_{e^*}$  – критическая плотность скрытой энергии при  $T = T_f$ :

$$u_{e^*} = \Delta H_{TB} - c \cdot \rho \cdot T. \quad (15)$$

$k_{cmp}$  – коэффициент сопротивления структуры материала Ле-Шателье:



$$k_{cmp} = 2 \cdot (u_{e^*} - u_{e0}) / (3 \cdot u_{e^*} - u_{e0}). \quad (16)$$

Совокупность уравнений (2)–(16) представляет модель отказов исследуемого типа ПК по энергетическому критерию контактной прочности материала неподвижного кольца в заданных стационарных условиях эксплуатации. Подобным образом формулируются модели отказа ПК по критерию усталости внутреннего кольца и тел качения. На основе моделей создан алгоритм и программа «Долговечность ПК», позволяющая оценивать их средний проектный ресурс  $t_*$  в заданных условиях нагружения.

### Оценка результатов моделирования

Для оценки адекватности предложенного подхода необходимо сопоставить значения проектного ресурса  $t_*$ , рассчитанные по программе «Долговечность ПК», с величинами номинального ресурса  $L_{10}$ , полученными по стандартной эмпирической зависимости (1). С этой целью использовали шариковый подшипник № 309, эмпирический ресурс которого в работе [источник<sup>10</sup>, с. 154, пример 5] составил  $L_{10} = 17363$  ч при радиальной нагрузке  $F_r = 5600$  Н и частоте вращения внутреннего кольца  $n_e = 800$  об/мин.

Чтобы результаты сравнения были сопоставимы, начальные условия модели (2)–(16) подобрали такими, чтобы теоретический ресурс  $t_*$  при  $F_r = 5600$  Н и  $n_e = 800$  об/мин был приблизительно равен эмпирическому  $L_{10} = 17363$  ч. Такому условию соответствует ШПК № 309, изготовленный из ШХ15 со следующими характеристиками:  $HB \approx 5100$  МПа,  $\sigma_e \approx 1910$  МПа,  $\sigma_T \approx 1370$  МПа, и условиями работы:  $F_r = 5600$  Н,  $n_e = 800$  об/мин,  $T_0 \approx 50^\circ\text{C}$ . Его рассчитанный по программе ресурс составляет  $t_* = 17220$  ч и приблизительно равен  $L_{10} = 17363$  ч.

На рисунке показано изменение эмпирического  $L_{10}$  (кривая ГОСТ) и теоретического  $t_*$  (кривые 1–9) ресурса ШПК № 309 в зависимости от температурно-силовых параметров его эксплуатации. Стрелками показано графическое определение ресурса  $t_* \approx L_{10}$  для условий рассмотренного примера.

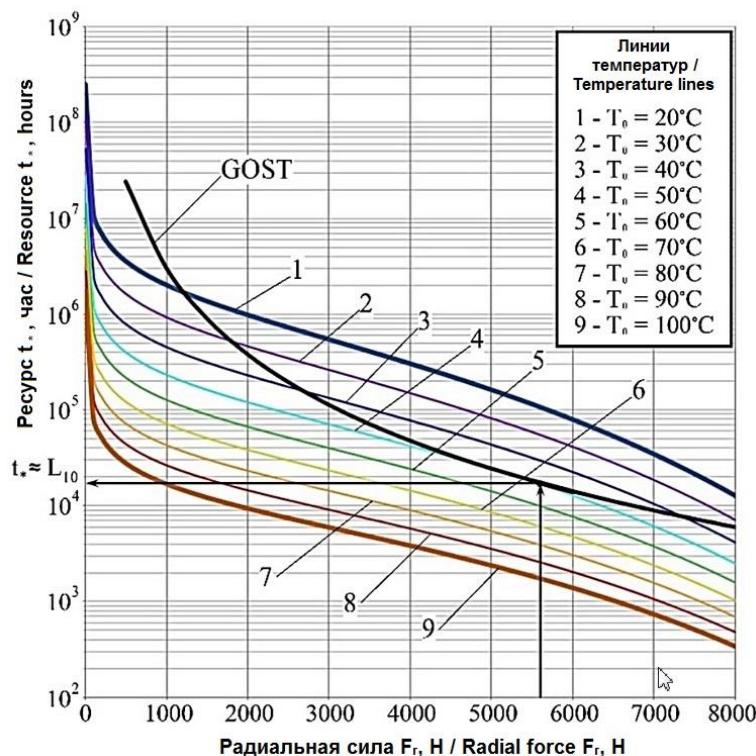
Анализ подобных исследований показывает, что наиболее существенным параметром, который не учитывает эмпирическая зависимость (1), является рабочая температура ПК. Из рисунка следует, что для условий рассмотренного примера изменение температур в реальном рабочем диапазоне  $T_0 = 20\ldots80^\circ\text{C}$  приводит к изменению ресурса ШПК № 309 практически на порядок. Из рисунка также следует, что при изменении нагрузки в диапазоне  $F_r = 1000\ldots8000$  Н эмпирический ресурс ШПК № 309 снижается от  $L_{10} \approx 3 \cdot 10^6$  ч до  $L_{10} \approx 6 \cdot 10^3$  ч. Величина  $t_*$  для этих условий изменяется от  $t_* \approx 2 \cdot 10^5$  ч до  $t_* \approx 2,5 \cdot 10^3$  ч, что говорит о менее интенсивном влиянии нагрузки на долговечность по новой методике.

Очевидно, что предложенный алгоритм и программа расчета позволяют исследовать влияние других, перечисленных в начальных и граничных условиях, параметров на величину проектного ресурса исследуемого ПК без проведения дополнительных экспериментов. Это выгодно отличает предложенный кинетический подход от однозначной экспериментальной зависимости для оценки ресурса подшипников качения по динамической грузоподъемности.



## Выводы

1. На основе современных достижений теории надежности, физики и механики, повреждаемости и разрушения деталей машин сформулирована аналитическая методика построения моделей отказов различных ПК по энергетическому критерию контактной выносливости материалов. При разработке моделей учитываются все основные конструктивные и технологические параметры эксплуатации ПК, а также свойства материалов. В качестве примера представлена постановка краевой задачи для прогнозирования ресурса подшипников с вращающимся внутренним кольцом.



*Влияние температурно-силовых параметров на ресурс ШПК № 309  
Influence of temperature and power parameters on the resource of the single row ball bearing no. 309*

2. Решение краевой задачи представлено для краевых условий нагружения шариковых подшипников № 309. Результаты теоретических исследований показали, что изменение рабочей температуры от 20-ти до 80-ти градусов может привести к изменению ресурса подшипника более чем на порядок. Возможность исследования влияния различных конструктивных и технологических параметров на величину проектного ресурса, исследуемого ПК без проведения дополнительных экспериментов, выгодно отличает предложенный кинетический подход от известной однозначной экспериментальной зависимости.

## Библиографический список

1. Проников А.С. Параметрическая надежность машин. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 560 с.
2. Antsupov A.V., Antsupov A.V. (jun), Antsupov V.P. Designed assessment of machine element reliability due to efficiency criteria // Vestnik Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov. 2013. No. 5 (45). 62–66.
3. Анцупов А.В. (мл.), Анцупов А.В., Анцупов В.П. Развитие теории прогнозирования надежности деталей машин // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. № 2. С. 26–32.
4. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974. 560 с.
5. Федоров В.В. Кинетика повреждаемости и разрушения твердых тел. Ташкент: Изд-во «Фан» УзССР, 1985. 165 с.



6. Анцупов А.В. (мл.), Анцупов А.В., Анцупов В.П. Теория и практика обеспечения надежности деталей машин по критериям кинетической прочности и износостойкости материалов. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2015. 308 с.
7. Анцупов А.В. (мл.), Анцупов А.В., Анцупов В.П. Аналитический метод проектной оценки ресурса элементов металлургических машин // Известия вузов. Черная металлургия. 2017. Том 60. № 1. С. 30–35.
8. Иванова В.С. Синергетика. Прочность и разрушение металлических материалов. М.: Наука, 1992. 160 с.
9. Федоров В.В. Основы эргодинамики и синергетики деформируемых тел. Основы эргодинамики деформируемых тел. Калининград: Изд-во ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2014. Ч. 3. 222 с.
10. Панин В.Е., Федоров В.В., Ромашов Р.В. Явление структурно-энергетической аналогии процессов разрушения и плавления металлов и сплавов // Синергетика и усталостное разрушение металлов: сб. науч. тр. Москва, 1989. С. 29–44.
11. Бартенев Г.М. Прочность и механизм разрушения полимеров. М.: Химия, 1984. 280 с.
12. Ибатуллин И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2008. 387 с.
13. Федоров В.В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твердых тел. Ташкент: Изд-во «Фан» УзССР, 1979. 168 с.
14. Анцупов (мл.) А.В., Анцупов А.В., Анцупов В.П., Слободянский М.Г., Русанов В.А. Энерго-механическая концепция прогнозирования ресурса узлов трения по критерию износостойкости элементов // Трение и износ. 2016. Т. 37. № 5. С. 636–642.
15. Буллер П. Физико-химическая термодинамика вещества. СПб.: Янус, 2001. 192 с.
16. Френкель Я.И. Введение в теорию металлов. Л.: Наука, 1972. 424 с.
17. Журков С.Н., Нурзуллаев Б.Н. Временная зависимость прочности при различных режимах нагружения // Журнал технической физики. 1953. Т. 23. №10. С. 1677–1689.
18. Федоров В.В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твердых тел. Ташкент: Фан, 1979. 168 с.
19. Беляев Н.М. Сопротивление материалов. М.: Наука, 1976, 608 с.

#### References

1. Pronikov A.S. *Parametricheskaja nadezhnost' mashin* [Parametric reliability of machines]. Moscow: MGTU im. N.Je. Baumana Publ., 2002, 560 p. (In Russian).
2. Antsupov A.V., Antsupov A.V. (Jr), Antsupov V.P. Designed assessment of machine element reliability due to efficiency criteria. Vestnik Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, 2013, no. 5 (45), 62–66.
3. Ancupov A.V. (ml.), Ancupov A.V., Ancupov V.P. Development of the theory predicting the reliability of machine parts. *Mashinostroenie: setevoj elektronnyj nauchnyj zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2014, no. 2, pp. 26–32. (In Russian).
4. Regel' V.R., Slucker A.I., Tomashevskij Je.E. *Kineticheskaja priroda prochnosti tverdyh tel* [Kinetic nature of solid strength]. Moscow: Nauka Publ., 1974, 560 p. (In Russian).
5. Fedorov V.V. *Kinetika povrezhdaemosti i razrushenija tverdyh tel* [Kinetics of damage and destruction of solids]. Tashkent: «Fan» UzSSR Publ., 1985, 165 p. (In Russian).
6. Antsupov A.V. (ml.), Ancupov A.V., Ancupov V.P. *Teorija i praktika obespechenija nadezhnosti detaej mashin po kriterijam kineticheskoy prochnosti i iznosostojkosti materialov* [Theory and practice of machine part reliability provision by the criteria of material kinetic strength and wear resistance]. Magnitogorsk: Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosova Publ., 2015, 308 p. (In Russian).
7. Antsupov A.V. (ml.), Ancupov A.V., Ancupov V.P. Analytical method for project resource estimation of metallurgical machinery parts. *Izvestija vuzov. Chernaja metallurgija* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy]. 2017, vol. 60, no. 1, pp. 30–35. (In Russian).
8. Ivanova V.S. *Sinergetika. Prochnost' i razrushenie metallicheskikh materialov* [Strength and fracture of metallic materials]. Moscow: Nauka Publ., 1992. 160 p. (In Russian).
9. Fedorov V.V. *Osnovy jergodinamiki i sinergetiki deformiruemyh tel. Osnovy jergodinamiki deformiruemyh tel* [Fundamentals of ergodynamics and synergetics of deformable bodies. Fundamentals of deformable body ergodynamics]. Kaliningrad: FGBOU VPO «KGTU» Publ., 2014, Part 3, 222 p. (In Russian).
10. Panin V.E., Fedorov V.V., Romashov R.V. *Javlenie strukturno-jenergeticheskoy analogii processov razrushenija i plavlenija metallov i splavov* [Phenomenon of structural and energy analogy of the processes of metal and alloy destruction and melting]. *Sbornik nauchnyh Trudov "Sinergetika i ustalostnoe razrushenie metallov"* [Collection of scientific articles: Synergetics and fatigue failure of metals]. Moscow, 1989, pp. 29–44. (In Russian).
11. Bartenev G.M. *Prochnost' i mehanizm razrushenija polimerov* [Strength and polymer destruction mechanism]. Moscow: Himija Publ., 1984, 280 p. (In Russian).
12. Ibatullin I.D. *Kinetika ustalostnoj povrezhdaemosti i razrushenija poverhnostnyh sloev* [Kinetics of fatigue damage and destruction of surface layers]. Samara: Samara State Technical University Publ., 2008, 387 p. (In Russian).
13. Fedorov V.V. *Termodinamicheskie aspekty prochnosti i razrushenija tverdyh tel* [Thermodynamic aspects of solids'



- strength and fracture]. Tashkent: «Fan» UzSSR Publ., 1979, 168 p. (In Russian).
14. Antsupov (ml.) A.V., Ancupov A.V., Ancupov V.P., Slobodjanskij M.G., Rusanov V.A. Energy-mechanical concept of the durability prediction of friction units on the wear resistance criterion of elements. *Trenie i iznos* [Friction and wear], 2016, vol. 37, no. 5, pp. 636–642. (In Russian).
15. Buler P. Fiziko-himicheskaja termodinamika veshhestva [Physico-chemical thermodynamics of matter]. St. Petersburg: Janus Publ., 2001, 192 p. (In Russian).
16. Frenkel' Ja.I. *Vvedenie v teoriyu metallov* [Introduction to the theory of metals]. Leningrad: Nauka Publ., 1972, 424 p. (In Russian).
17. Zhurkov S.N., Nurzullaev B.N. Strength time dependence under various loading modes. *Zhurnal tehnicheskoy fiziki* [Journal of Technical Physics]. 1953, vol. 23, no. 10, pp. 1677–1689. (In Russian).
18. Fedorov V.V. *Termodinamicheskie aspekty prochnosti i razrushenija tverdyh tel* [Thermodynamic aspects of solids' strength and fracture]. Tashkent: Fan, 1979, 168 p. (In Russian).
19. Beljaev N.M. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Moscow: Nauka Publ., 1976, 608 s. (In Russian).

**Критерии авторства**

Анцупов А.В. (мл.), Анцупов А.В., Анцупов В.П., Слободянский М.Г. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за plagiat.

**Authorship criteria**

Antsupov A.V.(Jr.), Antsupov A.V., Antsupov V.P., Slobodyanskii M.G. have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interests**

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.914.2+624.044.2

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-21-34>

## УНИФИКАЦИЯ НАЛАДКИ КОНЦЕВОГО ИНСТРУМЕНТА ПО ДЛИНЕ ВЫЛЕТА ПРИ КОНТУРНОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ ПЛОСКОСТЕЙ ОСНАСТКИ

© А.С. Исаченко<sup>1</sup>, Д.Ю. Казимиров<sup>2</sup>

Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

**РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ.** Снижение времени перехода на новое изделие на широкономенклатурном производстве с единственным выпуском изделия. **МЕТОДЫ.** Представляется подход, состоящий в унификации используемой инструментальной наладки по длине вылета концевой фрезы. Расчетная модель, учитывающая влияние вылета на отжим, выполнена методом конечных элементов. Для получения вероятного отжима концевой фрезы и установления его влияния на точность контура без расчетов, построили номограмму, разложили результаты промежуточных вычислений на квадранты, а итоговый результат деформации дали с учетом корректировок, полученных в ходе решения конечных элементов моделей всех исследуемых сочетаний. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Для определения отжима составлена номограмма. Для получения поправочного коэффициента на отжим концевой фрезы проведен эксперимент на станке 676П. **ВЫВОДЫ.** Применение номограммы позволяет определить без расчета отжим инструмента и провести унификацию инструментальной наладки по длине вылета с обеспечением заданной точности размера, сократив время перехода на новое изделие.

**Ключевые слова:** время перехода на новое изделие, отжим концевого инструмента, унификация, метод конечных элементов.

**Информация о статье.** Дата поступления 7 февраля 2018 г.; дата принятия к печати 21 февраля 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2018 г.

**Формат цитирования.** Исаченко А.С., Казимиров Д.Ю. Унификация наладки концевого инструмента по длине вылета при контурном фрезеровании плоскостей оснастки // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 4. С. 21–34. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-21-34

### END MILL TOOLING SETUP UNIFICATION BY EXTENSION LENGTH UNDER CONTOUR MILLING OF PRODUCTION TOOL PLANES

A.S. Isachenko, D.Yu. Kazimirov

Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

**ABSTRACT.** The **PURPOSE** of this research is to reduce the product changeover time in singular manufacturing with a broad range of products. **METHODS.** An approach is presented that includes tooling setup unification by the end mill extension length. The calculation model allowing for the tool extension length effect on deflection is designed by the finite element method. To obtain the probable deflection of the end mill and determine its influence on the contour accuracy without calculations a nomogram is constructed, the results of the intermediate calculations are decomposed into quadrants, and the final result of deformation is given with regard to the corrections obtained when solving the finite elements of the models of all the combinations under investigation. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** A nomogram for deflection determination has been constructed. An experiment using a 676P milling machine has been carried out to determine a correction factor for end mill deflection. **CONCLUSIONS.** The use of the nomogram allows to determine tool deflection without calculations and perform tooling setup unification by the end mill extension length that will provide the required precision of dimensions and reduce the product changeover time.

<sup>1</sup>Исаченко Алексей Сергеевич, аспирант; e-mail: isachenko.alexey.irk@gmail.com  
Aleksei S. Isachenko, Post-graduate student; e-mail: isa-chenko.alexey.irk@gmail.com

<sup>2</sup>Казимиров Денис Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительного производства; e-mail: kazimirov@fromru.com

Denis Yu. Kazimirov, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Technology and Equipment of Machine-Building Production; e-mail: kazimirov@fromru.com



**Keywords:** product changeover time, end mill deflection, unification, finite element method

**Information about the article.** Received February 7, 2018; accepted for publication February 21, 2018; available online April 30, 2018.

**For citation.** Isachenko A.S., Kazimirov D.Yu. End mill tooling setup unification by extension length under contour milling of production tool planes. Proceeding of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 4, pp. 21–34. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-21-34

## Введение

Для серийного производства наиболее актуальны задачи сокращения затрат на переналадку станков, отладку технологии и управляющих программ (УП). Для решения задач серийного производства целесообразно использование относительно небольшой номенклатуры универсального инструмента и типизация конфигурации обрабатываемых поверхностей с учетом приемов обработки. Отработка технологии и УП в этом случае включается во время переналадки станков. Поэтому отладка операционной технологии обычно заканчивается обработкой нескольких деталей в соответствии с техническими требованиями к ним, УП в дальнейшем не корректируют [1].

Анализ работы операторов станков с числовым программным управлением (ЧПУ), показал, что проектирование операционной технологии, на основе которой разрабатывают УП, как правило, основано на опыте разработчика. При этом операционная технология, «не встретившая возражений» со стороны потребителя станка, принимается в качестве образца для последующей разработки.

Операционная технология не совершенствуется и технико-экономических оценок операций, как правило, не проводят. Это связано с тем, что частая смена объектов обработки затрудняет накопление исходных данных для подобных расчетов, а относительно небольшая величина обрабатываемых партий делает малоэффективным экспериментальное совершенствование операционной технологии на рабочем месте. Поиск оптимальных решений для операционной технологии станков с ЧПУ в производственных условиях не стимулируется [1].

При многономенклатурном характере единичного производства использование станков с ЧПУ связано с частыми переналадками. Стоимость нормо-часа станков с ЧПУ при их быстродействии и производительности значительно превосходит станки с ручным управлением. Инструменты этих станков работают в составе сборных наладок и заменяются при поступлении нового производственного задания. Технологическая подготовка обработки на станках с ЧПУ связана со значительными затратами, и при оценке эффективности технологических решений для станков с ЧПУ нельзя игнорировать затраты на отладку и переналадку станков [2].

Групповая технология позволяет уменьшить количество требуемых переналадок, но требует наличия большого количества сходств у объектов производства, что не наблюдается в конкретном производстве [3]. Возможно снижение подготовительно-заключительного времени обработки за счет группирования деталей по используемому инструменту [4]. Стандартизация конструкции выпускаемых изделий также приводит к уменьшению количества переналадок, но этот метод неприменим для широкономенклатурного производства. Использование модульных конструкций стандартных приспособлений позволяет снизить количество переналадок, но требует серьезных материальных вложений и имеет длительный срок окупаемости [5]. Механизация или автоматизация процесса переналадки значительно снижает затрачиваемое время, однако и этот вариант сравнительно дорогостоящий [6].

Авторы работ [7, 8] предлагают метод сокращения подготовительно-заключительного времени за счет группирования деталей по используемому инструменту. В то время как данный подход эффективен при наличии только одного станка на участке, при наличии нескольких станков, особенно с общим инструментообеспечением, необходимо учитывать и другие параметры



деталей, такие как габариты и методы крепления заготовки в рабочей зоне станка, количество управляемых координат и др.

В работе [9] авторами предлагается использование статистического анализа для параметрической оптимизации и унификации инструментов и средств оснащения технологических комплексов механической обработки. Данный метод не затрагивает возможность варьирования таких параметров, как вылет инструмента, при обработке элементов с одинаковыми параметрами и размерами.

Станок простояивает во время сборки и балансировки инструмента. При работе различными инструментами, заменяемыми по мере необходимости, суммарное время простоя станка, связанное с заменой инструмента, пропорционально количеству инструментов в наладках.

Известно, что при выполнении УП базовая позиция шпинделья, являющаяся пересечением его торца и оси вращения, определяется запрограммированными координатами. Обработка производится не от базовой позиции, а кромкой режущего инструмента, находящейся на некотором расстоянии от базовой точки шпинделья. Для того чтобы в запрограммированную координату приходила именно режущая кромка, необходимо определить величину смещения по оси Z. Перед началом обработки оператор должен измерить длину каждого из инструментов, использующихся в программе, и ввести числовые значения длин в соответствующие регистры компенсации длины инструмента или в таблицу инструментов. Смещение базовой точки шпинделья на величину длины инструмента называется компенсацией длины инструмента. Количество вариантов получаемых длин инструмента и, соответственно, компенсаторов растет в зависимости от номенклатуры оснастки с ЧПУ [2].

Для достижения эффективного удаления чернового припуска и обеспечения требований по точности фрезерованной плоскости разработчик УП стремится использовать максимально возможный диаметр фрезы при минимальном ее вылете из патрона, но не всегда руководствуется соображениями минимизации разнообразия вылетов при одинаковой номенклатуре инструмента, т.е. унификацией. Так, в некоторых случаях в инструментальном магазине требуется наличие фрез с разным вылетом, например, таких, как назначают для фрезерования матриц, что может быть достигнуто применением одного инструмента разных серий. В таких случаях, если для обработки двух поступающих последовательно деталей разного наименования и типоразмера используется как фреза обычной серии, так и она же, но более длинная, возникает потребность снятия инструмента и его монтажа, что увеличивает время простоя станка.

Наличие классификатора изготавливаемых изделий позволит определить типовые значения вылета инструмента, требуемые для обработки элементов изделия [10]. Унифицировав значения вылета концевого инструмента в соответствии с типовыми значениями высоты обрабатываемого конструктивного элемента, возможно избавиться от необходимости в изменении состава инструментальной наладки при переходе на новую единицу планирования и задания коррекции вылета инструмента по оси Z, тем самым добившись необходимого снижения времени производства. Чем меньше уникальная номенклатура инструментов, тем быстрее производство может перестроиться под новый заказ [11]. Для сборного инструмента в качестве дополнительной меры по сокращению количества типов инструмента в наладке следует рассмотреть унификацию сменных режущих пластин, их узлов крепления и резцовых вставок. Целесообразность использования инструмента с разным вылетом и необходимость смены инструмента может быть оценена при помощи определения отжима инструмента на «наихудших» режимах обработки, обеспечивающих заданную точность.

### **Расчет отжима концевого инструмента методом конечных элементов**

Вследствие сложности упруго-жесткого взаимодействия «шпиндель–оснастка ЧПУ–концевая фреза–обрабатываемая стенка заготовки–приспособление» выполним теоретико-экспериментальное исследование данной системы. Пренебрежем температурной и пластической составляющими суммарной деформации в зоне резания, как нехарактерными для отжима фрезы



от обрабатываемой поверхности в радиальном направлении. Будем рассматривать только предварительное фрезерование, которое характеризуется наиболее значительными деформациями и разнообразием номенклатуры наладок концевых фрез.

Представим перемещение оси фрезы как функцию  $\Delta = f(P, E, D, L, L_{реж})$ , где  $P$  – сила резания;  $E$  – модуль упругости материала фрезы;  $D$  – диаметр фрезы;  $L$  – вылет фрезы из патрона;  $L_{реж}$  – длина режущей части фрезы.

Дополнительно идеализируем поведение данной системы под нагрузкой и, во-первых, выделим деформации, связанные с контактной жесткостью в стыках шпиндельной группы и сборок цанговых патронов, которые обусловливают до 70% контактных перемещений станка [12] в отдельную составляющую, и, во-вторых, пренебрежем несовпадением изгибной силы резания  $P_y$  и составляющими силами резания  $P_h$  и  $P_v$ , поддающимися измерению. Вследствие воздействия нескольких факторов на систему и ведение оценки только по возможному перемещению режущей кромки относительно оси фрезы, введем коэффициент  $K_p$ , учитывающий отклонение реального перемещения, характерного для каждого конкретного станка, от полученного методом экспериментального моделирования.

Теоретическое исследование упругих деформаций при обработке изделий резанием использует три группы методов решения дифференциального уравнения упругости: аналитические, численные и моделирование. Вторую группу формирует метод конечных разностей (МКР), метод конечных элементов (МКЭ) и другие. Они позволяют учесть особенности геометрического тела полнее, чем при аналитическом подходе, и повысить адекватность полученных результатов. Моделирование имеет две разновидности: физическое и математическое. Физическое моделирование выполняют на устройствах, представляющих собой масштабную копию реального тела. При этом источники нагружения могут быть иными, чем в реальном процессе. В последние годы развились САЕ-системы, позволяющие автоматизировать процесс приближенного интегрирования дифференциального уравнения для моделей, построенных в CAD-системе.

При фрезеровании равнодействующую силу резания  $P$  раскладывают на составляющие силы, определяющие процесс резания, и влияющие на технологические факторы. Например, касательная сила  $P_z$  создает крутящий момент на шпинделе станка, по которому рассчитывается необходимая мощность, это главная сила по своему значению. Вторая составляющая – радиальная сила  $P_y$  направлена нормально к поверхности резания. Сила  $P_y$  вызывает отжим инструмента от заготовки и, следовательно, размерную неточность обработки. Однако при контурной обработке касательная сила  $P_z$  вызывает «запаздывание» положения инструмента (пунктирная окружность), что, в свою очередь, вызывает еще большие погрешности формы (рис. 1). Вследствие этой особенности, расчет отжима необходимо проводить относительно силы  $P_z$ , а не  $P_y$ . Необходимо подчеркнуть, что все составляющие силы резания заметно изменяются в зависимости от таких факторов, как форма и геометрия фрезы, размер среза, острота режущих кромок, род обрабатываемого материала, наличие смазочно-охлаждающей жидкости, и т.д. [13, 14].

Требуемые для анализа значения изгибающей силы  $P_z$  в диапазоне от 50 до 300 Н с шагом в 50 Н при варьировании числа зубьев фрезы ( $z = 2, 3$  и  $4$ ) возможными стандартными диаметрами ( $D = 6–30$  мм) с учетом вылета, колеблющегося от 60 до 300 мм, и связанной с ним длиной режущей части приводят к такому количеству экспериментальных комбинаций, которое можно реализовать только в ходе имитационного моделирования. Машинный эксперимент проводится с целью получения информации о характеристиках процесса функционирования рассматриваемого объекта. Эта информация может быть получена как для анализа характеристик, так и для синтеза структуры, алгоритмов и параметров системы. В зависимости от поставленных целей моделирования системы на ЭВМ имеются различные подходы к организации имитационного эксперимента.

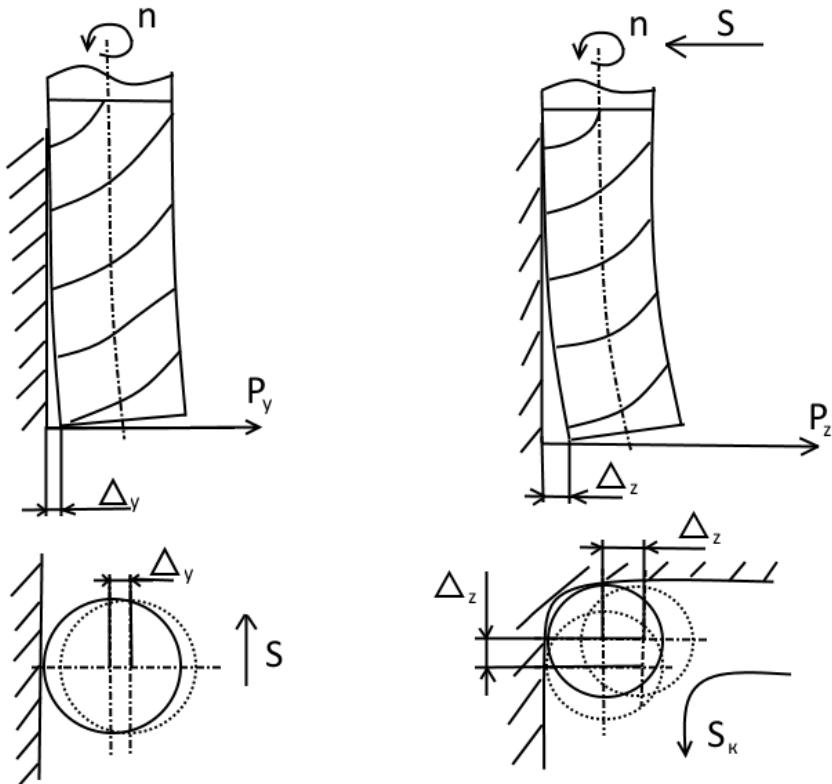


Рис. 1. Отжимы концевой фрезы при обработке вертикальных профилей  
Fig. 1. End mill deflection at vertical profile machining

Преимуществом машинных экспериментов перед натурными является возможность полного воспроизведения условий эксперимента с моделью исследуемой системы. Простота прерывания и возобновления машинного эксперимента позволяет применять последовательные и эвристические приемы планирования, которые могут оказаться нереализуемыми в экспериментах с реальными объектами.

Подтвердим сходимость результатов МКЭ при определении упругих деформаций для принятого размера и вида конечно-элементной сетки. Для созданной в среде Siemens NX 8.5 модель стальной ( $\rho = 7,829 \cdot 10^{-6}$  кг/мм<sup>3</sup>;  $E = 206940000$  кПа) консольной балки Ø20 мм и длиной  $L = 300$  мм была создана КЭ модель с 3D-тетраэдральной сеткой с размером элемента 1,5 мм. В качестве типа решателя для симуляции был выбран SOL 101 Linear Statics – Global Constraints с итерационным решателем элемента. На незакрепленный конец балки была приложена сила  $Q = 200$  Н, получено значение максимального отклонения  $f_{max} = 1,106$  мм.

Сравним полученный результат с аналитическими расчетами, известными из сопротивления материалов.

Максимальное отклонение

$$f_{max} = -\frac{Ql^3}{3EI}.$$

Момент инерции круглого сечения

$$I = \frac{\pi d^4}{64}.$$



$$I = \frac{3,14 * 0,02^4}{64} = 7,85 * 10^{-9} \text{ мм}^4;$$

$$f_{\max} = -\frac{200 * 0,3^3}{3 * 20694 * 10^7 * 7,85 * 10^{-9}} = -1,108 \text{ мм};$$

$$\Delta = \frac{1,108 - 1,106}{1,108} = 0,18\%.$$

Отклонение в 0,18% незначительно, и, следовательно, конечно-элементная сетка и указанный тип решателя могут применяться для определения интересующих упругих деформаций с получением достоверных результатов. Достоверность определения упругих отжимов в задачах машиностроения доказана рядом исследователей при сопоставлении результатов расчета с экспериментальными данными.

Основную сложность в реализации теоретического исследования имеет этап моделирования, для которого требуется расчетная модель поведения системы с учетом физических особенностей упруго-деформируемых тел. Вычислительный эксперимент проведем при симуляции деформирования податливого тела в Siemens NX 8.5, а перемещения определим МКЭ в решателе Nastran при следующих условиях: заделка в сечении по кромке свободного торца патрона, материал фрезы – быстрорежущая сталь, модуль Юнга  $E = 206,94 \text{ ГПа}$ , коэффициент Пуассона  $\mu = 0,288$ , нагружение силой  $P_z$ , равномерно распределенной по рабочей поверхности зуба и направленной противоположно направлению резания. Конечно-элементная модель была построена с 3D-тетраэдralной сеткой с размером элемента 1,5 мм (количество элементов – 29156) – вид стружечной канавки, упрощенный без вышлифованного профиля. Модель исследуемой фрезы соответствует геометрически и физически фрезам серии Sandvik Coromant Plura без перемычки с углом  $\omega = 10^\circ$  (рис. 2).

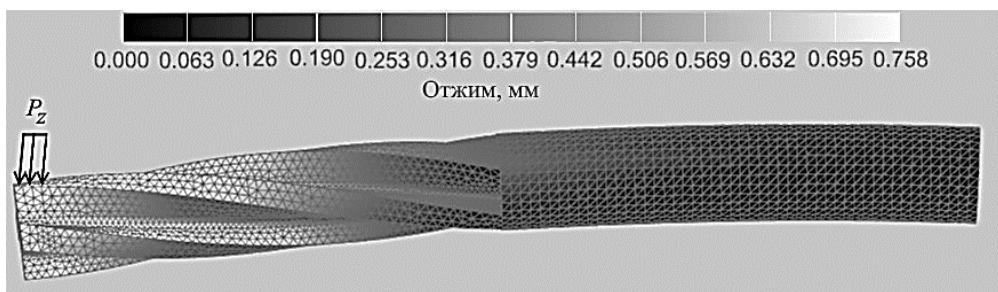


Рис. 2. Отжимы концевой фрезы при обработке вертикальных профилей  
Fig. 2. End mill deflections at vertical profile machining

Данный подход показал хорошую надежность результатов при моделировании прогиба сборок «термопатрон-удлинитель-фреза».

### Номограмма отжима фрезы

Для получения вероятного отжима концевой фрезы и установления его влияния на точность контура без расчетов построим номограмму, разложив результаты промежуточных вычислений на квадранты, а итоговый результат деформации дадим с учетом корректив, полученных в ходе решения конечных элементов (КЭ) моделей всех исследуемых сочетаний.



Известно, что режущая сила  $P_z$  вычисляется по следующей формуле<sup>3</sup>:

$$P_z = C_{p1} \times D^{n_{p1}} \times \left( \frac{t}{D} \right)^{n_{p2}} \times s_z^{n_{p3}} \times K_{P_m} \times C_{p2} \times (HB)^{m_{p2}} \times C_{p3} \times z^{m_{p3}} \times C_{p4} \times B^{m_{p4}} . \quad (1)$$

Фреза имеет разные поперечные сечения на протяжении своей длины, поэтому ее необходимо рассматривать как ступенчатую балку. Для получения момента инерции сечения режущей части фрезы были проведены расчеты при помощи соответствующей функции в NX 8.5, и получены коэффициенты приведения  $K_I = 2,143$  (при  $z = 2$  и  $z = 4$ ) и  $K_I = 2,52$  (при  $z = 3$ ).

Используя интеграл Мора для расчета отжима ступенчатой балки, получаем формулу<sup>3,4</sup>:

$$\Delta = \frac{P(L_{\text{реж}}^3(K_I - 1) + L^3)}{3EI} . \quad (2)$$

Подставив расчет  $P_z$  (1) в формулу (2) и соответствующие коэффициенты, получена расчетная зависимость отжима фрезы:

$$\Delta = \frac{21,8155 \times t^{0,66} \times s_z^{0,89} \times K_{P_m} \times (HB)^{1,1} \times z \times B (L_{\text{реж}}^3(K_I - 1) + L^3)}{E \times D^{4,52}} . \quad (3)$$

Первый сектор номограммы представляет собой зависимость безразмерного конструктивного параметра  $P_1 = L^3 / D^{4,52}$  от  $L$  и  $D$ . В качестве ряда диаметров были выбраны стандартные значения от 6 до 12 мм.

Переход между секторами 1 и 2 осуществляется при помощи проведения линии через точку со значением  $P_1$ , линии, показывающей зависимость параметра  $P_2 = P_1 \times L^3 \left( \left( L_{\text{реж}} / L \right)^3 \times (K_I - 1) + 1 \right)$  от  $P_1$  и отношения длины режущей части  $L_{\text{реж}}$  к вылету фрезы  $L$ . Линия проводится параллельно соответствующей линии, исходящей из ближайшего деления на оси ординат. Коэффициент  $K_I$  принят равным 2,143.

Второй сектор номограммы отражает зависимость параметра  $P_3 = P_2 \times B$  от  $P_2$  и ширины фрезерования  $B$ . В качестве возможных значений ширин фрезерования были выбраны значения от 1 до 23 мм согласно  $L_{\text{реж}}$ .

Третий сектор номограммы отражает зависимость параметра  $P_4 = P_3 \times s_z^{0,89}$  от  $P_3$  и подачи на зуб  $s_z$ . При помощи анализа ОСТ 92-3236-82<sup>4</sup> был введен ряд рекомендуемых подач с 0,03 до 0,15 мм/зуб.

Переход между секторами 3 и 4 осуществляется при помощи проведения линии через точку с полученным значением  $P_4$ , линии, показывающей зависимость параметра  $P_5 = P_4 \times K_{P_m} (HB)^{1,1}$  от  $P_4$  и отношения твердости обрабатываемого материала НВ. Линия проводится параллельно соответствующей линии, исходящей из ближайшего деления на оси ординат.  $K_{P_m}$  в этом случае был взят как для алюминиевых сплавов, равный 0,8 мм.

<sup>3</sup> Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с числовым программным управлением. Часть II. Нормативы режимов резания. М.: Экономика, 1990. 473 с. / General machine-building standards of time and cutting modes for methods and time measurement of operations performed on universal and multipurpose NC machine tools. Part II. Standards of cutting modes. M.: Economics, 1990. 473 p.

<sup>4</sup> ОСТ 92-3236-82. Обработка алюминиевых сплавов. Режимы резания и геометрические параметры инструмента. 57 с. / OST 92-3236-82. Processing of aluminum alloys. Cutting modes and tool geometric parameters. 57p.



Четвертый сектор номограммы отражает зависимость отжима фрезы  $\Delta$  от  $P_5$  и глубины фрезерования  $t$ . В качестве ряда глубин фрезерования были выбраны черновые глубины до 11 мм. На номограмме показаны значения  $\Delta$  при  $z = 2$ ; при  $z = 4$  полученное значение удваивается, если в контакте с заготовкой находятся два зуба фрезы, то есть когда  $B \geq 0,5D$ .

Расчетные значения отжимов не совпадают с экспериментальными ввиду того, что при расчете методом КЭ рассматривается идеализированная система. Для приближения результатов к реальным, был проведен эксперимент на станке 676П для определения поправочного коэффициента, состоящего из двух частей – «чистой» поправки, на которую влияет конструкция шпиндельного узла, и поправки, зависящей от геометрии инструмента. В данном эксперименте были получены коэффициент «чистой» поправки  $K_{\text{пч}} = 6$  и коэффициент  $K_{\text{пэ}} = 1,8$ .

Эксперимент был проведен путем создания радиальной нагрузки на конец оправки или фрезы, установленной в шпиндель станка 676П. Во время первого эксперимента для установления чистой поправки от жесткости шпинделя, нагружалась сплошная стальная оправка Ø12 мм с вылетом 115 мм. Нагрузка в диапазоне 50–300 Н создавалась при помощи предварительно тарированного динамометра – система Н.Г. Токаря, ГОСТ 9500-60 тип ДОС 03 с интервалом в 50 Н. При помощи индикатора типа ИЧ 0-10 мм ГОСТ-577-68 проводилось пять замеров отжима при каждом значении нагрузки, после чего оправка проворачивалась в шпинделе на 180° для устранения знакопеременной погрешности измерения, и замеры проводились снова. Рассмотрим табл. 1–6.

Таблица 1  
Замеры отжима сплошной оправки

Table 1

*Measurements of a solid mandrel deflection*

F, Н	Замер № 1, мм / Measurement no. 1, mm	Замер № 2, мм / Measurement no. 2, mm	Замер № 3, мм / Measurement no. 3, mm	Замер № 4, мм / Measurement no. 4, mm	Замер № 5, мм / Measurement no. 5, mm
50	0,46	0,31	0,28	0,27	0,34
100	0,88	0,62	0,75	0,67	0,69
150	1,27	1,02	1,22	1,13	1,15
200	1,70	1,54	1,70	1,68	1,64
250	2,08	2,00	2,14	2,11	2,10
300	2,23	2,33	2,31	2,30	2,22
Поворот оправки в шпинделе на 180° / Mandrel 180 degree turn in the spindle					
50	0,43	0,32	0,28	0,23	0,24
100	1,01	0,74	0,70	0,58	0,58
150	1,42	1,14	1,06	0,89	0,90
200	1,88	1,52	1,45	1,50	1,20
250	2,13	1,97	1,84	1,60	1,55
300	2,65	2,33	2,25	2,05	2,02

В среде Siemens NX 8.5 была построена геометрическая модель оправки, что позволило получить значение отжима при помощи метода конечных элементов. Полученные значения были сравнены со средними значениями экспериментально полученных отжимов при всех нагрузках.



**Таблица 2**  
**Погрешность замеров отжима сплошной оправки**

**Table 2**

**Measurement error of solid mandrel deflection**

$F, \text{Н}$	Средний отжим, мм / Average deflection, mm	Отжим в NX, мм / Deflection in NX, mm	Фактор расхождения / Divergence factor
50	0,309	0,0639	4,83
100	0,722	0,128	5,64
150	1,12	0,192	5,83
200	1,581	0,256	6,17
250	1,952	0,32	6,1
300	2,269	0,384	5,9

Как видно из вышеприведенной таблицы, фактор расхождения измерений имеет наименьшее значение при минимальной нагрузке, и практически не изменяется при более высоких значениях нагрузки. Таким образом, была получена «чистая» поправка, не учитывающая геометрию инструмента.

Аналогично была нагружена фреза из быстрорежущей стали Ø24 мм с вылетом из шпинделя 78 мм и числом зубьев  $z = 2$ . Верхняя граница диапазона нагрузки была принята 300 Н.

**Таблица 3**  
**Замеры отжима двузубой фрезы**

**Table 3**

**Measurements of a two-lipped end mill deflection**

$F, \text{Н}$	Замер №1, мм / Measurement no.1, mm	Замер №2, мм / Measurement no.2, mm	Замер №3, мм / Measurement no.3, mm	Замер №4, мм / Measurement no.4, mm	Замер №5, мм / Measurement no.5, mm
50	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
100	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03
150	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04
200	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05
250	0,08	0,06	0,06	0,06	0,06
300	0,1	0,07	0,08	0,08	0,08
Поворот фрезы в шпинделе на 180° Mandrel 180 degree turn in the spindle					
50	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
100	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
150	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03
200	0,06	0,06	0,04	0,04	0,04
250	0,08	0,08	0,06	0,06	0,06
300	0,11	0,11	0,08	0,08	0,08



**Таблица 4**  
**Погрешность замеров отжима двузубой фрезы**  
**Table 4**  
**Measurement error of two-lip end mill deflection**

F, Н	Средний отжим, мм / Average deflection, mm	Отжим в NX, мм / Deflection in NX, mm	Фактор расхождения / Divergence factor
50	0,015	0,00292	5,13
100	0,024	0,00584	4,11
150	0,037	0,00876	4,22
200	0,048	0,01168	4,11
250	0,064	0,0146	4,38
300	0,084	0,01752	4,79

Также была нагружена быстрорежущая фреза Ø30 мм с вылетом из шпинделя 75 мм и числом зубьев  $z = 4$ . Верхняя граница диапазона нагрузки была принята 300 Н.

**Таблица 5**  
**Замеры отжима четырехзубой фрезы**  
**Table 5**  
**Measurements of four-lip end mill deflection**

F, Н	Замер № 1, мм / Measurement no. 1, mm	Замер № 2, мм / Measurement no. 2, mm	Замер № 3, мм / Measurement no. 3, mm	Замер № 4, мм / Measurement no. 4, mm	Замер № 5, мм / Measurement no. 5, mm
50	0,03	0,03	0,03	0,02	0,04
100	0,04	0,04	0,04	0,03	0,05
150	0,05	0,04	0,04	0,04	0,05
200	0,06	0,05	0,05	0,05	0,06
250	0,06	0,06	0,05	0,05	0,07
300	0,07	0,06	0,06	0,06	0,07

Поворот фрезы в шпинделе на 180°  
Mandrel 180 degree turn in the spindle

50	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02
100	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03
150	0,04	0,03	0,02	0,04	0,04
200	0,04	0,03	0,03	0,05	0,04
250	0,05	0,04	0,04	0,05	0,05
300	0,06	0,04	0,04	0,06	0,05



**Таблица 6**  
**Погрешность замеров отжима четырехзубой фрезы**

**Table 6**

**Measurement error of four-lip end mill deflection**

$F, \text{Н}$	Средний отжим, мм / Average deflection, mm	Отжим в NX, мм / Deflection in NX, mm	Фактор расхождения / Divergence factor
50	0,024	0,00129	18,6
100	0,033	0,00258	12,8
150	0,039	0,00387	10,1
200	0,046	0,00516	8,9
250	0,052	0,00645	8,1
300	0,057	0,00774	7,4

Исходя из полученных данных, сделан вывод, что расхождения между экспериментальными и расчетными значениями отжима наиболее велики в случае четырехзубой фрезы. Суммарный поправочный коэффициент примем за среднее арифметическое значение фактора расхождения при отжиме четырехзубой фрезы  $K_p = 11$ . Коэффициент  $K_p$  является произведением двух поправочных коэффициентов  $K_{p1}$ , зависящего от конструкции шпиндельного узла, и  $K_{p2}$ , зависящего от геометрических параметров инструмента.  $K_{p1}$  принят равным 6 – среднему арифметическому фактору расхождения из табл. 2. Следовательно,  $K_{p2} = 11/6 = 1,8$ . Для любой другой модели станка необходимо получить соответствующие коэффициенты по предложенной методике.

На рис. 3 толстыми линиями показан пример пользования номограммой. В этом примере унифицируем следующие варианты вылетов концевого инструмента. Первый диаметр фрезы  $D = 8$  мм, число зубьев  $z = 2$ , вылет  $L = 90$  мм, отношение длины режущей части к вылету  $L_{\text{реж}}/L = 0,5$ , ширина фрезерования  $B = 5$  мм, подача на зуб  $S_z = 0,08$  мм/зуб, твердость обрабатываемого алюминиевого сплава –  $HB 250$ , глубина фрезерования  $t = 5$  мм. Отжим составил 0,04 мм при обработке элемента с размером, попадающим в интервал 6–10 мм, что позволяет получить квалитет точности при фрезеровании  $IT10^5$ . Другой линией обозначен процесс получения значения отжима для фрезы  $D = 6$  мм, число зубьев  $z = 2$ , вылет  $L = 90$  мм, отношение длины режущей части к вылету  $L_{\text{реж}}/L = 0,5$ , ширина фрезерования  $B = 4$  мм, подача на зуб  $S_z = 0,08$  мм/зуб, твердость обрабатываемого алюминиевого сплава  $HB 250$ , глубина фрезерования  $t = 4$  мм. Значение отжима практически не отличается от предыдущего примера при одинаковых вылетах. Дополнительной линией показан процесс получения отжима для такой же фрезы, но с  $L = 80$  мм. Все три варианта позволяют получить квалитет точности при фрезеровании не менее  $IT11$  при обработке элемента с размером, попадающим в интервал 6–10 мм. Зная высоту типовых изготавливаемых деталей, можно использовать в инструментальной наладке фрезы с  $D = 6$  мм и  $D = 8$  мм с вылетом  $L = 90$  мм, исключив иные значения вылетов. Такая унификация позволит избавиться от необходимости во введении коррекции длины инструмента на станке, снизив тем самым время простоя станка и перехода на новое изделие, а также сократит количество возможных вариантов инструментальных наладок.

<sup>5</sup>ОСТ 1 00022-80. Предельные отклонения размеров от 0,1 до 10 000 мм и допуски формы и расположения поверхностей, не указанные на чертеже. 23 с. / OST 1 00022-80. Limit deviations of sizes from 0.1 to 10 000 mm and tolerances of shape and surface arrangement not specified in the drawing. 23 p.

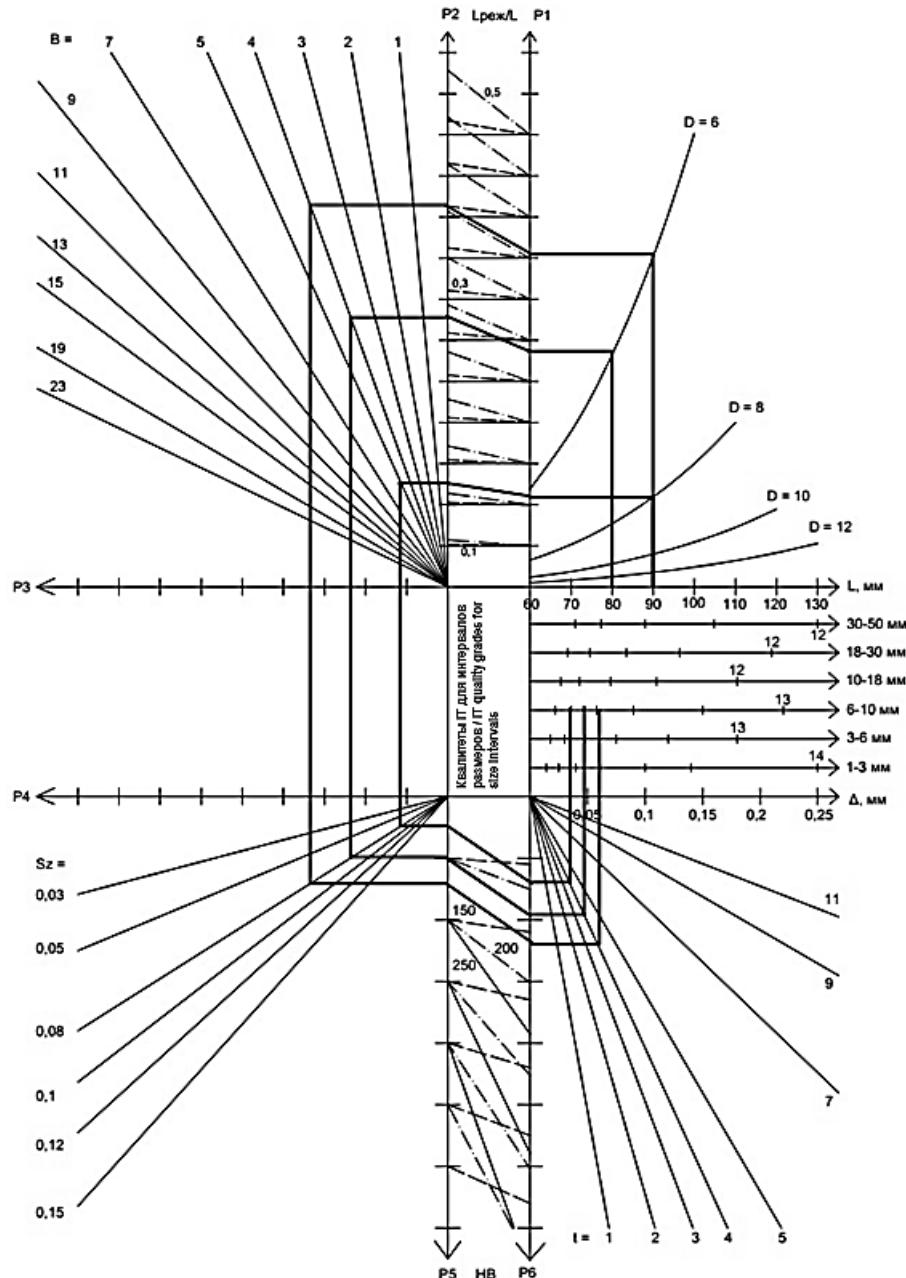


Рис. 3. Номограмма отжимов быстрорежущих двузубых и четырехзубых фрез при обработке алюминиевых сплавов

**Fig. 3. Nomogram of high-speed two- and four-flip end mill deflections at aluminum alloy machining**

## Заключение

Данная номограмма позволяет без расчета определить отжим инструмента при заданных режимах резания и унифицировать применяемый инструмент по вылету и длине режущей части посредством исключения из наладки инструмента, который возможно заменить без потери точности формы обработанного элемента, что, в свою очередь, уменьшит время простоя станка с ЧПУ на переналадке<sup>5</sup>. Стоит отметить, что номограмма на рис. 3 может быть использована только для определения отжимов двузубых и четырехзубых концевых фрез из быстрорежущей стали при обработке алюминиевых сплавов на станке 676П.

Для других станков, материалов инструмента, обрабатываемой детали и чисел зубьев составляются отдельные номограммы.



**Библиографический список**

1. Григорьев С.Н., Кохомский М.В., Маслов А.Р. Инструментальная оснастка станков с ЧПУ: справочник / Под общ. ред. А.Р. Маслова. М.: Машиностроение, 2006. 544 с.
2. Горлов И.В., Полетаева Е.В., Калинин Н.А. Групповая технология как основа автоматизации широкономенклатурного производства // Вестник Тверского государственного технического университета. 2016. № 1(29). С. 59–65.
3. Чуваков А.Б. Современные тенденции развития и основы эффективной эксплуатации обрабатывающих станков с ЧПУ. Нижний Новгород: Изд-во НГТУ, 2013. 174 с.
4. Исаков И.Н. Сокращение подготовительно-заключительного времени обработки за счет группирования деталей по используемому инструменту // Наукоемкие технологии. 2017. Т. 18. № 2. С. 68–70.
5. Попок Н.Н. Анализ тенденций проектирования инструментальных систем. Часть 3. Инструментальные системы для многоцелевой обработки // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер.В: Промышленность. Прикладные науки. 2013. № 3. С. 19–37.
6. Синго С. Изучение производственной системы Тойоты с точки зрения организации производства / Пер. с англ. М.: Институт комплексных стратегических исследований, 2006. 312 с.
7. Исаков И.Н. Снижение подготовительно-заключительного времени обработки за счет группирования деталей по используемому инструменту // Наукоемкие технологии. 2017. Т. 18. № 2. С. 68–70.
8. Аскалонова Т.А., Леонов С.Л., Ситников А.А. Особенности организации групповой технологии в гибких производственных системах // Механики XXI века. 2016. № 15. С. 128–130.
9. Бородавко В.И., Гайко В.А., Крутько В.С., Позылова Н.М., Хейфец М.Л. Параметрическая оптимизация и унификация инструментов и средств оснащения технологических комплексов механической обработки // Технологичні комплекси. 2012. № 1-2. С. 30–35.
10. Казимиров Д.Ю., Исаченко А.С. Формирование последовательности запуска в производство изделий одновременной кластеризацией по технологическим признакам и классам деталей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 7. С. 24–36. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-24-36>
11. Загидуллин Р.Р. Управление машиностроительным производством с помощью систем MES, APS, ERP. 2-е изд. Старый Оскол: ООО «Тонкие наукоемкие технологии», 2015, 372 с.
12. Суслов А.Г., Федоров В.П., Горленко О.А. Технологическое повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений. М.: Машиностроение, 2006, 448 с.
13. Воронцов А.Л., Албагачиев А.Ю., Султан-Заде Н.М. Теоретические основы обработки металлов в машиностроении. Старый Оскол: ООО «Тонкие наукоемкие технологии», 2014. 522 с.
14. Wen-Hsiang Lai. Modeling of Cutting Forces in End Milling Operations // Tamkang Journal of Science and Engineering. 2000. Vol. 3. No. 1. P. 15–22.

**References**

1. Grigor'ev S.N., Kohomskij M.V., Maslov A.R. *Instrumental'naja osnastka stankov s ChPU: spravochnik* [Tooling of CNC machine tools: Reference book]. Moscow: Machine-Building Publ., 2006, 544 p. (In Russian).
2. Gorlov I.V., Poletaeva E.V., Kalinin N.A. Group technology as the basis of wide range production automation. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* [Bulletin of Tver State Technical University], 2016, no. 1(29), pp. 59–65. (In Russian).
3. Chuvakov A.B. *Sovremennye tendencii razvitiya i osnovy jeksploatacii obrabatyvajushhih stankov s ChPU* [Modern development trends and bases of CNC machine tool effective operation]. Nizhnij Novgorod: Novosibirsk State Technical University Publ., 2013, 174 p. (In Russian).
4. Isakov I.N. Reduction of preparatory and final processing time by grouping parts according to the used tools. *Naukoemkie tehnologii* [Science Intensive Technologies]. 2017, vol. 18, no. 2, pp. 68–70. (In Russian).
5. Popok N.N. Trend analysis in the design of instrumental systems. Part 3. Instrumental systems for multi-purpose processing. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta. Promyshlennost'. Prikladnye nauki* [Vestnik of PSU №11, 2014. Series B. Industry. Applied Sciences], 2013, no. 3, pp. 19–37. (In Russian).
6. Shingo Shigeo A Study of the Toyota Production System, 2006, 312 p. (Russ. ed.: *Izuchenie proizvodstvennoj sistemy Tojoty s tochki zrenija organizacii proizvodstva*. Moscow, Institute for Comprehensive Strategic Studies Publ., 2006, 312 p.)
7. Isakov I.N. Reduction of preparatory and final processing time by grouping parts according to the used tools. *Naukoemkie tehnologii* [Science Intensive Technologies], 2017, vol. 18, no. 2, pp. 68–70. (In Russian).
8. Askalonova T.A., Leonov S.L., Sitnikov A.A. Features of the group technologies in the flexible manufacturing systems. *Mehaniki XXI veku* [Mechanical Engineers to XXI century], 2016, no. 15, pp. 128–130. (In Russian).
9. Borodavko V.I., Gajko V.A., Krut'ko V.S., Pozyllova N.M., Hejfec M.L. Parametric optimization and unification of tools and tooling for technological machining complexes. *Tehnologichni kompleksi* [Technological complexes], 2012, no. 1-2, pp. 30–35.



10. Kazimirov D.Ju., Isachenko A.S. Production sequence formation using simultaneous clustering by part technological features and classes. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2016, no. 7, pp. 24–36. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-24-36. (In Russian).
11. Zagidullin R.R. *Upravlenie mashinostroitel'nym proizvodstvom s pomoshch'yu sistem MES, APS, ERP* [Mechanical engineering production management by means of MES, APS, ERP]. Staryj Oskol: OOO «High science intensive technologies». 2015. 372 p. (In Russian).
12. Suslov A.G., Fedorov V.P., Gorlenko O.A. *Tehnologicheskoe povyshenie jeksplyata-cionnyh svojstv detalej i ih soedinenij* [Technological improvement of operational properties of parts and their assemblies]. Moscow: Machine-Building Publ., 2006. 448 p. (In Russian).
13. Voroncov A.L., Albagachiev A.Ju., Sultan-Zade N.M. *Teoreticheskie osnovy obrabotki metallov v mashinostroenii* [Theoretical foundations of metal processing in mechanical engineering]. Staryj Oskol: OOO «High science intensive technologies», 2014, 522 p. (In Russian).
14. Wen-Hsiang Lai. Modeling of Cutting Forces in End Milling Operations. *Tamkang Journal of Science and Engineering*, 2000, vol. 3, no. 1, pp. 15–22. (In Russian).

**Критерии авторства**

Исаченко А.С. разработал конечно-элементные модели, результаты расчета, машинного и натурного экспериментов, номограмму, технологические выводы и рекомендации. Казимиров Д.Ю. занимался методологией научного исследования. Исаченко А.С. несет ответственность за плагиат.

**Authorship criteria**

Isachenko A.S. has developed finite-element models, calculation results, machine and full-scale experiments, a nomogram, technological conclusions and recommendations. Kazimirov D.Yu. was engaged in the methodology of scientific research. Isachenko A.S. bears the responsibility for plagiarism.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interests**

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.9.048.4

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-35-42>

## ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОФАКТОРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ РАЗБИВКИ ОТВЕРСТИЙ ПРИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ПРОШИВКЕ МИКРООТВЕРСТИЙ

А.М. Лойко<sup>1</sup>, А.Ф. Бойко<sup>2</sup>

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,  
308012, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.

**РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ.** Определение реальной зависимости разбивки отверстий при электроэрэозионной прошивке микроотверстий от основных параметров процесса. **МЕТОДЫ.** Для исследования многофакторной зависимости разбивки отверстий применены экспериментальный и расчетный методы исследований. Выполнено математическое моделирование трехфакторной зависимости разбивки отверстий. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** На основе результатов эксперимента были получены математические модели зависимости разбивки отверстий от основных параметров процесса. **ВЫВОДЫ.** Установлено, что наиболее значимым параметром, влияющим на разбивку отверстий при электроэрэозионной прошивке, является энергия импульсов. Полученные математические модели позволяют подбирать оптимальный диаметр электрода-инструмента и назначать оптимальные электрические режимы при электроэрэозионной прошивке микроотверстий.

**Ключевые слова:** электроэрэозионная обработка, прошивка микроотверстий, точность электроэрэозионной прошивки, энергия импульсов электроэрэозионной обработки, разбивка отверстия.

**Информация о статье.** Дата поступления 22 февраля 2018 г.; дата принятия к печати 15 марта 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2018 г.

**Формат цитирования.** Лойко А.М., Бойко А.Ф. Исследование многофакторной зависимости разбивки отверстий при электроэрэозионной прошивке микроотверстий // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 4. С. 35–42. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-35-42

### STUDYING MULTIFACTORIAL DEPENDENCE OF HOLE OVERCUT AT MICROHOLE EDM

А.М. Loyko, А.Ф. Boyko

Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov,  
46, Kostyukov St., Belgorod, 308012, Russian Federation

**ABSTRACT.** The **PURPOSE** of the paper is to determine the actual dependence of hole overcut at the EDM drilling of microholes on the main process parameters. **METHODS.** An experimental and calculation research methods are used to study the multifactorial dependence of the hole overcut. Mathematical modeling of the three-factorial dependence of the hole overcut is performed. **RESULTS.** Mathematical models of the hole overcut dependence on main process parameters have been received. **CONCLUSIONS.** The pulse energy has been determined to be the most significant parameter influencing the hole overcut at EDM drilling. The obtained mathematical models allow to select the optimum diameter of an electrode-tool and to specify the optimum electric modes at the EDM drilling of microholes.

**Keywords:** electrical discharge machining (EDM), EDM-drilling of microholes, EDM precision, EDM pulse energy, hole overcut

**Information about the article.** Received February 22, 2018; accepted for publication March 15, 2018; available online April 30, 2018.

**For citation.** Loyko A.M., Boyko A.F. Studying multifactorial dependence of hole overcut at microhole EDM// Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 4, pp. 35–42. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-35-42

<sup>1</sup>Лойко Алексей Михайлович, аспирант, e-mail: lam.bel@mail.ru  
Aleksey M. Loyko, Postgraduate student, e-mail: lam.bel@mail.ru

<sup>2</sup>Бойко Анатолий Фёдорович, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения,  
e-mail: boyko\_1947@bk.ru  
Anatoliy F. Boyko, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology,  
e-mail: boyko\_1947@bk.ru



## Введение

В последние годы в различных отраслях промышленности (электронной, медицинской, авиационной и др.) значительно возросла потребность в выполнении электроэррозионной прошивки микроотверстий диаметром менее 0,2 мм в изделиях из твердых сплавов, титановых сплавов, углеродистых и нержавеющих сталей и других материалов. В частности, большое значение получение микроотверстий приобрело в производстве твердосплавного специинструмента, фильтер, волочильного инструмента, распылителей и других изделий<sup>3</sup> [1].

К настоящему времени выполнен значительный объем научных исследований процесса электроэррозионной прошивки микроотверстий. Многие из опубликованных работ позволили установить взаимосвязи между входными параметрами процесса (геометрическими параметрами отверстия и режимами обработки) и выходными параметрами (износом электрода-инструмента, производительностью процесса, качеством поверхности отверстия)<sup>3,4</sup> [1–4], а также влиянием применяемых материалов электродов-инструментов, рабочих жидкостей и генераторов импульсов на технологические показатели процесса электроэррозионной

обработки [5–9].

Данная статья является частью разрабатываемой методики определения оптимальных параметров процесса электроэррозионной прошивки микроотверстий, направленной на повышение точности и производительности процесса обработки. В работе изложены результаты проведенных исследований зависимости разбивки отверстий (разности между диаметром отверстия и диаметром электрода-инструмента) от основных параметров процесса электроэррозионной прошивки при минимальной глубине (0,1 мм) обрабатываемых отверстий. При прошивке отверстий столь малой глубины практически исключаются основные погрешности формы отверстий, возникающие при электроэррозионной обработке микроотверстий, – овальность в поперечных сечениях и конусность в продольном осевом сечении [1]. Исключение влияния данных погрешностей повышает точность оценки результатов эксперимента.

Целью данной работы является определение реальной зависимости разбивки отверстий при электроэррозионной прошивке микроотверстий от основных параметров процесса.

## Материал и методы исследования

Экспериментальные исследования были выполнены на электроэррозионном прошивочном станке модели 04ЭП-10МФ2 [10]. В качестве электрода-инструмента использовалась вольфрамовая проволока диаметром от 50 до 200 мкм, в качестве обрабатываемого материала – пластина из нержавеющей стали 65Х13 толщиной 0,1 мм. В качестве рабочей жидкости при обработке

применялась водопроводная вода. В данном эксперименте определяется зависимость разбивки отверстия  $R$  от диаметра электрода-инструмента  $d$ , энергии импульсов  $E$  и частоты следования импульсов  $f$  при следующих постоянных режимах обработки: частота вибрации электрода-инструмента  $f_v = 380$  Гц, амплитуда вибрации электрода-инструмента  $A = 10$  мкм.

<sup>3</sup>Домашенко Б.В. Разработка технологии и оборудования электроэррозионной прошивки капиллярных отверстий в атравматических иглах: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. Белгород, 2007. 20 с. / Domashenko B.V. Development of technology and equipment for capillary hole EDM in atraumatic needles: Author's Abstract of Candidate's Dissertation in technical sciences: 05.02.08. Belgorod, 2007. 20 p.

<sup>4</sup>Пузачева Е.И. Совершенствование технологии малоизносной электроэррозионной обработки высокоточных малых отверстий: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07. Брянск, 2015. 22 с. / Puzacheva E.I. Improvement of the technology of low-wear EDM of high-precision microholes: Author's Abstract of Candidate's Dissertation in technical sciences: 05.02.07. Bryansk, 2015. 22 p.



Измерение диаметров отверстий производилось на цифровом микроскопе Levenhuk D70L, предварительно откалиброванном для определения размеров с помощью объекта-микрометра.

## Результаты исследования

Разбивка отверстия  $R$  представляет собой разность между диаметром отверстия  $D$  и диаметром электрода-инструмента  $d$  (см. рис. 1).

Математическая модель разбивки отверстия  $R$  при электроэрозионной обработке микроотверстий представлена следующим уравнением степенной функции:

$$R = C \cdot d^{\alpha_1} \cdot E^{\alpha_2} \cdot f^{\alpha_3}, \quad (1)$$

где  $d$  – диаметр электрода-инструмента, мкм;  $E$  – энергия импульсов, мкДж;  $f$  – частота следования импульсов, кГц;  $C$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  – значения параметров модели.

После логарифмирования уравнения (1) получим уравнение линейного вида:

$$\ln R = \ln C + \alpha_1 \ln d + \alpha_2 \ln E + \alpha_3 \ln f. \quad (2)$$

Примем  $\ln R = y$ ,  $\ln C = b_0$ ,  
 $\alpha_1 = b_1$ ,  $\ln d = x_1$ ,  $\alpha_2 = b_2$ ,  
 $\ln E = x_2$ ,  $\alpha_3 = b_3$ ,  $\ln f = x_3$ ,  
тогда уравнение (2) примет следующий вид:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3. \quad (3)$$

Для определения коэффициентов  $b_0 \dots b_3$  уравнения (3) используется метод наименьших квадратов (МНК). Переменные

факторы  $x_1 \dots x_3$  уравнения (3) принимают кодированные значения в соответствии со следующими уравнениями кодирования<sup>5</sup> [11]:

$$x_1 = \frac{2 \cdot (\ln d - \ln d_{max})}{\ln d_{max} - \ln d_{min}} + 1; \quad (4)$$

$$x_2 = \frac{2 \cdot (\ln E - \ln E_{max})}{\ln E_{max} - \ln E_{min}} + 1; \quad (5)$$

$$x_3 = \frac{2 \cdot (\ln f - \ln f_{max})}{\ln f_{max} - \ln f_{min}} + 1, \quad (6)$$

где  $d_{max}$  и  $d_{min}$  – соответственно, максимальное и минимальное значения диаметра электрода-инструмента, мкм;  $E_{max}$  и  $E_{min}$  – соответственно, максимальное и минимальное значения энергии импульса, мкДж;  $f_{max}$  и  $f_{min}$  – соответственно, максимальное и минимальное значения частоты импульсов, кГц.

В связи с большим диапазоном варьирования факторов разделим диапазон диаметров на два интервала варьирования факторов: от 50 мкм до 100 мкм и от 100 мкм до 200 мкм. Модели разбивки отверстий будут иметь следующие обозначения:  $R_{50-100}$  – для интервала варьирования от 50 мкм до 100 мкм;  $R_{100-200}$  – для интервала варьирования от 100 мкм до 200 мкм.

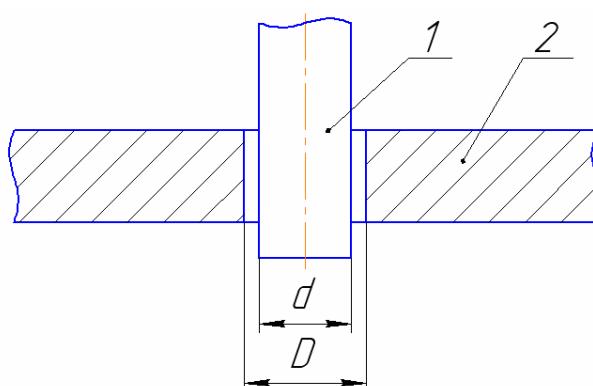


Рис. 1. Схема разбивки отверстия: 1 – электрод-инструмент; 2 – заготовка  
Fig. 1. Diagram of hole overcut: 1 – electrode-tool; 2 – workpiece



**Таблица 1**

**Таблица условий эксперимента для диаметров от 50 мкм до 100 мкм**

**Table 1**

**Table of experimental conditions for the diameters from 50  $\mu\text{m}$  to 100  $\mu\text{m}$**

Уровни факторов / Levels of factors	Натуральные значения факторов / Natural values of factors			Кодовые значения факторов / Factor code values		
	$d$ , мкм / $d$ , $\mu\text{m}$	$E$ , мкДж / $E$ , $\mu\text{J}$	$f$ , кГц / $f$ , kHz	$x_1$	$x_2$	$x_3$
верхний / upper	100	96,15	88	+1	+1	+1
средний / medium	70	53,83	62	0	0	0
нижний / lower	50	30,13	44	-1	-1	-1

В данной работе приведен подробный расчет математической модели для интервала варьирования диаметров от 50 мкм до 100 мкм, расчет для интервала варьирования диаметров от 100 мкм до 200 мкм выполняется аналогично.

Условия эксперимента для интервала варьирования диаметров от 50 мкм до 100 мкм представлены в табл. 1.

Кодированные значения факторов  $x_1 \dots x_3$  для модели с интервалом варьирования диаметров от 50 мкм до 100 мкм по зависимостям (4)–(6) будут иметь вид:

$$x_1 = 2,885 \ln d - 12,287; \quad (7)$$

$$x_2 = 1,724 \ln E - 6,87; \quad (8)$$

$$x_3 = 2,886 \ln f - 11,92. \quad (9)$$

Для определения коэффициентов уравнения (3) необходимо провести полный факторный эксперимент с репликой типа 2. С целью снижения влияния дисперсии при проведении эксперимента в каждой точке плана проводится по 3 дублирующих опыта<sup>3</sup>.

Матрица планирования эксперимента приведена в табл. 2.

В соответствии с составленной матрицей планирования были проведены эксперименты и определены значения разбивки отверстий при электроэрозионной прошивке (табл. 3).

Коэффициенты уравнения (3) рассчитываются, исходя из полученных результатов проведенного эксперимента, по следующим формулам:

**Таблица 2**

**Матрица планирования эксперимента для диаметров от 50 мкм до 100 мкм**

**Table 2**

**Experiment planning matrix for the diameters from 50  $\mu\text{m}$  to 100  $\mu\text{m}$**

№ опыта / experiment no.	Натуральные значения факторов / Natural values of factors			Кодовые значения факторов / Factor code values			
	$d$ , мкм / $d$ , $\mu\text{m}$	$E$ , мкДж / $E$ , $\mu\text{J}$	$f$ , кГц / $f$ , kHz	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$
1	100	96,15	88	+1	+1	+1	+1
2	50	96,15	88	+1	-1	+1	+1
3	100	30,13	88	+1	+1	-1	+1
4	50	30,13	88	+1	-1	-1	+1
5	100	96,15	44	+1	+1	+1	-1
6	50	96,15	44	+1	-1	+1	-1
7	100	30,13	44	+1	+1	-1	-1
8	50	30,13	44	+1	-1	-1	-1



$$b_0 = \frac{1}{n} \sum_1^n y_i; \quad (10)$$

$$b_1 \dots b_3 = \frac{1}{n} \sum_1^n y_i x_i, \quad (11)$$

где  $n$  – количество экспериментов;  $y_i$  – логарифм полученного значения эксперимента;  $x_i$  – кодовое значение фактора.

После нахождения коэффициентов  $b_0 \dots b_3$  уравнения (3) было получено уравнение регрессии для интервала варьирования диаметров от 50 мкм до 100 мкм:

$$y_{R(50-100)} = 1,508 + 0,031x_1 + 0,322x_2 + 0,093x_3. \quad (12)$$

В результате выполнения раскодирования уравнения (12) была получена модель разбивки отверстий для интервала варьирования диаметров от 50 мкм до 100 мкм:

$$R_{50-100} = 0,111 \cdot d^{0,089} \cdot E^{0,555} \cdot f^{0,268}. \quad (13)$$

По результатам аналогичных расчетов получена математическая модель разбивки отверстий для интервала варьирования диаметров от 100 мкм до 200 мкм:

$$R_{100-200} = 0,361 \cdot d^{0,121} \times E^{0,352} \cdot f^{0,159}. \quad (14)$$

Для полученных математических моделей выполнена статистическая оценка результатов по показателям значимости коэффициентов и адекватности модели<sup>5</sup> [11, 12].

При оценке значимости коэффициентов оценке подлежат коэффициенты уравнения регрессии (12) до его раскодирования. По результатам расчетов определено, что все коэффициенты уравнений регрессии превышают доверительные интервалы коэффициентов регрессии, следовательно, они являются значимыми<sup>5</sup> [11, 12].

Адекватность математических моделей определена путем сравнения разности расчетных и экспериментальных значений функции с ошибкой опыта  $\sigma_y$ . Разность расчетных и экспериментальных значений исследуемой функции не превышает ошибки опыта для обеих математических моделей.

Графики зависимостей (13) и (14) разбивки отверстий ( $R_{50-100}$  и  $R_{100-200}$ ) при электроэрозионной обработке от одного из факторов при среднем значении других факторов показаны на рис. 2–4.

**Результаты эксперимента для диаметров от 50 мкм до 100 мкм**  
*Experiment results for the diameters from 50 μm to 100 μm*

**Таблица 3**

**Table 3**

№ опыта / experiment no.	Разбивка отверстия $R$ , мкм / Hole overcut $R$ , μm	$y = \ln R$
1	6,9	1,932
2	6,4	1,856
3	3,8	1,335
4	3,6	1,281
5	6,0	1,792
6	5,7	1,741
7	3,0	1,099
8	2,8	1,030

<sup>5</sup>Погонин А.А., Бойко А.Ф., Блинова Т.А. Научно-исследовательская работа по специальности: метод. указания. Белгород: Изд-во БГТУ, 2009. 56 с. / Pogonin A.A., Boyko A.F., Blinova T.A. Research work on the specialty: methodological guidelines. Belgorod: BSTU Publishing House, 2009. 56 p.

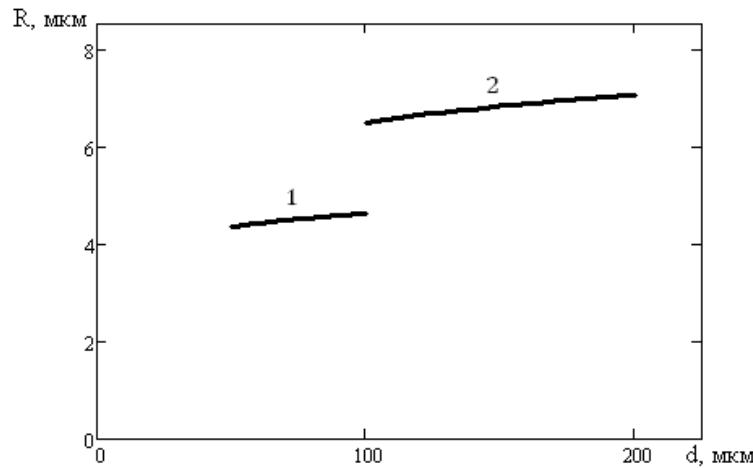


Рис. 2. График зависимости разбивки отверстия  $R$  от диаметра электродно-инструмента  $d$ : 1 –  $R_{50-100}(d)$ ; 2 –  $R_{100-200}(d)$

Fig. 2. Dependence graph of the hole overcut  $R$  on the electrode-tool diameter  $d$ : 1 –  $R_{50-100}(d)$ ; 2 –  $R_{100-200}(d)$

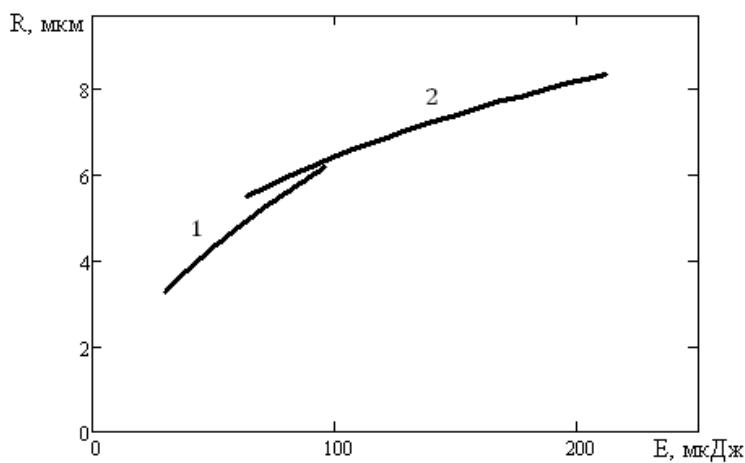


Рис. 3. График зависимости разбивки отверстия  $R$  от энергии импульса  $E$ : 1 –  $R_{50-100}(E)$ ; 2 –  $R_{100-200}(E)$

Fig. 3. Dependence graph of the hole overcut  $R$  on the pulse energy  $E$ : 1 –  $R_{50-100}(E)$ ; 2 –  $R_{100-200}(E)$

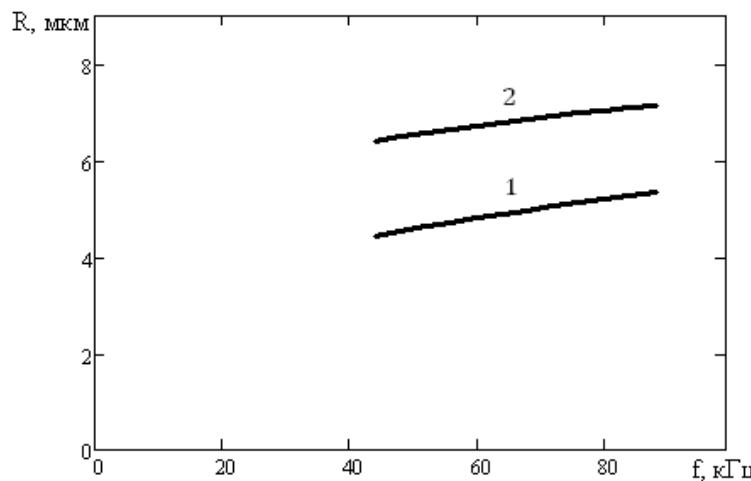


Рис. 4. График зависимости разбивки отверстия  $R$  от частоты импульсов  $f$ : 1 –  $R_{50-100}(f)$ ; 2 –  $R_{100-200}(f)$

Fig. 4. Dependence graph of the hole overcut  $R$  on the pulse frequency  $f$ : 1 –  $R_{50-100}(f)$ ; 2 –  $R_{100-200}(f)$



## Выводы

1. С увеличением диаметра электрода-инструмента разбивка отверстия возрастает. Это происходит вследствие значительного увеличения площади поперечного сечения при обработке и, следовательно, увеличения общего объема продуктов эрозии, удаляемых из межэлектродного промежутка в процессе обработки, что приводит к возникновению дополнительных разрядов в боковом промежутке, увеличивающих разбивку отверстия.

2. При увеличении значений электрических режимов обработки (энергии и частоты импульсов) разбивка отверстия увеличивается, так как увеличивается величина бокового межэлектродного зазора

вследствие возрастания значений напряжения в межэлектродном промежутке и увеличения размера твердых частиц, удаляемых из него.

3. По результатам анализа математических моделей определено, что из всех рассматриваемых параметров наибольшее влияние на разбивку отверстий при электроэрозионной прошивке оказывает энергия импульсов.

4. Полученные математические модели позволяют подбирать оптимальный диаметр электрода-инструмента и назначать оптимальные электрические режимы обработки (энергию и частоту импульсов) в зависимости от требуемого диаметра обрабатываемого отверстия.

## Библиографический список

1. Бойко А.Ф. Эффективная технология и оборудование для электроэрозионной прошивки прецизионных микроотверстий. Белгород: Изд-во Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, 2010. 314 с.
2. Бойко А.Ф., Лойко А.М., Шестаков А.И. Особенности процесса естественной эвакуации продуктов обработки при электроэрозионной прошивке микроотверстий // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 11. С. 128–131.
3. Бойко А.Ф., Лойко А.М., Переверзев С.С., Шинкарев И.Ю. Исследование многофакторной зависимости производительности процесса электроэрозионной прошивки микроотверстий // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 10. С. 143–149.
4. Лойко А.М., Бойко А.Ф. Исследование зависимости износа электрода-инструмента и производительности процесса от материала электрода-инструмента при электроэрозионной прошивке микроотверстий // Актуальные проблемы развития науки и современного образования: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (Белгород, 10 апреля 2017 г.). Белгород, 2017. С. 98–100.
5. D'Urso G., Maccarini G., Ravasio C. Influence of electrode material in micro-EDM drilling of stainless steel and tungsten carbide // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016. Vol. 8. P. 2013–2025.
6. D'Urso G., Ravasio C. The effects of electrode size and discharged power on micro-electro-discharge machining drilling of stainless steel // Advances in Mechanical Engineering. 2016. No. 8. P. 1–12.
7. Jahan M.P., Wong Y.S., Rahman M. A study on the fine-finish die-sinking micro-EDM of tungsten carbide using different electrode materials // Journal of Materials Processing Technology. 2009. Vol. 209. No. 8. С. 3956–3967.
8. Jahan M.P., Wong Y.S., Rahman M. A study on the quality micro-hole machining of tungsten carbide by micro-EDM process using transistor and RC-type pulse generator // Journal of Materials Processing Technology. 2009. Vol. 209. No. 4. P. 1706–1716.
9. Tai T.Y., Masusawa T., Lee H.T. Drilling microholes in hot toll steel by using micro-electro discharge machining // Materials Transactions. 2007. Vol. 48. No. 2. P. 205–210.
10. Лойко А.М., Шинкарев И.Ю. Краткий обзор отечественного оборудования для электроэрозионной прошивки микроотверстий // Наукоемкие технологии и инновации: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых (Белгород, 1–20 мая 2016 г.). Белгород, 2016. С. 2363–2368.
11. Рогов В.А. Методика и практика технических экспериментов. М.: Академия, 2005. 288 с.
12. Спиридовон А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 1981. 184 с.



### References

1. Boyko A.F. Effective technology and equipment for precision micro hole EDM drilling. Belgorod: Belgorod State Technological University. V.G. Shukhov Publ., 2010, 314 p. (In Russian).
2. Boyko A.F., Loyko A.M., Shestakov A.I. Features of process of natural evacuation of products of erosion in case of electrical discharge machining of microopenings. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova* [The Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov], 2016, no. 11, pp. 128–131. (In Russian).
3. Boyko A.F., Loyko A.M., Pereverzev S.S., Shinkarev I.Ju. Research of multifactorial dependence of productivity at the electrical discharge machining of small openings. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova* [The Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov], 2016, no. 10, pp. 143–149. (In Russian).
4. Loyko A.M., Boyko A.F. *Issledovaniye zavisimosti iznosa elektroda-instrumenta i proizvoditelnosti protsessa ot materiala elektroda-instrumenta pri elektroerozionnoy proshivke mikrootverstiy* [Studying dependence of electrode tool wear and process efficiency on the electrode-tool material under electrical discharge machining of micro holes]. *Aktual'nyye problemy razvitiya nauki i sovremennoego obrazovaniya: sbornik materialov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proceedings of the International scientific and practical conference “Actual development problems of science and modern education”, Belgorod, 10 April 2017]. Belgorod, 2017, pp. 98–100. (In Russian).
5. D'Urso G., Maccarini G., Ravasio C. Influence of electrode material in micro-EDM drilling of stainless steel and tungsten carbide. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, vol. 8, pp. 2013–2025.
6. D'Urso G., Ravasio C. The effects of electrode size and discharged power on micro-electro-discharge machining drilling of stainless steel. *Advances in Mechanical Engineering*, 2016, no. 8, pp. 1–12.
7. Jahan M.P., Wong Y.S., Rahman M. A study on the fine-finish die-sinking micro-EDM of tungsten carbide using different electrode materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, vol. 209, no. 8, pp. 3956–3967.
8. Jahan M.P., Wong Y.S., Rahman M. A study on the quality micro-hole machining of tungsten carbide by micro-EDM process using transistor and RC-type pulse generator. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, vol. 209, no. 4, pp. 1706–1716.
9. Tai T.Y., Masusawa T., Lee H.T. Drilling microholes in hot toll steel by using micro-electro discharge machining. *Materials Transactions*, 2007, vol. 48, no. 2, pp. 205–210.
10. Loyko A.M., Shinkarev I.Ju. *Kratkiy obzor otechestvennogo oborudovaniya dlya elektroerozionnoy proshivki mikrootverstiy* [Short overview of domestic equipment for microhole EDM]. *Naukoyemkiye tekhnologii i innovatsii: sbornik dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh* [Proceedings of the International scientific and technical conference of young scientists “High Technologies and Innovation”, Belgorod, 1–20 May 2016]. Belgorod, 2016, pp. 2363–2368. (In Russian).
11. Rogov V.A. *Metodika i praktika tekhnicheskikh eksperimentov* [Methods and practice of technical experiments]. Moscow: Akademija Publ., 2005, 288 p. (In Russian).
12. Spiridonov A.A. *Planirovaniye experimenta pri issledovanii tekhnologicheskikh processov* [Planning an experiment when studying technological processes]. Moscow: Mashine-Building Publ., 1981, 184 p. (In Russian).

### Критерии авторства

Лойко А.М., Бойко А.Ф. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Authorship criteria

Loyko A.M., Boyko A.F. have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article

УДК 51-74 + 625.8

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-43-61>

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ГРАНУЛИРУЕМОГО МАТЕРИАЛА В ФИЛЬЕРАХ ПЛОСКОМАТРИЧНОГО ГРАНУЛЯТОРА

© А.В. Осокин<sup>1</sup>

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,  
308012, Российской Федерации, г. Белгород, ул. Костюкова, д. 46.  
АО «НИИ парашютостроения»,  
107497, Российской Федерации, г. Москва, ул. Иркутская, д. 2, корп. 1.

**РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ.** Процессы формования гранул из дисперсных материалов различной природы и агрегатного состояния при их переработке в грануляторах с плоской пресс-матрицей. Разработка математической модели движения упруго-вязко-пластичных и волокносодержащих дисперсных материалов в каналах формования (фильтерах) постоянного и переменного поперечного сечения при переработке указанных материалов в грануляторах с плоской пресс-матрицей. **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.** При разработке математической модели движения материала по фильтру использовалась следующая методика. В объеме материала, находящегося в канале формования, выделяется элементарный слой. Затем составляется уравнение равновесия выделенного элементарного слоя с учетом всех действующих на него сил и решается полученное уравнение равновесия. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Подробно описан процесс движения дисперсного упруго-вязко-пластичного и волокносодержащего (волокнистого) материалов по каналам фильтров постоянного и переменного сечения грануляторов с плоской матрицей. Разработана математическая модель данного процесса. Приведено сравнение полученных моделей на примере волокносодержащей шихты для производства гранулированных стабилизирующих добавок щебено-мастичных асфальтобетонов.

**ВЫВОДЫ.** Разработанная математическая модель может быть использована в расчетах параметров грануляционного оборудования экструзионного типа, в частности плоскоматричных грануляторов технологических линий по производству гранулированных стабилизирующих добавок щебено-мастичных асфальтобетонов и для проведения дальнейших теоретико-экспериментальных исследований.

**Ключевые слова:** гранулятор с плоской матрицей, плоскоматричный гранулятор, канал формования, фильтр, противодавление канала формования, техногенные волокнистые материалы.

**Информация о статье.** Дата поступления 20 февраля 2018 г.; дата принятия к печати 7 марта 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2018 г.

**Формат цитирования.** Осокин А.В. Разработка математической модели движения гранулируемого материала в фильтерах плоскоматричного гранулятора // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 4. С. 43–61. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-43-61

### DEVELOPMENT OF THE MATHEMATICAL MODEL OF GRANULATED MATERIAL MOVEMENT IN FLAT MATRIX GRANULATOR SPINNERETS

A.V. Osokin

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,  
46, Kostyukov St., Belgorod, 308012, Russian Federation  
JSC "Research Institute of Parachute Construction"  
2, Irkutskaya St., bld.1, Moscow, 107497, Russian Federation

**ABSTRACT.** The **PURPOSE** of the paper is to consider the formation of granules from dispersed materials of various nature and aggregate state under their processing in granulators with a flat press matrix; to develop a mathematical model of motion of elastic viscous plastic and fiber-containing dispersed materials in the formation channels (spinnerets) of dif-

<sup>1</sup>Осокин Антон Владиславович, соискатель, начальник сектора отв. за характеристики парашютных систем, e-mail: [anton\\_osokin@xaker.ru](mailto:anton_osokin@xaker.ru)

Anton V. Osokin, Competitor, head of sector of the department of characteristics, e-mail: [anton\\_osokin@xaker.ru](mailto:anton_osokin@xaker.ru)



ferent cross-sections when processing these materials in granulators with a flat press matrix. **MATERIALS AND METHODS.** The following procedure is used when developing a mathematical model of material movement along the spinneret: an elementary layer is identified in the volume of material in the forming channel. Then an equilibrium equation of the identified elementary layer is constructed with the allowance for all the forces acting on it and the obtained equilibrium equation is solved. **RESULTS.** A detailed description is given to the movement of the dispersed visco-elastic plastic and fiber-containing (fibrous) material along the channels of spinnerets of constant and variable cross-sections of granulators with a flat matrix. A mathematical model of the process is developed. The obtained models are compared on the example of fiber-containing charge for the production of granular stabilizing additives of crushed stone-mastic asphalt concretes. **CONCLUSIONS.** The developed mathematical model can be used in calculations of extrusion type granulation equipment parameters, in particular in flat-matrix granulators of technological lines for the production of granular stabilizing additives of crushed stone-mastic asphalt and for further theoretical and experimental studies.

**Keywords:** granulator with a flat matrix, flat matrix granulator, forming channel, spinneret, back pressure of the forming channel, technogenic fibrous materials

**Information about the article.** Received February 20, 2018; accepted for publication March 7, 2018; available online April 30, 2018.

**For citation.** Osokin A.V. Development of the mathematical model of granulated material movement in flat matrix granulator spinnerets. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 4, pp. 43–61. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-43-61

## Введение

Компактирование материалов получило широкое распространение в строительной, химической, пищевой, фармацевтической, металлургической, стекольной, военной и других отраслях промышленности. Это обусловлено существенным снижением склонности гранулированного продукта к слеживанию. Упрощается его хранение, транспортирование и дозирование. Повышается сыпучесть материала при одновременном устраниении запыленности производственных помещений [1].

Механизм деформации пластифицированных шихт (паст) под действием внешних сил, вне зависимости от физико-механических и реологических характеристик подчиняется общим закономерностям, в основе которых лежит процесс изменения под внешним воздействием дислокации структуры (взаиморасположения твердой, жидкой и газообразной фаз) и соответствующих реологических свойств материала<sup>2</sup> [1–4].

Процессы, происходящие при деформациях и продвижении по формующим каналам штемпельных и матричных прессов дисперсных порошковых материалов изучены достаточно подробно<sup>2,3</sup> [1–4]. В то время как процессы формования волокнистых техногенных материалов на основе целлюлозных волокон требуют дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

С появлением и активным развитием в России нового вида дорожного покрытия – щебено-мasticичных асфальтобетонов (ЩМА) – возникла потребность в производстве гранулированных стабилизирующих добавок (ГСД) как одного из важных компонентов смеси. Основу ГСД составляют тонкоизмельченные волокнистые материалы.

При их производстве шихта, в основе которой находится специально подготовленный измельченный целлюлозосодержащий волокнистый материал, подвергается формированию в

<sup>2</sup>Севостьянов, М.В. Пресс-валковый экструдер для формования техногенных порошкообразных материалов: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13. Белгород. 2006. 250 с. / Sevostyanov, M.V. Press-roller extruder for molding technogenic powders of various materials: Candidate's Dissertation in Technical sciences: 05.02.13. Belgorod. 2006. 250 p.

<sup>3</sup>Булатов И.А. Разработка процесса прессового гранулирования мелкодисперсных сред на примере минеральных порошков и древесных отходов: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.13. Москва, 2012. 17 с. / Bulatov I.A. Development of the process of finely dispersed media pelletization on example of mineral powders and wood waste: Candidate's Dissertation in Technical Sciences: 05.02.13. Moscow, 2012. 17 p.

специализированных машинах – грануляторах (рис. 1 *a*, 1 *b*) [5], наибольшее распространение из которых получили грануляторы с кольцевой (рис. 1 *c*) и плоской (рис. 1 *d*) пресс-матрицами.

При этом процессы, происходящие с шихтой во время формования, до настоящего времени были мало изучены. В основном из-за отсутствия необходимости в данных исследованиях. Однако теперь понимание физики процесса, его математическое описание, а также исследование деформации материала и характера его продвижения по формующим каналам, имеют большое значение для разработки и выбора рациональных параметров машин, оптимизации режимов работы перерабатывающего оборудования и технологического процесса.

В связи с этим, целью настоящей работы является разработка математической модели движения упруго-вязко-пластичного и волокносодержащих дисперсных материалов в каналах формования (фильтрах) постоянного и переменного поперечного сечения (фильтра в виде цилиндра и цилиндра с конической вставкой).

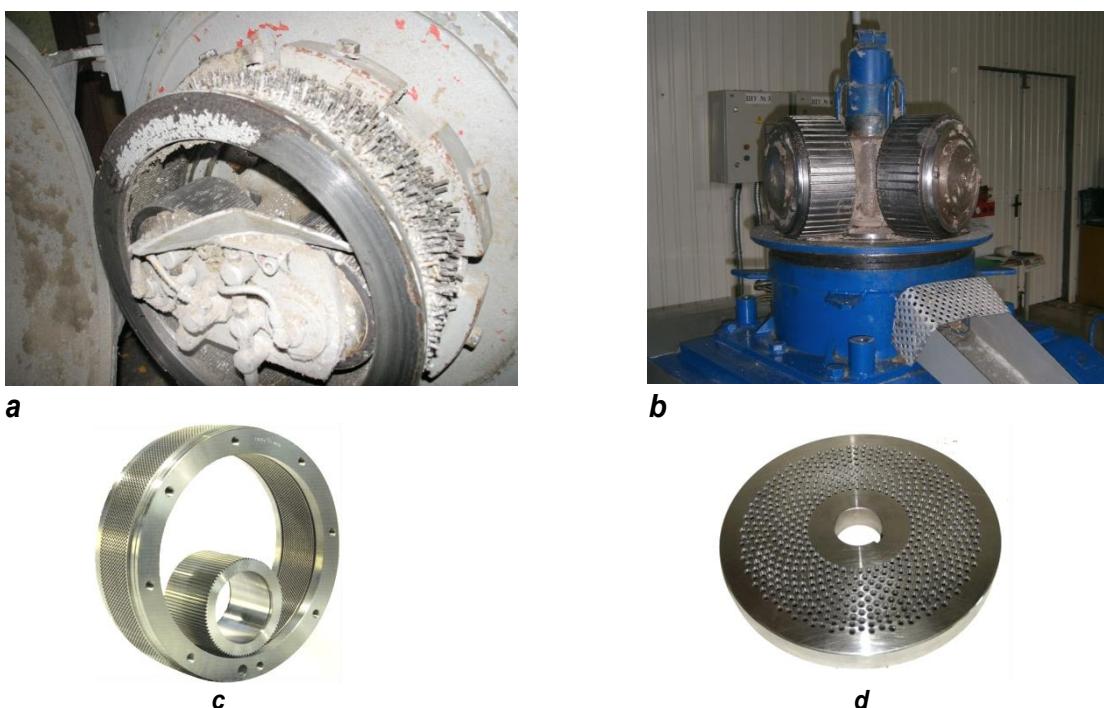


Рис. 1. Общий вид гранулятора с кольцевой (а) и плоской (б) пресс-матрицами, и конструктивное исполнение кольцевой (с) и плоской (д) пресс-матриц

Fig. 1. General view of a granulator with annular (a) and flat (b) press matrices and structural design of annular (c) and flat (d) press matrices

### Движение упруго-вязко-пластичного материала по фильтре переменного поперечного сечения

Образование гранул и брикетов при экструзионном гранулировании (получении гранулированных тел методом экструзии [1]) происходит под действием всестороннего сжатия при прохождении перерабатываемого материала через каналы определенного профиля. Форма канала может быть различной и определяется, зачастую, физико-механическими показателями перерабатываемого материала. При этом механизм деформации материала под действием внешних сил, вне зависимости от физико-механических и реологических характеристик, подчиняется общим закономерностям, в основе которых лежит процесс изменения под внешним воздействием дислокации структуры (взаиморасположения твердой, жидкой и газообразной фаз) и соответствующих реологических свойств материала<sup>2,3</sup>.



Всестороннее сжатие обеспечивается противодавлением со стороны упора на выходе из канала, стенками канала и штемпелем. При этом в машинах непрерывного действия (грануляторы и брикетировщики), в которых материал проходит через рабочие органы непрерывно, каналы формования будут открытыми. В открытом канале противодавление создается подвижным упором, которым являются ранее спрессованные порции материала. Противодавление, обеспечивающее сжатие материала вдоль оси канала, возникает в результате трения материала о стенки канала.

Противодавление со стороны канала формования определяет плотность получаемых гранул: чем выше противодавление, тем большее давление необходимо приложить к материалу для его проталкивания и тем выше плотность получаемых гранул.

Наиболее близкими к волокнистым техногенным материалам по свойствам, природе и агрегатному состоянию перед формированием являются «сено-соломистые» волокнистые материалы, а также древесные опилки для производства пеллет. Вопросам формования данных материалов посвящены работы [5–13].

Так, согласно<sup>4</sup> [6], наиболее точно физическую сущность процесса формования указанных материалов описывает уравнение:

$$P = C \cdot \left( e^{a(\rho - \rho_0)} - 1 \right), \quad (1)$$

где  $C$  – постоянный параметр, (Па);  $a$  – эмпирический параметр, характеризующий свойства материала, ( $\text{м}^3/\text{кг}$ );  $\rho_0$ ,  $\rho$  – исходная насыпная масса прессуемого материала и его плотность в сформованном состоянии, ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ).

При  $P = C \cdot (e - 1)$  плотность  $\rho = \rho_0 + (1/a)$ . Величина  $1/a$  представляет собой приращение начальной плотности материала при давлении, равном  $C \cdot (e - 1)$ .

Значение эмпирических параметров  $C$  и  $a$  зависит от структурно-механических свойств материала (начальная плотность, влажность, температура, крупность частиц) и определяют собой сопротивляемость материала сжатию. Определяются экспериментально для каждого материала.

При равномерной подаче материала в камеру гранулирования за время одного оборота пресс-валка вокруг оси водила (приводного вала) на рабочей поверхности плоской пресс-матрицы образуется кольцевой слой материала высотой  $H$  с насыпной плотностью  $\rho_0$  (рис. 2 а). Накатывающийся на материал пресс-валок сжимает слой материала между сближающимися рабочими поверхностями пресс-матрицы и пресс-валка. В грануляторах с кольцевой и плоской пресс-матрицей, в отличие от штемпельных прессов, камера сжатия материала вынесена за пределы канала формования и расположена в зоне захвата материала  $\beta_{\text{сж}}$  (дуга  $AB$  на рис. 2 а). Давление сжатия при этом возрастает по кривой  $A_1B_1$  от нуля в точке  $A_1$  до максимального значения  $P$  в точке  $B_1$ . Кривая  $A_1B_1$  описывается уравнением (1).

Преодолевая сопротивление канала, осевое давление со стороны рабочего органа (пресс-валка) уменьшается. Для определения закона изменения осевого давления в канале переменного сечения, рассмотрим равновесие выделенного слоя материала толщиной  $dx$  на небольшой глубине  $x_1$  на первом участке (коническая часть) и на глубине  $x_2$  – на втором участке (цилиндрическая часть) (рис. 2 а). На него действуют осевые давления: над слоем  $P_x$ , под слоем – давление  $(P_x + dP_x)$ . Кроме того в поперечном сечении по периметру  $U_x$  слоя действует боковое давление (боковой распор)  $q_x$  и обусловленная им сила внешнего трения  $F_{mp}^i$  материала о поверхность канала формования.

<sup>4</sup>Глебов Л.А., Демский А.Б., Веденьев В.Ф., Темиров М.М., Огурцов Ю.М. Технологическое оборудование предприятий отрасли (зерноперерабатывающие предприятия): учебник. М.: ДеЛи принт. 2006. 816 с. / Glebov L.A., Demsky A.B., Vedeniev V.F., Temirov M.M., Ogurtsov Yu.M. Technological equipment of industrial enterprises (grain processing enterprises): textbook. M.: Deli print. 2006. 816 p.

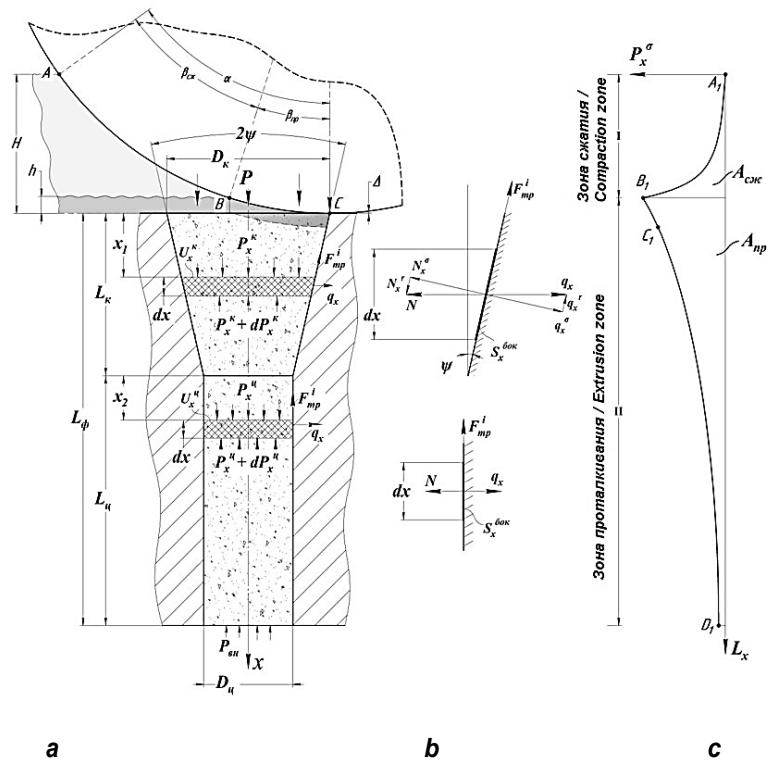


Рис. 2. Схема к расчету усилия экструдирования упруго-вязко-пластичного материала через фильтеру с переменным поперечным сечением: а – условие равновесия элементарного слоя материала; б – схема сил; в – график изменения осевого давления экструдирования

Fig. 2. Diagram for calculating the extrusion force of a material through a spinneret with a variable cross-section: a – material elementary layer equilibrium condition; b – force diagram; c – graph of extrusion pressure variation

В общем виде величина бокового распора  $q_x$  определяется по выражению<sup>4</sup> [6]:

$$q_x = \xi \cdot P_x + q_0, \quad (2)$$

где  $\xi$  – коэффициент бокового давления (бокового распора):  $\xi = \mu/(1 - \mu) = \text{const}$ ; [6];  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $P_x$  – осевое давление, Па;  $q_0$  – остаточное боковое давление, Па.

Первое слагаемое  $\xi \cdot P_x$  представляет собой боковое давление, вызываемое осевой нагрузкой на материал, второе  $q_0$  – выражает остаточное боковое давление, обусловленное упругим расширением спрессованного материала. Эта часть бокового давления не зависит от осевого<sup>4</sup>.

При гранулировании порошковых строительных материалов, у которых остаточное боковое давление практически отсутствует, используют зависимость.

$$q_x = \xi \cdot P_x, \quad (3)$$

где  $\xi$  – коэффициент бокового давления (бокового распора):  $\xi = \sigma_3/\sigma_1 = (1 - \sin \varphi)/(1 + \sin \varphi)$ ;  $\sigma_1$  – главные нормальные напряжения, Па;  $\varphi$  – эффективный угол внутреннего трения, град<sup>6</sup>.

Составим уравнения равновесия элементарного выделенного слоя в конической и цилиндрической части, соответственно:

$$P_x S_x - (P_x + dP_x) S_x - f_i \cdot q_x \cdot U_x^k \cdot \cos \psi \cdot dx - q_x \cdot U_x^k \cdot \sin \psi \cdot dx + q_x \cdot U_x^k \cdot \operatorname{tg} \psi \cdot \cos \psi \cdot dx = 0; \quad (4)$$



$$P_x S_x - (P_x + dP_x) S_x - f_i \cdot (\xi \cdot P_x + q_0) \cdot U_x^u \cdot dx = 0, \quad (5)$$

где  $S_x$  – площадь поперечного сечения канала на глубине  $x$ ,  $\text{м}^2$ ;  $f_i$  – коэффициент внешнего трения;  $q_x$  – величина бокового давления, Па;  $U_x$  – периметр поперечного сечения слоя на глубине  $x$ , м;  $\psi$  – угол наклона стенок канала к ее оси, град. При этом имеем:

– для конической части

$$S_x^{\text{бок}} = \frac{U_x^k \cdot dx}{\cos \psi}; \quad (6)$$

$$N^\sigma = q_x^\sigma \cdot S_x^{\text{бок}} = q_x \cdot U_x^k \cdot dx; \quad (7)$$

$$N^\tau = q_x^\tau \cdot S_x^{\text{бок}} = q_x \cdot U_x^k \cdot \operatorname{tg} \psi \cdot dx; \quad (8)$$

$$F_{mp}^i = f_i \cdot N^\sigma = q_x \cdot U_x^k \cdot dx; \quad (9)$$

– для цилиндрической части:

$$S_x^{\text{бок}} = U_x^u \cdot dx; \quad (10)$$

$$N^\sigma = q_x \cdot S_x^{\text{бок}} = (\xi \cdot P_x + q_0) \cdot U_x^u \cdot dx; \quad (11)$$

$$F_{mp}^i = f_i \cdot N = f_i \cdot (\xi \cdot P_x + q_0) \cdot U_x^u \cdot dx, \quad (12)$$

где  $S_x^{\text{бок}}$  – площадь боковой поверхности элементарного слоя,  $\text{м}^2$ ;  $q_x^\sigma$ ,  $q_x^\tau$  – нормальная и касательная составляющие бокового распора, соответственно, Па;  $N^\sigma$ ,  $N^\tau$  – нормальная и касательная составляющие реакции  $N$  стенки канала фильтры, соответственно, Н. Разделяем переменные и интегрируем выражения (4) и (5):

– коническая часть:

$$\int_P^{P_1} \frac{dP_x}{\xi \cdot P_x + q_0} = - \int_0^{x_1} \frac{4 f_i \cdot \cos \psi}{D_k - 2 x_1 \cdot \operatorname{tg} \psi} dx; \quad (13)$$

– цилиндрическая часть:

$$\int_{P_1}^{P_2} \frac{dP_x}{q_0 + \xi \cdot P_x} = - \int_0^{x_2} f_i \cdot \frac{U_x^u}{S_x} \cdot dx. \quad (14)$$

После соответствующих преобразований получим уравнения изменения осевого давления по длине конической и цилиндрической части фильтры, соответственно:

$$P_x^k = \left( P + \frac{q_0}{\xi} \right) \cdot \left( \frac{D_k - 2 x_1 \cdot \operatorname{tg} \psi}{D_k} \right)^{\frac{2 f_i \cdot \cos \psi \cdot \xi}{\operatorname{tg} \psi}} - \frac{q_0}{\xi}; \quad (15)$$

$$P_x^u = \left( P_1 + \frac{q_0}{\xi} \right) \cdot e^{-\frac{\xi \cdot f_i \cdot \frac{4}{D_k} \cdot x_2}{\operatorname{tg} \psi}} - \frac{q_0}{\xi}, \quad (16)$$



где  $D_k$  – диаметр входного сечения конической части канала, м;  $P$  – нормальная составляющая давления со стороны формующего валка, Па;  $P_1$  – давление на входе в цилиндрическую часть, Па.

Закономерность изменения бокового давления  $q_x$  по длине конической и цилиндрической части канала можно определить, подставив в уравнение (2) значение  $P_x$  из уравнения (15) и (16) соответственно. После преобразований получим:

$$q_x^\kappa = (\xi \cdot P + q_0) \cdot \left( \frac{D_k - 2x \cdot \operatorname{tg} \psi}{D_k} \right)^{\frac{2f_i \cdot \cos \psi \cdot \xi}{\operatorname{tg} \psi}}; \quad (17)$$

$$q_x^u = (\xi \cdot P_1 + q_0) \cdot e^{-\frac{\xi \cdot f_i \cdot \frac{4}{D_u} \cdot x_2}{\operatorname{tg} \psi}}. \quad (18)$$

Решая уравнение (15) относительно  $P$  при  $x_1 = L_k$  и  $P_x = P_{\text{вн}}$  (т.к. есть сопротивление со стороны цилиндрической части), получим выражение для определения сопротивления конической части фильтры:

$$P_k = \left( P_{\text{вн}} + \frac{q_0}{\xi} \right) \cdot \left( \frac{D_k}{D_u} \right)^{\frac{2f_i \cdot \cos \psi \cdot \xi}{\operatorname{tg} \psi}} - \frac{q_0}{\xi}, \quad (19)$$

где  $P_{\text{вн}}$  – давление на выходе из конической части фильтры, Па;  $D_u$  – диаметр цилиндрической части фильтры, м.

Аналогичным образом определяем сопротивление цилиндрической части фильтры из выражения (16) при  $x_2 = L_u$  и  $P_x = 0$  (т.к. противодавление на выходе из фильтры отсутствует):

$$P_u = \frac{q_0}{\xi} \left[ e^{\frac{\xi \cdot f_i \cdot \frac{4}{D_u} \cdot L_u}{\operatorname{tg} \psi}} - 1 \right]. \quad (20)$$

Тогда полное противодавление со стороны фильтры получим, подставив в (19) вместо  $P_{\text{вн}}$  правую часть из выражения (20). После соответствующих преобразований имеем:

$$P_\phi = \frac{q_0}{\xi} \cdot \left[ e^{\frac{4 \cdot \xi \cdot f_i \cdot L_\phi - L_k}{D_u}} \cdot \left( \frac{D_k}{D_u} \right)^{\frac{2f_i \cdot \cos \psi \cdot \xi}{\operatorname{tg} \psi}} - 1 \right], \quad (21)$$

где  $L_\phi$  – длина фильтры, м.

Противодавление со стороны фильтры, полученное по выражению (21) есть противодавление, которое необходимо для получения гранул заданной плотности  $\rho$ .

Решая совместно уравнения (1) и (21) относительно  $L_\phi$ , получаем:

$$L_\phi = \frac{D_u}{(1-n) \cdot 4 \cdot f_i \cdot \xi} \ln \left( \left[ \frac{C \cdot \xi}{q_0} \cdot (e^{a(\rho - \rho_0)} - 1) + 1 \right] \cdot \left( \frac{D_u}{D_k} \right)^{\frac{2f_i \cdot \cos \psi \cdot \xi}{\operatorname{tg} \psi}} \right). \quad (22)$$

Здесь  $n$  есть длина конической части  $L_k$ , выраженная в долях от общей длины фильтры  $L_\phi$ . Например,  $n = 0,2$  означает, что длина конической части составляет 20% от общей длины фильтры, при  $n = 0,35$  – соответственно 35%.



Длина канала фильтры  $L_\phi$ , определенная по (22), обеспечивает получение заданной плотности  $\rho$  сформованных гранул.

### **Движение волокносодержащего материала по фильтре постоянного поперечного сечения**

Перед исследованием процесса формования волокнистых техногенных материалов в фильтре рассмотренного профиля техногенных волокнистых материалов необходимо обозначить их основные особенности, существенно отличающие их от порошковых и сено-соломистых материалов. При этом под «техногенными волокнистыми материалами» будем понимать класс материалов, состоящих преимущественно из тонкоизмельченных волокон ( $l_e = 0,5 \dots 5$  мм) растительного (техническая целлюлоза, макулатура) или минерального (асбест) происхождения.

Одна из таких особенностей связана с размерами частиц и волокон, из которых состоит гранулируемая смесь. Частицы сено-соломистых волокнистых материалов и, тем более, порошковых материалов имеют примерно равные пространственные размеры. В то время как у рассматриваемых нами волокнистых материалов отношение длины к диаметру волокна  $L/D$  (т.н. «фактор формы») может достигать 14000 и более [14].

Фактор формы волокнистых материалов обуславливает высокоразвитую контактную поверхность между волокнами и, как следствие, высокий коэффициент внутреннего трения  $f_e$ . Такие материалы обладают практически нулевой относительной подвижностью «частиц» (волокон) при повышенных давлениях на слой материала, в результате чего при прокатывании слоя пресс-валком постепенно формируется сплошной монолит. В момент, когда плотность получившегося слоя приблизится к плотности материала, происходит вдавливание очередной порции материала в каналы фильтр.

Другая важная особенность заключается в том, что степень уплотнения волокнистых материалов  $\lambda_{uppl}$  при переработке может достигать  $\lambda_{uppl} \sim 15$  (рост плотности смеси происходит с  $\rho_0 = 40 \pm 20$  до  $\rho_{ep} = 600 \pm 50$  кг/м<sup>3</sup>). Сравнимые показатели степени уплотнения имеются только в с/х промышленности, где при производстве комбикормов  $\lambda_{uppl}$  может достигать 5 ÷ 8 [6, 7]. В ПСМ, например, степень уплотнения материала при экструдировании составляет порядка 1,5 ÷ 4.<sup>2</sup>

Основываясь на указанных особенностях, а также наблюдениях при экспериментальных исследованиях процесса формования волокнистых материалов в грануляторах с кольцевой и плоской пресс-матрицей, нами была выдвинута гипотеза, что такие материалы вдавливаются в каналы и движутся по ним слоями. Т.е. за один цикл прессования (накатывания пресс-валка на слой материала) вдавливание порции материала происходит не за счет пластического течения из области повышенных давлений в области пониженных, но за счет «разрезания» уплотненного слоя по периметру входного сечения фильтры в момент прохода образующей пресс-валка над входным сечением фильтры.

Рассмотрим движение волокнистого материала по каналу постоянного сечения, на основе наших предположений о «слоистом течении» материала.

При равномерной подаче материала в камеру гранулирования за время одного оборота пресс-валка вокруг оси водила (приводного вала) на рабочей поверхности пресс-матрицы образуется кольцевой слой материала высотой  $H$  с насыпной плотностью  $\rho_0$  (рис. 3). Накатывающийся на материал пресс-валок сжимает слой между сближающимися рабочими поверхностями пресс-матрицы и пресс-валка. Давление сжатия при этом возрастает по кривой  $A_1B_1$  от нуля в точке  $A_1$  до максимального значения  $P_B$  в точке  $B_1$ . Кривая  $A_1B_1$  описывается уравнением (1).

В точке  $B$  усилие со стороны пресс-валка на уплотненный слой материала становится равным силам трения, имеющимся в канале спрессованного материала о стенки фильтры, т.е.

сопротивлению продвижения прессованного материала по каналу. При дальнейшем накатывании пресс-валка на слой происходит разрушение последнего по периметру входной части фильтры, вдавливание получившегося «кружка-порции» в канал формования и проталкивание всего спрессованного материала. Процесс заканчивается, когда образующая обечайки пресс-валка полностью пересечет входное отверстие канала формования (точка С). Падение давления, при проталкивании материала по каналу, происходит по кривой  $B_1C_1$ .

Имеющийся в шихте связующий пластифицирующий компонент (содержание которого может составлять более 30% мас.), способствует сцеплению слоев при их продвижении по каналу.

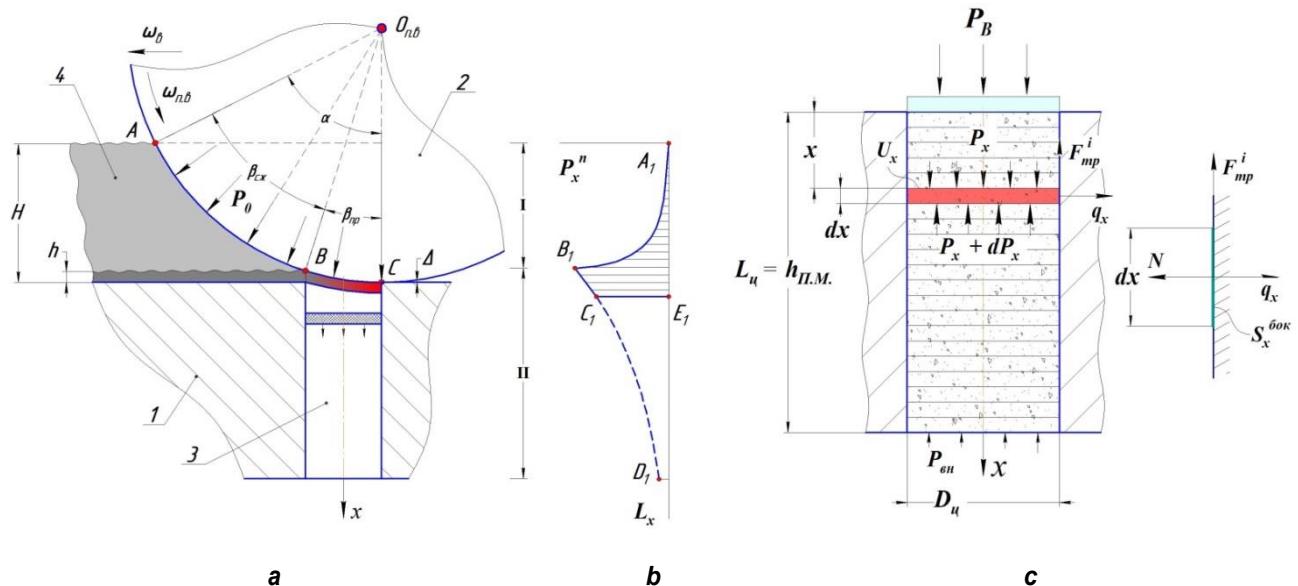


Рис. 3. Схема к расчету усилия экструдирования волокнистого материала через фильтеру с постоянным сечением: а – условие равновесия элементарного слоя материала; б – схема сил; в – график изменения давления экструдирования;

**Fig. 3. Diagram for calculating the extruding force of fibrous material through a spinneret with a constant cross section: a – material elementary layer equilibrium condition; b – force diagram; c – graph of extrusion pressure variation: 1 – press matrix, 2 – press roller, 3 – spinneret channel, 4 – compacted material**

Воспользуемся описанной выше методикой и определим закон изменения осевого давления в канале постоянного сечения.

Уравнение равновесия выделенного «слоя-порции» материала толщиной  $dx$  (справедливо, поскольку толщина слоя  $h_{\text{сл}} \ll L_u$ ) на небольшой глубине  $x$  от входного сечения (рис. 3 б) в проекции на ось  $Ox$  фильры:

$$P_v S_v - (P_v + dP_v) S_v - f_v \cdot (\xi \cdot P_v + q_0) \cdot U_v \cdot dx = 0. \quad (23)$$

После преобразования получим:

$$\frac{dP_x}{\xi \cdot P_x + q_0} = -f_i \cdot \frac{U_x}{S_x} \cdot dx. \quad (24)$$

Знак « $-$ » в правой части уравнения показывает, что давление в направлении к выходному сечению канала уменьшается.



Интегрируем левую часть от  $P$  до  $P_x$ , а правую от 0 до  $x$ , с учетом того, что  $U_x = \pi \cdot D_u = \text{const}$  и  $S_x = \pi \cdot D_u^2/4 = \text{const}$ . Получим:

$$\ln \frac{\xi \cdot P_x + q_0}{\xi \cdot P + q_0} = -\xi \cdot f_i \cdot \frac{4}{D_u} \cdot x. \quad (25)$$

Решив полученное уравнение относительно  $P_x$ , получим закономерность изменения осевого давления по длине канала:

$$P_x = \left( P + \frac{q_0}{\xi} \right) \cdot e^{-\xi \cdot f_i \cdot \frac{4}{D_u} \cdot x} - \frac{q_0}{\xi}. \quad (26)$$

Здесь  $P$  нормальная составляющая давления  $P_0$  со стороны рабочего органа, при котором происходит вдавливание спрессованной порции материала (без учета усилия на разрезание слоя при вдавливании в фильтеру) и продавливание всего материала, находящегося в канале фильтры.

При  $x = 0$  значение этого давления будет определяться максимальным давлением, необходимым для получения плотности материала  $\rho$ , которое находится по уравнению (1).

Таким образом, полученное уравнение (26) позволяет определить падение давления по длине канала и описывает кривую  $B_1D_1$  на рис. 2 б.

Решив уравнение (26) относительно  $P$  при  $x = L_u$  и  $P_x = 0$  (т.к. противодавление на выходе отсутствует) получим выражение для определения сопротивления канала длиной  $L_u$  постоянного круглого сечения:

$$P_u = \frac{q_0}{\xi} \left[ e^{\xi f_i \frac{4}{D_u} L_u} - 1 \right]. \quad (27)$$

Давление  $P_u$ , определяемое по уравнению (27), является противодавлением, которое для получения гранул заданной плотности должно обеспечить максимальное давление  $P$  (его нормальная составляющая) пресс-валка. Приравняв правые части уравнений (1) и (27), и решив относительно  $L_u$ , получим длину канала формования постоянного круглого сечения, которое обеспечит данное противодавление:

$$L_u = \frac{D_u}{4 \cdot \xi \cdot f_i} \ln \left[ 1 + \frac{C \cdot \xi}{q_0} \cdot \left( e^{\alpha(\rho - \rho_0)} - 1 \right) \right]. \quad (28)$$

### **Движение волокносодержащего материала по фильтру переменного поперечного сечения**

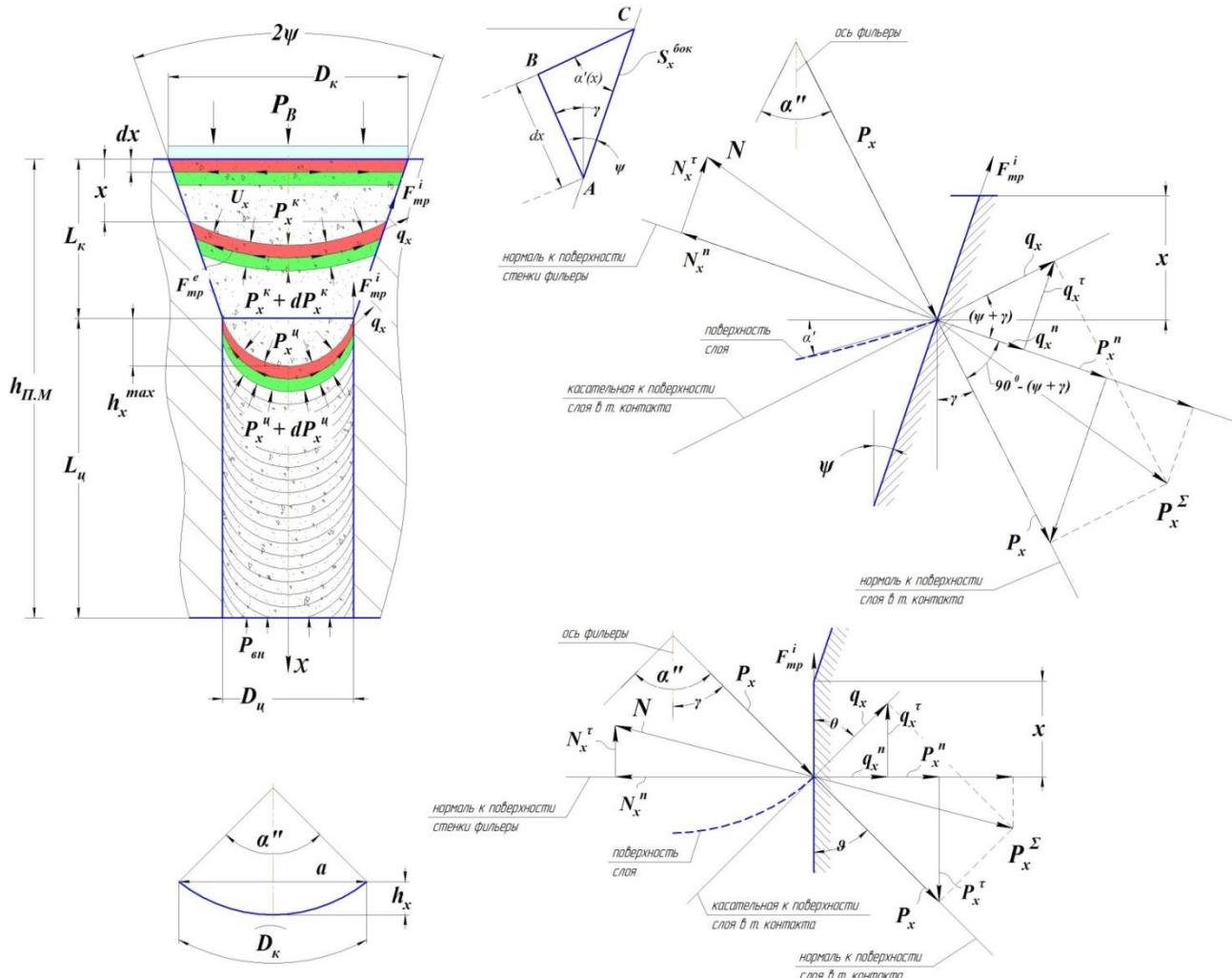
Теперь рассмотрим движение волокнистого материала по каналу фильтры пресс-матрицы, имеющего профиль, показанный на рис. 4. Согласно предложенной нами гипотезе о «слоистом течении», «слои-порции» материала, не имея относительной подвижности волокон, будут деформироваться по ходу движения.

Такая деформация материала приводит к перераспределению нормального давления  $P$  от рабочего органа, расклинивая к стенкам фильтры движущийся по ней материал (т.к. в твердых телах давление передается по нормали к поверхности вдоль линии действия силы). Вследствие чего увеличится сопротивление канала формования продвижению уплотняемого материала.



Деформация слоев при высоком давлении обеспечит, согласно [3], высокое сухое трение между слоями, что, в свою очередь, повысит сцепление слоев между собой и прочность готовой гранулы.

Для удобства описания математической модели примем, что выделенный «слой-порция» при деформации принимает форму части поверхности сферы.



Примечание. Ось фильеры / Spinneret axis; Нормаль к поверхности стенки фильеры / Normal to the spinneret wall surface; Поверхность слоя / Layer surface; Касательная к поверхности слоя в т. контакта / Tangent to the layer surface in the contact point; Нормаль к поверхности слоя в т. контакта / Normal to the layer surface in the contact point.

**Рис. 4. Движение волокнистого материала по каналу фильеры переменного поперечного сечения и расчетные схемы**

**Fig. 4. Fibrous material motion through the channel of the variable cross-section spinneret and design schemes**

Величину прогиба  $h_x$  выделенного «слоя-порции» можно определить по следующему известному приближенному соотношению<sup>5</sup>:

$$h_x \approx \sqrt{\frac{3}{16} (D_k^2 - D_u^2)}, \quad (29)$$

где  $D_k$  – диаметр входного сечения конической части фильеры, м;  $D_u$  – диаметр выходной цилиндрической части фильеры, м.



Прогиб  $h_x$  выделенного «слоя-порции» связан с центральным углом  $\alpha''$  кругового сектора (рис. 4) соотношением<sup>5</sup>:

$$h_x = \frac{a}{2} \operatorname{tg} \frac{\alpha''}{4}, \quad (30)$$

где  $a$  – хорда сектора, м;  $\alpha''$  – центральный угол сектора, град.

Поскольку хорда сектора  $a$  (рис. 4) в конической части фильтры величина переменная, выражая ее через координату  $x$ , воспользуемся зависимостью:

$$D_k(x) = D_k - 2 \cdot x \cdot \operatorname{tg} \psi. \quad (31)$$

Подставив (31) в (29), запишем:

$$h_x(x) = \sqrt{\frac{3}{16} \left( D_k^2 - (D_k - 2 \cdot x \cdot \operatorname{tg} \psi)^2 \right)}. \quad (32)$$

Тогда для изменяющегося центрального угла  $\alpha''$  как функции от координаты  $x$  запишем:

$$\alpha''(x) = 4 \operatorname{arctg} \left( \frac{2 \cdot \sqrt{\frac{3}{16} \left( D_k^2 - (D_k - 2 \cdot x \cdot \operatorname{tg} \psi)^2 \right)}}{D_k - 2 \cdot x \cdot \operatorname{tg} \psi} \right). \quad (33)$$

После преобразований получим:

$$\alpha''(x) = 4 \operatorname{arctg} \left( \sqrt{\frac{3}{4} \left( \frac{D_k^2}{(D_k - 2 \cdot x \cdot \operatorname{tg} \psi)^2} - 1 \right)} \right). \quad (34)$$

Центральный угол  $\alpha''$  определяет максимальное значение угла  $\gamma$  – т.е. величину перераспределения нормального давления  $P$  со стороны рабочего органа гранулятора по мере продвижения материала (рис. 4). Угол  $\gamma$  равен:

$$\gamma = 0,5 \alpha'' = 2 \cdot \operatorname{arctg} \left( \sqrt{\frac{3}{4} \left( \frac{D_k^2}{(D_k - 2 \cdot x \cdot \operatorname{tg} \psi)^2} - 1 \right)} \right). \quad (35)$$

Боковая поверхность выделенного «слоя-порции» у входного сечения составит:

$$S_x^{\text{бок}} = \frac{U_x \cdot dx}{\cos \psi}, \quad (36)$$

где  $U_x$  – периметр поперечного сечения слоя на глубине  $x$  (м);  $dx$  – толщина элементарного выделенного слоя, (м).

Деформация «слоя-порции» по мере продвижения будет приводить к изменению боковой поверхности. По схеме на рис. 4 видно, что гипотенуза треугольника  $ABC$  будет составлять:

$$AC = \frac{dx}{\cos(\psi + \gamma)}. \quad (37)$$



Тогда (36) запишем в виде:

$$S_x^{\text{бок}} = \frac{U_x \cdot dx}{\cos(\psi + \gamma)}. \quad (38)$$

В конической части боковой распор раскладывается на две составляющие (рис. 4): нормальную и касательную к стенке фильтры, соответственно:

$$q_x^n = q_x \cdot \cos(\psi + \gamma); \quad (39)$$

$$q_x^t = q_x \cdot \sin(\psi + \gamma). \quad (40)$$

Нормальная и касательная составляющие давления составят (рис. 4):

$$P_x^n = P_x \cdot \cos(90^\circ - (\psi + \gamma)) = P_x \cdot \sin(\psi + \gamma); \quad (41)$$

$$P_x^t = P_x \cdot \sin(90^\circ - (\psi + \gamma)) = P_x \cdot \cos(\psi + \gamma). \quad (42)$$

Реакцией стенки фильтры на совместное действие бокового распора и перераспределенного давления будет сила  $N$ , нормальную и касательную составляющие которой определим по схеме (рис. 4):

$$N^n = [P_x \cdot \sin(\psi + \gamma) + q_x \cdot \cos(\psi + \gamma)] \cdot S_x^{\text{бок}}; \quad (43)$$

$$N^t = [P_x \cdot \cos(\psi + \gamma) - q_x \cdot \sin(\psi + \gamma)] \cdot S_x^{\text{бок}}. \quad (44)$$

Сила внешнего трения материала о стенки фильтры  $F_{mp}^i$  будет определяться нормальной составляющей силы  $N$ , т.е.:

$$F_{mp}^i = f_i \cdot N^n = f_i \cdot [P_x \cdot \sin(\psi + \gamma) + q_x \cdot \cos(\psi + \gamma)] \cdot S_x^{\text{бок}}, \quad (45)$$

где  $f_i$  – коэффициент внешнего трения материала о стенки канала.

С учетом выражения (38), зависимости (43)–(45) примут вид:

$$N^n = [P_x \cdot \sin(\psi + \gamma) + q_x \cdot \cos(\psi + \gamma)] \cdot \frac{U_x \cdot dx}{\cos(\psi + \gamma)}; \quad (46)$$

$$N^t = [P_x \cdot \cos(\psi + \gamma) - q_x \cdot \sin(\psi + \gamma)] \cdot \frac{U_x \cdot dx}{\cos(\psi + \gamma)}; \quad (47)$$

$$F_{mp}^i = f_i \cdot N^n = f_i \cdot [P_x \cdot \sin(\psi + \gamma) + q_x \cdot \cos(\psi + \gamma)] \cdot \frac{U_x \cdot dx}{\cos(\psi + \gamma)}. \quad (48)$$

После преобразований, получим:

$$N^n = P_x \cdot U_x \cdot \operatorname{tg}(\psi + \gamma) \cdot dx + q_x \cdot U_x \cdot dx; \quad (49)$$



$$N^t = P_x \cdot U_x \cdot dx - q_x \cdot U_x \cdot \operatorname{tg}(\psi + \gamma) \cdot dx; \quad (50)$$

$$F_{mp}^i = f_i \cdot [P_x \cdot U_x \cdot \operatorname{tg}(\psi + \gamma) \cdot dx + q_x \cdot U_x \cdot dx]. \quad (51)$$

С учетом сказанного, уравнение равновесия деформированного слоя на глубине  $x$  от входного сечения в проекции на ось фильтры (рис. 4) будет иметь следующий вид:

$$P_x S_x - (P_x + dP_x) S_x - F_{mp}^i \cdot \cos \psi - N^t \cdot \cos \psi - N^n \cdot \sin \psi = 0, \quad (52)$$

где  $S_x$  – площадь поперечного сечения канала на глубине  $x$ , ( $\text{м}^2$ ).

После преобразований получим:

$$dP_x S_x = -N^n \cdot (f_i \cdot \cos \psi - \sin \psi) - N^t \cdot \cos \psi. \quad (53)$$

С учетом (49) и (50), получим:

$$dP_x S_x = -[P_x \cdot U_x \cdot \operatorname{tg}(\psi + \gamma) \cdot dx + q_x \cdot U_x \cdot dx] \cdot (f_i \cdot \cos \psi - \sin \psi) - [P_x \cdot U_x \cdot dx - q_x \cdot U_x \cdot \operatorname{tg}(\psi + \gamma) \cdot dx] \cdot \cos \psi. \quad (54)$$

Заменим  $q_x$  выражением (2), а  $\gamma$  – выражением (35) и приведем зависимость (54) к виду  $dy = F(x, y) dx$  (ОДУ первого порядка). После преобразований получим:

$$\begin{aligned} dP_x = -P_x \cdot \operatorname{tg} \left[ \psi + 2 \operatorname{arctg} \left( \sqrt{\frac{3}{4} \left( \frac{D_\kappa^2}{(D_\kappa - 2 \cdot x \cdot \operatorname{tg} \psi)^2} - 1 \right)} \right) \right] \cdot \frac{U_x}{S_x} \cdot (f_i \cdot \cos \psi - \sin \psi) \cdot dx - \\ - (\xi \cdot P_x + q_0) \cdot \frac{U_x}{S_x} \cdot (f_i \cdot \cos \psi - \sin \psi) \cdot dx - P_x \cdot \frac{U_x}{S_x} \cdot \cos \psi \cdot dx + \\ + (\xi \cdot P_x + q_0) \cdot \operatorname{tg} \left[ \psi + 2 \operatorname{arctg} \left( \sqrt{\frac{3}{4} \left( \frac{D_\kappa^2}{(D_\kappa - 2 \cdot x \cdot \operatorname{tg} \psi)^2} - 1 \right)} \right) \right] \cdot \frac{U_x}{S_x} \cdot \cos \psi \cdot dx. \end{aligned} \quad (55)$$

Согласно нашей гипотезе, площадь «кружка-порции» остается постоянной, а периметр  $U_x$  уменьшается по мере продвижения, т.е.  $S_x = \pi \cdot D_\kappa^2 / 4 = \text{const}$  и  $U_x = \pi \cdot (D_\kappa - 2 \cdot x \cdot \operatorname{tg} \psi)$ , тогда:

$$\frac{U_x}{S_x} = \frac{4 \cdot (D_\kappa - 2x \cdot \operatorname{tg} \psi)}{D_\kappa^2}. \quad (56)$$

С учетом (56), выражение (55) примет вид:

$$\begin{aligned} dP_x = -P_x \cdot \operatorname{tg} \left[ \psi + 2 \operatorname{arctg} \left( \sqrt{\frac{3}{4} \left( \frac{D_\kappa^2}{(D_\kappa - 2 \cdot x \cdot \operatorname{tg} \psi)^2} - 1 \right)} \right) \right] \cdot \frac{4(D_\kappa - 2x \cdot \operatorname{tg} \psi)}{D_\kappa^2} (f_i \cos \psi - \sin \psi) \cdot dx - \\ - (\xi \cdot P_x + q_0) \cdot \frac{4(D_\kappa - 2x \cdot \operatorname{tg} \psi)}{D_\kappa^2} (f_i \cos \psi - \sin \psi) \cdot dx - P_x \cdot \frac{4(D_\kappa - 2x \cdot \operatorname{tg} \psi)}{D_\kappa^2} \cos \psi \cdot dx + \\ + (\xi \cdot P_x + q_0) \cdot \operatorname{tg} \left[ \psi + 2 \operatorname{arctg} \left( \sqrt{\frac{3}{4} \left( \frac{D_\kappa^2}{(D_\kappa - 2 \cdot x \cdot \operatorname{tg} \psi)^2} - 1 \right)} \right) \right] \cdot \frac{4(D_\kappa - 2x \cdot \operatorname{tg} \psi)}{D_\kappa^2} \cos \psi \cdot dx. \end{aligned} \quad (57)$$



После конической части фильтры, деформированные слои материала с максимальным прогибом  $h_x^{max}$  (рис. 4), попадают в цилиндрическую часть. В результате чего здесь также наблюдается перераспределение нормального давления и, как следствие, повышение сопротивления канала продвижению материала. Здесь боковой распор  $q_x$  также раскладывается на две составляющие:

$$q_x^n = q_x \cdot \sin \theta; \quad (58)$$

$$q_x^t = q_x \cdot \cos \theta. \quad (59)$$

Нормальная и касательная составляющие давления составят (рис. 4):

$$P_x^n = P_x \cdot \sin \vartheta; \quad (60)$$

$$P_x^t = P_x \cdot \cos \vartheta. \quad (61)$$

Из рис. 4 видно, что  $\theta = (90^0 - \vartheta)$ , тогда:

$$q_x^n = q_x \cdot \sin(90^0 - \vartheta) = q_x \cdot \cos \vartheta; \quad (62)$$

$$q_x^t = q_x \cdot \cos(90^0 - \vartheta) = q_x \cdot \sin \vartheta. \quad (63)$$

Нормальная и касательная составляющие силы  $N$  к поверхности стенки составят (рис. 4):

$$N^n = (P_x \cdot \sin \vartheta + q_x \cdot \cos \vartheta) \cdot S_x^{\text{бок}}; \quad (64)$$

$$N^t = (P_x \cdot \cos \vartheta + q_x \cdot \sin \vartheta) \cdot S_x^{\text{бок}}. \quad (65)$$

Боковая поверхность слоя в цилиндрической части фильтры будет постоянной и определиться по (38). Тогда сила внешнего трения материала о стенки фильтры  $F_{mp}^i$  составит:

$$F_{mp}^i = f_i \cdot N^n = f_i \cdot (P_x \cdot \sin \vartheta + q_x \cdot \cos \vartheta) \cdot \frac{l_x \cdot dx}{\cos(\psi + \gamma)}. \quad (66)$$

Проектируем все силы на ось  $Ox$ :

$$P_x S_x - (P_x + dP_x) S_x - F_{mp}^i - N^t = 0. \quad (67)$$

После преобразований, с учетом (2), получим:

$$dP_x = -f_i \cdot (P_x \cdot \sin \vartheta + (\xi \cdot P_x + q_0) \cdot \cos \vartheta) \cdot \frac{U_x}{S_x} \cdot \frac{dx}{\cos(\psi + \gamma)} - (P_x \cdot \cos \vartheta + (\xi \cdot P_x + q_0) \cdot \sin \vartheta) \cdot \frac{U_x}{S_x} \cdot \frac{dx}{\cos(\psi + \gamma)}. \quad (68)$$

Периметр  $U_x$  и площадь  $S_x$  остаются постоянными и определяются, соответственно,  $U_x = \pi \cdot D_u = \text{const}$  и  $S_x = \pi \cdot D_k^2 / 4 = \text{const}$ , тогда:



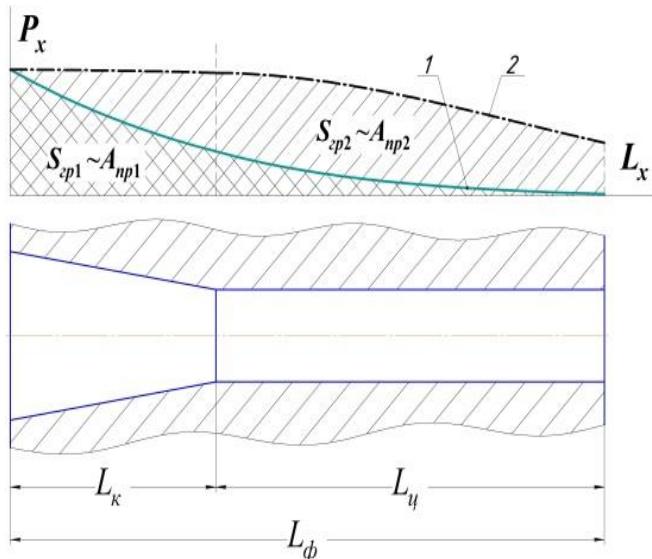
$$\frac{U_x}{S_x} = \frac{4 \cdot D_u}{D_k^2}. \quad (69)$$

Из рис. 4 видно, что угол  $\vartheta = \gamma$ , принимающего максимальное значение на переходе конической части в цилиндрическую часть. Численно значение угла  $\gamma$  определим по (35) при  $x = L_k$ . С учетом сказанного, (68) примет вид:

$$dP_x = -f_i \cdot (P_x \cdot \sin \gamma + (\xi \cdot P_x + q_0) \cdot \cos \gamma) \cdot \frac{4D_u}{D_k^2} \cdot \frac{dx}{\cos(\psi + \gamma)} - (P_x \cdot \cos \gamma + (\xi \cdot P_x + q_0) \cdot \sin \gamma) \cdot \frac{4D_u}{D_k^2} \cdot \frac{dx}{\cos(\psi + \gamma)}. \quad (70)$$

Здесь  $P_x$  – давление на входе в цилиндрическую часть, равное давлению  $P_x$  на выходе из конической части.

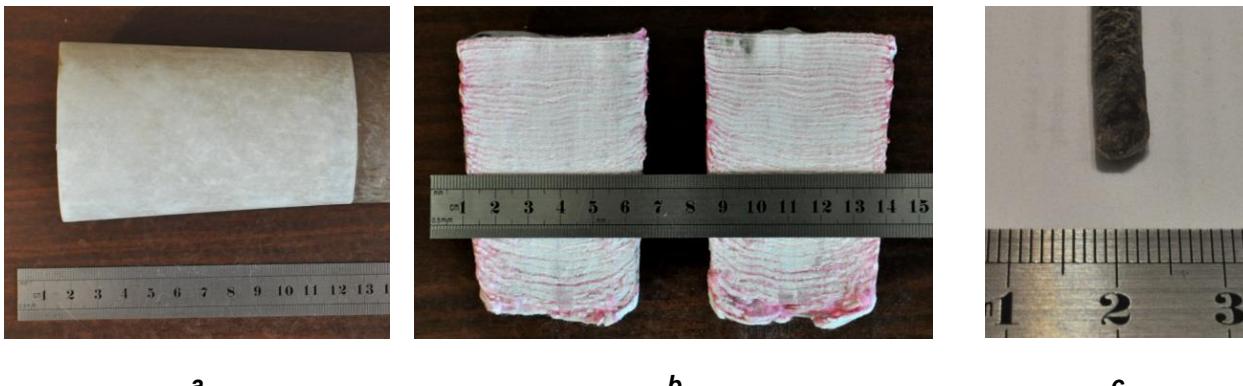
Используя выражения (57) и (70), совместно с (15) и (16), рассчитаем и построим графики изменения осевого давления по длине канала формования (при прочих равных условиях) при формировании техногенных волокнистых материалов (шихта из измельченного гофрокартона с пластификатором на основе битумной эмульсии и отработанного машинного масла, имеющая следующие параметры  $C = 4,31 \cdot 10^6$  Па,  $a = 2,15 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/кг,  $\xi = 0,27$ ,  $q_0 = 1,35 \cdot 10^6$  Па,  $f_i = 0,22$ ,  $\rho_0 = 45$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho = 550$  кг/м<sup>3</sup>). Результат представлен на рис. 5. Площади фигур под графиками пропорциональны работе  $A_{np}$  внешних сил со стороны пресс-валка, необходимых для проталкивания материала по каналу. Причем площадь под кривой 2 в  $k_f \approx 2,3$  раза больше площади под кривой 1.



**Рис. 5. Изменение осевого давления при экструзионном гранулировании волокнистого материала как вязко-пластичного тела (1) и с учетом особенностей волокнистой среды (2)**

**Fig. 5. Variation of the axial pressure under extrusion granulation of fibrous material as a viscous-plastic body (1) and taking into account the fibrous medium (2) characteristics**

Небольшой эксперимент, наглядно демонстрирующий рассмотренный нами эффект, был проведен на смоделированной в масштабе 7,75:1 фильере плоскоматричного гранулятора с конической заходной частью (рис. 6 а). В качестве «слоев» материала служили косметические ватные диски, для наглядности чередующиеся по цвету. Связующим компонентом служил эпоксидный клей. На распиле получившейся «гранулы» (рис. 6 б) хорошо видно, как по мере продвижения материала происходит выгибание «слоев-порций». На рис. 6 с представлена фотография гранулы, полученной на плоскоматричном грануляторе и имеющей характерный выпуклый торец на изломе.



**Рис. 6. Модель канала формования в масштабе 7,75:1 (а), деформация элементарных слоев в канале при моделировании «слоистого течения» материала (б) и деформация слоев на срезе готовой гранулы (с)**

**Fig. 6. Model of the forming channel in the scale 7.75:1 (a), deformation of elementary layers in the channel when modeling the “layered flow” of material (b) and deformation of layers on the finished granule cut (c)**

## Результаты исследования

Рассмотрены и подробно описаны процессы движения перерабатываемого упруго-вязко-пластичного и волокносодержащего материалов по формующим каналам постоянного и переменного поперечного сечения плоских пресс-матриц.

С учетом указанных свойств техногенных волокнистых материалов (малая сыпучесть и насыпная плотность, высокое влагопоглощение и коэффициент внутреннего трения, повышенная склонность к слеживаемости, неравномерное распределение материала по рабочей камере машины и др.) и связанных с этими свойствами особенностей формования гранул, разработана математическая модель данного процесса.

На примере формования волокносодержащей шихты (при производстве ГСД щМА) как упруго-вязко-пластичного и волокнистого материала приведено сравнение разработанных математических моделей. В результате получено, что затраты энергии при формировании волокносодержащей шихты в гранулы примерно в несколько раз больше, чем при формировании упруго-вязко-пластичного тела с теми же характеристиками и при прочих равных условиях. Это обстоятельство необходимо учитывать при подборе существующего или проектировании нового грануляционного оборудования.

В соответствии с уравнениями (21), (22), (27), (28), (57) и (70) показано, что сопротивление продвижению перерабатываемого материала формующего канала постоянного и переменного поперечного сечения изменяется по степенному закону, зависит от геометрических параметров канала ( $D_k$ ,  $D_u$ ,  $\Psi$ ,  $L_\phi$ ,  $L_k$ ,  $L_u$ ) и физико-механических свойств ( $f_i$ ,  $\xi$  и  $q_0$ ) гранулируемой шихты.

В выражениях (22) и (28) видно, что длина канала фильтры пропорциональна начальной плотности шихты  $\rho_0$ . Чем больше будет начальная плотность шихты, тем меньшее давление необходимо приложить со стороны пресс-валка для получения плотности  $\rho$  готовой гранулы, тем меньше должно быть сопротивление канала формования и, как следствие, меньше должна быть длина фильтры  $L_\phi$ . А это, в свою очередь, снижает металлоемкость и себестоимость гранулятора. Отсюда закономерно встает вопрос о целесообразности наличия в конструкции гранулятора дополнительного устройства предварительного уплотнения.

В результате теоретико-экспериментальных исследований нами была разработана конструкция плоскоматричного гранулятора [15]. Данный агрегат нашел применение в ресурсосберегающем технологическом комплексе для производства гранулированных стабилизирующих добавок щебеночно-мастичного асфальтобетона [16].



## Выводы

На основании проведенных теоретических исследований можно сделать следующие выводы:

1. Формование в каналах переменного поперечного сечения волокнистых материалов, ввиду их особенностей, требует больших затрат энергии, чем формование упруго-вязко-пластичных материалов (при прочих равных условиях).
2. Гипотеза о «слоистом течении» волокнистых материалов подтверждается моделированием данного процесса на модели фильтры, а также при экспериментальных исследованиях процесса формования волокнистых техногенных материалов в лабораторной и опытно-промышленной установках плоскоматричного гранулятора.
3. Разработанная математическая модель может быть использована в расчетах параметров грануляционного оборудования экструзионного типа, в частности плоскоматричных грануляторов технологических линий по производству гранулированных стабилизирующих добавок ЦМА и для проведения дальнейших теоретико-экспериментальных исследований.

## Библиографический список

1. Осокин, А.В., Севостьянов М.В. Анализ существующих способов и технологических средств для компактирования техногенных материалов // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. Москва. 2013. № 7. С. 62–66.
2. Дубинин, Н.Н. Бесшнековые машины для формования пластичных масс. Белгород: Белгородский государственный технический университет, 2013. 110 с.
3. Фадеева В.С. Формирование структуры пластичных паст строительных материалов при машинной переработке. М.: Стройиздат, 1972. 223 с.
4. Севостьянов В.С., Шинкарев Л.И., Севостьянов М.В., Макридин А.А., Солопов Н.В. Технические основы переработки и утилизации техногенных материалов. Белгород: Белгородский государственный технический университет, 2011. 268 с.
5. Осокин А.В. Исследование кинематической схемы плоскоматричного гранулятора с активными цилиндрическими пресс-валками // Вестник Московского государственного строительного университета. 2017. № 3 (102). С. 317–325. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.3.317-325>
6. Мельников С.В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм. Л.: Колос, 1978. 560 с.
7. Кучинская З.М., Особов В.И., Фререр Ю.Л. Оборудование для сушки, гранулирования и брикетирования кормов. М.: Агропромиздат, 1988. 208 с.
8. Левченко В.И., Гуменюк Г.Д., Дмитрук Е.А. Производство и использование гранулированных комбикормов. Киев: Урожай. 1982. 120 с.
9. Федоренко И.Я. Альтернативная теория прессования кормов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. № 3 (101). 2013. С. 95–98.
10. Križan P., M. Matúš M., Beniak J. Relationships between technological and material parameters during densification of cherry tree sawdust // MM SCIENCE JOURNAL. XII. 2016. P. 1549–1554. [https://doi.org/10.17973/MMSJ.2016\\_12\\_2016142](https://doi.org/10.17973/MMSJ.2016_12_2016142)
11. Križan P., M. Matúš M., Beniak J. Relationships between compacting pressure and conditions in pressing chamber during biomass pressing // Acta Polytechnica 56 (1). 2016. P. 33–40. <https://doi.org/10.14311/APP.2016.56.0033>
12. Križan P., Svátek M., Matúš M., Beniak J. Impact of pressing temperature on the pressing conditions in briquetting machine pressing chamber // Journal of Production Engineering. 2014. Vol. 17. № 1. P. 79–82.
13. Križan P., Matúš M. Impact of pressing chamber conicalness on the quality of briquetts produced from biofuels in briquetting machines // Fuel. 2012. № 4. P. 122–127.
14. Иванов С.Н. Технология бумаги. 3-е изд. М.: Школа бумаги, 2006. 696 с.
15. Пат. 135539, Российская Федерация, МПК B 01 J 2/20. Гранулятор волокнистых материалов / М.В. Севостьянов, Т.Н. Ильина, А.В. Осокин, В.С. Севостьянов, Р.А. Сабитов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО БГТУ им. В.Г. Шухова. № 2013130468/05; заявл. 02.07.2013; опубл. 20.12.2013. Бюл. № 35. 2 с.



16. Севостьянов, М.В., Ильина Т.Н., Кузнецова И.А., Осокин А.В., Мартаков И.Г. Ресурсосберегающий технологический комплекс для производства гранулированных стабилизирующих добавок щебено-мастичного асфальтобетона // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2016. Т. 22. № 2. С. 272–279. <https://doi.org/10.17277/vestnik.2016.02.pp.272-279>

### **References**

1. Osokin A.V., Sevost'yanov M.V. Analysis of existing methods and technological means for man-made material compaction. *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук* [Relevant problems of the humanities and natural sciences], 2013, no. 7, pp. 62–66. (In Russian).
2. Dubinin N.N. *Besshnekovye mashiny dlya formovaniya plastichnykh mass* [Screwless machinery for plastic mass molding]. Belgorod: Belgorod State Technical University Publ., 2013, 110 p. (In Russian).
3. Fadeeva V.S. *Formirovanie struktury plastichnyh past stroitelnyh materialov pri mashinnoi pererabotke* [Structure formation of plastic pastes of building materials under machine processing]. Moscow: Stroizdat Publ., 1972, 223 p. (In Russian).
4. Sevostyanov V.S., Shinkarev L.I., Sevostyanov M.V., Makridin A.A., Solopov N.V. *Technicheskie osnovy pererabotki i utilizacií technogennych materialov* [Technical bases of technogenic material processing and recycling]. Belgorod: Publishing house BSTU named after V.G. Shukhov, 2011. 268 p. (In Russian).
5. Osokin A.V. Study of the flat die pellet mills kinematic diagram with active cylindrical press rolls. *Vestnik MGSU. Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo stroitel'nogo universiteta* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering], 2017, vol. 12, issue 3 (102), pp. 317–325. (In Russian). <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.3.317-325>
6. Melnikov, S.V. *Mechanizaciya i avtomatizacya zivotnovodcheskikh ferm* [Mechanization and automation of livestock farms]. Leningrad: Kolos Publ., 1978, 560 p. (In Russian).
7. Kucinskas, Z.M. *Oborudovanie dlya sushki, granulirovaniya i briketirovaniya kormov* [Equipment for drying, granulation and briquetting of feed]. Moscow: Agropromizdat Publ., 1988. 208 p. (In Russian).
8. Levchenko, V.I., Gumennyuk G.D., Dmitruk E.A. *Proizvodstvo i ispolzovanie granulirovannykh kombikormov* [Production and use of granulated compound feeds]. Kiev: Urozai, 1982, 120 p.
9. Fedorenko, I.Ya. Alternative theory of feed pressing. *Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Altai State Agricultural University], 2013, no. 3 (101), pp. 95–98. (In Russian).
10. Križan P., M. Matúš M., Beniak J. Relationships between technological and material parameters during densification of cherry tree sawdust. *MM SCIENCE JOURNAL. XII*, 2016, pp. 1549–1554. [https://doi.org/10.17973/MMSJ.2016\\_12\\_2016142](https://doi.org/10.17973/MMSJ.2016_12_2016142)
11. Križan P., M. Matúš M., Beniak J. Relationships between compacting pressure and conditions in pressing chamber during biomass pressing. *Acta Polytechnica*, 2016, 56 (1), pp. 33–40. <https://doi.org/10.14311/APP.2016.56.0033>
12. Križan P., Svátek M., Matúš M., Beniak J. Impact of pressing temperature on the pressing conditions in briquetting machine pressing chamber. *Journal of Production Engineering*, 2014, vol. 17, no. 1, pp. 79 – 82.
13. Križan P., Matúš M. Impact of pressing chamber conicalness on the quality of briquetts produced from biofuels in briquetting machines. *Fuel*, 2012, no. 4. pp. 122–127.
14. Ivanov, S.N. *Technologiya bumagi* [Paper technology]. Moscow: School paper Publ., 2006, 696 p. (In Russian).
15. *Granulyator voloknistyh materialov* [Pellet mill of fibrous materials]: patent 135539 Russian Federation, IPC B 01 J 2/20 / Sevost'yanov M.V., Ilyina T. N., Osokin A.V., 15. Sevostyanov M.V., Ilina T.N., Osokin A.V., Sevostyanov V.S., Sabitov R.A. *Granulyator voloknistyh materialov* [Pellet mill of fibrous materials]. Patent RF, no. 2013130468/05, 2013.
16. Sevost'yanov M.V. Resource-saving technological system for production of granulated stabilizers for stone mastic asphalt concrete. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Transactions of the TSTU], 2016, vol. 22, no. 2, pp. 272–279. (In Russian). <https://doi.org/10.17277/vestnik.2016.02.pp.272-279>

### **Критерии авторства**

Осокин А.В. создал рукопись и несет ответственность за plagiat.

### **Authorship criteria**

Osokin A.V. has prepared the manuscript and bears the responsibility for plagiarism.

### **Конфликт интересов**

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

### **Conflict of interests**

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.9

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-62-72>

## АЛГОРИТМ РАЗБИЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ СВОБОДНОЙ ФОРМЫ ПО ЗНАЧЕНИЯМ КРИВИЗНЫ ПРИ ПОДГОТОВКЕ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ ДЛЯ СТАНКОВ С ЧПУ

© Б.Б. Пономарев<sup>1</sup>, Нгуен Ши Хьен<sup>2</sup>

Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

**РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ.** Разработать алгоритм разбиения поверхностей свободной формы на локальные области (отдельные участки), построения границ между этими областями и подготовки исходных данных для формирования оптимального технологического процесса механической обработки и подготовки управляющих программ формообразования таких поверхностей. **МЕТОДЫ.** Разбиение выполняется на основе средней и гауссовой кривизны в точках поверхности свободной формы. В качестве исходных данных для проведения анализа геометрии участков поверхности предложено использовать координаты узлов сетки ее 3D модели или данные для построения NURBS поверхности. Для разбиения использован программный комплекс Matlab, разработана программа для реализации алгоритма и определения координат границ областей, которые могут импортироваться в любые CAD/CAM-программы. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Алгоритм позволяет разделить поверхность свободной формы на плоские, выпуклые, вогнутые и седлообразные области. Для получения таких поверхностей на деталях различных изделий могут быть использованы современные фрезерные станки. При этом станки должны быть оснащены инструментом различного типоразмера и номенклатуры. Их количество и стратегии обработки, определяющие траектории движения инструмента на участках поверхности относительно заготовки, существенно влияют на производительность. **ВЫВОДЫ.** Получаемые данные являются основой для выбора формообразующего инструмента и решения задачи оптимизации траектории движения инструмента при многокоординатном концевом фрезеровании в зависимости от формы участков поверхности.

**Ключевые слова:** разбиение поверхностей, кривизна, фрезерование, поверхности свободной формы, пятикоординатная обработка.

**Информация о статье.** Дата поступления 20 февраля 2018 г.; дата принятия к печати 6 марта 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2018 г.

**Формат цитирования:** Пономарев Б.Б., Нгуен Ши Хьен. Алгоритм разбиения поверхностей свободной формы по значениям кривизны при подготовке управляющих программ для станков с ЧПУ // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 4. С. 62–72. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-62-72

## AN ALGORITHM FOR FREE FORM SURFACE PARTITIONING BASED ON SURFACE CURVATURE VALUES UNDER CONTROL PROGRAM DEVELOPMENT FOR CNC MACHINE-TOOLS

B.B. Ponomarev, Nguyen Sy Hyen

Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

**ABSTRACT.** The **PURPOSE** of the study is to develop an algorithm of free-form surface partitioning into local domains (individual regions), construction of boundaries between these regions and preparation of the initial data for the formation of an optimal technological process of machining and preparation of control programs for shaping such surfaces. **METHODS.** Partitioning is based on the mean and Gaussian curvature in the points of a free-form surface. The coordinates of the 3D model grid nodes or the data for NURBS surface construction are proposed to be used as initial data or the analysis

<sup>1</sup>Пономарев Борис Борисович, доктор технических наук, профессор кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, e-mail: pusw@istu.edu

Boris B. Ponomarev, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Technology and Equipment of Machinery Production, e-mail: pusw@istu.edu

<sup>2</sup>Нгуен Ши Хьен, аспирант, e-mail: syhiendk35@gmail.com

Nguyen Sy Hyen, Postgraduate, e-mail: syhiendk35@gmail.com



of the surface region geometry. The Matlab software package has been used for mesh partitioning. A program has been developed to implement the algorithm and determine the coordinates of domain regions which can be imported into any CAD/CAM programs. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The algorithm allows partitioning of free-form surfaces into flat, convex, concave and saddle-type regions. Modern milling machines can be used to obtain these kinds of surfaces on the parts of various products. These machines must be also equipped with the tools of various sizes and product lines. Their number and machining strategies which determine the toolpaths on the surface regions in relation to the workpiece have a significant influence on milling performance. **CONCLUSIONS.** The obtained data serve as a basis for tool selection and solving of the optimization problem of toolpath planning under multi-axis end milling depending on the shape of the surface regions.

**Keywords:** surface partitioning, curvature, milling, free-form surfaces, five-axis machining

**Information about the article.** Received February 20, 2018; accepted for publication March 6, 2018; available online April 30, 2018.

**For citation:** Ponomarev B.B., Hyen Sh. Nguyen An algorithm for free form surface partitioning based on surface curvature values under control program development for CNC machine-tools // Proceeding of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 4, pp. 62–72. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-62-72

## Введение

Повышение производительности в современном машиностроении является одной из важных задач, решаемых технологическими методами. Продолжительность формообразования поверхностей деталей может быть сокращена путем оптимизации режимов и других параметров обработки, назначаемых при проектировании технологических процессов. Обоснованность выбора параметров особенно важна для чистовой обработки поверхностей свободной формы (сложных поверхностей), в том числе, скульптурных, которые получают, как правило, на станках с числовым программным управлением с использованием концевых сфероцилиндрических и конических фрез. При этом обработку приходится вести инструментами нескольких типоразмеров. Назначаемый инструмент должен не только обеспечивать обработку всей поверхности, но и иметь возможно больший радиус его сферической и цилиндрической части [1, 2]. Учитывая зависимости, определяющие производительность процесса механической обработки, становится очевидным, что если обработку всей поверхности вести только одним инструментом, обеспечивающим полное ее формообразование, в том числе и в областях с малым радиусом поверхностей сопряжения участков, требуется значительно больше времени, чем при обработке

этой поверхности несколькими инструментами. Выбор оптимальных типоразмеров инструментов для обработки выпуклых, вогнутых и седлообразных областей, карманов и пазов деталей в зависимости от геометрических параметров их поверхностей – задача многокритериальная, требующая теоретического и практического решения [3, 4].

В общем случае, поверхность свободной формы имеет четыре основных типа областей: плоские, выпуклые, вогнутые и седлообразные. От типа и геометрических характеристик области зависит типоразмер и геометрия формообразующей части инструмента, выбирамого при проектировании технологического процесса обработки [5]. Следует учитывать, что детали, имеющие поверхности свободной формы, в современном машиностроении представляются чаще всего 3D-моделями. В связи с отсутствием в этом случае аналитического описания поверхностей, без задания их размеров и формы в числовом виде, при разработке технологического процесса фрезерования возникает необходимость в «распознавании» характера и параметров их отдельных участков. Эта задача может быть решена путем разбиения поверхности свободной формы на области по значениям гауссовой и средней кривизны, а для определения границ каждой из них могут быть использованы их бинарные изображения.



Разбиение поверхности представляет собой разделение поверхности свободной формы на несколько областей. При этом следует учитывать, что в каждой точке области одного типа имеют одинаковый характер кривизны [6].

С позиций технологии формообразования сложных поверхностей деталей машиностроения, скульптурных объектов, бытовой техники, упаковки, технологической оснастки и тому подобных изделий, их отдельные области могут быть получены по

локальным стратегиям обработки на многокоординатных фрезерных станках с ЧПУ с использованием концевых фрез различных типоразмеров [7, 8]. Целью работы является разработка алгоритма разбиения поверхностей свободной формы на локальные области, построение границ между этими областями и подготовка исходных данных для формирования оптимального технологического процесса механической обработки управляющих программ формообразования таких поверхностей.

### NURBS-поверхности свободной формы

Поверхности свободной формы могут быть сконструированы на компьютере. Наиболее часто используемыми формами построения поверхностей в CAD-системах являются поверхности Безье, B-сплайновые поверхности, неоднородные рациональные B-сплайновые поверхности (NURBS).

NURBS поверхность строится на сетке вершин, представленной совокупностью точек  $P_{i,j}$ , размещенных в  $m$  рядах по  $n$  точек в каждом ряду. Индексы вершины  $P_{i,j}$ , означают то, что данная точка является  $j$ -й по счету в  $i$ -м ряду. Уравнение NURBS-поверхности может быть записано в эквивалентной форме [9–10]:

$$S(u, v) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^m R_{i,p;j,q}(u, v)P_{i,j}, \quad (1)$$

где  $R_{i,p;j,q}(u, v)$  – радиус-вектор (рациональная базисная функция) NURBS поверхности, определенный как:

$$R_{i,p;j,q}(u, v) = \frac{w_{i,j}N_{i,p}(u)N_{j,q}(v)P_{i,j}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^m w_{i,j}N_{i,p}(u)N_{j,q}(v)}, \quad (2)$$

где  $P_{i,j}$  – вершины;  $w_{i,j}$  – вес соответствую-

щей вершины;  $m$  – количество рядов вершин;  $n$  – количество вершин в каждом ряду;  $N_{i,p}(u), N_{j,q}(v)$  – базисные функции степени  $p$  и  $q$  в  $u$ -направлении и  $v$ -направлении соответственно.

Базисные функции  $N_{i,p}(u), N_{j,q}(v)$  находятся по рекуррентной формуле:

$$N_{i,p}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+p} - u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1} - u}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u); \quad (3)$$

$$N_{i,p}(u) = \begin{cases} 1 & \text{если } u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (4)$$

и определены для значений узлов вида:

$$U = \left\{ \underbrace{0, \dots, 0}_{p+1}, u_{p+1}, \dots, u_{r-p-1}, \underbrace{1, \dots, 1}_{p+1} \right\};$$
$$V = \left\{ \underbrace{0, \dots, 0}_{q+1}, v_{q+1}, \dots, v_{s-q-1}, \underbrace{1, \dots, 1}_{q+1} \right\}.$$
 (5)

Здесь  $r = n+p+1$ ,  $s = m+q+1$ .

### К классификации поверхностей свободной формы

С целью группирования поверхностей деталей в некоторые семейства по форме для нормализации, моделирования и типизации технологических процессов их изготовления в работах ряда авторов пред-

лагаются различные подходы к их классификации по определенным признакам [6]. Как правило, методы классификации основываются на двух подходах: систематизации поверхностей в целом как таковых (глобальный подход) и по возможным видам их



локальных участков (локальный подход).

Глобальный подход основан на проведении классификации поверхностей свободной формы по характеристическим кривым и их топологическим структурам, таким как: плоские, вогнутые, осевые, шарообразные, конические, объединенные и т.д.

В работе [11] предложено использовать при классификации локальный подход, основанный на анализе внутренних свойств и локальной топологии поверхностей. В этом случае основными признаками является средняя кривизна ( $H$ ) и Гауссова кри-

визна ( $K$ ). При этом можно выделить следующие типы локальных участков поверхностей свободной формы:

1. Если  $K \geq 0$  и  $H < 0$  – локальный участок поверхности выпуклый.
2. Если  $K \geq 0$  и  $H > 0$  – локальный участок поверхности вогнутый.
3. Если  $K < 0$  и  $H \neq 0$  – локальный участок поверхности имеет седлообразный вид.
4. Если  $K=0$  и  $H=0$  – локальный участок поверхности плоский.

### Алгоритм разбиения поверхностей свободной формы

Для разбиения поверхности свободной формы на локальные участки (области поверхности) может использоваться программа математического анализа Matlab. Следует рассмотреть два случая формирования исходных данных обрабатываемой поверхности:

- 1) поверхность NURBS с узлами и весами;
- 2) поверхность, созданная в CAD-программах.

В первом случае исходные данные узлов и весов могут быть представлены в файле Excel и импортированы в программу Matlab. После этого происходит построение поверхности, создание сетки точек поверхности, разделение поверхности на области по значениям кривизны и построение границ. Затем происходит экспорт координат точек границ в \*.TXT файл. Кроме того, в программе Matlab создается подпрограмма создания файла \*.STEP для импорта 3D модели поверхности в любую САПР-программу.

Во втором случае, создание сетки точек поверхности происходит в CAD-программе, например, в Unigraphics NX, затем координаты этих точек импортируются в Matlab, где по значениям кривизны определяются области обработки и их границы.

На рис. 1 представлен алгоритм разбиения поверхностей свободной формы для

двух случаев представления исходных данных.

Алгоритм определения областей при разбиении поверхностей свободной формы предполагает выполнение следующих действий:

- 1) расчет гауссовой ( $K$ ) и средней кривизны ( $H$ ) в каждой точке сетки поверхности;
- 2) определение в каждой точке по значениям  $K$  и  $H$  идентификационных номеров и заполнение ячеичного массива с обозначением по правилу: 0 – значение элементов исходной матрицы, 1 – точки плоской области, 2 – точки вогнутой области, 3 – точки выпуклой области и 4 – точки седлообразной области;
- 3) «возврат» декартовых координат точек каждой области в ячеичный массив и построение матрицы точек для отображения разделенных областей поверхности.

На рис. 2 представлен пример структуры ячеичного массива точек вогнутой области.

На основе представленного выше алгоритма, инструментальных средств программного комплекса Matlab, теории дифференциальной геометрии кривых и поверхностей [12], подходов, предложенных в работе [13], разработана программа разбиения поверхностей свободной формы на области по значениям кривизны.



## Алгоритм определения границ областей

Разбиение поверхности свободной формы позволяет выделить области, геометрические параметры которых оказывают влияние на формирование технологии формообразования. Для выделенных областей могут быть применены различные типоразмеры инструментов, номенклатура, их количество и стратегии обработки, определяющие траектории движения инструмента относительно заготовки. Для подготовки

управляющей программы обработки области выбранным инструментом или комплексом инструментов требуется определить ее границы.

Для этого предлагается использовать метод цепного кода [14], который отслеживает наружные границы объекта на бинарном изображении. Матричное бинарное изображение, создаваемое из ячеичного массива каждой области, представляет собой исходные данные, в результате обра-

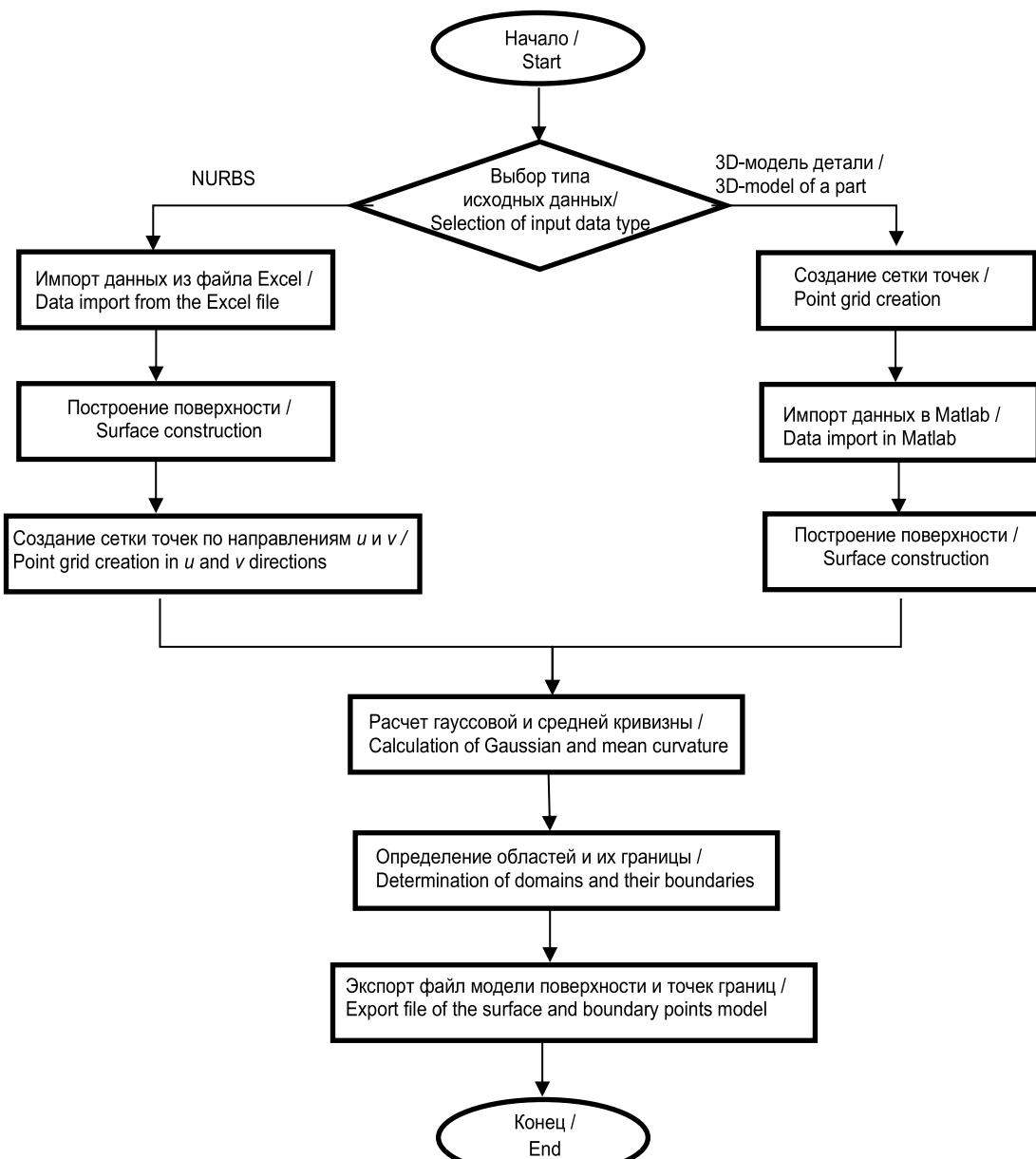


Рис. 1. Алгоритм разбиения поверхностей свободной формы  
Fig. 1. Algorithm of free form surface partitioning



По направлению u / In u direction

	1	2	3	4	5	6	7
По направлению u / In u direction	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	2	2	0	0	0
2	0	2	2	2	2	0	0
3	0	2	2	2	2	0	0
4	0	2	2	2	2	0	0
5	0	2	2	2	2	0	0
6	0	0	2	2	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0

*Рис. 2. Пример структуры ячеичного массива области  
Fig. 2. Example of the matrix structure*

ботки которых может быть получена матрица, содержащая координаты точек, определяющих границы между областями [15]. При этом ненулевые пиксели ячеичного массива (цифры 1, 2, или 3) (рис. 2) соответствуют 1 бинарного изображения области поверхности, границу которой необходимо определить, а нулевые пиксели соответ-

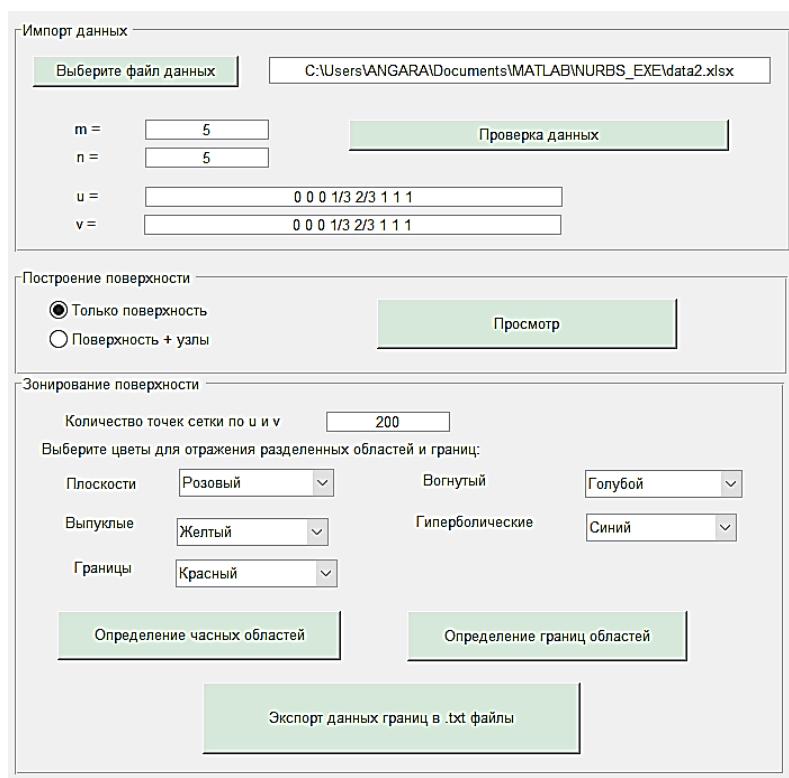
ствуют фону и отображают переход к другим типам областей поверхности.

С помощью метода цепного кода определяются границы для каждой области поверхности. Координаты границ экспортятся в \*.TXT файл, с помощью которого строится линия границы в CAD/CAM-программах.

### Разбиение NURBS-поверхностей

Интерфейс работы программы по предложенному алгоритму демонстрируется

на рис. 3. Применение функций Matlab для разбиения поверхности свободной формы



*Рис. 3. Интерфейс программы в Matlab  
Fig. 3. Program interface in Matlab*



на области и определение их границ по значениям кривизны позволяет значительно сократить время на подготовку данных для разработки управляющих программ для станков с числовым программным управлением (ЧПУ), а также повысить достоверность получаемых результатов.

Пример разбиения поверхности, исходные данные по узлам и весам которой представлены в таблице заимствованы из библиотеки Mathworks [16], демонстрирует простоту решения и точность получаемого результата. Данные в скобках таблицы: три первых значения – координаты узлов, четвертое значение – вес линий NURBS. Значения узлов должны образовывать неубывающую последовательность, а в остальном на них не накладывается никаких ограничений [11]. В работе значения узлов каж-

дого порядка по параметрическим направлениям  $u$  и  $v$  определяются рядом  $\{0\ 0\ 0\ 1/3\ 2/3\ 1\ 1\ 1\}$ .

На рис. 4 представлен результат создания и разбиения NURBS-поверхности на области с использованием программного обеспечения Matlab. В результате анализа поверхность делится на 7 областей: 2 вогнутые области выделены голубым цветом, 1 выпуклая область – желтым цветом, 4 седлообразные области – синим цветом, границы областей выделены красным цветом.

После расчета границ в Matlab, NURBS-поверхность экспортируется в \*.STEP файл, а координаты точек границ в \*.TXT файл. Полученные данные могут импортироваться в программу Unigraphics NX для создания линий границ и 3D модели (рис. 5).

### Узлы и веса NURBS поверхности Nodes and weights of the NURBS surface

По направлению  $v$  / In  $v$  direction

По направлению $u$ /	(0,0,2,1)	(3,0,2,1)	(5,0,7,1)	(8,0,7,1)	(10,0,8,1)
	(0,3,0,1)	(3,3,0,1)	(5,3,5,1)	(8,3,5,1)	(10,3,7,1)
	(0,5,0,1)	(3,5,0,1)	(5,5,5,1)	(8,5,5,1)	(10,5,7,1)
	(0,8,5,1)	(3,8,5,1)	(5,8,8,1)	(8,8,8,1)	(10,8,10,1)
	(0,10,5,1)	(3,10,5,1)	(5,10,8,1)	(8,10,8,1)	(10,10,10,1)

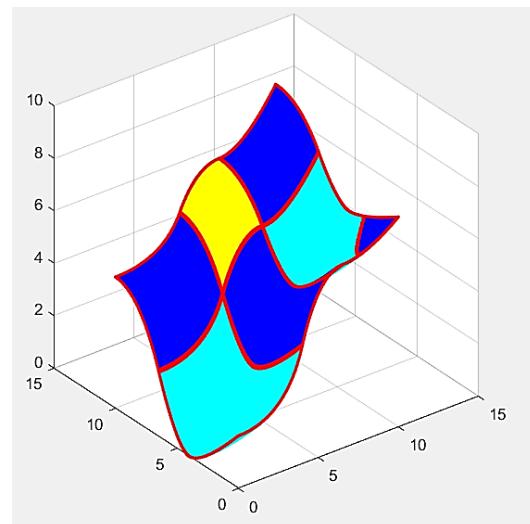
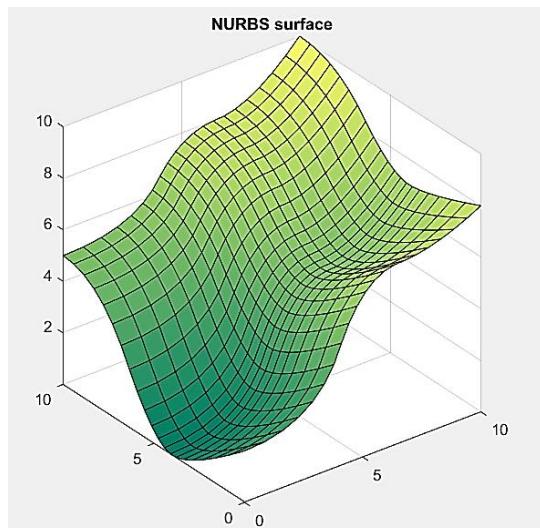


Рис. 4. Результат создания и разбиения NURBS-поверхности  
Fig. 4. Result of NURBS surface creation and partitioning

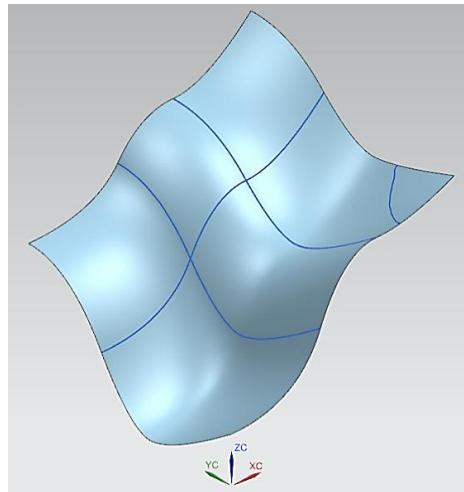


Рис. 5. Построение границ областей в Unigraphics NX  
Fig. 5. Construction of domain boundaries in Unigraphics NX

### Разбиение поверхности 3D-модели

Для деталей, проектируемых в CAD-программах в виде 3D-моделей, сложно определить исходные данные узлов и весов для описания поверхности в Matlab. Поэтому для разбиения поверхности предлагаются создавать сетку точек поверхности, подлежащей обработке, в других программах и затем координаты точек сетки импортировать в программу Matlab в качестве исходных данных для выполнения дальнейших операций. На рис. 6 представлена сетка на поверхности, созданная с использованием программы Unigraphics NX.

Интерфейс программы в аналитической программе Matlab и результат создания и разбиения поверхности представлены на рис. 7, 8.

После разбиения файл в формате \*.TXT, содержащий координаты точек границ областей поверхности, импортируется в CAD-программу. «Возврат» координат позволяет построить линии границ (рис. 9) и с использованием САМ-системы подготовить управляющую программу формообразования детали. При этом модули оптимизации процесса обработки отдельных областей поверхности дают возможность подобрать комплект инструментов и определить стратегии фрезерования ограниченных ее участков (локальные стратегии обработки), обеспечивающих повышение производительности формообразования и минимизацию объемов доводочных работ.

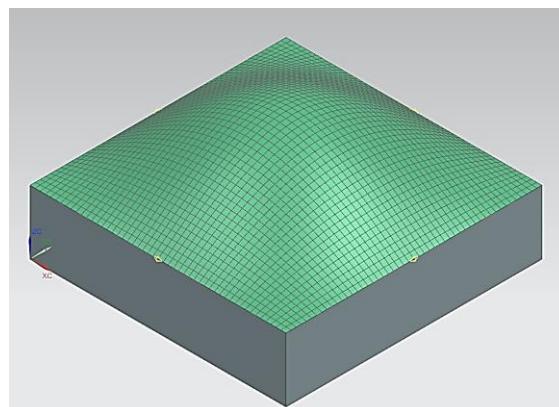
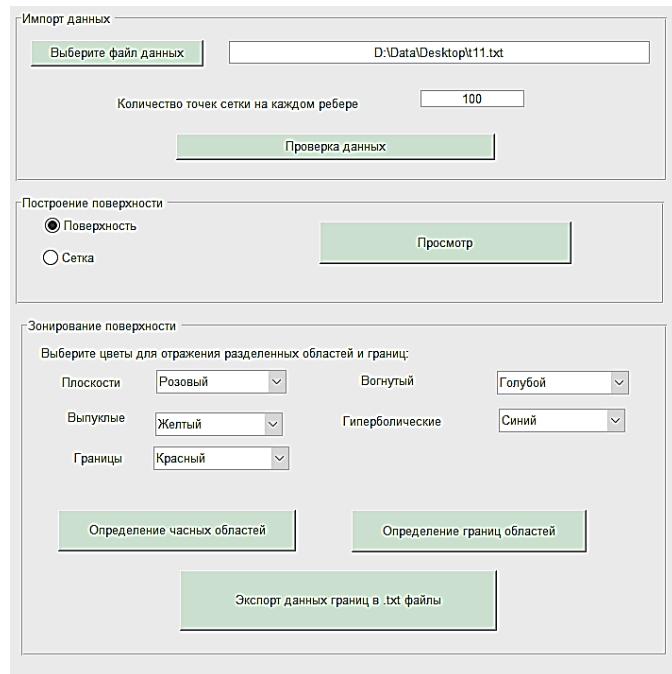
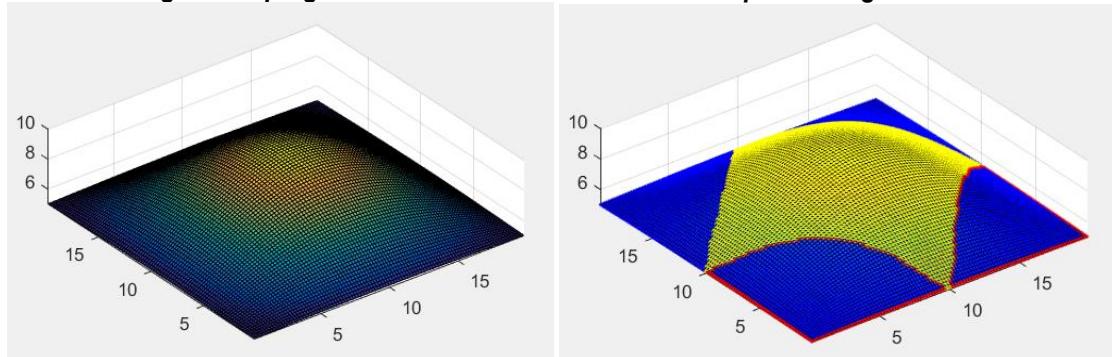


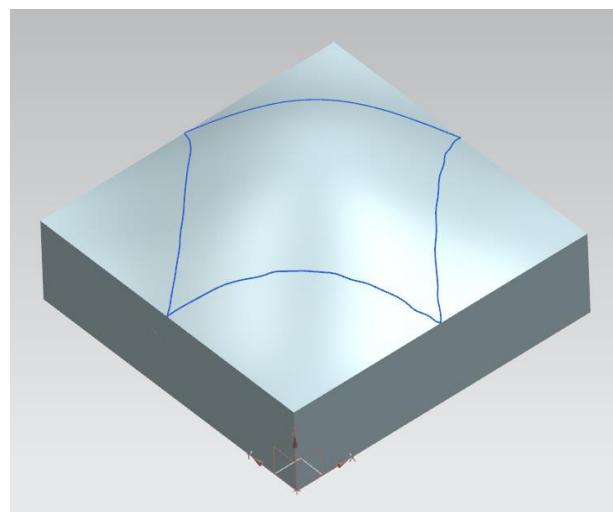
Рис. 6. Сетка точек поверхности  
Fig. 6. Surface grid



**Рис. 7. Интерфейс программы для разбиения на области CAD-модели поверхности в Matlab**  
*Fig. 7. The program interface for CAD-surface model partitioning in Matlab*



**Рис. 8. Результат создания и разбиения 3D-модели поверхности**  
*Fig. 8. The result of 3D-surface model creation and partitioning*



**Рис. 9. Границы областей в CAD-модели**  
*Fig. 9. Boundaries of regions in the CAD model*



## Вывод

Предложенный алгоритм позволяет произвести деление поверхности свободной формы на отдельные области (плоские, вогнутые, выпуклые и седлообразные) и определить границы этих участков на основе параметров кривизны в узловых точках поверхности. На примерах показано, что при этом могут быть использованы возможности высокопроизводительных систем математического анализа Matlab и 3D-моделирования Unigraphics NX. Получаемые данные являются основой для решения задачи оп-

тимизации траектории движения инструмента при многокоординатном концевом фрезеровании поверхностей в зависимости от формы участков. Результаты решения позволяют обоснованно выбирать инструмент, соответствующий конфигурации обрабатываемых деталей, что обеспечивает повышение производительности процесса формообразования, сокращает затраты на доводочные работы, а также способствует повышению эффективности использования дорогостоящего технологического оборудования.

## Библиографический список

1. Пономарев Б.Б. Оптимизация стратегии фрезерования сложных поверхностей. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2003. 239 с.
2. Сергеев О.С., Гисметулин А.Р., Маданов А.В. Автоматизация подготовки управляющих программ для станков с числовым программным управлением // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. № 4 (2). С. 399–402.
3. Ponomarev B.B., Paykin D.B. Selecting Optimal Machining Strategy Parameters when Milling Complex Surfaces by Spherical Milling Cutters, International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering. 2014. Vol. 14. № 1. P. 1–5.
4. Данилов В.А. Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием. Мн.: Наука и техника, 1995. 264 с.
5. Chen Z., Dong Z., Vickers G. W., “Automated Surface Subdivision and Tool Path Generation for 3 1/2 axis CNC Machining of Sculptured parts”, Computer in Industry. 2003. Vol. 50. P. 319–331.
6. Нгуен Ши Хьен. О классификации поверхностей свободной формы // Новая наука: Современное состояние и пути развития: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (г. Стерлитамак, 30 августа 2016 г.). Стерлитамак, 2016. С. 99–105.
7. Голованов Н.Н. Геометрическое моделирование. М.: Физматлит, 2002. 472 с.
8. Piegl, Les and Tiller, Wayne. The NURBS Book, 2 nd Edition, Springer-Verlag (Berlin), 1997.
9. Радзевич С.П. Формообразование поверхностей деталей. Растан, 2001. 592 с.
10. Манфредо П. до Кармо. Дифференциальная геометрия кривых и поверхностей. М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2013. 608 с.
11. NURBS Toolbox by D.M. Spink re-uploaded. The previous link has broken. URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/26390-nurbs-toolbox-by-d-m-spink> (15.01.2010).
12. Gonzalez R.C., Woods R.E, Eddins S.L., Digital Image Processing Using MATLAB, New Jersey, Pearson Prentice Hall, 2004.
13. Jensen, C.G., Red, W.E., and Pi J. 2002. Tool selection for five-axis curvature matched machining. Computer Aided Design, 34 (3), pp. 251–266.
14. Shih Frank. Image processing and pattern recognition: fundamentals and techniques. IEEE Press, 2010, 537 p.
15. Nurbs2IGES – File Exchange – MATLAB Central. URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/12087> (31.08.2006).

## References

1. Ponomarev B.B. *Optimizatsiya strategii frezerovaniya slozhnykh poverkhnostey* [Optimizing the strategy of complex surface milling]. Irkutsk: Irkutsk State Technical University Publ., 2003, 239 p. (In Russian).
2. Sergeev O.S., Gismetulin A.R., Madanov A.V. *Avtomatisatsiya podgotovki upravlyayushchikh programm dlya stankov s chislovym programmnym upravleniyem* [Development of methodics of automatic programming for computer numerical control machines] // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2012, vol. 14, no. 4 (2), pp. 399–402. (In Russian).
3. Ponomarev B.B., Paykin D.B. Selecting Optimal Machining Strategy Parameters when Milling Complex Surfaces by Spherical Milling Cutters, International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering, 2014, vol. 14, no. 1, pp. 1–5.
4. Danilov V.A. *Formoobrazuyushchaya obrabotka slozhnykh poverkhnostey rezaniyem* [Shaping of complex surfaces by cutting]. Nauka i tekhnika [Science and Technology], 1995, 264 p. (In Russian).



5. Chen Z., Dong Z., Vickers G. W., "Automated Surface Subdivision and Tool Path Generation for 3 1/2 1/2 axis CNC Machining of Sculptured parts", Computer in Industry, 2003, vol 50, pp. 319–331.
6. Nguen Sh.H. *O klassifikacii poverhnostej svobodnoj formy* [On the classification of free form surfaces]. Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii Novaja nauka "Sovremennoe sostojanie i puti razvitiija" [Proceedings of the International scientific and practical Conference New science "Current state and development directions"]. Sterlitamak, 2016. P. 99–105. (In Russian).
7. Golovanov N.N. *Geometricheskoye modelirovaniye* [Geometric modeling]. Moscow, Phismatlit Publ., 2002, 472 p. (In Russian).
8. Piegl, Les and Tiller, Wayne; The NURBS Book, 2nd Edition, Springer-Verlag (Berlin), 1997.
9. Radzevich S.P. *Formoobrazovaniye poverkhnostey detaley* [Part surface shaping]. Kiev: Rastan Publ., 2001, 592 p. (In Russian).
10. Manfredo P. to Carmo. *Differentsial'naya geometriya krivykh i poverkhnostey* [Differential geometry of curves and surfaces]. M.-Izhevsk: Institute of Computer Sciences Publ., 2013, 608 p. (In Russian).
11. NURBS Toolbox by D.M. Spink re-uploaded. The previous link has broken. URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/26390-nurbs-toolbox-by-d-m-spink> (accessed 15 January 2010).
12. Gonzalez R. C., Woods R. E., Eddins S. L., *Digital Image Processing Using MATLAB*, New Jersey, Pearson Prentice Hall, 2004.
13. Jensen, C.G., Red, W. E., and Pi, J. 2002. Tool selection for five-axis curvature matched machining. *Computer Aided Design*, 34(3), pp 251–266.
14. Shih Frank. *Image processing and pattern recognition: fundamentals and techniques*. IEEE Press, 2010, 537 p.
15. Nurbs2IGES – File Exchange – MATLAB Central. URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/12087> (accessed 31 August 2006).

#### **Критерии авторства**

Пономарев Б.Б., Нгуен Ши Хьен подготовили статью и несут ответственность за плагиат.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **Authorship criteria**

Ponomarev B.B., Hyen Sh. Nguyen have prepared the article for publication and bear the responsibility for plagiarism.

#### **Conflict of interests**

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article

УДК 551.583: 63 (571.53)

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-73-82>

## ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА ПОВТОРЯЕМОСТИ ЗАСУХ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РИСКОВ АГРАРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

© Я.М. Иваньо<sup>1</sup>, С.А. Петрова<sup>2</sup>, М.Н. Полковская<sup>3</sup>

Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского,  
664038, Российской Федерации, г. Иркутск, Иркутский район, п. Молодежный, 1/1.

**РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ.** В статье приведены различные методы оценки засух. Рассмотрены тенденции изменчивости климата за последние 70 лет, влияющие на повторяемость засушливых явлений на территории Иркутской области.

**МЕТОДЫ.** Для оценки вероятности проявления засухи использованы данные об урожайности основной зерновой культуры – пшеницы. По результатам статистического анализа многолетних рядов биопродуктивности пшеницы выделено три группы: случайные выборки, последовательности с автокорреляционными связями и трендами.

**РЕЗУЛЬТАТЫ.** Согласно предложенным алгоритмам, определены статистические параметры рядов урожайности пшеницы с учетом их особенностей. Получены вероятности проявления засух, по значениям которых выделили пять групп муниципальных районов. На основе предложенной методики оценки вероятностей экстремального явления рассчитаны значения повторяемости сильной засухи 2015 г., вычислены ущербы и возможные страховые возмещения.

**ВЫВОДЫ.** Полученные вероятностные модели повторяемости засух предложено использовать для улучшения планирования производства продовольственной продукции на разных природно-климатических территориях.

**Ключевые слова:** засуха, урожайность, климат, риски, аграрная продукция, Иркутская область.

**Информация о статье.** Дата поступления 5 февраля 2018 г.; дата принятия к печати 6 марта 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2018 г.

**Формат цитирования.** Иваньо Я.М., Петрова С.А., Полковская М.Н. Вероятностная оценка повторяемости засух и определение рисков аграрного производства // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 4. С. 73–82. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-73-82

### PROBABILISTIC ESTIMATION OF DROUGHT FREQUENCY AND DETERMINATION OF AGRICULTURAL PRODUCTION RISKS

Ya.M. Ivanyo, S.A. Petrova, M.N. Polkovskaya

Irkutsk State Agricultural University named after A.A. Ezhevsky,  
1/1 Molodezhny settlement, Irkutsk, Irkutsk region, 664038, Russian Federation

**ABSTRACT. PURPOSE.** The article presents various methods of drought evaluation, considers the trends of climate variability for the last 70 years that affect the frequency of droughts in the Irkutsk region. **METHODS.** The data on the yield of wheat as the main grain crop are used to evaluate the probability of droughts. Three groups including random samples, sequences with autocorrelation links and trends are distinguished based on the results of the statistical analysis of the long-term series of wheat bioproductivity. **RESULTS.** The proposed algorithms allowed to determine the statistical param-

<sup>1</sup>Иваньо Ярослав Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры информатики и математического моделирования, проректор по научной работе, e-mail: iymex@rambler.ru

Yaroslav M. Ivanyo, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Information Science and Mathematical Modeling; e-mail: iymex@rambler.ru

<sup>2</sup>Петрова Софья Андреевна, кандидат технических наук, доцент кафедры информатики и математического моделирования Института экономики управления и прикладной информатики, e-mail: sofia.registration@bk.ru

Sofia A. Petrova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information Sciences and Mathematical Modeling, e-mail: sofia.registration@bk.ru

<sup>3</sup>Полковская Марина Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры информатики и математического моделирования Института экономики управления и прикладной информатики, e-mail: polk\_mn@mail.ru

Marina N. Polkovskaya, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information Sciences and Mathematical Modeling, e-mail: polk\_mn@mail.ru



eters of wheat yield series taking into account their specific features. Having obtained the probabilities of drought occurrence, we distinguished five groups of municipal districts. Based on the proposed methodology of extreme weather event probability estimation, the values of severe drought frequency in 2015 were calculated as well as the damages and possible insurance reimbursements. **CONCLUSIONS.** It is proposed to use the probabilistic models of drought frequency with the purpose to improve the planning of food production in different natural and climatic areas.

**Keywords:** drought, yield, climate, risks, agrarian products, Irkutsk region

**Information about the article.** Received February 5, 2018; accepted for publication March 6, 2018; available online April 30, 2018.

**For citation.** Ivanyo Ya.M., Petrova S.A., Polkovskaya M.N. Probabilistic estimation of drought frequency and determination of agricultural production risks. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 4, pp. 73–82. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-73-82

## Введение

Основной культурой, выращиваемой в России, является пшеница. По ее производству страна занимает лидирующие позиции вместе с Китаем, Индией и США [1]. Наибольшие площади и объемы производства озимой и яровой пшеницы имеют место в Иркутской области [2]. От посевов зерновых и зернобобовых площадь этой культуры занимает чуть более 34%. При этом посевы ячменя и овса примерно в полтора раза ниже. Из этого следует, что в основном потери урожая пшеницы в наибольшей степени сказываются на состоянии и перспективах развития сельского хозяйства в масштабах страны и региона.

Из многих экстремальных климатических явлений, влияющих на урожай зерновых культур, наиболее неблагоприятной является засуха. В работах различных авторов [3–8 и др.] рассматриваются критерии оценки засушливого явления. Широкое распространение в нашей стране и за рубежом нашли геотермический коэффициент, стандартизованный индекс осадков и стандартизованный индекс осадков и испаряемости [3, 5–8]. Не вдаваясь в подробности значений тех или иных параметров, основанных на данных осадков, температур и испарения за вегетационный период, входящих в том или ином виде в уравнения вод-

ного и теплового баланса, обратим внимание на показатель интенсивности засух в виде снижения урожая не менее 20%. [3, 9, 10 и др.]. Дело в том, что именно этот показатель засухи используется в методике определения страховой стоимости и размера утраты (гибели) урожая сельскохозяйственной культуры и посадок многолетних насаждений и методике определения страховой стоимости и размера утраты (гибели) сельскохозяйственных животных<sup>4</sup>. Поэтому необходимо эффективно управлять процессом получения урожая, стремясь минимизировать ущербы в результате неблагоприятных ситуаций, связанных, прежде всего, с природными рисками [11, 12]. Правильное планирование имеет особо большое значение в условиях изменения климата на глобальном и региональном уровнях [5, 13–18 и др.].

Поскольку повторяемость засушливых явлений не является детерминированной величиной ввиду большого числа непредсказуемых факторов, в работе предлагается ее вероятностная оценка на основе статистических свойств многолетних рядов урожайности пшеницы в муниципальных районах Иркутской области с определением возможных рисков и страховых возмещений.

<sup>4</sup>Об утверждении методики определения страховой стоимости и размера утраты (гибели) урожая сельскохозяйственной культуры и посадок многолетних насаждений и методики определения страховой стоимости и размера утраты (гибели) сельскохозяйственных животных: Приказ Минсельхоза России от 16.11.2017 № 578 (Зарегистрировано в Минюсте России 05.12.2017 № 49117) / On the approval of the methodology for determining the insurance value and the amount of loss (death) of crop yield and perennial plantings and the methods for estimating insurance value and the amount of loss (death) of farm animals: Order No. 578 of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation of November 16, 2017 (Registered with the Ministry of Justice of Russia on December 5, 2017. No. 49117)



## Климатические изменения в регионе

В работах [9, 13, 14, 16, 17 и др.] приведены сведения об изменчивости годовых, зимних температур воздуха и температур за теплый период года. Показано, что значения этих параметров имеют тенденцию к увеличению. Это особо отчетливо проявляется на юге региона. Сравнивая данные изменчивости годовых температур воздуха за период 1946–2007 гг. и значения за 1946–2015 гг., можно заключить, что тенденция потепления продолжается. Причем она стала сильнее проявляться на севере Иркутской области, хотя не так явно как на юге.

Такой вывод подтвержден результатами анализа продолжительностей безморозного периода. Этот параметр характеризуется значимыми трендами с несколько более высокими коэффициентами детерминации, чем тренды годовых температур воздуха. При этом с юга на север устойчивость тенденций уменьшается.

Исходя из полученных трендов годовых температур и продолжительностей безморозного периода, подтверждающих тенденцию потепления, следует иметь в виду влияние этого фактора на изменение агроклиматических условий различных природно-климатических территорий региона.

Вместе с тем в многолетних рядах температур воздуха по годам и сезонам наблюдаются в некоторые «соседние» годы резкие колебания значений, когда холодный год сменяется теплым, а теплые зимы сменяют холодные или наоборот. Такая неустойчивость параметра тепла за последние 30 лет предполагает возможность смены общей тенденции потепления на тенденцию похолодания.

Между тем в рамках выявленной тенденции потепления на основе статистического анализа связи урожайности зерновых культур с факторами тепла и увлажнения определены следующие закономерности [9, 19]:

- на биопродуктивность влияют суммы температур и осадков по месяцам за вегетационный период, число дней бездождевого периода;
- в лесостепной зоне на биопродуктивность влияют температуры за теплый период года, а в остеиненной – осадки и продолжительность бездождевого периода;
- нелинейные квадратичные зависимости по сравнению с линейными отличаются более высокой степенью значимости регрессионных выражений.

## Статистические свойства рядов урожайности пшеницы

В работе [20] сделана попытка оценки вероятностей проявления засух в разных муниципальных районах Иркутской области на основе гипотезы о том, что ряды урожайности пшеницы являются случайными. При этом засушливым считался год с урожайностью рассматриваемой сельскохозяйственной культуры не более 80% от среднего многолетнего значения.

Недостатком такого подхода к анализу многолетних рядов урожайности сельскохозяйственных культур является то, что не все ряды являются случайными [9, 19, 21]. В некоторых последовательностях могут быть обнаружены тренды или значимые автокорреляционные связи. Встречаются

ситуации наличия в многолетних рядах урожайности зерновых культур, как значимых тенденций, так и внутрирядных связей.

Статистический анализ урожайности пшеницы по данным 24 муниципальных районов Иркутской области за 1996–2015 гг. позволил выделить следующие свойства многолетних рядов.

Во-первых, для Куйтунского, Нижнеудинского, Усть-Удинского, Чунского и Баяндаевского районов в последовательностях биопродуктивности рассматриваемой сельскохозяйственной культуры обнаружены значимые тренды.

Во-вторых, в рядах урожайности пшеницы Черемховского, Жигаловского, Заларинского, Зиминского, Тайшетского,



Усольского, Нукутского, Эхирит-Булагатского и Братского районов имеют место значимые первые коэффициенты автокорреляции, изменяющиеся от 0,30 до 0,66. В этом случае необходимо учитывать их значения, влияющие на статистические параметры выборок, коэффициенты вариации и асимметрии [22].

В-третьих, остальные последовательности, характеризующие биопродуктивность пшеницы в Балаганском, Иркутском, Качугском, Киренском, Тулунском, Усть-Илимском, Усть-Кутском, Аларском, Боянском и Осинском районах, представляют собой случайные выборки.

Таким образом, данные урожайности сельскохозяйственной культуры неоднородны. Поэтому необходимо приведение информации к однородности для возможности районирования территории по вероятности проявления засух на основе критерия непревышения  $0,8 \bar{y}$ , где  $\bar{y}$  – средняя урожайность пшеницы за многолетний период.

Для многолетних рядов зерновой культуры со значимыми трендами при определении вероятности проявления засух в виде критерия низкой урожайности использован следующий алгоритм.

Поскольку в многолетних рядах рассматриваемого параметра выделяются значимые тренды (табл. 1), каждая выборка разделена на четыре последовательности продолжительностью 5 лет. Для каждой последовательности определены годы проявления засух и статистические параметры: средние значения и коэффициенты вариации  $c_v$ . Усредненные значения параметра рассеяния использованы для оценки вероятностей критерия, определяющего переход урожайности зерновой культуры в разряд события согласно  $0,8 \bar{y}$ . В качестве закона распределения вероятностей применена функция Пирсона III типа, что обусловлено свойствами случайных рядов урожайности пшеницы – различными соотношениями коэффициентов асимметрии и вариации, а также критерием согласия Колмогорова-Смирнова. В дополнение отметим, что полученные вероятности перехода значения биопродуктивности сельскохозяйственной

культуры в событие (засуха) по приведенному алгоритму близки к эмпирическим частотам. Между тем при отсутствии учета трендов расхождения эмпирических и аналитических данных значительно, вероятность проявления засухи возрастает почти в 2 раза. Такой результат не соответствует действительности, завышенная повторяемость засушливого явления.

В дополнение к сказанному отметим, что для Чунского и Куйтунского районов помимо значимых трендов имеют место высокие первые коэффициенты автокорреляции, что позволяет строить авторегрессионные зависимости для оценки урожайности пшеницы в следующем году. Однако сравнительный анализ результатов моделирования рассматриваемого параметра по тренду и авторегрессионной зависимости не выявил предпочтений одного из методов.

Кроме того, полученные модели в виде линейных связей урожайности зерновых  $y_t$  с предшествующим значением  $y_{t-1}$  и временем  $t$  практически не улучшают результаты моделирования по сравнению с трендами и авторегрессией,

$$y_t = a_1 t + a_2 y_{t-1} + a_0, \quad (1)$$

поэтому использован рассмотренный алгоритм оценки вероятностей низкой урожайности пшеницы с учетом трендов.

Для второй группы многолетних рядов пшеницы со значимыми первыми коэффициентами автокорреляции при устранении отрицательного смещения коэффициентов вариации использовано выражение С.Н. Крицкого и М.Ф. Менкеля [12]:

$$c_v = \frac{\tilde{c}_v}{\sqrt{1 - \frac{2R_1}{n(n-1)(1-R_1)} \left( n - \frac{1-R_1^n}{1-R_1} \right)}}, \quad (2)$$

где  $\tilde{c}_v$ ,  $c_v$  – смещенная и несмещенная оценка коэффициента вариации, полученная методом моментов;  $R_1$  – первый коэффициент автокорреляции;  $n$  – число значений многолетнего ряда.



Таблица 1

Выделенные линейные тренды многолетних рядов урожайности пшеницы  
для муниципальных районов Иркутской области по данным 1996–2015 гг.

Table 1

*Dedicated linear trends of long-term series of wheat yields for the municipal districts  
of the Irkutsk region by the data for the period from 1996 to 2015*

Районы / Districts	Выражение тренда / Trend expression	Коэффициент детерминации / Coefficient of determination	Соотношение коэффициента роста и его стандартной погрешности / Ratio of the growth coefficient and its standard error
Куйтунский / Kuitun	$y_t=0,592t+11,6$	0,68	6,2
Нижнеудинский / Nizhneudinsk	$y_t=0,471t+8,0$	0,55	4,7
Усть-Удинский / Ust-Uda	$y_t=0,419t+6,5$	0,51	4,3
Чунский / Chuna	$y_t=0,625t+5,5$	0,63	5,5
Баяндаевский / Bayanday	$y_t=0,583t+7,2$	0,51	4,3

Расхождения средних значений смещенного и несмещенного коэффициентов вариации по 9 муниципальным районам составили 5,3% при максимальном отклонении 8,8%. Благодаря устранению смещения коэффициентов вариации уменьшилось расхождение между вероятностью проявления засухи, полученному по распределению Пирсона III типа, и эмпирическим значениям. Эта величина для средних вероятностей составила менее 1%, а само аналитическое значение соответствует 0,21. Добавим к этому, что для урожайности пшеницы с трендами усредненная вероятность проявления засушливых явлений несколько ниже – 0,184.

Для третьей группы муниципальных районов многолетние ряды урожайности пшеницы представляют собой случайные выборки, которые согласно критерию согласия Колмогорова-Смирнова и свойствам статистических параметров подчиняются закону распределения вероятностей Пирсона III типа.

Объединив статистические параметры трех групп рядов в одну выборку как однородную, учтя наличия трендов и автокорреляции, на основе эмпирических данных построены законы распределения вероятностей засух при урожайности пшеницы 0,8  $\bar{y}$  в виде гамма-распределения и Пир-

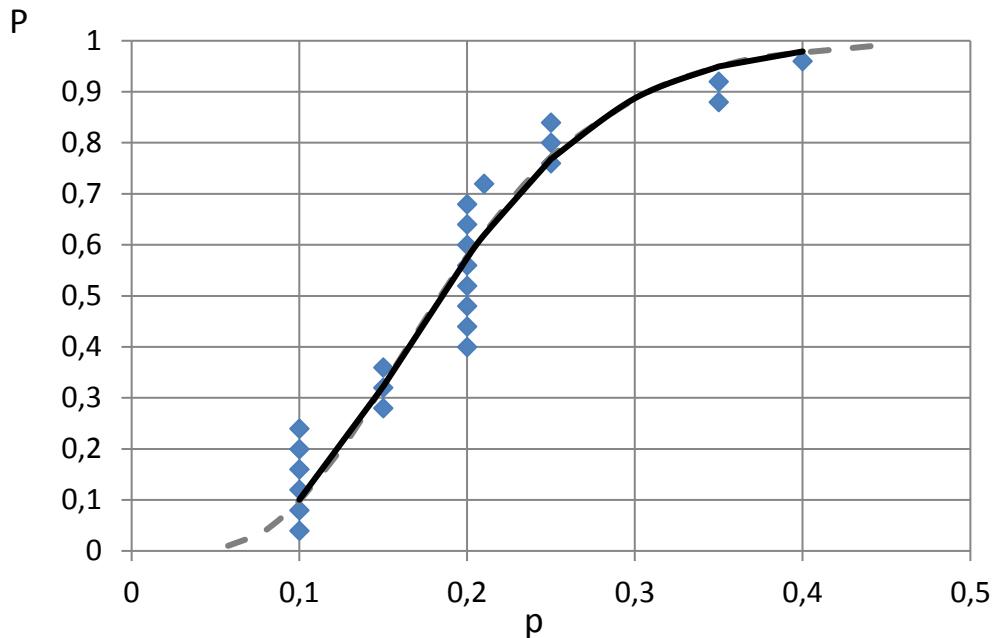
сона III типа (рисунок). Аналитические функции практически совпадают, поэтому при оценке вероятностей перехода значения урожайности в событие можно использовать гамма-распределение со средним значением 0,196 и коэффициентом вариации 0,42.

Согласно полученным вероятностям засух, территория региона разделена на пять групп при условии значения интервала вероятностей  $\Delta p = 0.0594$  и экстремальных значений: минимум - 0,08, максимум - 0,377 (табл. 2).

Полученные группы районов связаны с природно-сельскохозяйственными провинциями и типами климата [14, 23]. Первая из них расположена в зоне оптимального увлажнения с умеренно теплым летом и умеренно сухой малоснежной зимой.

Муниципальные районы второй группы находятся в той же климатической зоне, вместе с тем большинство из них частично расположены в зоне недостаточного увлажнения с умеренно теплым летом и умеренно сухой малоснежной зимой.

Территории третьей группы отличаются от районов второй группы тем, что здесь в большей степени преобладает климат с недостаточным увлажнением, умеренно теплым летом и умеренно сухой малоснежной зимой. Что касается Чунского и Нижнеудинского районов, то их особенно



Гамма-распределение (сплошная линия) и распределение Пирсона III типа (штриховая линия)  
вероятностей проявления засух по данным урожайности пшеницы (0,8  $\bar{y}$ )

с учетом трендов и автокорреляции за 1996–2015 гг.

Gamma distribution (heavy line) and Pearson type III distribution (dashed line)  
of drought probabilities by the data on wheat yields (0,8  $\bar{y}$ ) with consideration of trends  
and autocorrelation for the period from 1996 to 2015

Таблица 2  
Группы районов Иркутской области, выделенные по градациям вероятности проявления засух в соответствии с критерием урожайности пшеницы 0,8  $\bar{y}$

Table 2  
Group of districts in the Irkutsk region distinguished by drought probability gradations in accordance with 0.8  $\bar{y}$  wheat productivity criterion

Интервал вероятностей проявления засух/ Interval of drought probability	Группа районов/ Group of districts
0,08–0,139	Тулунский, Тайшетский, Куйтунский/ Tulun, Taishet, Kuitun
0,140–0,200	Усольский, Заларинский, Зиминский, Иркутский, Качугский, Аларский, Бокханский, Осинский, Нижнеудинский, Чунский/ Usolsky, Zalari, Zima, Irkutsk, Kachug, Alari, Bokhan, Osa, Nizhneudinsk, Chunsky
0,201–0,258	Усть-Удинский, Жигаловский, Братский, Балаганский, Киренский, Усть-Илимский, Черемховский, Баяндаевский/ Ust-Uda, Zhigalovo, Bratsk, Balagansk, Kirensk, Ust-Ilim, Cheremkhovo, Bayanday
0,259–0,318	Нукутский, Эхирит-Булагатский/ Nukut, Ekhirit-Bulagatsky
0,319–0,377	Усть-Кутский/Ust-Kut



стью является то, что они частично находятся в зоне умеренно суворой снежной зимы.

Районы четвертой группы практически полностью расположены на территории недостаточного увлажнения с умеренно теплым летом и умеренно суворой малоснежной зимой.

Усть-Кутский район не отличается развитым сельским хозяйством. Он расположен в зоне, где наблюдается умеренно теплое и холодное лето, умеренно суворая малоснежная и снежная зима. Средняя урожайность пшеницы здесь составила 7,4 ц/га. Относительно высокая урожайность в районе наблюдается в годы низкой урожайности на юге региона.

### Оценка рисков и страховые выплаты

Исходя из табл. 2, каждая группа районов по-разному подвержена рискам, связанным с проявлением засушливых явлений. Очевидно, что в наибольшей степени трудности в своей деятельности испытывают сельскохозяйственные товаропроизводители, находящиеся в муниципальных районах групп 4 и 5. Поскольку в третьей группе муниципальных районов интервал вероятностей проявления засух выше среднего значения, то эти территории можно отнести к засушливым.

Только первая и вторая группы характеризуются повторяемостью засух, не превышающих средний показатель.

Согласно методике определения страховой стоимости и размера утраты (гибели) урожая сельскохозяйственной культуры, посадок многолетних насаждений, методике определения страховой стоимости, размера утраты (гибели) сельскохозяйственных животных рассчитаны ущербы, нанесенные сельским товаропроизводителям сильной засухой 2015 г.<sup>4</sup>

По полученным статистическим параметрам многолетних рядов урожайности пшеницы с учетом автокорреляции и трендов оценены вероятности проявления этого события.

В значительной степени пострадали сельскохозяйственные товаропроизводи-

тели следующих районов, недополучившие значительное количество зерна с 1 га: Балаганский (3,56 ц/га), Иркутский (8,12 ц/га), Киренский (3,26 ц/га), Черемховский (9,00 ц/га), Боханский (5,88 ц/га), Нукутский (8,44 ц/га), Эхирит-Булагатский (11,52 ц/га). Вероятность проявления засухи на этих территориях по распределению Пирсона III типа, соответственно, составила: 0,168; 0,0583; 0,103; 0,224; 0,206; 0,175; 0,107. В результате урожай пшеницы, полученный на всех площадях 47805 га, был уменьшен на 37350 т. Особенно пострадали по относительному показателю потерь Эхирит-Булагатский (56%), Нукутский (43%) и Иркутский районы (42%). Между тем, исходя из площадей посева, наибольшие ущербы засуха нанесла Черемховскому району. Здесь объем недополученной продукции составил около 20 000 т.

Расчетные страховые возмещения с учетом стоимости 1 т зерна 9 000 руб. определены в виде суммы более 336 млн руб. Средняя вероятность формирования экстремального явления 2015 г. соответствует 0,149 или частоте проявления примерно 1 раз в 7 лет. По этому параметру редкой можно считать засуху в Иркутском районе, вероятность проявления которой составила 0,058 или повторяемость 1 раз в 17 лет.

### Заключение

В результате статистического анализа урожайности пшеницы за многолетний период в муниципальных районах Иркутской области, согласно критерию перехода значе-

ния параметра в событие, определены вероятности проявления засушливых явлений.

Для их адекватной оценки использованы алгоритмы приведения последова-



тельностей с трендами и автокорреляционными связями к однородным выборкам.

Выделено пять групп районов по расчетным значениям вероятности проявления засушливых явлений. Определены риски сильной засухи 2015 г. и их повторяемость, а также возможные страховые возмещения.

Приведенная методика оценки вероятностей проявления засух имеет значение для повышения эффективности управления сельскохозяйственным производством на различных природно-климатических территориях в условиях рисков.

### Библиографический список

1. Производство пшеницы в России в 2016 году [Электронный ресурс]. URL: <https://agrovosti.net/lib/industries/cereals/proizvodstvo-pshenitsy-v-rossii-v-2016-godu.html> (15.02.2018).
2. Сельское хозяйство Иркутской области [Электронный ресурс]. URL: <http://ab-centre.ru/page/selskoe-hozyaystvo> (15.02.2018).
3. Генкель П.А. Физиология жаро- и засухоустойчивых растений. М.: Наука, 1982. 280 с.
4. Логинов В.Ф., Неушкин А.И., Рочев Э.В. Засухи, их возможные причины и предпосылки предсказания. Обнинск, 1976. 71 с.
5. Хлебникова Е.И., Павлова Т.В., Сперанская Н.А. Засухи в кн.: Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. М.: Росгидромет, 2012. С. 126–164.
6. Черенкова Е.А., Золотокрылин А.Н. О сравнимости некоторых количественных показателей засухи // Фундаментальная и прикладная климатология. 2016. Т. 2. С. 79–94.
7. Beguería S, Vicente-Serrano S.M., Reig F., Latorre B. 2014. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *Int. J. Climatol.*, 34. P. 3001–3023.
8. Guttmann N.B. 1998. Comparing the palmer drought index and the standardized precipitation index. *Journal of the American Water Resources Association*. 34(1). P. 113–121.
9. Ващукевич Е.В., Иваньо Я.М. Математические модели аграрного производства с вероятностными характеристиками засух и гидрологических событий. Иркутск: Изд-во ИрГСХА, 2012. 150 с.
10. Чирков Ю. И. Агрометеорология. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 320 с.
11. Шахов В.В., Миллерман А.С., Медведев В.Г. Теория и управление рисками в страховании. М.: Финансы и статистика, 2002. 223 с.
12. Никитин А.В., Федоренко А.В. Экономический механизм страхования и преодоления рисков в сельском хозяйстве России при вступлении в ВТО. М.: Федеральное государственное научное учреждение «Росинформагротех», 2006. 220 с.
13. Абасов Н.В., Бережных Т.В., Ветрова В.В. Об исследовании динамики увлажненности территории Прибайкалья // Климат, экология, сельское хозяйство Евразии: Сб. статей Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 75-летию образования ИрГСХА (Иркутск, 25–29 мая 2009 г.). Иркутск, 2009. С. 17–21.
14. Географическая энциклопедия Иркутской области. Общий очерк / Ред. Л. М. Корытный. Иркутск: Изд-во Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2017. 336 с.
15. Грингоф И.Г. Засухи и опустынивание – экологические проблемы современности в кн.: Труды Всероссийского научно-исследовательского института сельскохозяйственной микробиологии. Иркутск, 2000. Вып. 33. С. 14–40.
16. Иваньо Я.М. Изменчивость климатических характеристик Восточной Сибири и аграрное производство // Климат, экология, сельское хозяйство Евразии: материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 75-летию образования ИрГСХА (Иркутск, 25–29 мая 2009 г.). Иркутск: НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2009. С. 31–38.
17. Шимараев, М.Н. Циркуляция атмосферы и климат на Байкале (1950–2007 гг.) // Климат, экология, сельское хозяйство Евразии: сб. статей Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 75-летию образования ИрГСХА (25–29 мая 2009 г.). Иркутск: НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2009. С. 77–85.
18. Findell K.L. and Delworth T.L., 2010. Impact of common sea surface temperature anomalies on global drought and pluvial frequency, *J. Climate*. Vol. 23. No. 3. P. 485–503.
19. Иваньо Я.М., Полковская М.Н. Оптимизация структуры посевов с учетом изменчивости климатических параметров и биопродуктивности культур. Иркутск: Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского, 2016. 150 с.
20. Ivan'o, Ya.M. Modeling the Frequency of Droughts and Risks of Agricultural Production // Climate, ecology, agriculture of Eurasia: materials of the international scientific-practical conference (Ulan-Bator, May 30–31, 2017). Ulaanbaatar, 2017. P. 90–99.
21. Иваньо Я.М., Старкова Н.В. Моделирование природных событий для управления народно-хозяйственными объектами региона. Иркутск: Иркутская государственная сельскохозяйственная академия, 2011. 160 с.
22. Рождественский А.В. Оценка точности кривых распределения гидрологических характеристик. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 270 с.
23. Серышев В.А., Солодун В.И. Агроландшафтное районирование Иркутской области // География и природные ресурсы. 2009. № 2. С. 86–94.



References

1. *Proizvodstvo pshenicy v Rossii v 2016 godu* [Wheat production in Russia in 2016]. Available at: <https://agrovesti.net/lib/industries/cereals/proizvodstvo-pshenitsy-v-rossii-v-2016-godu.html> (15.02.2018).
2. *Se'skoe hozjajstvo Irkutskoj oblasti* [Irkutsk region agriculture]. Available at: <http://ab-centre.ru/page/se'skoe-hozjajstvo> (15.02.2018).
3. Genkel' P.A. *Fiziologija zharo- i zasuhoustojchivih rastenij* [Physiology of heat and drought-resistant plants] Moscow: Nauka Publ., 1982, 280 p. (In Russian).
4. Loginov V.F., Neushkin A.I., Rochev Je.V. *Zasuhi, ih vozmozhnye prichiny i predposyлki predskazanija* [Droughts, their possible causes and backgrounds for predictions]. Ochninsk, 1976, 71 p.
5. Hlebnikova E.I., Pavlova T.V., Speranskaja N.A. *Zasuhi. Metody ocenki posledstvij izmenenija klimata dlja fizicheskikh i biologicheskikh system* [Droughts. Methods evaluating climate change effects on physical and biological systems]. M.: Rosgidromet Publ., 2012, pp. 126–164. (In Russian).
6. Cherenkova E.A., Zolotokrylin A.N. On the comparability of some quantitative drought indices. *Fundament'naja i prikladnaja klimatologija* [Fundamental and Applied Climatology]. 2016, vol. 2, pp. 79–94. (In Russian).
7. Beguería S, Vicente-Serrano S.M., Reig F., Latorre B. 2014. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *Int. J. Climatol.*, 34, pp. 3001–3023.
8. Guttmann N.B. 1998. Comparing the palmer drought index and the standardized precipitation index. *Journal of the American Water Resources Association*. 34(1), pp. 113–121.
9. Vashukevich E.V., Ivan'o Ja.M. *Matematicheskie modeli agrarnogo proizvodstva s veroyatnostnymi harakteristikami zasuh i gidrologicheskikh sobytij* [Mathematical models of agricultural production with probabilistic characteristics of droughts and hydrological events]. Irkutsk: Irkutsk State Agricultural Academy Publ., 2012, 150 p. (In Russian).
10. Chirkov Ju. I. *Agrometeorologija* [Agrometeorology]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1979, 320 p. (In Russian).
11. Shahov V.V., Millerman A.S., Medvedev V.G. *Teoriya i upravlenie riskami v strahovanii* [Theory and risk management in insurance]. Moscow: Finance and Statistics Publ., 2002, 223 p. (In Russian).
12. Nikitin A.B., Fedorenko A.B. *Jekonomicheskij mehanizm strahovanija i preodolenija riskov v se'skom hozjajstve Rossii pri vstuplenii v WTO* [Economic mechanism of insurance and overcoming of risks in Russian agriculture at WTO accession]. Moscow: Federal State Scientific Institution «Rosinformagroteh» Publ., 2006, 220 p. (In Russian).
13. Abasov N.V., Berezhnyh T.V., Vetrova V.V. *Ob issledovanii dinamiki uvlazhnennosti territorii Pribajkal'ja* [On the study of the Baikal area moisture content dynamics]. *Sbornik statej mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvjashchennoj 75-letiju obrazovaniya IrGSHA "Klimat, jekologija, se'skoe hozjajstvo Evrazii"* [Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 75<sup>th</sup> anniversary of Irkutsk State Agrarian University formation "Climate, Ecology, Agriculture of Eurasia", Irkutsk, 25–29 May 2009]. Irkutsk, 2009, pp. 17–21. (In Russian).
14. Korytnyj L.M. *Geograficheskaja jenciklopedija Irkutskoj oblasti. Obshhij ocherk* [Geographical encyclopedia of the Irkutsk region. General review]. Irkutsk: Institute of Geography named after V.B. Sochava, 2017, 336 p. (In Russian).
15. Gringof I.G. *Zasuhi i opustynivanie – jekologicheskie problemy sovremennosti. Trudy VNIISHM Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij institut se'skohozjajstvennoj mikrobiologii* [Droughts and desertification as environmental problems of modern times. Proceedings of the All-Russian Scientific Research Institute of Agricultural Microbiology]. Irkutsk. 2000. Issue. 33, pp. 14–40. (In Russian).
16. Ivan'o Ja.M. *Izmenchivost' klimaticheskikh harakteristik Vostochnoj Sibiri i agrarnoe proizvodstvo* [Variability of climatic characteristics of Eastern Siberia and agrarian production]. *Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvjashchennoj 75-letiju obrazovaniya IrGSHA "Klimat, jekologija, se'skoe hozjajstvo Evrazii"* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 75<sup>th</sup> anniversary of Irkutsk State Agrarian University formation. Climate, Ecology, Agriculture of Eurasia, Irkutsk, 25–29 May 2009]. Irkutsk, 2009, pp. 31–38. (In Russian).
17. Shimaraev M.N. *Tsirkulyatsiya atmosfery i klimat na Baikale (1950–2007 gg.)* [Atmosphere circulation and climate on Lake Baikal (1950–2007)]. *Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvjashchennoj 75-letiju obrazovaniya IrGSHA "Klimat, jekologija, se'skoe hozjajstvo Evrazii"* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 75<sup>th</sup> anniversary of Irkutsk State Agrarian University formation. Climate, Ecology, Agriculture of Eurasia, Irkutsk, 25–29 May 2009]. Irkutsk, 2009, pp. 77–85. (In Russian).
18. Findell K.L. and Delworth T.L., 2010. Impact of common sea surface temperature anomalies on global drought and pluvial frequency, *J. Climate*, vol. 23, no. 3, pp. 485–503.
19. Ivan'o Ja.M., Polkovskaja M.N. *Optimizacija struktury posevov s uchetom izmenchivosti klimaticheskikh parametrov i bioproduktivnosti kul'tur* [Crop structure optimization taking into account variability of climatic parameters and crop bioproduction]. Irkutsk: Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky Publ., 2016, 150 p. (In Russian).
20. Ivan'o, Ya.M., Suvorkina N.S. Modeling the Frequency of Droughts and Risks of Agricultural Production. Climate, ecology, agriculture of Eurasia: materials of the international scientific-practical conference (Ulan-Bator, 30–31 May 2017). Ulaanbaatar, 2017. pp. 90–99.



21. Ivan'o Ya.M., Starkova N.V. *Modelirovanie prirodnyh sobytiij dlja upravlenija narodno-hozjajstvennymi ob'ektami regiona* [Natural event modeling for the management of public and economic objects of the region]. Irkutsk: Irkutsk State Agricultural Academy, 2011, 160 p. (In Russian).

22. Rozhdestvenskij A.V. *Ocenka tochnosti krivyh raspredelenija gidrologicheskikh harakteristik* [Accuracy

assessment of hydrological characteristic distribution curves]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1977, 270 p. (In Russian).

23. Seryshev V.A., Solodun V.I. *Agrolandscape zoning of the Irkutsk region*. *Geografija i prirodnye resursy* [Geography and natural resources], 2009, no. 2, pp. 86–94. (In Russian).

#### **Критерии авторства**

Иваньо Я.М., Петрова С.А., Полковская М.Н. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

#### **Authorship criteria**

Ivan'o Ya.M., Petrova S.A., Polkovskaya M.N. have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **Conflict of interests**

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article

УДК 681.58

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-83-92>

## РАЗРАБОТКА СПОСОБА ОПТИМИЗАЦИИ РАСХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАНАЛА РЕГУЛИРОВАНИЯ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ

© Е.Д. Маршалов<sup>1</sup>, Ю.С. Тверской<sup>2</sup>

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина  
153003, Российская Федерация, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

**РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ.** Повышение эффективности работы технологического оборудования в широком диапазоне нагрузок посредством оптимизации характеристик регулирующих клапанов в автоматических системах регулирования.

**МЕТОДЫ.** Для оптимизации характеристик арматуры обычно применяют метод перепрофилирования регулирующего органа или метод введения нелинейной связи. Основными отрицательными моментами данных методов является необходимость конструктивных преобразований исполнительных устройств и невозможность настройки для всех режимов работы. Совершенствование характеристик регулирующей арматуры предлагается осуществлять алгоритмическим путем в режиме реального времени. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Проведено исследование влияния особенностей гидравлической системы на работу систем управления на примере многосвязной АСР. Исходные данные получены в результате обработки архива АСУТП энергоблока ПГУ-450. Способ алгоритмической коррекции нелинейности расходных характеристик регулирующих органов заключается в коррекции управляющего сигнала от регулятора, поступающего на исполнительное устройство с целью его дополнительного перемещения на величину, значение которой определяется невязкой с эталонной характеристикой. **ВЫВОДЫ.** Показано, что реализация предложенного способа улучшает качество работы систем автоматического регулирования. Способ применим для любого типа дросселирующей арматуры, т.к. корректировка вводится не в конструкцию регулирующей арматуры, а в структуру схемы автоматического регулирования между регулятором и блоком цифро-импульсного преобразования, подающего управляющий сигнал на устройства, осуществляющие реверсивное управление электродвигателями.

**Ключевые слова:** переходные процессы, регулирующая арматура, диагностика, автоматические системы управления, расходные характеристики.

**Информация о статье.** Дата поступления 5 марта 2018 г.; дата принятия к печати 3 апреля 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2018 г.

**Формат цитирования.** Маршалов Е.Д., Тверской Ю.С. Разработка способа оптимизации расходной характеристики канала регулирования в системе управления // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 4. С. 83–92. DOI: [10.21285/1814-3520-2018-4-83-92](http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-83-92)

### DEVELOPMENT OF A METHOD TO OPTIMIZE THE CONTROL CHANNEL FLOW CHARACTERISTIC IN A CONTROL SYSTEM

E.D. Marshalov, Yu.S. Tverskoy

Ivanovo State Power Engineering University  
34, Rabfakovskaya St., 153003, Ivanovo, Russian Federation

**ABSTRACT.** The **PURPOSE** of the paper is to improve the efficiency of technological equipment in a wide range of loads by optimizing the characteristics of control valves in automatic control systems. **METHODS.** The usual method for valve characteristics optimization is the method of re-profiling the control valves or the method of nonlinear coupling introduction. The main disadvantage of these methods is the need for design transformations of actuators and inability of adjustment

<sup>1</sup>Маршалов Евгений Дмитриевич, кандидат технических наук, декан факультета информатики и вычислительной техники; e-mail: [edm@su.ispu.ru](mailto:edm@su.ispu.ru)

Evgeny D. Marshalov, Candidate of technical sciences, Dean of the IT and Computer Science Faculty; e-mail: [edm@su.ispu.ru](mailto:edm@su.ispu.ru)

<sup>2</sup>Тверской Юрий Семенович, доктор технических наук, профессор кафедры систем управления; e-mail: [tverskoy@su.ispu.ru](mailto:tverskoy@su.ispu.ru)

Yury S. Tverskoy, Doctor of technical sciences, Professor of the Control Systems Department; e-mail: [tverskoy@su.ispu.ru](mailto:tverskoy@su.ispu.ru)



for all operation modes. It is proposed to improve algorithmically the characteristics of control valves in real time. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The effect of hydraulic system features on the operation of control systems is studied on example of a multiple connected automatic control systems (ACS). Input data are obtained as a result of processing the archive of the automated process control system (APCS) of the PGU-450 power unit. The method of the algorithmic correction of the nonlinearity of the flow characteristics of control valves consists in the correction of the regulator's control signal sent to the actuator in order to displace it further by a value whose magnitude is determined by the reference characteristic discrepancy. **CONCLUSIONS.** It is shown that being implemented, the proposed method improves the operation quality of automatic control systems. The method can be applied for any type of throttle valves. It means that correction is introduced in the structure of the automatic control circuit between the regulator and the block of digital-impulse conversion, which sends the control signal to devices engaged in reverse control of electric motors rather than the design of the control valve.

**Keywords:** transient processes, control valves, diagnostics, automatic control systems (ACS), flow characteristics

**Information about the article.** Received March 5, 2018; accepted for publication April 3, 2018; available online April 30, 2018.

**For citation.** Marshalov E.D., Tverskoy Yu.S. Development of a method to optimize the control channel flow characteristic in a control system. Proceeding of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 4, pp. 83–92. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-83-92

## Введение

Характерной особенностью современного этапа развития автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) является осуществление в полном объеме как информационных, так и управляющих функций. Современные высокоточные системы управления и АСУТП предъявляют высокие требования к качеству представительности сигналов. Реализация эффективных алгоритмов автоматического управления возможна только при наличии достаточного числа датчиков и регулирующей арматуры, к качеству которой предъявляют высокие требования [1, 2]. Эффективность и надежность работы технологического оборудования существенным образом зависит от характеристик исполнительных устройств (ИУ). Поэтому, при разработке проектной документации и введении в эксплуатацию технологических объектов управления вопросу выбора ИУ традиционно уделяется значительное внимание [3, 4].

В настоящее время нередко «эффективными» менеджерами, не имеющими базового технического образования и не осознающими всю сложность работы современного энергоблока принимаются ошибочные решения при организации мероприятий

по созданию новых энергоблоков и модернизации существующих. На первое место выходит стоимость оборудования, в том числе регулирующей арматуры, а не качество и надежность ее работы, что приводит к ухудшению работы систем управления и энергоблока в целом [5, 6].

Поэтому задача исследования работы регулирующих клапанов, обнаружения дефектов и оптимизации характеристик регулирующих клапанов в автоматических системах регулирования (АСР) является актуальной и востребованной [7].

Проведение специальных испытаний на технологическом оборудовании в широком диапазоне нагрузок с целью определения показателей работы регулирующих клапанов является весьма непростой задачей, как с технологической, так и с организационной точек зрения. При этом информация о состоянии регулирующих клапанов может быть определена посредством обработки трендов из архива АСУТП.

Цель работы заключается в повышении эффективности работы технологического оборудования в широком диапазоне нагрузок посредством оптимизации характеристик регулирующих клапанов в автоматических системах регулирования.



## Методы исследования

В работе использованы методы теории автоматического управления, обобщенного термодинамического анализа, имитационного моделирования, вычислительного эксперимента и др.

Для определения характеристик эксплуатируемых на электростанциях исполнительных устройств проведено диагностирование регулирующих клапанов (РК) с использованием специализированного программно-методического комплекса, с учетом рекомендаций нормативно-технических документов (РД 153-34.1-39.504-00, РТМ 108.711.02-79 и др.). Диагностирование выполнено по трендам сигналов (по расходу технологической среды, положению РК и т.д.), полученным для режима штатной эксплуатации [8]. В необходимых случаях проводились специальные испытания для определения расходных характеристик (РХ). Необходимость в специальных испытаниях определялась для каждого клапана по результатам штатного диагностирования или по технологическим соображениям с целью оценить работу клапана в требуемом диапазоне по степени его открытия.

В целом диагностирование РК позволило выявить основные дефекты регулирующей арматуры по ее состоянию на текущий момент времени. Основные дефекты включают в себя наличие недопустимого люфта, существенную нелинейность РХ, большой начальный пропуск среды через РК, «перетяг» РК, неправильную настройку датчика УП, и др.

С учетом накопленного положительного опыта и отработанной технологии проведения таких работ целесообразно выполнять диагностирование РК регулярно с интервалом 3–6 месяцев по мере освоения пусковых и штатных АСР в составе АСУТП.

Расходная характеристика исполнительного устройства зависит как от формы расходной характеристики регулирующего органа (РО) и профиля плунжера РО, так и от характеристики связи между исполнительным механизмом и РО. Требуемую на основании технического задания форму

расходной характеристики исполнительного устройства можно получить как за счет изменения профиля плунжера РО, так и путем коррекции характеристики связи ИМ и РО.

Метод изменения профиля плунжера регулирующего органа не приводит к усложнению элементов сочленения ИМ с РО, но обеспечивает невысокую точность преобразования расходной характеристики исполнительного устройства. Метод коррекции характеристики связи ИМ и РО позволяет получить форму расходной характеристики более близкую к требуемой, но не применим для исполнительных устройств со встроенным исполнительным механизмом [3].

Основными отрицательными моментами обоих упомянутых методов можно считать необходимость конструктивных преобразований исполнительных устройств, применимость для ограниченного круга регулирующей арматуры, оптимальную настройку только для одной точки режимной карты и невозможность качественной настройки для всех режимов работы технологического объекта управления.

Учитывая, что во время диагностирования у ряда клапанов выявлена нестабильность во времени (т.е. нарастание устранимых дефектов со временем), целесообразно заменять некачественную арматуру или производить ее ремонт. Для поддержания гарантированной работоспособности локальных систем управления и нормальной работы энергоблока все выявленные устранимые дефекты арматуры, связанные с некачественным монтажом, ремонтом и прочими факторами, должны устраняться в планово-оперативном порядке. Дальнейшее совершенствование характеристик регулирующей арматуры предлагается осуществлять алгоритмическим путем в режиме реального времени.

Для реализации предложенного метода разработана методика обобщенного термодинамического анализа гидравлических систем и определены математические выражения обобщенных термодинамиче-

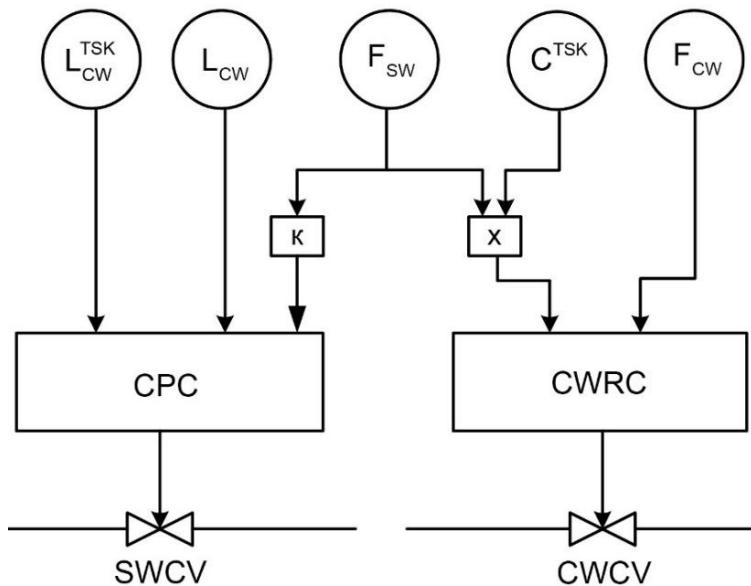
ских потенциалов и обобщенных термодинамических координат гидравлических систем [9]. Путем применения термодинамического анализа показано, что обобщенными потенциалами гидравлической системы служат конструктивные параметры гидравлических систем, а обобщенные координаты характеризуют режим работы гидравлической системы. Разработана методика расчета характеристик регулирующих органов, отличающаяся тем, что в ней учитываются гидравлические сопротивления (расширение, сужение, повороты трубопровода, наличие тройников, диафрагм, запорной арматуры и т.д.). Разработаны математические модели гидравлических систем с

регулирующими органами, учитывающие регулировочные характеристики РО и режимы работы технологического объекта управления. Математические модели доведены до уровня имитационных моделей гидравлических систем с регулирующими органами, позволяющими проводить различного рода исследования, в том числе исследования с учетом априорной информации, решить задачу оптимизации расходных характеристик регулирующей арматуры. Подробнее вопрос разработки математических моделей гидравлических систем с регулирующими органами представлен в [9].

### Результаты исследования

Исследование влияния особенностей гидравлической системы на работу систем управления рассмотрено на примере

многосвязной автоматической системы регулирования производительности и рециркуляции осветлителя (рис. 1).



**Рис. 1. Информационная структура регулирования производительности и рециркуляции осветлителя: CPC – регулятор производительности осветлителя; CWRC – регулятор рециркуляции коагулированной воды; C<sup>TSK</sup> – заданное соотношение расходов исходной воды и коагулированной воды в линии рециркуляции; F<sub>sw</sub> (F<sub>CW</sub>) – расход исходной (коагулированной) воды; L<sub>CW</sub> – уровень в баке коагулированной воды; L<sub>CW</sub><sup>TSK</sup> – заданное значение уровня в баке коагулированной воды; SWCV – регулирующий клапан исходной воды; CWCV – регулирующий клапан коагулированной воды**

*Fig. 1. Information structure of clarifier performance control and recirculation:*

CPC – clarifier performance controller; CWRC – coagulated water recirculation controller; C<sup>TSK</sup> – specified ratio of source water and coagulated water flow in the recirculation line; F<sub>sw</sub> (F<sub>CW</sub>) – source (coagulated) water flow rate; L<sub>CW</sub> – level in the coagulated water tank; L<sub>CW</sub><sup>TSK</sup> – specified value of level in the coagulated water tank; SWCV – source water control valve; CWCV – coagulated water control valve

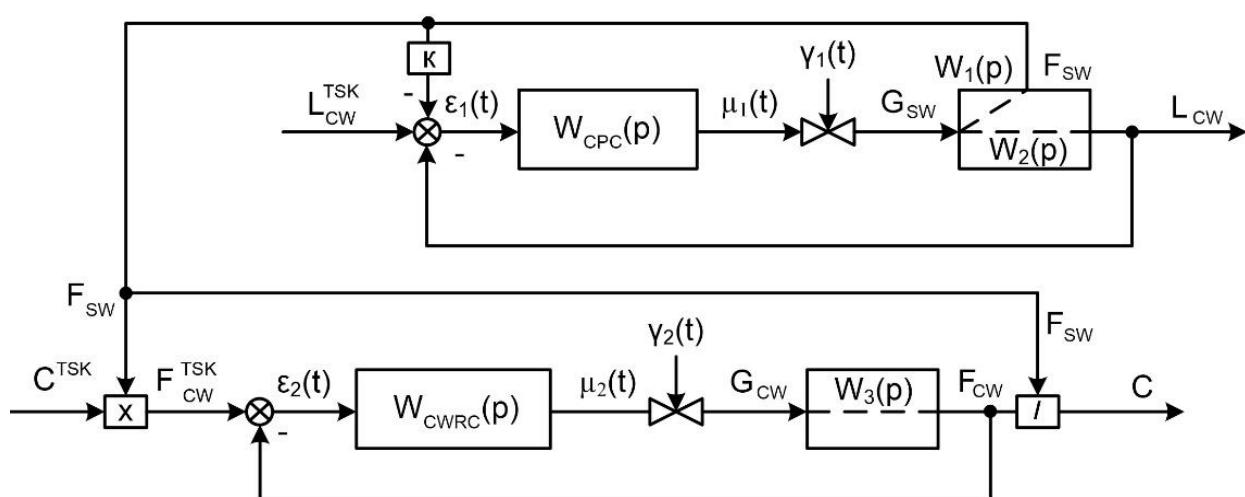
Регулятор рециркуляции коагулированной воды воздействует на соответствующий клапан и обеспечивает поддержание соотношения расходов исходной воды и коагулированной воды. Регулятор производительности осветлителя осуществляет поддержание заданного соотношения между уровнем в баке коагулированной воды и расходом исходной воды, подаваемой в осветлитель. Регулятор воздействует на соответствующий регулирующий клапан.

Расчетная структура АСР представлена на рис. 2.

Исходные данные для идентификации каналов регулирования получены в результате обработки архива АСУТП энергоблока ПГУ-450. Методика экспериментальных исследований и обработки результатов выполнена согласно [10–12].

В ходе проведения экспериментов осуществлялась необходимая стабилизация заданного режима работы оборудования объекта управления, наносились возмущения как положительного (открытие), так и отрицательного (закрытие) знака, величины возмущений выбирались порядка 10% перемещения РО. Экспериментальные кривые разгона приводились к единичному возмущению с целью определения постоянной времени, а коэффициент усиления объекта определялся на основании расхода среды при 100% открытии клапана.

Результатом эксперимента являются временные переходные характеристики (кривые разгона), полученные как реакции объекта на ступенчатые возмущения по каналам регулирования (рис. 3).



**Рис. 2. Расчетная структура регулирования производительности и рециркуляции осветлителя:**  
 $L_{CW}^{TSK}$ ,  $C^{TSK}$ ,  $F_{CW}^{TSK}$  – задающие воздействия;  $\varepsilon_1(t)$ ,  $\varepsilon_2(t)$  – ошибки регулирования;  $\mu_1(t)$ ,  $\mu_2(t)$  – ступенчатые воздействия;  $L_{CW}$ ,  $C$  – реакции системы на воздействия;  $y_1(t)$ ,  $y_2(t)$  – внутренние воздействия;  $W_{CPC}(p)$  – передаточная функция регулятора производительности осветлителя;  $W_{CWRC}(p)$  – передаточная функция регулятора рециркуляции коагулированной воды;  $W_1(p)$  – передаточная функция объекта по каналу «расход исходной воды – расход исходной воды»;  $W_2(p)$  – передаточная функция объекта по каналу «расход исходной воды – уровень в баке коагулированной воды»;  $W_3(p)$  – передаточная функция объекта по каналу «расход коагулированной воды – расход коагулированной воды»;  $F_{SW}$ ,  $F_{CW}$  – расход исходной (коагулированной) воды, регистрируемый датчиком;  $G_{SW}$ ,  $G_{CW}$  – расход исходной (коагулированной) воды

**Fig. 2. Calculated structure of clarifier performance control and recirculation:**

$L_{CW}^{TSK}$ ,  $C^{TSK}$ ,  $F_{CW}^{TSK}$  – setting impacts;  $\varepsilon_1(t)$ ,  $\varepsilon_2(t)$  – control errors;  $\mu_1(t)$ ,  $\mu_2(t)$  – step impacts;  $L_{CW}$ ,  $C$  – system response to impacts;  $y_1(t)$ ,  $y_2(t)$  – internal impacts;  $W_{CPC}(p)$  – transfer function of the clarifier performance controller;  $W_{CWRC}(p)$  – transfer function of the coagulated water recirculation controller;  $W_1(p)$  – transfer function of the object by the channel «flow rate of source water – flow rate of source water»;  $W_2(p)$  – transfer function of the object on the channel «flow rate of source water – level in the tank of coagulated water»;  $W_3(p)$  – transfer function of the object on the channel «flow rate of coagulated water – flow rate of coagulated water»;  $F_{SW}$ ,  $F_{CW}$  – sensor-recorded flow rate of source (coagulated) water;  $G_{SW}$ ,  $G_{CW}$  – source (coagulated) water flow rate

Построение интервальных оценок точности (границ доверительных интервалов) выполнено в наиболее характерных сечениях оценки переходной характеристики для заданной доверительной вероятности 0,9 (рис. 4).

Для расчета оптимальных параметров настройки регуляторов применен непараметрический подход [11]. Для этого по

оценкам переходных характеристик проведены расчеты комплексных частотных характеристик путем непосредственного пересчета переходных характеристик. Передаточные функции по каналам «степень открытия РО исходной воды – расход исходной воды» и «степень открытия РО коагулированной воды – расход коагулированной воды» определены путем аппроксимации

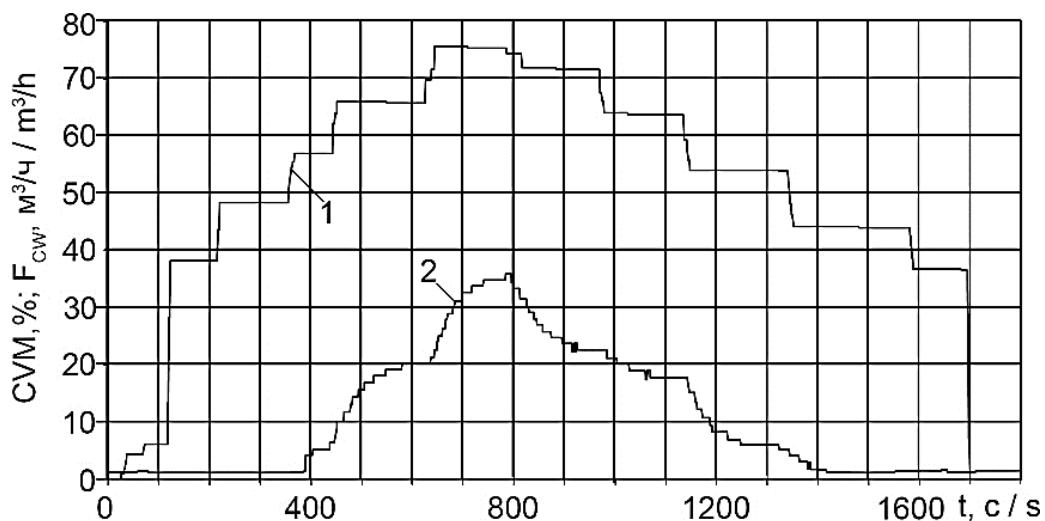


Рис. 3. Кривые разгона хода РО (CVM, %) и расхода коагулированной воды ( $F_{CW}$ ,  $m^3/h$ ):  
1 – кривая разгона, характеризующая изменение степени открытия клапана расхода коагулированной воды; 2 – кривая разгона, характеризующая изменение расхода коагулированной воды

Fig. 3. Transient response curves of control valve movement (CVM, %) and coagulated water flow rate ( $F_{CW}$ ,  $m^3/h$ ): 1 – transient response curve characterizing the change in the opening degree of the control valve of coagulated water flow rate; 2 – transient response curve characterizing the change in the coagulated water flow rate

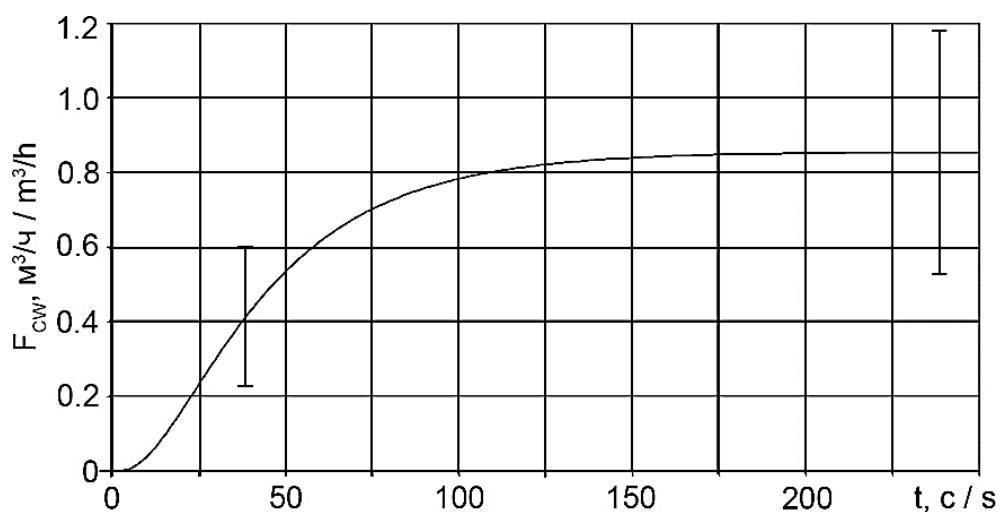


Рис. 4. Сглаженная оценка переходной характеристики по расходу коагулированной воды ( $F_{CW}$ ,  $m^3/h$ ) в зоне доверительного интервала

Fig. 4. Smoothed estimate of the transient characteristic by the flow rate of coagulated water ( $F_{CW}$ ,  $m^3/h$ ) in the zone of the confidence interval

полученных оценок комплексных частотных характеристик (КЧХ) в частотной области.

Построены переходные процессы для разных степеней открытия РО, полученные при работе схемы при возмущении заданием и возмущении РО. Результаты обработки системой возмущения РО, равного 10 %, приведены на рис. 5.

Очевидно, что нелинейности характеристик регулирующих клапанов, которые могут изменяться в довольно широких пределах, существенно влияют на характер переходных процессов.

Известны разные подходы в решении задачи стабилизации показателей качества АСР в условиях неопределенности [13, 14]. Однако все известные подходы направлены на усложнение алгоритма регулирования, что во многих случаях нельзя считать оправданным.

Для решения возникших проблем при работе систем регулирования совместно с арматурой с нелинейными расходными характеристиками разработан способ, позволяющий преобразовывать нелинейные характеристики РО в характеристики, близкие к оптимальным (например, линейным), что позволяет добиться заданных по-

казателей качества работы замкнутых АСР.

Идея способа алгоритмической коррекции нелинейности расходных характеристик регулирующих органов в структуре замкнутой АСР заключается в коррекции управляющего сигнала от регулятора, поступающего на исполнительное устройство с целью его дополнительного перемещения на величину, значение которой определяется невязкой с эталонной характеристикой.

Способ формирования корректирующей модели рассмотрен на примере регулирующего клапана АИ7.511.1322-АА. При сравнении исходной характеристики клапана с требуемой возникает значительное расхождение между ними (рис. 6). Например, для получения расхода среды, величиной в 20 % от максимального значения, при требуемой (например, линейной) характеристике регулирующий орган нужно открыть на 20%, а при имеющейся расходной характеристике для получения расхода в 20 % регулирующий орган требуется переместить в положение 43,5%. Следовательно, необходимо для каждого положения регулирующего органа устанавливать несоответствие между характеристиками и вносить корректировку в управляющий сигнал.

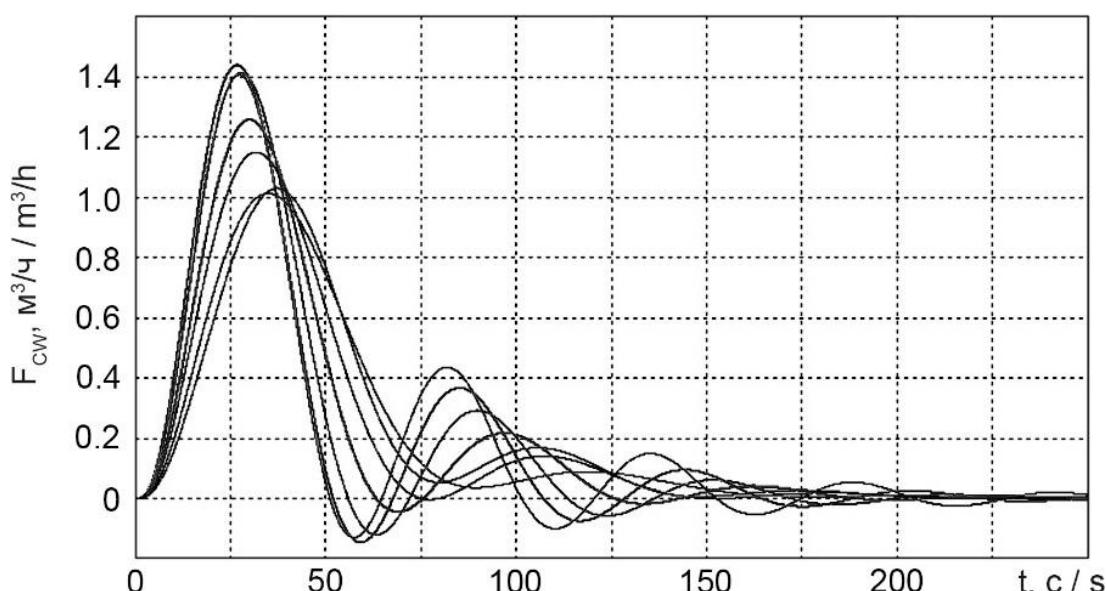


Рис. 5. Переходные процессы изменения расхода коагулированной воды при 10%-м возмущении РО (начальная степень открытия: РО 20 ÷ 80 %)  
Fig. 5. Transient processes of coagulated water flow rate alteration at 10% disturbance of the control valve (initial degree of control valve opening is 20 ÷ 80%)

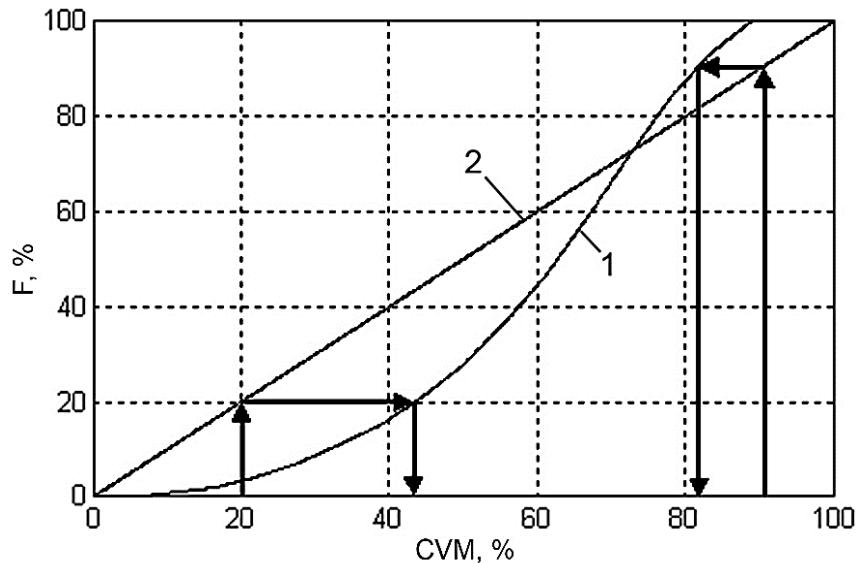


Рис. 6. Приведенные (линейная и заводская) характеристики: 1 – исходная РХ; 2 – линейная РХ; F – расход среды; CVM – степень открытия РО

Fig. 6. Reduced (linear and rating (plant)) characteristics: 1 – initial flow rate characteristic; 2 – linear flow rate characteristic; F – media flow rate; CVM – control valve opening degree

Модель корректирующего устройства состоит из макроблоков, соответствующих определенным интервалам степени открытия клапана.

Рассмотрим работу АСР с моделью реального клапана и корректирующей моделью. Результаты отработки системой возмущений в зависимости от степени открытия клапана приведены на рис. 7.

Как видно из графиков, использование разработанного способа алгоритмической коррекции нелинейности расходных характеристик регулирующих органов приводит к устойчивой работе при всех степенях открытия клапана, а показатели качества переходных процессов соответствуют заданным.

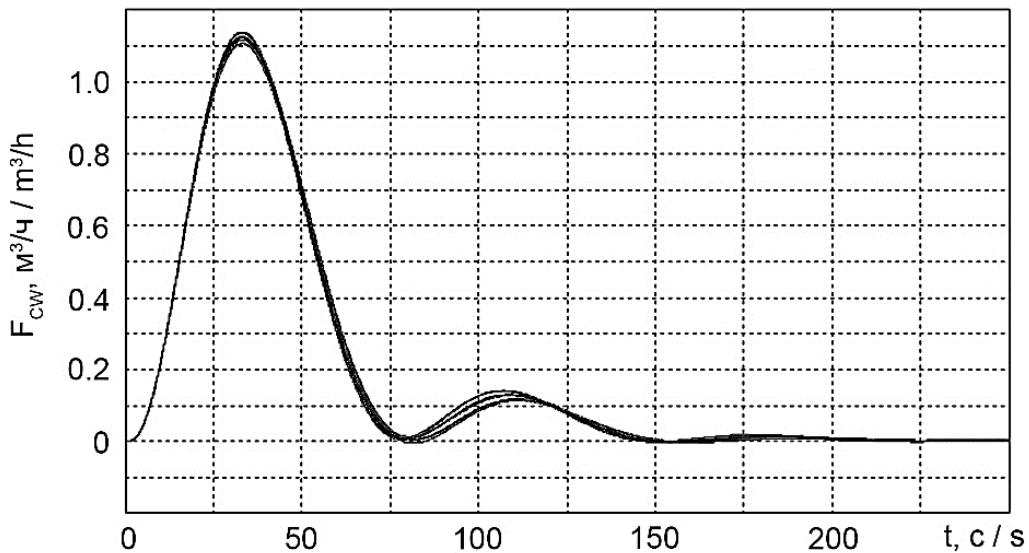


Рис. 7. Переходные процессы изменения расхода коагулированной воды при 10%-м возмущении РО (начальная степень открытия: РО 20 ÷ 80 %)

Fig. 7. Transient processes of coagulated water flow rate alteration at 10% disturbance of the control valve (initial degree of control valve opening is 20 ÷ 80%)



## Заключение

Разработан способ алгоритмической коррекции формы расходных и пропускных характеристик регулирующих клапанов в структуре замкнутых автоматических систем регулирования. В предложенном способе осуществляется адаптация управляющего сигнала аппаратуры управления, поступающего на исполнительный механизм с целью его дополнительного перемещения на корректирующую величину, значение которой определяется невязкой исходной характеристики с требуемой.

Показано, что реализация предло-

женного способа улучшает качество работы систем автоматического регулирования без необходимости конструктивных преобразований исполнительных устройств. Способ применим для любого типа дросселирующей арматуры, т.к. корректировка вводится не в конструкцию регулирующей арматуры, а в структуру схемы автоматического регулирования между регулятором и блоком цифро-импульсного преобразования, подающего управляющий сигнал на устройства, осуществляющие реверсивное управление электродвигателями.

## Библиографический список

1. Liu X., Liu J., He Q., Guo B. Simulation of the flow field characteristics of the boiler control valve pipe system of a power station // Journal of Shenzhen University Science and Engineering. 2017. Vol. 34. No. 1. P. 105–110.
2. Тверской Ю.С., Маршалов Е.Д. Оптимизация характеристик регулирующих органов в системах автоматического управления // Вестник ИГЭУ. 2010. № 4. С. 64–68.
3. Баев А.В., Салов, В.М. Дроссельные регулирующие органы в системе управления. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2005. 142 с.
4. Фалк Г.Б. Технические средства автоматизации и управления: исполнительные устройства. М.: Московский институт электроники и математики имени А.Н. Тихонова, 2004. 126 с.
5. Какузин В.Б. Обзор рынка энергетической арматуры. М.: Филиал ОАО «Инженерный центр ЕЭС»; фирма «ОРГРЭС», 2007. 12 с.
6. Копсов А.Я. Надежность электроснабжения потребителей – приоритетная задача энергетиков московского региона // В кн. Технология АСУТП электростанций. Иваново: Ивановский гос. энергетический ун-т имени В. И. Ленина, 2005. С. 15–20.
7. Shin C.H. A numerical study on the characteristics of transient flow in a pressure regulator resulting from closure of the pressure control valve // Journal of Mechanical Science and Technology. 2013. Vol. 27. No. 2. P. 443–449.
8. Тверской Ю.С., Агафонова Н.А., Маршалов Е.Д., Бушмакин С.А., Соловьев М.Ю., Харитонов И.Е., Наумов Ю.В. Диагностирование характеристик регулирующей арматуры в системах управления энергоблоков // Теплоэнергетика. 2012. № 2. С. 51–57.
9. Тверской Ю.С., Маршалов Е.Д. Особенности моделирования гидравлических систем с регулирующими органами // Теплоэнергетика. 2014. № 9. С. 64–69.
10. Нестеров С.В. Определение динамических характеристик паровых котлов тепловых электрических станций. Краснодар: Кубанский государственный технологический университет, 2007. 58 с.
11. Тверской Ю.С., Таламанов С.А., Агафонова Н.А. Методы интервальной оценки частотных характеристик и робастной настройки систем управления. Иваново: Ивановский гос. энергетический ун-т имени В.И. Ленина, 2010. 220 с.
12. Пат. № 88800, Российская Федерация, МПК G 01 F 25/00. Установка для стендовых испытаний расходных характеристик гидравлических сопротивлений / Е.Д. Маршалов, О.А. Нечаева; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «ИГЭУ им. В.И. Ленина». № 2008112469; заявл. 31.03.2008; опубл. 20.11.2009, Бюл. № 32.
13. Аракелян Э.К., Пикина Г.А. Оптимизация и оптимальное управление. М.: Изд-во МЭИ, 2002. 210 с.
14. Рутковский В.Ю., Глумов В.М. Особенности динамики адаптивной системы управления с нелинейной эталонной моделью // Автоматика и телемеханика. 2017. № 4. С. 92–105.

## References

1. Liu X., Liu J., He Q., Guo B. Simulation of the flow field characteristics of the boiler control valve pipe system of a power station. Journal of Shenzhen University Science and Engineering. 2017, vol. 34, no. 1, pp. 105–110.
2. Tverskoy Yu.S., Marshalov E.D. Optimization of control valve characteristics in automation control systems.

*Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo jenergeticheskogo universiteta* [Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University]. 2010, no. 4, pp. 64–68. (In Russian).

3. Baev A.V., Salov, V.M. *Drossel'nye reguliruyushchie organy v sisteme upravleniya* [Throttle regulators in the control system]. Irkutsk: Moscow Institute of Electronics



- and Mathematics named after A.N. Tikhonov Publ., 2005, 142 p. (In Russian).
4. Falk G.B. *Tekhnicheskie sredstva avtomatizacii i upravleniya: ispolnitel'nye ustroystva* [Technical means of automation and control: actuators]. Moscow: MIEHM Publ., 2004, 126 p. (In Russian).
5. Kakuzin V.B. *Obzor rynka energeticheskoy armatury* [Overview of power valves market]. Branch of «UPG Engineering Centre » JSC –«ORGRES» company Publ., 2007, 12 p. (In Russian).
6. Kopsov A.Ya. *Nadezhnost' elektrosnabzheniya potrebitely – prioritetnaya zadacha energetikov moskovskogo regiona* [Reliability of electricity supply to consumers is a priority for power engineers in the Moscow region]. *Tekhnologiya ASUTP elektrostanciy* [Technology of process control systems of power plants]. Ivanovo: The Ivanovo state. Energy University named after V.I. Lenin Publ., 2005, pp. 15–20. (In Russian).
7. Shin C.-H. A numerical study on the characteristics of transient flow in a pressure regulator resulting from closure of the pressure control valve. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2013, vol. 27, no. 2, pp. 443–449.
8. Tverskoy Yu.S., Agafonova N.A., Marshalov E.D., Bushmakin S.A., Solov'ev M.Yu., Haritonov I.E., Naumov Yu.V. Diagnosing the characteristics of control valves used in power unit control systems. *Teploehnergetika* [Thermal Engineering], 2012, no. 2, pp. 51–57. (In Russian).
9. Tverskoy Yu.S., Marshalov E.D. Specific features pertinent to modeling of hydraulic systems containing control members. *Teploehnergetika* [Thermal Engineering], 2014, no. 9, pp. 64–69. (In Russian).
10. Nesterov S.V. *Opredeleniye dinamicheskikh kharakteristik parovykh kotlov teplovyykh elektricheskikh stantsiy* [Determination of dynamic characteristics of thermal power plant steam boilers]. Krasnodar: Kuban State Technological University Publ., 2007, 58 p. (In Russian)
11. Tverskoy Yu.S., Talamonov S.A., Agafonova N.A. *Metody interval'noy ocenki chasotnyh harakteristik i robustnoy nastroyki sistem upravleniya* [Methods of interval estimation of frequency characteristics and robust adjustment of control systems]. Ivanovo: The Ivanovo state. Power Engineering University named after V.I. Lenin Publ. 2010, 220 p. (In Russian)
12. Marshalov E.D., Nechaeva O.A. *Ustanovka dlya stendovykh ispytaniy raskhodnykh kharakteristik gidravlicheskikh sопrotivleniy* [Installation for bench tests of flow characteristics of hydraulic resistances]. Patent RF, no. 88800, 2009.
13. Arakelyan Eh.K., Pikina G.A. *Optimizaciya i optimal'noe upravlenie* [Optimization and optimal control]. Moscow, MEHI Publ., 2002, 210 p. (In Russian)
14. Rutkovskij V.Yu., Glumov V.M. *Osobennosti dinamiki adaptivnoy sistemy upravleniya s nelineynoy etalonnoy model'yu* [Dynamics peculiarities of an adaptive control system with nonlinear reference model]. *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and telemechanics], 2017, no. 4, pp. 92–105. (In Russian)

#### Критерии авторства

Маршалов Е.Д., Тверской Ю.С. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за plagiat.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Authorship criteria

Marshalov E.D., Tverskoy Yu.S. have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

#### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article

УДК 004.94

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-93-100>

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТОКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ПРИМЕНЕНИЕМ К ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССАМ

© К.В. Митин<sup>1</sup>

Сибирский федеральный университет,  
660041, Российская Федерация, г. Красноярск, пр. Свободный, д. 79.

**РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ.** Целью данной работы является моделирование движения заряженных частиц в электростатическом поле электродов применительно к процессу очистки отходящих газов. **МЕТОДЫ.** Для моделирования использовался метод, относящийся к смешанным алгоритмам, в котором каждый участок сплайна находится путем дискретизации напряженности и интегрирования уравнений движения заряженных частиц в электростатическом поле. Данный метод применен для моделирования движения частиц пыли через пластинчатый электрофильтр. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Проведены численные эксперименты по компьютерному моделированию потока частиц пыли в электрофильтре ЭГАВ 1-40-9-6-4. Результаты моделирования согласуются с характером процесса очистки отходящих газов. **ВЫВОДЫ.** Был разработан эмулятор для 3D моделирования потока частиц пыли в электрофильтре между коронирующими и осадительными электродами.

**Ключевые слова:** заряженная частица, поток частиц, электростатическое поле, сплайн, 3D моделирование, компьютерное моделирование.

**Информация о статье.** Дата поступления 29 января 2018 г.; дата принятия к печати 5 марта 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2018 г.

**Формат цитирования.** Митин К.В. Моделирование потоков заряженных частиц применительно к технологическим процессам // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 4. С. 93–100. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-93-100

## MODELING OF CHARGED PARTICLE CURRENTS AS APPLIED TO TECHNOLOGICAL PROCESSES

**K.V. Mitin**

Siberian Federal University,  
79, Svobodny pr., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

**ABSTRACT.** The **PURPOSE** of this work is modeling of motion of charged particles in the electrostatic field of electrodes as applied to the process of flue gas purification. **METHODS.** The method relating to the mixed algorithms is used for modeling. According to this method each part of a spline is found by field strength sampling and integration of the equations of motion of charged particles in an electrostatic field. This method is used for modeling of the dust particles motion via plate electrostatic precipitator. **RESULTS.** Numerical experiments on computer modeling of the current of dust particles in the EGAV 1-40-9-6-4 electrostatic precipitator have been conducted. The modeling results agree with the nature of the process of flue gas purification. **CONCLUSIONS.** An emulator has been developed for 3D modeling of a dust particle current in the electrostatic precipitator between the discharge and receiving electrodes.

**Keywords:** charged particle; current of particles; electrostatic field; spline; 3D modeling; computer modeling

**Information about the article.** Received January 29, 2018; accepted for publication March 5, 2018; available online April 30, 2018.

**For citation.** Mitin K.V. Modeling of charged particle currents as applied to technological processes. Proceeding of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 4, pp. 93–100. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-93-100

<sup>1</sup>Митин Константин Валерьевич, математик Департамента информационных технологий; e-mail: KMitin@sfu-kras.ru  
Konstantin V. Mitin, Mathematician of the Department of Information Technologies; e-mail: KMitin@sfu-kras.ru



## Введение

Изучение потоков ионов в электростатических полях представляет собой весьма актуальную научно-техническую задачу. Большое значение такие исследования имеют для повышения эффективности металлургических процессов, в частности электролитического рафинирования меди и других металлов. Кроме того, моделирование электрических полей позволяет изучать электрические и магнитные потоки, а также потоки заряженных частиц (пыли, газов), что актуально как для проектирования промышленных фильтров, так и систем трубопроводного проветривания глубоких карьеров.

Перенос вещества в процессе электролитического рафинирования осуществляется по трем механизмам: молекулярная диффузия, миграция, конвекция. В соответствии с этим говорят о потоках диффузии, миграции и конвекции. Суммарный поток складывается из трех указанных потоков [1]. Данная статья посвящена вопросам моделирования миграционного потока ионов в электростатическом поле электродов применительно к задачам электролитического рафинирования.

В современном математическом моделировании все более распространяются алгоритмы, известные под общим названием «методы частиц» [2–6]. Характерной особенностью этих методов является специальный способ дискретизации, при котором вводится множество дискретных объектов – модельных частиц, рассматриваемых как некоторая сетка подвижных узлов. Изначально методы частиц получили наибольшее развитие в тех научно-прикладных областях, где требовались масштабные вычислительные эксперименты, для проведения которых сосредотачивались большие интеллектуальные и вычислительные ресурсы. Примерами могут служить работы в области управляемого термоядерного синтеза [7], вычислительной физики плазмы [8], газовой динамики [2, 9–10], электролиза [3–6] и других областях [11, 12].

Среди методов частиц различают чисто «лагранжевые» и смешанные алгоритмы. Алгоритмы первой группы сводятся к численному интегрированию систем дифференциальных уравнений динамического типа [13–15], которые описывают траектории взаимодействующих частиц. Для смешанных алгоритмов характерно то, что эволюция системы частиц на каждом временном шаге разбивается на два этапа. На одном из них при фиксированном положении частиц предварительно вычисляется результат их взаимодействия и (или) их коллективного воздействия на среду. Расчет ведется на неподвижной «эйлеровой» сетке. Поэтому этап называется эйлеровым. На другом, лагранжевом, этапе выполняется интегрирование на очередном временном шаге динамической системы, правая часть которой вычислена на эйлеровом этапе.

Для методов частиц, как правило, характерна относительно невысокая точность. Обычный уровень погрешностей составляет несколько процентов. Это является результатом уставновившегося компромисса между разумным объемом вычислительной работы и возможностью моделировать сложные явления. Такой подход дает существенную экономию машинного времени.

В отличие от физических задач, решаемых методами частиц, где рассматриваемые процессы протекают за короткие промежутки времени и при высоких скоростях, упомянутые выше технологические процессы занимают продолжительное время и являются медленнотекущими. Это обуславливает выбор методов «частиц-в-ячейках» для моделирования данного процесса, поскольку они обладают большим запасом устойчивости и допускают относительно быстрое продвижение по эволюционной переменной. Однако из-за длительности данного процесса, что является существенным отличием от упомянутых выше работ, применение метода быстрого преобразования (Фурье) для расчета потенциала поля не оправдано вследствие существенного накопления погрешности с течением времени.



## Математическая модель потока ионов металла в процессе электролитического рафинирования

В основу математической модели движения заряженной частицы положены законы движения иона под действием электрической силы. Предполагается, что частицы распределены равномерно на аноде. Для каждого участка траектории строятся отдельные уравнения движения, с помощью которых находятся координаты и скорость частицы в любой момент времени  $t$ . Будем рассматривать движение в направлении нормали к плоскости электродов. Реальная траектория движения частицы является случайной, поскольку скорость и ускорение заряженной частицы в каждой точке ее траектории зависят от случайных столкновений с другой заряженной частицей или стенкой емкости, являющейся диэлектриком. Поэтому в каждой точке рассчитывается свой вектор ускорения, который определяется напряженностью электрического поля и используется для расчета скорости в этой точке.

Напряженность электростатического поля определяется как антиградиент потенциала поля  $f$  (см. [2])  $\mathbf{E} = -\operatorname{grad} f$ .

Согласно уравнениям Максвелла,

$$-\operatorname{div} \mathbf{E} = \operatorname{div} \operatorname{grad} f \equiv \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = 0. \quad (1)$$

Таким образом, потенциал  $f$  удовлетворяет уравнению Лапласа в области  $x \in (-d/2, d/2)$ ,  $y \in (0, h)$  (рис. 1) и граничным условиям

$$f(-d/2, y) = q, f(d/2, y) = q_A, f(x, 0) = f(x, h) = 0, \quad (2)$$

где  $q_A$  – заряд на аноде.

Пусть частица достигает второго электрода за время  $T$ , то есть  $t$  изменяется в промежутке от 0 до  $T$ . Рассмотрим промежуток времени  $\Delta t$  настолько малый, чтобы на участке траектории движения частицы от точки  $(x(t), y(t))$  до точки  $(x(t+\Delta t), y(t+\Delta t))$  напряженность  $\bar{\mathbf{E}} = (E_x, E_y)$  можно было приближенно считать постоянной. Тогда приближенная модель закона движения заряженной частицы представляет собой вектор-функцию  $\bar{S}(t) = (S_x(t), S_y(t))$ , где  $S_x(t)$  и  $S_y(t)$  – это квадратичные сплайны, построенные на сетке  $\omega$ :  $t_i = i\Delta t$ ,  $i = 1, \dots, n$ ,  $n = T / \Delta t$ . На каждом промежутке  $[t_i, t_{i+1}]$  вектор-функция  $\bar{S}(t)$  задается функциями [2]:

$$S_x^i(t) = \frac{qE_{xi}}{m} \frac{(t-t_i)^2}{2} + v_{xi}(t-t_i) + S_x^{i-1}(t_i); \quad (3)$$

$$S_y^i(t) = \frac{qE_{yi}}{m} \frac{(t-t_i)^2}{2} + v_{yi}(t-t_i) + S_y^{i-1}(t_i). \quad (4)$$

Если происходит столкновение двух частиц в момент  $t^* \in [t_i, t_{i+1}]$ , летящих со скоростями  $\bar{v}_1(t^*)$  и  $\bar{v}_2(t^*)$ , то траектория первой частицы меняется по следующему закону:



$$S_{1x}(t) = \begin{cases} \frac{qE_x(t_i)}{m} \frac{(t-t_i)^2}{2} + v_{1x}^i(t-t_i) + x_1(t_i), & t_i \leq t < t^*, \\ \frac{qE_x(t_i)}{m} \frac{(t-t^*)^2}{2} + v_{1x}^i(t-t^*) + \frac{qE_x(t_i)}{m} \frac{(t-t_i)^2}{2} + \\ + v_{1x}^i(t-t_i) + x_1(t_i), & t^* \leq t < t_{i+1}; \end{cases} \quad (5)$$

$$S_{1y}(t) = \begin{cases} \frac{qE_y(t_i)}{m} \frac{(t-t_i)^2}{2} + v_{1y}^i(t-t_i) + y_1(t_i), & t_i \leq t < t^*, \\ \frac{qE_y(t_i)}{m} \frac{(t-t^*)^2}{2} + v_{1y}^i(t-t^*) + \frac{qE_y(t_i)}{m} \frac{(t-t_i)^2}{2} + \\ + v_{1y}^i(t-t_i) + y_1(t_i), & t^* \leq t < t_{i+1}. \end{cases} \quad (6)$$

Аналогичным образом изменяется траектория второй частицы:

$$S_{2x}(t) = \begin{cases} \frac{qE_x(t_i)}{m} \frac{(t-t_i)^2}{2} + v_{2x}^i(t-t_i) + x_2(t_i), & t_i \leq t < t^*, \\ \frac{qE_x(t_i)}{m} \frac{(t-t^*)^2}{2} + v_{2x}^i(t-t^*) + \frac{qE_x(t_i)}{m} \frac{(t-t_i)^2}{2} + \\ + v_{2x}^i(t-t_i) + x_2(t_i), & t^* \leq t < t_{i+1}; \end{cases} \quad (7)$$

$$S_{2y}(t) = \begin{cases} \frac{qE_y(t_i)}{m} \frac{(t-t_i)^2}{2} + v_{2y}^i(t-t_i) + y_2(t_i), & t_i \leq t < t^*, \\ \frac{qE_y(t_i)}{m} \frac{(t-t^*)^2}{2} + v_{2y}^i(t-t^*) + \frac{qE_y(t_i)}{m} \frac{(t-t_i)^2}{2} + \\ + v_{2y}^i(t-t_i) + y_2(t_i), & t^* \leq t < t_{i+1}. \end{cases} \quad (8)$$

При ударе частицы о дно электролитической ванны угол падения частицы на стенку будет равен углу отражения от нее. В этом случае траектория движения частицы моделируется следующим образом:

$$S_x(t) = \begin{cases} \frac{qE_x}{m} \frac{t^2}{2} + v_x t + x_0, & t < t^*, \\ \frac{qE_x}{m} \frac{(t-t^*)^2}{2} + v_x(t-t^*) + qE_x \frac{(t^*)^2}{2} + v_x t^* + x_0, & t^* \leq t < t_{i+1}; \end{cases} \quad (9)$$

$$S_y(t) = \begin{cases} \frac{qE_y}{m} \frac{t^2}{2} + v_y t + y_0, & t < t^*, \\ \frac{qE_y}{m} \frac{(t-t^*)^2}{2} - v_y(t-t^*) + qE_y \frac{(t^*)^2}{2} + v_y t^* + y_0, & t^* \leq t < t_{i+1}. \end{cases} \quad (10)$$

В любом из описанных случаев координата  $z$  остается постоянной, то есть  $z = z_0$ .

Данная модель может быть использована не только для моделирования потока катионов металла, но и анионов кислотного остатка. В отличие от катионов металла, анионы кислотного остатка при миграции свободно движутся в электролитической ванне, не осаждаясь на электроды.



## Компьютерное моделирование потока ионов

Ионы меди являются заряженными частицами одного и того же типа и имеют одинаковую массу. Для таких частиц масса не учитывается, и берется равной единице для всех частиц. В начальный момент времени заряженная частица находится в точке  $(0, y_0, z_0)$ . В случае соударения частиц или удара частицы о стенку емкости траектории движения частиц формируются по законам (3)–(10) с  $t = 1$ .

В электролизной ванне электроды расположены параллельно друг другу. При таком расположении электродов  $v_{0x} = 0$ . Начальные координаты  $y_0, z_0$  заряженной частицы моделируются методом Монте – Карло как случайные величины, подчиненные равномерному закону распределения. В силу кинематических уравнений (6), (7) плоского движения частицы при постоянной напряженности электростатического поля первый участок сплайна рассчитывается по формулам (3), (4) при  $i = 1$ .

Далее вычисляются координаты частицы  $(x_1, y_1, z_0)$  в момент  $t = t_1$  и средняя скорость перемещения частицы в точку с этими координатами с помощью (3)–(10). Процесс продолжается до тех пор, пока частица не достигнет границы области моделирования. Когда частица достигает нижней горизонтальной границы области, моделируется ее столкновение с дном емкости. Если в какой-то момент времени координаты двух различных частиц совпадают, то моделируется столкновение частиц. В случае совпадения координат частицы с координатами точки на катоде происходит осаждение.

Область моделирования представляет собой пространство между чередующимися катодами и анодами, заполненное электролитом. Оно окружено стенками и дном ванны, являющимися диэлектриками. Область имеет геометрическую форму параллелепипеда.

Заряд на электродах предполагается распределенным равномерно с одинаковой плотностью, так же как в [2–4]. Потенциалы электродов моделируются в плоскости координат  $x$  и  $y$ , потому что они не зависят от ширины электродов  $z$ . Для расчета потенциала используется пятивточечная разностная схема для задачи (1), (2), построенная на сетке с одинаковым шагом  $h$  по  $x$  и  $y$  [2–4]:

Данная схема является устойчивой. Разностная задача решается методом простых итераций:

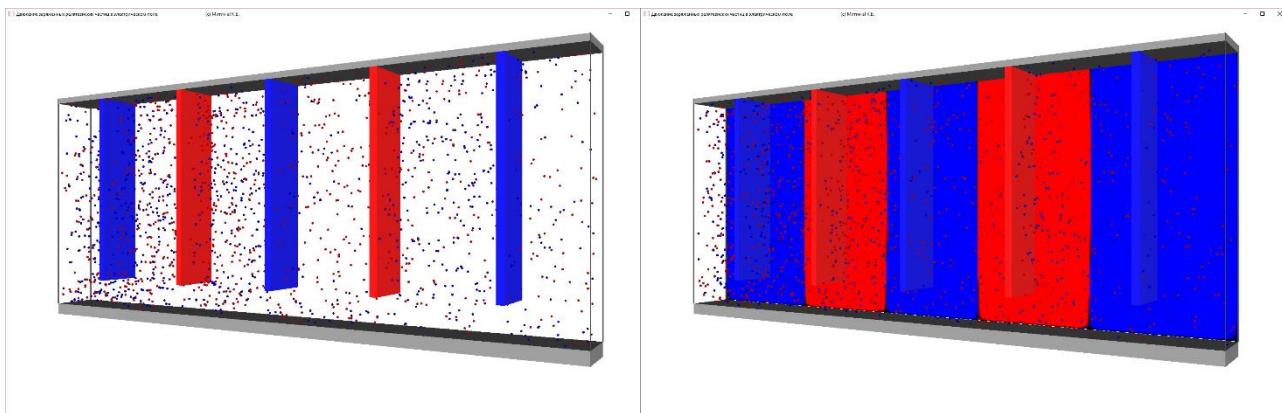
$$f^k(i, j) = \frac{(f^{k-1}(i-1, j) + f^{k-1}(i+1, j) + f^{k-1}(i, j-1) + f^{k-1}(i, j+1))}{4}, k = 1, 2, \dots,$$

где  $i$  – координата узла сетки по оси  $y$ , а  $j$  – по оси  $x$ . После этого элементы массива  $f$  используются для вычисления компонент вектора напряженности, с помощью разностных производных

$$\begin{cases} E_x(i, j) \approx \frac{f(i, j) - f(i, j+1)}{h} \\ E_y(i, j) \approx \frac{f(i, j) - f(i+1, j)}{h} \end{cases},$$

и построения траектории полета заряженных частиц.

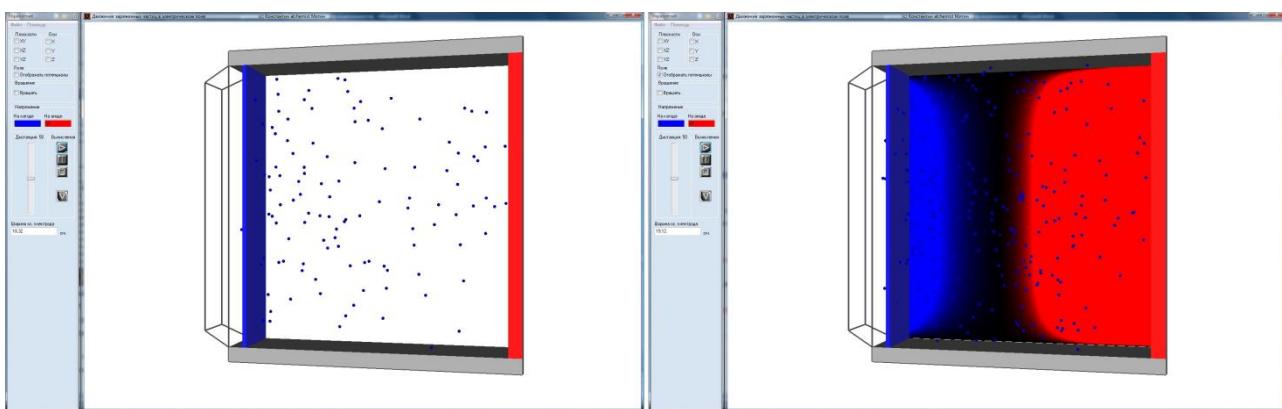
Результаты численного эксперимента приведены на рис. 1, где слева – поток ионов, справа – потенциалы электродов



*Рис. 1. Моделирование потока ионов при электролитическом рафинировании меди  
Fig. 1. Simulation of the ion flux under electrolytic refining of copper*

Математическая модель потока частиц (1)–(10) применима для моделирования процессов газоочистки и проветривания с той лишь разницей, что масса заряженных частиц может быть различна. Численный эксперимент моделирования применительно к процессу газоочистки проводился для электрофильтра ЭГАВ 1-40-9-6-4, который используется на Красноярском цементном заводе (ООО «Красноярский цемент») для очистки отходящих газов.

На рис. 2 представлены результаты компьютерного моделирования потока заряженных частиц в электрофильтре, где слева поток заряженных частиц в электрофильтре, справа потенциалы коронирующего (слева) и осадительного (справа) электродов.



*Рис. 2. Моделирование потока пыли при работе электрофильтра ЭГАВ 1-40-9-6-4  
Fig. 2. Dust flow simulation under the operation of EGAV 1-40-9-6-4 electrostatic precipitator*

Компьютерное моделирование проводилось в специально созданных программах-эмulyаторах [5, 6].

### Заключение

Создан алгоритм, позволяющий применять метод «частиц-в-ячейках» для моделирования потока ионов между анодом и катодом при электролитическом рафинировании. Метод применен для моделирования потоков ионов металла и кислотного остатка в лабораторной установке электролитического рафинирования меди и моделирования потока частиц пыли в электрофильтре ЭГАВ 1-40-9-6-4, проведены численные эксперименты по компьютерному моделированию. Результаты моделирования согласуются с характером процессов.



**Библиографический список**

1. Дамаскин Б.Б., Петрий О.А. Введение в электрохимическую кинетику. М.: Высш. шк., 1983. 400 с.
2. Любanova А.Ш., Митин К.В. Моделирование потока заряженных частиц применительно к процессам газоочистки // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2011. Т. 4. № 6. С. 642–652.
3. Митин К.В., Любanova А.Ш. Моделирование потоков ионов в процессе электролитического рафинирования методом частиц // Фундаментальные исследования. 2012, № 9-3. С. 662–666.
4. Митин К.В. Моделирование потоков ионов в процессе электролитического рафинирования // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2013. Т. 6. № 5. С. 527–533.
5. Lyubanova A.Sh., Mitin K.V. Modeling of the ions streams by the method of particles // Вестник Казахского национального университета. Серия: Математика, механика, информатика. 2015. № 3-3 (86). С. 14–18.
6. Lyubanova A.Sh., Mitin K.V. Modeling of the ions streams by the method of particles // Вычислительные технологии. 2015. Т. 20. С. 14–18.
7. Бабенко К.И. Теоретические основы и конструирование численных алгоритмов задач математической физики. М.: Наука, 1979. 295 с.
8. Березин Ю.А., Вшивков В.А. Метод частиц в динамике разреженной плазмы. Новосибирск: Наука, 1980. 94 с.
9. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. М.: Наука, 1982. 392 с.
10. Белоцерковский О.М. Численное моделирование в механике сплошных сред. М.: Наука, 1984. 518 с.
11. Вшивков В.А., Терехов А.В. О самодействии в методе частиц в ячейках // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. 2008. Т. 9. № 1. С. 48–57.
12. Берендеев Е.А., Боронина М.А., Вшивков В.А., Ефимова А.А. Особенности использования цилиндрической геометрии при решении задач физики плазмы методом частиц в ячейках // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2016): материалы Междунар. науч. конф. (Архангельск, 28 марта – 1 апреля 2016 г.). Архангельск, 2016. С. 442–453.
13. Григорьев Ю.Н., Вшивков В.А., Федорук М.П. Численное моделирование методами частиц-в-ячейках. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. 360 с.
14. А. с. № 2011617891. Программный комплекс «ElectroModels» / К.В. Митин; правообладатель Митин К.В. опубл. 07.10.2011.
15. А. с. № 2012616247. ELECTROMODELSNRCH 1.0. / К.В. Митин, А.Ш. Любanova; опубл. 22.05.2012.

**References**

1. Damaskin B.B., Petry O.A. *Vvedenie v jelektrorohimicheskiju kinetiku* [Introduction to electrochemical kinetics]. Moscow: The higher school Publ., 1983, 400 p. (In Russian).
2. Lyubanova A. Sh., Mitin K.V. Modeling of a stream of charged particles with reference to gas purification processes. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Serija: Tehnika i tehnologii* [SibFU Journal. Engineering and Technologies], 2011, vol. 4, no. 6, pp. 642–652. (In Russian).
3. Mitin K.V., Lyubanova A.Sh. Modeling of the flows of ions in the course of electrolytic refinement by the method of particles. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research]. 2012, no. 9-3, pp. 662–666. (In Russian).
4. Mitin K.V. Modeling of the flows of ions in the course of electrolytic refinement. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research], 2013. vol. 6, no. 5. pp. 527–533. (In Russian).
5. Lyubanova A.Sh., Mitin K.V. Modeling of the ions streams by the method of particles. *Vestnik Kazakhskogo natsional'nogo universiteta. Seriya: Matematika, mehanika, informatika* [The BULLETIN of KAZNU. Mathematics, Mechanics and Informatics Issue], 2015, vol. 20, pp. 14–18. (In Russian).
6. Lyubanova A.Sh., Mitin K.V. Modeling of the ions streams by the method of particles. *Vychislitel'nyye tekhnologii* [Computational technologies], 2015, no. 3-3 (86), pp. 14–18. (In Russian).
7. Babenko K.I. *Teoreticheskie osnovy i konstruirovaniye chislennyh algoritmov zadach matematicheskoy fiziki* [Theoretical bases and designing of numerical algorithms of mathematical physics problems]. Moscow: Science Publ., 1979, 295 p. (In Russian).
8. Berezin Yu.A., Vshivkov V.A. *Metod chastic v dinamike razrezennoj plazmy* [Metod of particles in the dynamics of rarefied plasma]. Novosibirsk: Science Publ., 1980, 94 p. (In Russian).
9. Belocerkovskij O.M., Davydov Yu.M. *Metod krupnyh chastic v gazovoj dinamike* [Metod of large particles in gas dynamics]. Moscow: Science Publ., 1982, 392 p. (In Russian).
10. Belocerkovskij O.M. *Chislennoe modelirovaniye v mehanike sploshnyh sred* [Numerical modeling in the continuum mechanics]. Moscow: Science Publ., 1984, 518 p. (In Russian).
11. Vshivkov V.A., Terekhov A.V. On the self-force in the particle-in-cell method. *Vychislitel'nyye metody i programmirovaniye: novye vychislitel'nyye tekhnologii* [Numerical Methods and Programming: New Computing Technologies], 2008. vol. 9, no. 1, pp. 48–57. (In Russian).
12. Berendeev E.A., Boronina M.A., Vshivkov V.A., Yefimova A.A. *Osobennosti ispol'zovaniya cilindricheskoy geometrii pri reshenii zadach fiziki plazmy metodom chastic v jachejkah* [Application features of cylindrical geometry when solving



- plasma physics problems by the method of particles in cells]. Materialy Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii "Parallel'nye vychislitel'nye tehnologii (PaVT'2016)" [Materials of the International Scientific Conference "Parallel Computing Technologies (PAVT' 2016)", Arkhangelsk, 28 March – 1 April 2016]. Arkhangelsk, 2016, pp. 442–453. (In Russian).
13. Grigoriev YU. N., Vshivkov V.A., Fedoruk M.P. *Chislennoe modelirovanie metodami chastic-v-jachejkah* [Numerical modeling by particle-in-cell methods]. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Science publishing house Publ., 2004, 360 p. (In Russian).
14. Mitin K.V. *Programmnyj kompleks «ElectroModels»* [ElectroModels Program Complex]. Ampere-second RF, no. 2011617891, 2011.
15. Mitin K. V., Lyubanova A. Sh. ELECTROMODEL SNRCH 1.0. Ampere-second. RF, no. 2012616247, 2012.

**Критерии авторства**

Митин К.В. подготовил рукопись и несет ответственность за плагиат.

**Authorship criteria**

Mitin K.V. has prepared the manuscript and bears the responsibility for plagiarism.

**Конфликт интересов**

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest**

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article

УДК 519.862.6

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-101-110>

## МНОЖЕСТВЕННОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И КРИТЕРИЙ СОГЛАСОВАННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ В РЕГРЕССИОННОМ АНАЛИЗЕ

© С.И. Носков<sup>1</sup>, М.П. Базилевский<sup>2</sup>

Иркутский государственный университет путей сообщения,  
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

**РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ.** В регрессионном анализе разработан широкий арсенал методов оценивания неизвестных параметров моделей регрессии. Одним из таких методов является метод множественного оценивания, заключающийся в одновременной минимизации ошибок сразу по двум критериям – методу наименьших модулей и методу антиробастного оценивания. При этом оценки регрессионной модели, полученные с помощью множественного оценивания, определяются неявным образом, что затрудняет работу с ними. Целью данной работы является привлечение критерия согласованности поведения для выделения из множественных оценок единственного вектора параметров. **МЕТОДЫ.** Для достижения цели использованы математические и статистические методы. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** В работе дано краткое описание задачи множественного оценивания регрессионных моделей, представляющей собой задачу линейного программирования. Показано, что этот метод дает неявное представление оценок регрессионных моделей. Для выбора из множества оценок единственного вектора параметров использован критерий согласованности поведения. При этом сформулирована задача множественного оценивания регрессионных моделей с одновременной максимизацией значения критерия согласованности поведения, относящаяся к классу задач линейно-булевого линейного программирования. Представленная методика использована для решения задачи моделирования грузооборота транспорта Красноярской железной дороги. **ВЫВОДЫ.** Сформулированная в работе задача обеспечивает не только паретовость вектора оцениваемых параметров в двухкритериальной задаче оценивания, но и максимальную согласованность в поведении фактических и расчетных значений зависимой переменной.

**Ключевые слова:** регрессионная модель, метод наименьших модулей, метод антиробастного оценивания, метод множественного оценивания, множество Парето, критерий «согласованности поведения».

**Информация о статье.** Дата поступления 21 февраля 2018 г.; дата принятия к печати 3 апреля 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2018 г.

**Формат цитирования.** Носков С.И., Базилевский М.П. Множественное оценивание параметров и критерий согласованности поведения в регрессионном анализе // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 4. С. 101–110. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-101-110

## MULTIPLE PARAMETER ESTIMATION AND BEHAVIOR CONSISTENCY CRITERION IN REGRESSION ANALYSIS

**S.I. Noskov, M.P. Bazilevsky**

Irkutsk State Transport University,  
15, Chernyshevsky St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

**ABSTRACT. PURPOSE.** A wide range of methods for estimating unknown parameters of regression models has been developed in the regression analysis. One of these methods is a multiple estimation method that is based on simultaneous minimization of errors by two criteria – the least absolute deviation method and the method of anti-robust estimation. In this case, the estimates of the regression model obtained through multiple estimation are determined implicitly which makes the work with them difficult. The purpose of this paper is to involve the criterion of behavior consistency in order to identify

<sup>1</sup>Носков Сергей Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры информационных систем и защиты информации, e-mail: sergey.noskov.57@mail.ru

Sergey I. Noskov, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Information Systems and Data Protection, e-mail: sergey.noskov.57@mail.ru

<sup>2</sup>Базилевский Михаил Павлович, кандидат технических наук, доцент кафедры математики, e-mail: mik2178@yandex.ru

Mikhail P. Bazilevsky, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Mathematics, e-mail: mik2178@vandex.ru



a single parameter vector from multiple estimates. **METHODS.** The purpose is achieved through the use of mathematical and statistical methods. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The paper briefly describes the problem of multiple estimation of regression models, which is a linear programming problem. This method is shown to give an implicit representation of estimates of regression models. The criterion of behavior consistency is used to select a single parameter vector from a set of estimates. In this case, the problem of multiple estimation of regression models is formulated with simultaneous maximization of the value of the consistency criterion of behavior, which belongs to the class of problems of linear-boolean linear programming. The presented methodology has been used to solve the problem of Krasnoyarsk Railways freight turnover modeling. **CONCLUSIONS.** The problem formulated in the work provides both the pareiticity of the estimated parameter vector in the two-criteria estimation problem and the maximum consistency in the behavior of the actual and calculated values of the dependent variable.

**Keywords:** regression model, least absolute deviation method, method of anti-robust estimation, multiple estimation method, Pareto set, criterion of behavior consistency

**Information about the article.** received February 21, 2018; accepted for publication April 3, 2018; avail-able online April 30, 2018.

**For citation.** Noskov S.I., Bazilevsky M.P. Multiple parameter estimation and behavior consistency criterion in regression analysis. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 4, pp. 101–110. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-101-110

## Введение

В регрессионном анализе задача оценивания параметров модели регрессии является одной из ключевых. Для ее решения разработан широкий арсенал методов. Самым распространенным из них является метод наименьших квадратов (МНК) [1, 2], суть которого состоит в минимизации суммы квадратов ошибок. Эффективность МНК резко снижается, когда обрабатываемая выборка содержит так называемые выбросы. В этом случае можно использовать метод наименьших модулей (МНМ) [3, 4], который позволяет получать робастные оценки, т.е. менее чувствительные, чем МНК-оценки, к выбросам. В определенном смысле противоположным по отношению к МНМ является метод антиробастного оценивания (МАО) [5, 6], который следует применять тогда, когда исследователь убежден в уникальности

каждого наблюдения выборки и когда длина ее сильно ограничена. Оценки МНМ и МАО находятся с помощью решения задач линейного программирования. В работах [7, 8] предложен метод множественного оценивания параметров линейной регрессии, заключающийся в совместном использовании двух критериев, соответствующих МНМ и МАО. Решением этой многокритериальной задачи является модель, в которой параметры определяются неявным образом, поэтому работать с такой регрессией трудно. Для выделения из множества оценок единственного вектора параметров необходимо привлечь, например, какой-либо дополнительный критерий адекватности регрессионной модели. В данной работе в качестве такого критерия выступает критерий согласованности поведения [9–12].

## Множественное оценивание

Рассмотрим линейное регрессионное уравнение:

$$y_i = \alpha_0 + \sum_{j=1}^m \alpha_j x_{ij} + \varepsilon_i, \\ i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где  $y$  – объясняемая (зависимая), а  $x_i$  –  $i$ -я объясняющая (независимая) переменная;

$\alpha_i$  –  $i$ -й подлежащий оцениванию параметр;  $\varepsilon$  – ошибки аппроксимации,  $i$  – номер наблюдения,  $n$  – число наблюдений (объем выборки).

В работе [7] поставлена задача множественного оценивания параметров уравнения (1) с векторной функцией потерь  $J(\alpha) = (J_1(\alpha), J_\infty(\alpha))$ . При этом первая ее



компоненты соответствует методу наименьших модулей, игнорирующему выбросы, а вторая – методу антиробастного оценивания, сильно к ним тяготеющему.

В [7] показано, что такая задача сводится к многокритериальной задаче линейного программирования (МЛП) с  $2(n+m)+1$  переменными и  $2n$  ограничениями:

$$y = X\alpha^1 - X\alpha^2 + u - v, \quad (2)$$

$$u_i + v_i - r \leq 0, \quad i = \overline{1, n}, \quad (3)$$

условиями неотрицательности переменных

$$\alpha^1 \geq 0, \quad \alpha^2 \geq 0, \quad u \geq 0, \quad v \geq 0 \quad (4)$$

и векторной целевой функцией

$$J(\alpha) = \left( \sum_{i=1}^n (u_i + v_i), r \right). \quad (5)$$

Обозначим через  $Z \subset R^{2(n+m)+1}$  множество векторов  $z = (\alpha^1, \alpha^2, u, v, r)$ , удовлетворяющих ограничениям (2)–(5), а через  $P \subseteq Z$  – множество Парето в задаче МЛП.

Для его построения можно воспользоваться разработанным авторами многокритериальным симплекс-методом [13], основанном на факте:

$$z^0 \in P \Leftrightarrow J^0 = 0, \quad (6)$$

где

$$J^0 = d_1 + d_\infty \rightarrow \max_{\tilde{Z}}, \quad (7)$$

$$\tilde{Z} = \{(z, d) \mid z \in Z, J_s(z) + d_s \leq J_s(z^0), d_s \geq 0, s = 1, \infty\}.$$

В работе [13] предлагается два способа формирования множества паретовских вершин  $P^*$  многогранника  $Z$  в многокритериальной линейной задаче (2)–(5). Первый основан на многокритериальном симплекс-методе, а второй – на переборе узлов рав-

номерной сети на интервале (0,1) при построении свертки частных критериев

$$J_\gamma(z) = \gamma J_1(z) + (1-\gamma) J_\infty(z), \quad \gamma \in (0,1).$$

Упорядочим по возрастанию одной из компонент (например, первой) значения элементов множества образов паретовских вершин симплекса  $Z$  в критериальном пространстве  $J(P^*) = (J^1, J^2, \dots, J^g)$ .

Множество Парето в критериальном пространстве  $J(P)$  является объединением ребер  $S$ , соединяющих соседние паретовские вершины симплекса  $J(Z)$ :

$$J(P) = \bigcup_{j=1}^{g-1} S(J^j, J^{j+1}). \quad (8)$$

Прообразами ребер  $S(J^j, J^{j+1})$  являются множества векторов  $z \in Z$ , удовлетворяющие ограничениям:

$$\sum_{k=1}^n (u_k + v_k) = \lambda J_1^j + (1-\lambda) J_1^{j+1}, \quad (9)$$

$$r = \lambda J_\infty^j + (1-\lambda) J_\infty^{j+1}, \quad j = \overline{1, g-1}, \quad (10)$$

$$0 \leq \lambda \leq 1. \quad (11)$$

Обозначим через  $C^j$  множество векторов  $z \in R^{2(n+m)+1}$ , удовлетворяющих ограничениям (2)–(4), (9)–(11). Тогда множество  $P$  представимо в виде

$$P = \bigcup_{j=1}^{g-1} C^j. \quad (12)$$

В качестве вектора параметров  $\alpha$  регрессионного уравнения (1) можно принять любой вектор

$$\alpha = (z_1 - z_{m+1}, \quad z_2 - z_{m+2}, \dots, z_m - z_{2m}) \quad \text{при } z \in P.$$

Безусловно, с такой формой задания модели, в которой параметры определены



неявным образом, работать трудно. Поэтому в [8] представлены некоторые конструктивные приемы, облегчающие эту работу: точечная характеристизация множества Парето, построение множества  $A$  и др.

Способ точечной характеристизации множества Парето [8] позволяет оперировать не со всем множеством, а с неким его «полномочным представителем». Таким представителем может быть, например, центр тяжести  $J^0 = \frac{1}{g} \sum_{i=1}^g J^i$  множества  $J(P)$ . Очевидно, что  $J^0$  не будет являться паретовской точкой многогранника  $J(P)$ . Для определения точки  $J^*$ , максимально улучшающей  $J^0$  по обоим критериям одновременно, необходимо воспользоваться программой отсутствия мажорирования [7]. Решение этой задачи  $z^*$  и будет являться искомой точечной характеристизацией множества  $P$ .

Множество  $A = \{\alpha \in R^m \mid \alpha_i \in [\underline{\alpha}_i, \bar{\alpha}_i]\}$

[8], которому гарантированно будут принадлежать вектора  $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_m)^T$  с компонентами  $\alpha_i = z_i - z_{i+m}$ ,  $i = \overline{1, m}$ , представляет собой параллелепипед в  $m$ -мерном пространстве, в который вписана проекция  $\bar{P}$

множества  $P$  на  $R^m$ . Очевидно, что справедливы равенства  $\underline{\alpha}_i = \underline{\alpha}_i^1 - \bar{\alpha}_i^2$ ,  $\bar{\alpha}_i = \bar{\alpha}_i^1 - \underline{\alpha}_i^2$ , где  $\underline{\alpha}_i^1$ ,  $\underline{\alpha}_i^2$  и  $\bar{\alpha}_i^1$ ,  $\bar{\alpha}_i^2$  – соответственно минимально и максимально возможные значения положительных и отрицательных частей компонент вектора оцениваемых параметров. Для построения множества  $A$  необходимо для каждого параметра  $\alpha_i$  решить  $2(g-1)$  следующих задач ЛП:

$$\underline{\alpha}_i^j = \min_{z \in C^j} (\alpha_i^1 - \alpha_i^2),$$

$$\bar{\alpha}_i^j = \max_{z \in C^j} (\alpha_i^1 - \alpha_i^2),$$

$$j = \overline{1, g-1}.$$

Тогда  $\underline{\alpha}_i$  и  $\bar{\alpha}_i$  определяются по формулам:

$$\underline{\alpha}_i = \min_{j=1, g-1} \underline{\alpha}_i^j, \quad \bar{\alpha}_i = \max_{j=1, g-1} \bar{\alpha}_i^j.$$

Для выделения из множества  $P$  единственного вектора параметров необходимо привлечь некие дополнительные соображения, например, «подключить» еще какой-то критерий адекватности регрессионных моделей. Сделать это можно следующим образом.

### Множественное оценивание и критерии согласованности поведения

Существует важный аспект в оценке качества статистических зависимостей, не связанный напрямую с точностью аппроксимации, а отражающий степень согласованности в характере изменения (поведении) расчетных и фактических значений зависимости переменной на различных наблюдениях выборки. В работах [10, 12] предложены некоторые способы формализации отражающего этот аспект критерия «согласованность поведения»  $\Phi(\alpha)$  и корректировки оценок параметров регрессий на его основе.

Представим уравнение (1) в виде

$$y_i = \hat{y}_i + \varepsilon_i, \quad i = \overline{1, n},$$

где  $\hat{y}_i$  – расчетное  $i$ -е значение зависимой переменной. Тогда  $\Phi(\alpha)$  можно представить в виде

$$\Phi(\alpha) = \sum_{i=1}^{n-1} \text{sign}(y_{i+1} - y_i) \text{sign}(\hat{y}_{i+1} - \hat{y}_i). \quad (13)$$

Единственность вектора параметров, принадлежащих множеству Парето  $P$ , достигается решением задачи



$$\frac{1}{n} J_1(\alpha) + J_\infty(\alpha) - M\Phi(\alpha) \rightarrow \min, \alpha \in P, \quad (14)$$

с заранее выбранным числом  $M$ .

Присутствие в (14) первых двух компонент вызвано тем, что максимальная согласованность поведения может достигаться на множестве векторов из  $P$ .

В связи с наличием в (14) операции sign введем в рассмотрение булевые переменные  $\sigma_j$  следующим образом:

$$\sigma_j = \begin{cases} 1, & \text{sign}[(y_{j+1} - y_j)(\hat{y}_{j+1} - \hat{y}_j)] = 1, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Тогда задача (14) эквивалентна задаче линейно-булевого программирования (ЛБП) с ограничениями (2)–(4), (9)–(11), а также

### Моделирование грузооборота транспорта Красноярской железной дороги

Железнодорожный транспорт является важнейшей отраслью страны, играющей роль в ее успешном развитии. Он представляет собой исключительно сложную для анализа многоуровневую иерархическую неоднородную систему, управление которой представляет собой весьма сложную задачу, требующую успешного решения. Моделирование грузооборота железнодорожного транспорта по Красноярской железной дороге (КЖД) с помощью разработанной методики множественного оценивания регрессионных моделей осуществлялось по статистической информации из работ [14, 15] за период с 2000 г. по 2015 г. по следующим показателям:  $y$  – грузооборот, млн т км;  $x_1$  – прием порожних вагонов, штук;  $x_2$  – динамическая нагрузка, т. км / км;  $x_3$  – среднесуточный пробег локомотива, км;  $x_4$  – эксплуатируемый парк локомотивов, штук;  $x_5$  – техническая скорость, км / час;  $x_6$  – рабочий парк вагонов дороги, штук;  $z$  – провозная способность железнодорожной линии, млн т км.

$$(y_{k+1} - y_k) \sum_{j=1}^m \alpha_j (x_{k+1,j} - x_{kj}) + \\ + N\sigma_k \geq N + \delta, \quad k \in K, \quad (15)$$

$$\sigma_k \in \{0,1\}, \quad k \in K, \quad (16)$$

и целевой функцией

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_i + v_i) + r - M \sum_{j \in K} \sigma_j \rightarrow \min, \quad (17)$$

где  $N$  – заранее выбранное большое отрицательное число,  $K = \{1, 2, \dots, n-1\} \setminus K_0$ , где  $K_0 = \{k \mid |y_{k+1} - y_k| < \delta\}$ ,  $\delta$  – малая положительная константа. Смысл ее введения состоит в задании меры «безразличия» между близкими значениями зависимой переменной.

### Моделирование грузооборота транспорта Красноярской железной дороги

Переменная  $y$  является эксплуатационным показателем, определяющим функционирование КЖД в смысле грузовой работы; переменные  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$  и  $x_6$  являются управляющими факторами, т.е. поддающимися регулированию со стороны руководства дорогой; переменная  $z$  является внешним показателем, не поддающимся оперативному регулированию на местном уровне. Коэффициент корреляции переменной  $y$  с переменной  $x_1$  равен 0,937; с  $x_2$  – 0,803; с  $x_3$  – 0,429; с  $x_4$  – 0,942; с  $x_5$  – 0,755; с  $x_6$  – 0,856; с  $z$  – 0,709.

Оцененная с помощью МНМ линейная регрессионная модель переменной  $y$  от переменных  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, z$  имеет вид:

$$y = -124868 + 2,808x_1 - 193,798x_2 + \\ + 30,703x_3 + 131,48x_4 + 1636,47x_5 + \\ + 0,222x_6 + 45999,5z. \quad (18)$$

Для этой регрессии сумма модулей

остатков  $J_1 = 16868,96$ , максимальный абсолютный остаток  $J_\infty = 6440,35$ , а критерий согласованности поведения  $\Phi = 10$  при своем максимальном значении 14. Такое значение критерия  $\Phi$  говорит о несогласованности двух знаков приращений фактических и расчетных значений зависимой переменной  $y$ .

Для построения множества Парето  $J(P^*)$  и точечной характеристизации множества  $P$  был использован программный комплекс МОРМ (Множественное Оценивание Регрессионных Моделей) [16]. Множество Парето  $J(P^*)$ , состоящее из 11 вершин, представлено в табл. 1.

Множество Парето в критериальном пространстве с обозначением ребер представлено на рис. 1.

Точечная характеристизация множества  $P$  имеет вид:

$$y = -63542,438 + 2,888x_1 - 391,157x_2 + \\ + 88,365x_3 + 133,445x_4 + 368,02x_5 + \\ + 0,404x_6 + 8823,999z. \quad (19)$$

Для этой регрессии  $J_1 = 18838,6$ ,  $J_\infty = 2961,48$ ,  $\Phi = 10$ . По значениям критерии  $J_1$  и  $J_\infty$  видно, что модель (18) ближе в критериальном пространстве к точке 11, а модель (19) – к точке 6.

Множество  $A$  имеет вид:

$$\begin{aligned} \alpha_0 &\in [-124900; -53770], \\ \alpha_1 &\in [2,099; 6,969], \\ \alpha_2 &\in [-753,5; 192,3], \\ \alpha_3 &\in [24,33; 88,36], \\ \alpha_4 &\in [92,06; 158,5], \\ \alpha_5 &\in [-533,6; 1636], \\ \alpha_6 &\in [0,155; 0,408], \\ \alpha_7 &\in [8765; 67330]. \end{aligned}$$

Таблица 1  
Паретовские вершины

Table 1

Pareto peaks

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$J_1$	23350	22980	22770	19160	19050	18810	18460	17700	17480	17060	16870
$J_\infty$	2185	2205	2220	2804	2835	2952	3394	4421	4877	5848	6440

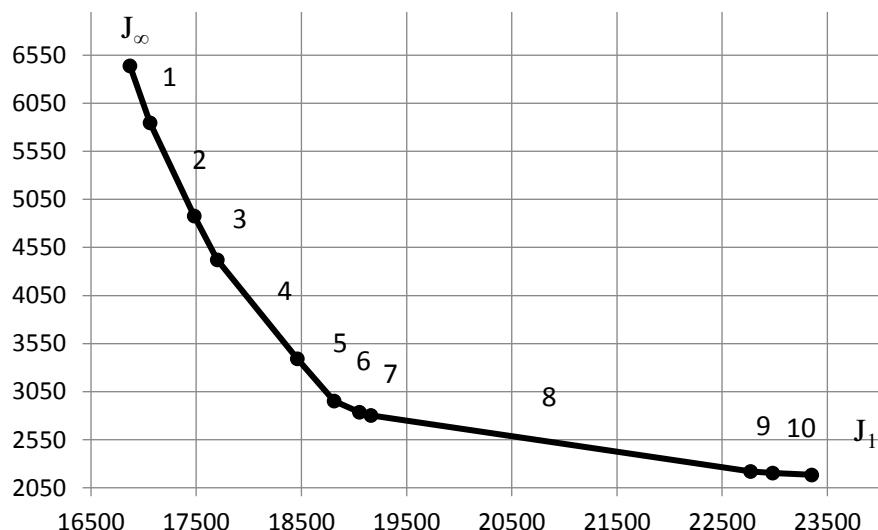


Рис. 1. Множество Парето  
Fig. 1. Pareto set



По этим промежуткам можно судить о значимости коэффициентов регрессии (по аналогии с доверительными интервалами для параметров модели). Так как промежутки для коэффициентов  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_6, \alpha_7$  не содержат гипотетических значений, равных нулю, то такие коэффициенты следует признать значимыми. Тогда параметры  $\alpha_2$  и  $\alpha_5$  являются незначимыми. Это, возможно, является причиной того, что в моделях (18) и (19) оценки параметров при переменной  $x_2$  оказались отрицательными, что противоречит явлению положительной корреляции между переменными  $y$  и  $x_2$ .

Решение задачи линейно-булевого программирования (2)–(4), (9)–(11), (15)–(17) осуществлялось вручную в пакете LP Solve. При этом задавались следующие параметры:

- точность целого числа  $\Delta = 10^{-7}$ ;
- большое положительное число  $M = 1000$ ;
- большое отрицательное число  $N = -1000000000$ ;
- малое число  $\delta = 0,001$ .

Результаты моделирования представлены ниже.

Ребро 1:

$$y = -111774,56 + 3,555x_1 - 305,655x_2 + \\ + 27,469x_3 + 138,328x_4 + 1282,659x_5 + \quad (20) \\ + 0,188x_6 + 56820,245z,$$

значение целевой функции

$$C = -5723,5, \lambda = 0,493, \\ J_1 = 17002,86, J_\infty = 6147,08, \Phi = 12.$$

Ребро 2:

$$y = -86986,26 + 4,5x_1 - 584,931x_2 + \\ + 32,351x_3 + 150,649x_4 + 878,265x_5 + \quad (21) \\ + 0,166x_6 + 57652,56z,$$

$$C = -6483,26, \lambda = 0,497, \\ J_1 = 17338,08, J_\infty = 5374,82, \Phi = 12.$$

Ребро 3:

$$y = -106160 + 2,237x_1 - 400,529x_2 + \\ + 48,665x_3 + 151,28x_4 + 1413,93x_5 + \quad (22) \\ + 0,242x_6 + 28104,65z,$$

$$C = -7117,93, \lambda = 0,616, J_1 = 17636,94, \\ J_\infty = 4711,73, \Phi = 12.$$

Ребро 4:

$$y = -110836,422 + 0,879x_1 + \\ + 172,818x_2 + 81,373x_3 + 110,288x_4 + \quad (23) \\ + 1101,473x_5 + 0,455x_6 + 5836,76z,$$

$$C = -8526,146, \lambda = 0,829, J_1 = 18353,86, \\ J_\infty = 4233,21, \Phi = 14.$$

Ребро 5:

$$y = -110127,2 + 0,0997x_1 + \\ + 215,294x_2 + 83,343x_3 + 122,872x_4 + \quad (24) \\ + 898,777x_5 + 0,44x_6 + 9663,21z,$$

$$C = -8407,585, \lambda = 0,867, \\ J_1 = 18766,52, J_\infty = 3337,26, \Phi = 12.$$

Ребро 6:

$$y = -60108,318 + 2,796x_1 - \\ - 260,368x_2 + 85,433x_3 + 131,29x_4 + \quad (25) \\ + 89,52x_5 + 0,398x_6 + 16871,427z,$$

$$C = -7837,777, \lambda = 0,503, \\ J_1 = 18966,52, J_\infty = 2917,93, \Phi = 10.$$

Ребро 7:

$$y = -68268 + 2,193x_1 + 37,144x_2 + \\ + 82,766x_3 + 125,149x_4 - 120,6x_5 + \quad (26) \\ + 0,406x_6 + 26481,085z,$$

$$C = -7899,924, \lambda = 0,514, \\ J_1 = 19115,39, J_\infty = 2833,88, \Phi = 10.$$

Ребро 8:

$$y = -80933,99 + 2,963x_1 + 193,117x_2 + \\ + 77,712x_3 + 101,638x_4 + 16,448x_5 + \quad (27) \\ + 0,476x_6 + 34509,83z,$$

$$C = -10007,555, \lambda = 0,591, \\ J_1 = 21291,35, J_\infty = 2569,98, \Phi = 14.$$

Ребро 9:

$$y = -55135,228 + 6,923x_1 + 153,749x_2 + \\ + 65,686x_3 + 98,936x_4 - 510,806x_5 + \quad (28) \\ + 0,364x_6 + 41391,132z,$$

$$C = -9255,246, \lambda = 0,487, \\ J_1 = 22857,71, J_\infty = 2225,17, \Phi = 12.$$

Ребро 10:

$$y = -60127,435 + 6,747x_1 + 177,59x_2 + \\ + 66,02x_3 + 94,699x_4 - 415,637x_5 + \quad (29) \\ + 0,388x_6 + 41643,67z,$$

$$C = -9252,75, \lambda = 0,504, \\ J_1 = 23170,39, J_\infty = 2197,62, \Phi = 12.$$

Как видно, в регрессионных моделях (23) и (27) значение критерия согласованности поведения максимально и равно 14. По нашему мнению, на практике лучше воспользоваться моделью (23), поскольку в целом она имеет лучшие аппроксимационные качества (по критерию  $J_1$ ), чем регрессия (27). При этом, сравнивая модель (23) с регрессией (18), оцененной по-обычному МНМ, можно сказать, что согласованность модели (23) хоть и увеличилась, но при этом ее качество снизилось существенно: с  $J_1 = 16868,96$  до  $J_1 = 18353,86$ . А сравнивая модель (23) с точечной характеристизацией (19) можно сделать вывод, что регрессия (23) лучше уравнения (19) сразу по двум критериям:  $J_1$  и  $\Phi$ .

Графики фактических и расчетных по модели (23) значений зависимой переменной  $y$  представлены на рис. 2.

На рис. 2 сплошной линией обозначен график фактических значений переменной  $y$ , а пунктиром – расчетных. По этим графикам четко прослеживается полная согласованность фактической и расчетной траекторий изменения зависимой переменной  $y$ .

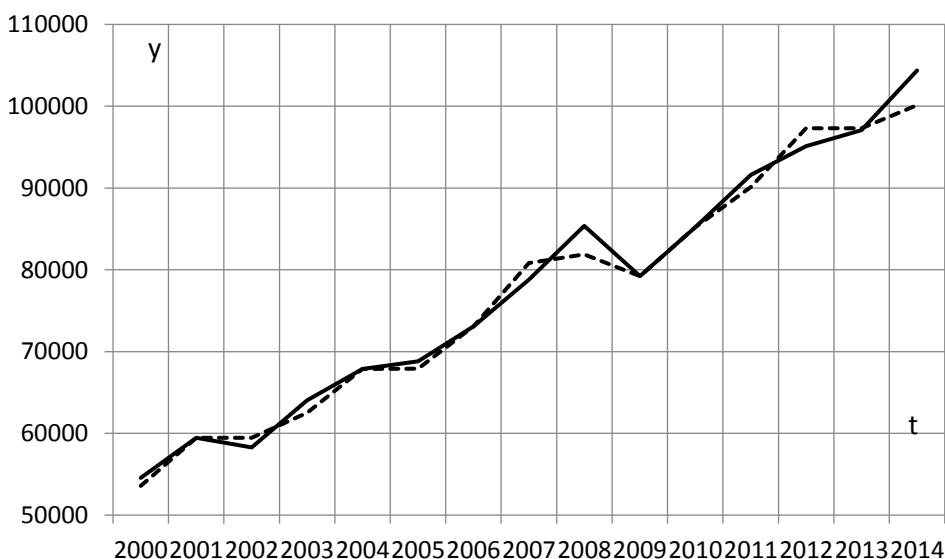


Рис. 2. График фактических и расчетных значений грузооборота  
Fig. 2. Graph of actual and estimated values of freight turnover



## Заключение

Таким образом, решение задачи ЛБП (2)–(4), (9)–(11), (15)–(17) обеспечивает не только паретовость вектора оцениваемых параметров в двухкритериальной задаче

оценивания, но и максимальную согласованность в поведении фактических и расчетных значений зависимой переменной.

## Библиографический список

1. Айвазян С.А. Методы эконометрики. М.: Магистр: ИНФРА-М, 2010. 512 с.
2. Магнус, Я.Р. Эконометрика. Начальный курс. М.: Дело, 2004. 576 с.
3. Bloomfield P. Least absolute deviations: theory, applications, and algorithms / P. Bloomfield, W.L. Steiger. Birkhauser, 1983. Р. 364.
4. Мудров В.И., Кушко В.Л. Метод наименьших модулей. М.: Знание, 1971. 60 с.
5. Демиденко, Е.З. Линейная и нелинейная регрессии. М.: Финансы и статистика, 1981. 304 с.
6. Wagner H.M. Linear programming techniques for regression analysis. JASA, 1959. Vol. 54. No. 285.
7. Носков С.И. Технология моделирования объектов с нестабильным функционированием и неопределенностью в данных. Иркутск: РИЦ ГП «Облинформпечат», 1996. 321 с.
8. Носков С.И., Баенхаева А.В. Множественное оценивание параметров линейного регрессионного уравнения // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 3. С. 133–138.
9. Носков С.И. Коррекция параметров регрессионных уравнений по критерию «согласованности поведения» // Материалы Всесоюзной конф. «Информатизация и моделирование территориальных социально-экономических объектов». Тезисы докл. Ч. 2. (г. Новосибирск, 4–6 декабря 1990 г.). Новосибирск, 1990. С. 12–14.
10. Носков С.И. Построение эконометрических зависимостей с учетом критерия «согласованности поведения» // Кибернетика и системный анализ. 1994. № 1. С. 177–180.
11. Базилевский М.П., Носков С.И. Программный комплекс построения линейной регрессионной модели с учетом критерия согласованности поведения фактической и расчетной траекторий изменения значений объясняемой переменной // Вестник ИрГТУ. Иркутск, 2017. Т. 21. № 9. С. 37–44. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-9-37-44>
12. Носков С.И. Критерий «согласованность поведения» в регрессионном анализе // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. № 1. С. 107–111.
13. Yu, L. The set of all nondominated solutions in linear cases and multicriteria simplex method / L. Yu, M. Zeleny // J. of Math. Anal. and Applic. 1975. Vol. 49. P. 430–468.
14. Базилевский М.П. Среднесрочное прогнозирование эксплуатационных показателей функционирования Красноярской железной дороги / М.П. Базилевский, И.П. Врублевский, С.И. Носков, И.С. Яковчук // Фундаментальные исследования. Москва, 2016. № 10(3). С. 471–476.
15. Носков С.И., Врублевский И.П., Носков С.И., Яковчук И.С. Регрессионная модель динамики эксплуатационных показателей функционирования железнодорожного транспорта // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 2. С. 192–197.
16. Баенхаева А.В., Базилевский М.П., Носков С.И. Программный комплекс множественного оценивания регрессионных моделей // Информационные технологии и проблемы математического моделирования сложных систем. 2016. № 17. С. 42–47.

## References

1. Ajvazjan S.A. *Metody jekonometriki. Magistr* [Methods of Econometrics]. Moscow: INFRA-M Publ., 2010. 512 p.
2. Magnus Ja.R. *Jekonometrika. Nachal'nyj kurs* Magnus [Econometrics. Introductory course]. Moscow: Business Publ., 2004. 576 p.
3. Bloomfield P. Least absolute deviations: theory, applications, and algorithms / P. Bloom-field, W.L. Steiger. Birkhauser, 1983, pp. 364.
4. Mudrov V.I. *Metod naimen'shih modulei* [Method of Least Modules]. Moscow: Knowledge Publ., 1971, 60 p.
5. Demidenko E.Z. *Linejnaja i nelinejnaja regressii* [Linear and nonlinear regressions]. Moscow: Finance and Statistics Publ., 1981, 304 p.
6. Wagner H.M. Linear programming techniques for regression analysis. JASA, 1959, vol. 54, no. 285.
7. Noskov S.I. *Tehnologija modelirovaniya ob'ektov s nestabil'nym funkcionirovaniem i neopredelennostju v dannyh* [Modeling technology for objects with unstable operation and data uncertainty]. Irkutsk: RIC GP «Oblinformpechat» Publ., 1996, 321 p.
8. Noskov S.I. Multiple estimation of parameters for the linear regression equation. *Sovremennye tehnologii. Systemnyj analiz. Modelirovaniye* [Modern technologies. System analysis. Modeling], 2016, no. 3, pp. 133–138.
9. Noskov S.I. *Korrekcija parametrov regressionnyh uravnenij po kriteriju «sogla-sovannosti povedenija»* [Correction of regression equation parameters by the cri-



terion of the "consistency of behavior"]. *Materiali Vsesoiuznoi konferensii "Informatizacija i modelirovanie territorial'nyh social'no-ekonomiceskikh ob'ektor"* [Proceedings of the All-Russia Conference "Informatization and Modeling of Territorial Socio-Economic Objects" Novosibirsk, 4–6 December 1990]. Novosibirsk, 1990, pp. 12–14.

10. Noskov S.I. Construction of econometric dependences taking into account the criterion of "consistency of behavior". *Kibernetika i sistemnyj analiz* [Cybernetics and system analysis]. 1994, no. 1, pp. 177–180.

11. Bazilevskij M.P. Program complex for linear regression model construction considering behavior consistency criterion of actual and calculated trajectories of explained variable value change. [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. Irkutsk, 2017, vol. 21, no. 9, p. 37–44. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-9-37-44>

12. Noskov S.I. The criterion of «consistency of behavior» in the regression analysis. *Sovremennye tehnologii*.

*Sistemnyj analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling], 2013, no. 1, pp. 107–111.

13. Yu L., Zeleny M. The set of all nondominated solutions in linear cases and multicriteria simplex method J. of Math. Anal. and Applic, 1975, vol. 49, pp. 430–468.

14. Bazilevskij M.P., Vrublevskij I.P., Noskov S.I., Jakovchuk I.S. Medium-term forecasting of performance indicators of functioning of Krannoyarsk railway. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental Research], 2016, № 10 (3), pp. 471–476.

15. Noskov S.I. Railway transport functioning the regression model performance indicators dynamics. *Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling], 2016, no. 2, pp. 192–197.

16. Baenhaeva A.V., Bazilevskij M.P., Noskov S.I. Programmatic complex of multiple estimation of regression models. *Informacionnye tehnologii i problemy matematicheskogo modelirovaniya slozhnyh system* [Information technologies and problems of complex system mathematical modeling], 2016, Issue. 17, pp. 42–47.

#### Критерии авторства

Носков С.И., Базилевский М.П. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за plagiat.

#### Authorship criteria

Noskov S.I., Bazilevskij M.P. have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.331

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-111-121>

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ, СОЗДАВАЕМЫХ ПОДЗЕМНОЙ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИЕЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

© Н.В. Буякова<sup>1</sup>, В.П. Закарюкин<sup>2</sup>, А.В. Крюков<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ангарский государственный технический университет,  
665835, Российская Федерация, г. Ангарск, ул. Чайковского, 60.

<sup>2,3</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения,  
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

<sup>3</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

**РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ.** Разработка методов и средств адекватного моделирования магнитных полей вблизи трасс кабельных линий подземной прокладки. **МЕТОДЫ.** Для анализа магнитного поля определялись режимы электроэнергетических систем (ЭЭС) на основе фазных координат, в образование которых положены модели элементов в виде решетчатых схем замещения с полно связной топологией. Эти модели и методы реализованы в программном комплексе Fazonord-APC, обеспечивающем моделирование режимов ЭЭС, а также определение напряженности электромагнитного поля, которое создается воздушными или кабельными линиями электропередачи. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В статье представлены результаты расчета магнитных полей, создаваемых высоковольтной кабельной линией, смонтированной в траншее на глубине в один метр. Линия выполнена одножильными экранированными кабелями с изоляцией из молекулярно спирального полиэтилена. При расчетах рассмотрены различные способы заземления и соединения экранов кабелей. Полученные результаты показали, что различные способы заземления экранов не оказывают существенного влияния на величину напряженности магнитного поля, но при заземлении экранов на отправном конце линии и соединении их на приемном уровне напряженности магнитного поля несколько больше остальных вариантов заземления. Напряженность магнитного поля не превышает допустимых пределов для электротехнического персонала, но незначительно превосходит допустимую норму для селитебных территорий. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** На основе методов моделирования режимов и электромагнитных полей, предложенных в ИрГУПСе, реализована методика оценки условий электромагнитной безопасности вблизи трасс высоковольтных кабельных линий.

**Ключевые слова:** электроэнергетические системы, кабельные линии высокого напряжения, моделирование магнитных полей.

**Информация о статье.** Дата поступления 19 февраля; дата принятия к печати 14 марта; дата онлайн-размещения 30 апреля 2018 г.

**Формат цитирования.** Буякова Н.В., Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование магнитных полей, создаваемых подземной кабельной линией электропередачи // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 4. С. 111–121. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-111-121

<sup>1</sup>Буякова Наталья Васильевна, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий, e-mail: bn\_900@mail.ru

Natalia V. Buyakova, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Power Supply of Industrial Enterprises, e-mail: bn\_900@mail.ru

<sup>2</sup>Закарюкин Василий Пантелеимонович, доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики транспорта, e-mail: zakar49@mail.ru

Vasily P. Zakaryukin, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Transport Electric Engineering, e-mail: zakar49@mail.ru

<sup>3</sup>Крюков Андрей Васильевич, доктор технических наук, академик, член-корреспондент, заслуженный энергетик, профессор кафедры электроснабжения и электротехники; профессор кафедры электроэнергетики транспорта, e-mail: and\_kryukov@mail.ru

Andrey V. Kryukov, Doctor of technical sciences, Academician, Corresponding member, Honoured Power Engineer, Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Professor of the Department of Transport Electric Engineering, e-mail: and\_kryukov@mail.ru



## MODELING UNDERGROUND CABLE POWER LINE MAGNETIC FIELDS

N.V. Buyakova, V.P. Zakaryukin, A.V. Kryukov

Angarsk State Technical University,  
60, Tchaikovsky St., Angarsk, 665835, Russian Federation  
Irkutsk State Transport University,  
15, Chernyshevsky St., Irkutsk, 664074, Russian Federation  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

**ABSTRACT.** The **PURPOSE** of the paper is to develop the methods and means for adequate modeling of magnetic fields close to underground cables. **METHODS.** The analysis of a magnetic field involves the determination of electric power system (EPS) modes based on phase coordinates with the application of element models in the form of meshed equivalent circuits with a fully-meshed topology. These models and methods are implemented in the software package Fazonord-APC ensuring modeling of electric power system (EPS) modes and determination of the strengths of the electromagnetic field generated by overhead or cable transmission lines. **RESULTS.** The paper presents the calculation results of magnetic fields generated by high-voltage cable lines laid in a trench at the depth of one meter. The line is represented by single-core screened conductors with CLPE insulation. Different methods of conductor screens grounding and connection have been considered. The obtained results demonstrate that different methods of screen grounding do not have any significant effect on the strengths of a magnetic field whereas the strengths of the magnetic field grow a little in the case if the screens are grounded at the sending end of the line and connected at the receiving end. The strength of the magnetic field does not exceed permissible limits set for electrical personnel but exceeds insignificantly the permissible norm for residential territories. **CONCLUSION.** Using the modeling methods of modes and electromagnetic fields proposed by Irkutsk State Transport University the evaluation methodology of electromagnetic safety conditions close to high voltage cable transmission lines has been implemented.

**Keywords:** electric power systems (EPS), high voltage cable lines, magnetic field modeling

**Information about the article.** Received February 19, 2018; accepted for publication March 14, 2018; available online April 30, 2018.

**For citation.** Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling underground cable power line magnetic fields. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 4, pp. 111–121. (in Russian) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-111-121

### Введение

Расчеты режимов электроэнергетических систем (ЭЭС), включающих в свой состав однофазные и трехфазные кабельные линии (КЛ), традиционно проводят с использованием собственных и взаимных сопротивлений и проводимостей. Расчетные соотношения для определения этих параметров предложены в [1] и развиты в отечественных работах [2, 3]. Этот подход с некоторыми модификациями используется в известном программном продукте EMTP [4]. Недостаток программы EMTP состоит в жесткой структуре моделей, затрудняющей введение новых разновидностей КЛ, а также в отсутствии учета эффекта близости (ЭБ), влияние которого на режим КЛ показано ниже.

Развернутые соотношения для кабельных линий, реализованных на базе одножильных экранированных кабелей, приведены в работах [5, 6]. Эти соотношения могут применяться в программных комплексах для расчета режимов сложных ЭЭС, в том числе и при наличии продольной и поперечной несимметрии на основе метода симметричных составляющих. Однако при использовании этого метода возникают затруднения при определении взаимных электромагнитных влияний линий электропередачи, а также при расчете режимов с многократными несимметриями, которые имеют место, например, в ЭЭС, питающих тяговые подстанции (ТП) магистральных железных дорог переменного тока [7–9]. Такая ситуация характерна для энергосистем в регионах Сибири и Дальнего Востока, в которых основная системообразующая сеть непосредственно примыкает к ТП. Кроме того, в перспективных системах электроснабжения высокоскоростных железных дорог планируется применение однофазных экранированных КЛ



[10]. Совместное моделирование режимов таких трехфазно-однофазных систем становится крайне затруднительным без использования фазных координат.

В работе [7] предложена методика моделирования многопроводных систем решетчатыми схемами, позволяющая рассматривать взаимосвязанные системы кабельных и воздушных линий, а также учитывать эффекты близости, интегрируя модели многопроводных систем в единую модель ЭЭС для расчетов режимов в фазных координатах. Ниже рассмотрена методология моделирования КЛ, сформированных с помощью одножильных экранированных кабелей, выполненных с использованием изоляционных материалов на основе молекулярно сшитого полиэтилена (СПЭ-кабелей).

Для корректного моделирования экранированных КЛ необходимо учитывать следующие обстоятельства:

- взаимные индуктивности и емкости между жилами и экранами;
- емкости между экранами отдельных кабелей, а также между экранами и землей;
- токораспределение в экранах кабелей, обусловленное эффектом близости и возможной несимметрией, приводящей к существенному перераспределению токов многопроводной системы [11].

Емкости между жилами и экранами разных кабелей малы, их можно не учитывать. Взаимная индуктивность между жилой и экраном кабеля определяется по справочным данным или путем расчетов. Собственные индуктивности экранов целесообразно рассчитывать с помощью модели проводника в виде пустотелого цилиндра, осуществляя корректировку его внутренней индуктивности.

Кабельные линии, выполненные экранированными кабелями с изоляцией из молекулярно сшитого полиэтилена и проложенные в земле, могут создавать значительные магнитные поля (МП), которые будут негативно влиять на условия электромагнитной безопасности (ЭМБ). Электрическое поле такие КЛ не создают из-за условий прокладки и наличия заземленных экранов. Для улучшения условий ЭМБ необходима разработка методов моделирования МП, создаваемых КЛ. Такие методы могут быть реализованы на базе технологий моделирования электромагнитных полей, предложенных в работах [12, 13]. Далее в статье представлена методика моделирования и результаты, подтверждающие ее актуальность.

### Методика моделирования

Система уравнений, позволяющая моделировать набор одножильных СПЭ-кабелей (рис. 1), может быть записана так:

$$\underline{\Delta \mathbf{U}} = \underline{\underline{\mathbf{Z}}} \underline{\mathbf{I}} l, \quad (1)$$

где  $\underline{\Delta \mathbf{U}} = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{U}}_1 - \underline{\mathbf{U}}_{2n+1} & \underline{\mathbf{U}}_2 - \underline{\mathbf{U}}_{2n+2} & \dots & \underline{\mathbf{U}}_{2n-1} - \underline{\mathbf{U}}_{4n-1} & \underline{\mathbf{U}}_{2n} - \underline{\mathbf{U}}_{4n} \end{bmatrix}^T$  – матрица падений напряжений

на жилах и экранах кабелей;  $\underline{\underline{\mathbf{Z}}} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{12} & \dots & \underline{Z}_{1n} \\ \underline{Z}_{21} & \underline{Z}_{22} & \dots & \underline{Z}_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \underline{Z}_{n1} & \underline{Z}_{n2} & \dots & \underline{Z}_{nn} \end{bmatrix}$  – матрица погонных сопротивлений жил

и экранов кабелей;  $\underline{Z}_{kk} = R_k + j\omega L_k$  – полное сопротивление петли «жила – земля» или петли «экран – земля», Ом/км;  $\underline{Z}_{ij} = \underline{Z}_{ji}$  – взаимные индуктивные сопротивления между жилами кабелей  $i$  и  $j$  или между жилой одного кабеля и экраном другого или между экранами кабелей  $i$  и  $j$ ;  $n$  – число кабелей;  $l$  – протяженность кабельной линии.

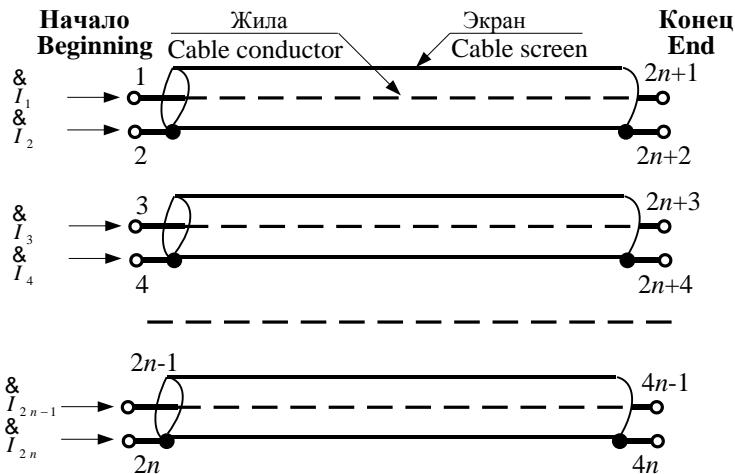


Рис. 1. Кабельная линия из одножильных экранированных кабелей  
Fig. 1. Cable line from single-wire screened cables

Сопротивления  $Z_{kk} = R_k + jX_k$ ,  $k = 1 \dots n$  можно найти по формуле (2), полученной в результате небольшой модификации выражений, приведенных в работе [2]:

$$\begin{aligned} Z_{kk} = & \pi^2 f 10^{-4} + R_0 (1 + 0.0049x^4 - 0.000035x^7) + \\ & + j \left( 28.94 f \lg \frac{0.208 \cdot 10^{-4}}{r_g \sqrt{\gamma f 10^{-7}}} + R_0 (0.12x^2 - 0.000613x^5) \right), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $f$  – частота, Гц;  $r_g$  – эквивалентный радиус жилы, см;  $\gamma$  – проводимость однородной земли

или эквивалентная средневзвешенная проводимость, См/м;  $x = 0.01 r_g \sqrt{\frac{7896 f}{R_0 S}}$ ,  $S$  – площадь

сечения жилы,  $\text{мм}^2$ ;  $R_0$  – омическое сопротивление, Ом/км.

Сопротивления  $Z_{ij}$  между жилами кабелей  $i$  и  $j$  или между жилой кабеля  $i$  и экраном кабеля  $j$  можно определить по формуле [7]:

$$Z_{ij} = 0.001 f + j f \left[ 0.005693 - 0.001256 \ln \left( d \sqrt{0.02 \gamma f} \right) \right], \text{ Ом/км},$$

где  $d$  – расстояние между токоведущими частями, м.

При определении сопротивления петли «экран – земля» необходимо использовать модель полого цилиндра, расположенного над поверхностью земли. При толщине экрана, не превышающей 1 мм, его активное сопротивление можно считать малозависящим от частоты вплоть до 2 кГц, и принимать равным омическому. Внутреннее индуктивное сопротивление проводника в виде полого проводящего цилиндра можно определить по выражению [14]:

$$X_{in} = \omega L_{in} = 2\pi f 10^{-4} \frac{t}{r_b}, \text{ Гн/км},$$

где  $t$  – толщина экрана, определяемая диаметром его проволок, мм, рис. 2;  $r_b$  – внешний радиус, мм.

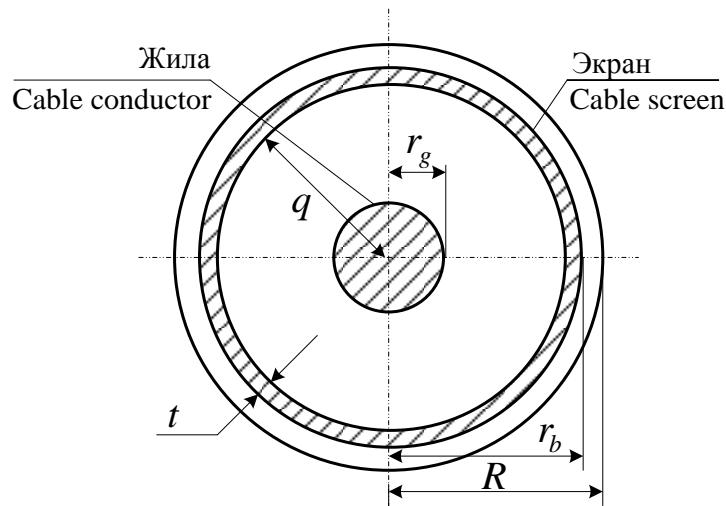


Рис. 2. Сечение экранированного кабеля  
Fig. 2. Cross-section of the screened cable

Сопротивление взаимной индуктивности «жила – экран»  $\underline{Z}_{12}$  можно найти из системы уравнений (1), которая записывается для одного кабеля длиной 1 км; при этом предполагается, что жила на конце замкнута на экран, то есть  $\underline{U}_3 = \underline{U}_4$ ;  $\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21}$ . Тогда

$$\begin{cases} \underline{U}_1 - \underline{U}_3 = I_1 \underline{Z}_{11} - I_1 \underline{Z}_{12}; \\ \underline{U}_2 - \underline{U}_4 = I_1 \underline{Z}_{21} - I_1 \underline{Z}_{22}, \end{cases}$$

где  $\underline{Z}_{11}$  – собственное сопротивление жилы, которое рассчитывается по выражению (2);  $\underline{Z}_{22}$  – полное сопротивление петли «экран – земля», методика расчета которого описана выше.

После несложных преобразований можно записать формулу входного сопротивления замкнутого на конце кабеля длиной 1 км:

$$\underline{Z}_{KZ} = \frac{\underline{U}_1 - \underline{U}_2}{\underline{I}_1} = \underline{Z}_{11} + \underline{Z}_{22} - 2\underline{Z}_{12}. \quad (3)$$

Если справочная информация по  $\underline{Z}_{KZ}$  отсутствует, то его величину можно найти путем измерений. Искомая величина  $\underline{Z}_{12}$  может быть найдена из (3):

$$\underline{Z}_{12} = \frac{1}{2} (\underline{Z}_{11} + \underline{Z}_{22} - \underline{Z}_{KZ}).$$

Если проведение измерений невозможно, а также отсутствует справочный материал, то величину  $\underline{Z}_{12}$  можно найти по выражению [14]:

$$\underline{Z}_{12} = \omega M_{12} = j 4\pi f \cdot 10^{-4} \left[ \ln \frac{q}{r_g} + \frac{1}{3} \left( 1 + \frac{4}{3} \frac{t}{q} \right) \right], \text{ Ом/км},$$



где  $q$  – внутренний радиус экрана (рис. 2).

Информация о емкостях «жила – экран» имеется в справочниках, а емкость между экраном и землей для кабеля, который расположен над поверхностью земли, можно найти по известной формуле:

$$C_{ob} = \frac{2\pi \epsilon_0}{\ln \frac{2h}{r_b}}, \quad (4)$$

где  $h$  – высота прокладки кабеля,  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная.

Если кабель смонтирован в траншее, то емкость между экраном и землей может быть найдена по формуле емкости цилиндрического конденсатора:

$$C_{ob} = \frac{2\pi \epsilon_a}{\ln \frac{R}{r_b}}, \quad (5)$$

где  $\epsilon_a$  – диэлектрическая проницаемость защитных покровов,  $R$  – внешний радиус покровов кабеля.

На основе матрицы  $\underline{Z}$  формируется матрица проводимостей решетчатой схемы замещения [7]:

$$\underline{Y}_C = \underline{Y}_{PC} + j\omega \mathbf{C}_Y, \quad (6)$$

где  $\underline{Y}_{PC} = -\mathbf{M}_0 \underline{Z}^{-1} \mathbf{M}_0^T = \begin{bmatrix} -\mathbf{D} & \mathbf{D} \\ \mathbf{D} & -\mathbf{D} \end{bmatrix}$ ;  $\underline{Y}_{PC}$  – матрица размерностью  $4n \times 4n$ ;  $\mathbf{D} = \underline{Z}^{-1}$ ;  $\mathbf{M}_0 = \begin{bmatrix} \mathbf{E} \\ -\mathbf{E} \end{bmatrix}$ ,

$\mathbf{E}$  – единичная матрица размерностью  $2n \times 2n$ ;  $\mathbf{C}_Y$  – матрица собственных и взаимных емкостей, формируемая на основе вычисленных по формулам (4), (5) параметров и емкостей «жила – экран»;  $\omega = 314$  рад/с.

## Результаты моделирования

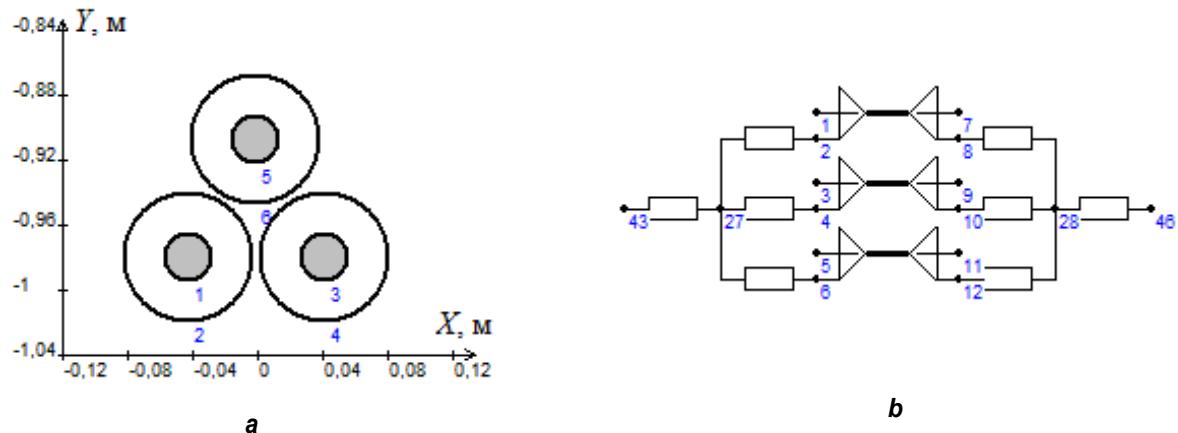
Описанная методика реализована в комплексе программ Fazonord [7], который предназначен для моделирования режимов ЭЭС и систем электроснабжения железных дорог переменного тока. В качестве иллюстрации выполнен расчет режима для КЛ 110 кВ протяженностью 10 км. Сечение жил принято равным  $630 \text{ mm}^2$ , а сечение экранов –  $95 \text{ mm}^2$ . Кабели с изоляцией из молекулярно спитого полиэтилена располагались по вершинам равностороннего треугольника (рис. 3 а) с примыканием друг к другу, на приемном конце были заданы симметричные нагрузки  $50 + j30 \text{ MB}\cdot\text{A}$ . Схема расчетной модели показана на рис. 3 б;  $Y = 0$  отвечает поверхности земли.

Рассматривалось три варианта заземления экранов по рис. 4.

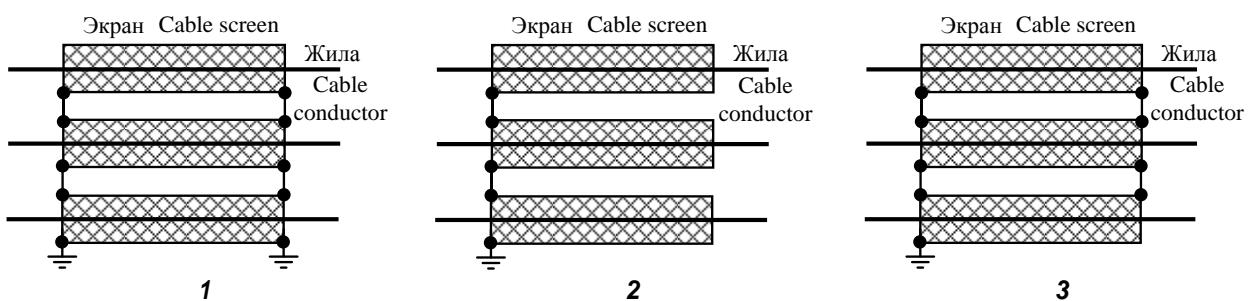
Результаты моделирования представлены в таблице и на рис. 5–7.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Рассмотренные способы заземления экранов не оказывают существенного влияния на величину напряженностей МП. Несколько большие уровни напряженностей наблюдаются при заземлении экранов на отправном конце кабельной линии.



**Рис. 3. Координаты расположения токоведущих частей (а) и схема расчетной модели (б)**  
 Fig. 3. Coordinates of conducting parts arrangement (a) and a calculation model scheme (b)



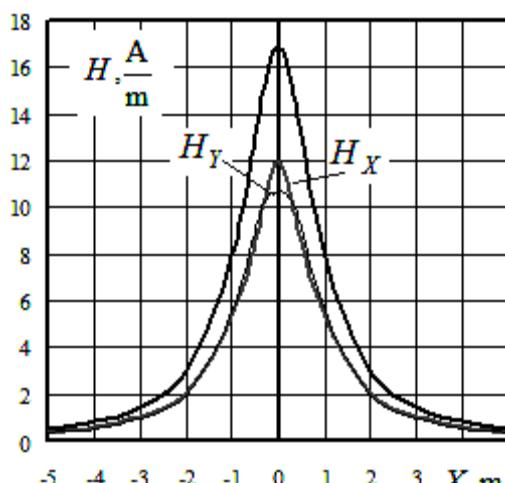
**Рис. 4. Варианты заземления экранов: 1 – экраны заземлены с двух сторон; 2 – экраны заземлены на отправном конце КЛ; 3 – экраны заземлены на отправном конце и соединены на приемном**  
 Fig. 4. Options of screen grounding: 1 – screens are grounded from two ends; 2 – screens are grounded at the sending end of the cable; 3 – screens are grounded at the sending end and connected at the receiving end

**Результаты расчета амплитуд напряженности магнитного поля, А/м**  
**Results of magnetic field amplitude calculation, A/m**

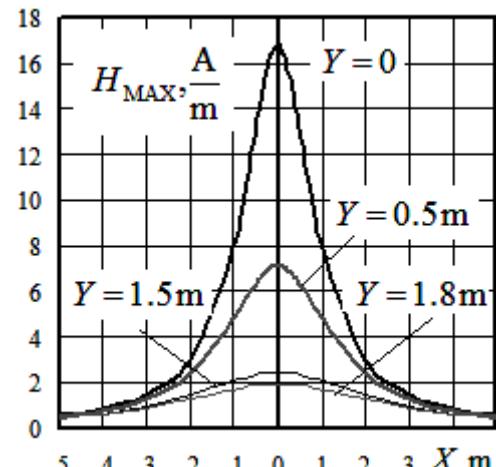
$X, \text{ м} / X, \text{ м}$	Варианты заземления экранов / Options of screen grounding			Различия / Differences, %	
	1	2	3	Между вариантами 1 и 2 / Between options 1 and 2	Между вариантами 1 и 3 / Between options 1 and 3
-0,5	13,14	13,64	13,13	-3,85	0,05
-0,4	14,27	14,81	14,26	-3,85	0,06
-0,3	15,29	15,87	15,28	-3,85	0,06
-0,2	16,11	16,73	16,10	-3,84	0,06
-0,1	16,65	17,29	16,64	-3,83	0,06
0	16,84	17,48	16,83	-3,83	0,06
0,1	16,65	17,29	16,64	-3,83	0,05
0,2	16,11	16,73	16,10	-3,83	0,06
0,3	15,29	15,88	15,28	-3,83	0,05
0,4	14,27	14,82	14,26	-3,83	0,04
0,5	13,14	13,65	13,14	-3,84	0,04

Примечание. 1 – экраны заземлены с двух сторон; 2 – экраны заземлены на отправном конце КЛ; 3 – экраны заземлены на отправном конце и соединены на приемном.

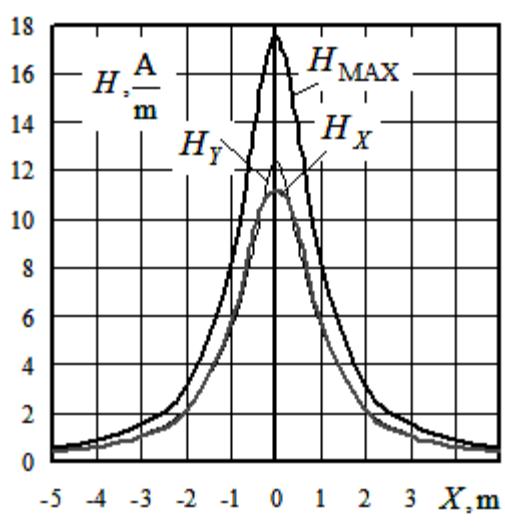
Note. 1 - screens are grounded on both sides; 2 - screens are grounded at the sending end of the cable line; 3 - screens are grounded at the sending end and connected at the receiving end.



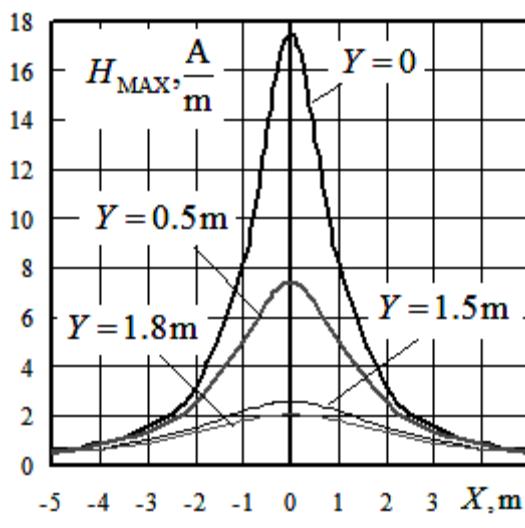
*a*



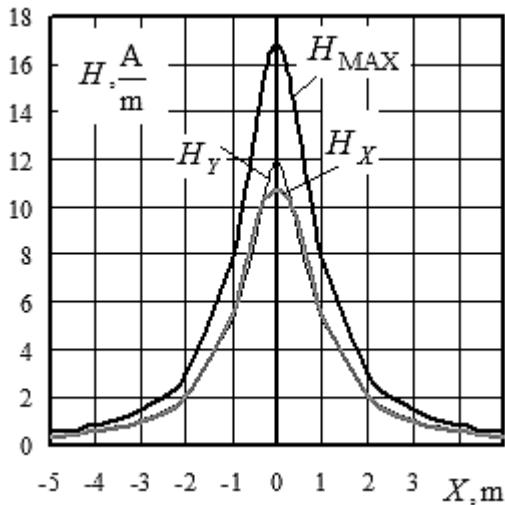
*b*



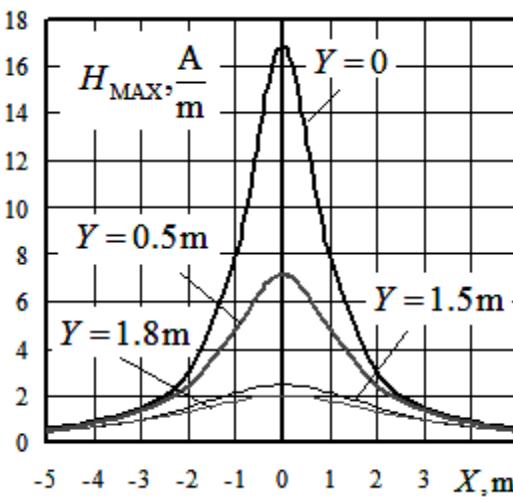
*c*



*d*



*e*



*f*

Рис. 5. Зависимости вертикальной ( $H_Y$ ) и горизонтальной ( $H_X$ ) составляющих, а также амплитудных значений ( $H_{MAX}$ ) напряженности МП от координаты  $X$ : а, б – вариант 1; с, д – вариант 2; е, ф – вариант 3

Fig. 5. Dependences of vertical ( $H_Y$ ) and horizontal ( $H_X$ ) components as well as amplitude values ( $H_{MAX}$ ) of magnetic field intensities on  $X$  coordinate:  
a, b – option 1; c, d – option 2; e, f – option 3

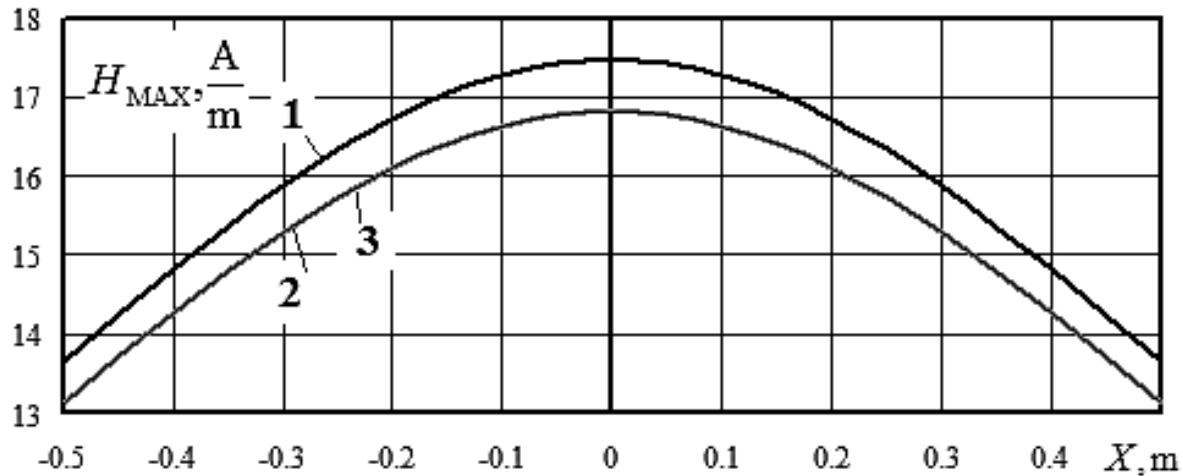


Рис. 6. Зависимость амплитудных значений напряженности МП от координаты X: 1, 2, 3 – варианты заземления экранов  
Fig. 6. Dependence of amplitude values of magnetic field intensities from X coordinate:  
1, 2, 3 – screen grounding options

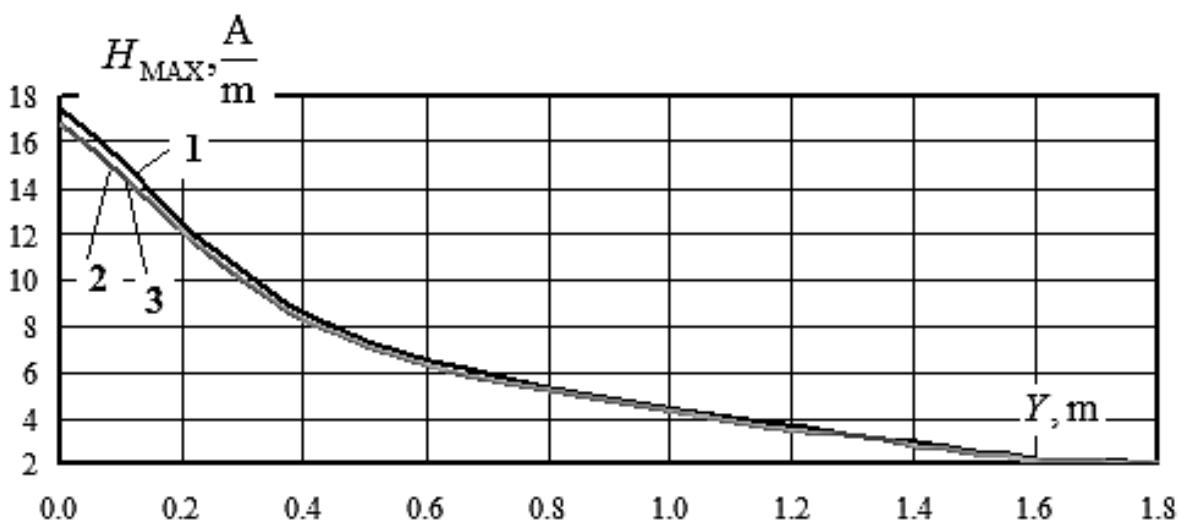


Рис. 7. Зависимость амплитудных значений напряженности МП от координаты Y  
Fig. 7. Dependence of amplitude values of magnetic field intensities from Y coordinate

2. Уровни напряженности не превышают допустимых пределов в 80 А/м для электротехнического персонала, но незначительно превосходят допустимую норму в 16 А/м для селитебных территорий.

3. Принятый способ расположения отдельных кабелей обеспечивает быстрое снижение напряженностей МП при удалении от оси КЛ.

### Заключение

На основе методов моделирования режимов и электромагнитных полей, предложенных в ИрГУПСе, реализована методика оценки условий электромагнитной безопасности вблизи трасс высоковольтных кабельных линий.



**Библиографический список**

1. Wedepohl L.M., Wilcox D.J. Transient Analysis of Underground Power-Transmission Systems – System Modal and Wave-Propagation Characteristics. Proc. IEE, Feb. 1973. Vol. 120. No. 2. P. 253–260.
2. Костенко М.В., Перельман Л.С., Шкарин Ю.П. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. М.: Энергия, 1973. 272 с.
3. Костенко М.В., Кадомская К.П., Левинштейн М.Л., Ефремов И.А. Перенапряжения и защита от них в воздушных и кабельных электропереходах высокого напряжения. Л.: Наука, 1988. 302 с.
4. Dommel H.W. Electromagnetic Transients Program (EMTP Theory Book). Prepared for Bonneville Power Administration, 1995. 483 p.
5. Дмитриев М.В., Евдокунин Г.А. Однофазные силовые кабели 6-500 кВ // Новости электротехники. 2007. № 2 (44). С. 124–128.
6. Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6-500 кВ. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 154 с.
7. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2005. 273 с.
8. Zakaryukin V., Kryukov A., Cherepanov A. Intelligent Traction Power Supply System // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport. EMMFT 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2017. Vol. 692. Springer, Cham. P. 91–99.
9. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Determination of the induced voltages when nonparallel power lines are adjacent to one another // Power Technology and Engineering. 2015. Vol. 49. No. 4. P. 304–309.
10. Киселев И.П., Блажко Л.С., Бурков А.Т. Высокоскоростной железнодорожный транспорт. Общий курс: в 2 т. М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2014. Т. 1. 308 с.
11. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Соколов В.Ю. Моделирование многоамперных шинопроводов // Проблемы энергетики. 2009. № 3–4. С. 65–73.
12. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Buyakova N.V. Improvement of Electromagnetic Environment in Traction Power Supply Systems // The power grid of the future. Proceeding Otto-von-Guericke University Magdeburg. 2013. No. 2. P. 39–44.
13. Крюков А.В., Закарюкин В.П., Буякова Н.В. Управление электромагнитной обстановкой в тяговых сетях железнодорожных дорог. Ангарск: Изд-во Ангарской государственной технической академии, 2014. 158 с.
14. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 488 с.

**References**

1. Wedepohl L.M., Wilcox D.J. Transient Analysis of Underground Power-Transmission Systems – System Modal and Wave-Propagation Characteristics. Proc. IEE, Feb. 1973, vol. 120, no. 2, pp. 253–260.
2. Kostenko M.V., Perelman L.S., Shkarin Yu.P. *Volnovye processy i elektricheskie pomehi v mnogoprovodnyh liniyah vysokogo napryazheniy* [Wave processes and electric hindrances in multiwire high voltage lines]. Moscow: Energy Publ., 1973, 272 p. (In Russian).
3. Kostenko M.V., Kadomskaya K.P., Levinstein M.L., Efremov of I.A. *Perenapryazheniya i zaschita ot nich v vozдушnyh i kabel'nyh elektroperedachah vysokogo napryazheniya* [Overvoltages and protection against them in air and cable power transmissions of high voltage]. Leningrad: The science Publ., 1988, 302 p. (In Russian).
4. Dommel H.W. Electromagnetic Transients Program (EMTP Theory Book). Prepared for Bonneville Power Administration, 1995, 483 p.
5. Dmitriev M.V., Evdokunin G.A. Single-phase power cables of 6-500 kV. *Novosti jeklktrotehniki* [Electrical Engineering News], 2007, no. 2 (44), pp. 124–128. (In Russian).
6. Dmitriev M.V. *Zazemlenie ekranov odnofaznyh silovyh kabelej 6-500 kV* [Screen grounding of single-phase power cables of 6-500 kV]. St. Petersburg: Politechnical University Publ., 2010, 154 p. (In Russian).
7. Zakaryukin V. P., Kryukov A.V. *Slozhnonesimmetrichnye rezhimy elektricheskikh system* [Complex asymmetrical modes of electric systems]. Irkutsk: Irkutsk state university Publ. 2005, 273 p. (In Russian).
8. Zakaryukin V., Kryukov A., Cherepanov A. Intelligent Traction Power Supply System // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport. EMMFT 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer, Cham. 2017, vol. 692, pp. 91–99.
9. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Determination of the induced voltages when nonparallel power lines are adjacent to one another // Power Technology and Engineering. 2015, vol. 49, no. 4, pp. 304–309.
10. Kiselyov I.P., Blazhko L.S., Burkov A.T. *Vysokoskorostnoj zheleznodorozhnyj transport. Obschij kurs* [High-speed railway transport. General course]. Moscow: Educational and methodological center for training in railway transport Publ., 2014, vol. 1, 308 p. (In Russian).
11. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Sokolov V.Yu. Modeling of multi amperes bus systems. *Problemy jenergetiki* [Problems of power], 2009, no. 3–4, pp. 65–73. (In Russian)



12. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Buyakova N.V. Improvement of Electromagnetic Environment in Traction Power Supply Systems // The power grid of the future. Proceeding Otto-von-Guericke University Magdeburg. 2013, no. 2, pp. 39–44.
13. Kryukov A.V., Zakaryukin V.P., Buyakova N.V. *Upravlenie elektromagnitnoj obstanovkoj v tyagovyh setyah zheleznyh dorog* [Management of electromagnetic situation in railroad traction networks]. Angarsk: Angarsk State Technical Academy Publ., 2014, 158 p. (In Russian).
14. Kalantarov P.L., Tseitlin L.A. *Raschet induktivnostej* [Inductance calculation]. Leningrad: Energoatomizdat Publ., 1986, 488 p. (In Russian).

**Критерии авторства**

Буякова Н.В. выполнила компьютерное моделирование магнитных полей. Закарюкин В.П. разработал компьютерные модели кабельных линий подземной прокладки. Крюков А.В. предложил методику моделирования, проанализировал полученные результаты, подготовил текст статьи. Несут ответственность за плагиат.

**Authorship criteria**

Buyakova N.V. has performed computer modeling of magnetic fields. Zakaryukin V.P. has developed computer models of underground power cables. Kryukov A.V. has proposed a modeling technique, analyzed the obtained results, prepared the text of the article. He bears the responsibility for plagiarism.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest**

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.311.1

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-122-135>

## КОМПЛЕКСНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ В СЕТЯХ ВНЕШНЕГО И ВНУТРЕННЕГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ С СОБСТВЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ

© П.В. Илюшин<sup>1</sup>

Петербургский энергетический институт повышения квалификации,  
196135, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Авиационная, 23.

**РЕЗЮМЕ.** При интеграции собственной генерации, включая резервные источники электроснабжения, в схемах внутреннего электроснабжения предприятий необходимо при проектировании выполнять нетиповой на сегодняшний день комплекс расчетов электрических режимов, включающий проведение установившихся расчетов и оптимизационных режимов, электромеханических переходных процессов и показателей качества электроэнергии.

**ЦЕЛЬ.** Выявление потенциальных рисков возникновения аварий с нарушением электроснабжения особо ответственных электроприемников при подключении к сетям внутреннего электроснабжения объектов собственной генерации, включая резервные источники электроснабжения, как при параллельном режиме работы с энергосистемой, так и в изолированном режиме. **МЕТОДЫ.** Проведение специализированных исследований параметров электрических режимов и комплекса расчетов установившихся и оптимизационных режимов, электромеханических переходных процессов и показателей качества электроэнергии в программном комплексе DlgSILENT PowerFactory.

**РЕЗУЛЬТАТЫ.** Представлены проблемные аспекты, выявленные при специализированных исследованиях и комплексном моделировании электрических режимов в сетях внешнего и внутреннего электроснабжения предприятий с собственной генерацией и резервными источниками электроснабжения, а также рекомендованные мероприятия по повышению надежности электроснабжения потребителей. **ВЫВОДЫ.** Необходимо повысить требования к объему моделирования электрических режимов в сетях внешнего и внутреннего электроснабжения предприятий с объектами собственной генерации и резервными источниками электроснабжения как на стадии проектирования, так и при проведении энергетических обследований для проверки обоснованности принятых проектных решений.

**Ключевые слова:** распределенная генерация, распределительные сети, электроснабжение, резервный источник электроснабжения, моделирование электрических режимов, энергетическое обследование.

**Информация о статье.** Дата поступления 13 марта 2018 г.; дата принятия к печати 10 апреля 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2018 г.

**Формат цитирования.** Илюшин П.В. Комплексное моделирование электрических режимов в сетях внешнего и внутреннего электроснабжения предприятий с собственной генерацией // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 4. С. 122–135. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-122-135

## COMPLEX MODELING OF ELECTRICAL MODES IN EXTERNAL AND INTERNAL POWER SUPPLY NETWORKS OF ENTERPRISES WITH OWN GENERATION

P.V. Ilyushin

St. Petersburg Power Engineering Institute of Professional Development,  
23, Aviation St., Saint Petersburg, 196135, Russian Federation

**ABSTRACT.** When integrating own generation including emergency power supply sources it is necessary to perform an atypical at the present time complex of calculations of electrical regimes in internal power supply schemes of enterprises including the calculations of steady and optimized regimes, electromechanical transients and power quality indicators. The **PURPOSE** of the study is to identify the potential risks of accidents resulting in the interruption of power supply of particularly responsible electric receivers when connecting to internal power supply systems of own generation facilities including emergency power supply sources both in parallel and stand-alone operation mode with the power system. The **METHODS** used include conducting specialized studies of the parameters of electrical modes and a complex of calculations of steady and optimized modes, electromechanical transients and power quality indicators in the DlgSILENT PowerFactory software

<sup>1</sup>Илюшин Павел Владимирович, кандидат технических наук, проректор по научной работе; e-mail: [ilyushin.pv@mail.ru](mailto:ilyushin.pv@mail.ru)

Pavel V. Ilyushin, Candidate of technical sciences, Vice-Rector for Scientific Research; e-mail: [ilyushin.pv@mail.ru](mailto:ilyushin.pv@mail.ru)



package. **RESULTS.** The articles presents the problematic aspects revealed in the specialized researches and integrated modeling of electrical modes in the networks of external and internal power supply of enterprises with own generation and emergency power sources, as well as the measures recommended in order to improve the reliability of consumer power supply. **CONCLUSIONS.** It is necessary to raise the requirements for the volume of electric mode modeling in the networks of external and internal power supply of enterprises with own generation facilities and emergency power supply sources both at the design stage and during energy inspections in order to verify the validity of the adopted design decisions.

**Keywords:** distributed generation, distribution networks, power supply, emergency power supply, modeling of electrical modes, energy inspection

**Information about the article.** Received March 13, 2018; accepted for publication April 10, 2018; available online April 30, 2018.

**For citation.** Ilyushin P.V. Complex modeling of electrical modes in external and internal power supply networks of enterprises with own generation. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 4, pp. 122–135. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-122-135

## Введение

В последние годы наблюдается рост числа аварий с полным или частичным нарушением электроснабжения электроприемников первой категории надежности, включая особую группу имеющих место при каскадных процессах<sup>2</sup>. Данные аварии, как правило, начинаются с отключения источников питания в сетях внешнего электроснабжения и завершаются последующей или одновременной нерасчетной и некорректной работой оборудования систем гарантированного и бесперебойного электроснабжения в сетях внутреннего электроснабжения потребителей, что приводит к экономическим потерям [1, 2].

Возникновение таких нарушений нередко связано с отсутствием в составе проектной документации раздела с результатами комплексного моделирования электрических режимов, включающих проведение расчетов установившихся и оптимизационных режимов, электромеханических переходных процессов, а также показатели качества электроэнергии. Для проведения корректного моделирования нередко требуется проведение натурных исследований параметров электрических режимов с выполнением специализированных испытаний и измерений.

Данная потребность обусловлена тем, что в результате накопления эффектов от малых изменений, происходящих в ходе перманентного обновления оборудования распределительных электрических сетей, постепенного изменения их конфигурации,

эволюции технологий и структуры электропотребления, фактическая схемно-режимная среда претерпела и претерпевает существенные количественные изменения. Эти изменения заключаются в появлении высших гармонических составляющих в режимных параметрах, динамической несимметрии, увеличении скорости и интенсивности реакции электроустановок потребителей на возмущения в электрической сети и т.п.

Указанное положение приводит, в конечном итоге, к принятию некорректных технических решений по составу, количеству и алгоритмам работы оборудования, устройству релейной защиты и автоматики и, как следствие, снижению надежности электроснабжения потребителей [3].

Кроме того, в последние годы на многих промышленных предприятиях, помимо ранее имевшихся резервных источников электроснабжения (РИСЭ), используемых для электроснабжения особой группы электроприемников первой категории в качестве третьего независимого взаимно резервирующего источника питания, стали появляться объекты распределенной генерации (РГ). Объекты РГ представляют собой электростанции с одной или несколькими генерирующими установками (ГУ), суммарной установленной мощностью, как правило, до 25 МВт, подключаемых к сетям внутреннего электроснабжения предприятия и выполненных на базе газотурбинных (ГТУ), газопоршневых (ГПУ) или дизель-генераторных (ДГУ) генерирующих установок.



Предотвращение возникновения подобных аварий, а также своевременное выявление фактических причин некорректного функционирования отдельных элементов систем внешнего и внутреннего электроснабжения предприятий [4], как на стадии проектирования энергообъекта, так и при

проводении энергетических обследований невозможно без комплексного математического моделирования электрических режимов, которые требуется производить с применением специализированного программного обеспечения.

### Проведение энергетических обследований

Если на стадии проектирования энергообъекта не было выполнено комплексное моделирование электрических режимов, то его необходимо провести в рамках энергетического обследования, которое должно включать в себя выполнение следующих этапов работ:

- документальное обследование (получение и обработка исходных данных: принципиальных схем, руководств по эксплуатации и паспортов оборудования, необходимых и достаточных для создания подробной расчетной модели сети внутреннего электроснабжения, а также части сети внешнего электроснабжения);
- инструментальное обследование (проведение натурных испытаний и измерений: фиксация параметров электрических режимов, имитация допустимых аварийных событий, обработка полученных экспериментальных данных для восполнения недостающей информации, необходимой для формирования расчетной модели, а также проверки работоспособности устройств РЗ и ПА);
- проведение комплекса расчетов: установившихся режимов, электромеханических переходных процессов, показателей

качества электроэнергии и расчетов токов короткого замыкания с целью выявления проблемных аспектов и проверки обоснованности принятых проектных технических решений;

– разработка рекомендаций по выполнению организационных и технических мероприятий, направленных на минимизацию вероятности возникновения нарушений электроснабжения электроприемников потребителей.

При обследовании сетей внешнего и внутреннего электроснабжения промышленных предприятий использовался программный комплекс DIgSILENT PowerFactory, что позволило выполнять расчеты при:

- параллельном режиме работы с электроэнергетической системой;
- изолированном режиме работы с питанием особо ответственной нагрузки от систем гарантированного и бесперебойного электроснабжения от РИСЭ в виде ДГУ;
- переходе, в результате возмущения в сети внешнего электроснабжения, от параллельного режима работы энергообъекта на электроснабжение от собственного объекта РГ.

### Выявленные проблемные аспекты

По результатам энергетических обследований, включающих натурные испытания и измерения, и комплексного математического моделирования электрических режимов были выявлены проблемные аспекты, оказывающие влияние на надежность электроснабжения потребителей электроэнергии [5], а именно:

- возникновение незатухающих колебаний параметров электрического режима вследствие несовместимости алгоритмов работы локальных систем автоматического регулирования (САР) активных энергетических установок;
- асимметрия трехфазных напряжений и токов, а также нелинейность нагрузки,

- вызывающих вибрацию и дополнительный нагрев электрических машин;
- неуспешные пуски крупных высоковольтных электродвигателей в различных схемно-режимных ситуациях;
  - возникновение нарушений ДГУ при ликвидации удаленных трехфазных КЗ действием максимально-токовой защиты с выдержкой времени при работе в изолированном режиме;
  - отключение ДГУ защитой от перегрева генератора с погашением электроснабжения всех электроприемников по причине наличия значительных гармонических искажений в токе нагрузки;

– отказ в срабатывании встроенных защит автоматических выключателей по причине неправильного выбора системы возбуждения ДГУ;

– неселективная работа автоматических выключателей в сети внутреннего электроснабжения при питании нагрузки от ДГУ в изолированном режиме.

В статье представлены результаты комплексного моделирования электрических режимов в сетях внешнего и внутреннего электроснабжения предприятий с собственной генерацией, а также рекомендованные мероприятия по повышению надежности электроснабжения потребителей.

### Незатухающие колебания параметров электрического режима

Системы гарантированного и бесперебойного питания (СГБП) с их источниками бесперебойного питания (ИБП) и ДГУ обеспечивают бесперебойность электроснабжения особо ответственных потребителей и отделение несимметричных и нелинейных нагрузок от чувствительных к ним трехфазных электрических машин. При этом ИБП и ДГУ – являются активными энергоустановками, располагающими собственными системами управления и регулирования.

На рис. 1 представлены осциллограммы прямого пуска компрессора кондиционера при работе системы внутреннего электроснабжения от ДГУ. Видно, что процесс от начала и до конца сопровождается колебаниями параметров электрического режима, является несимметричным и нелинейным, о чем свидетельствует появление значительного тока в рабочем нейтральном проводе, носящем характер незатухающих колебаний с диапазоном от 10–15 до 50 А.



**Рис. 1. Токи (фазные и в нулевом проводе) в процессе прямого пуска электрического компрессора кондиционера ( $P_{ном}=10$  кВт) при работе от ДГУ ( $P_{ном}=120$  кВт)**

**Fig. 1. Currents (phase and in a zero conductor) during the direct start-up of the electric compressor of the air conditioner ( $P_{nom} = 10$  kW) when operating from the diesel-generator plant (DGP) ( $P_{nom} = 120$  kW)**

Аналогичное явление наблюдалось в то же самое время на ИБП. Взаимный анализ токов и напряжений позволяет определить диапазон колебаний полной мощности ДГУ, сопровождающих работу компрессора, которая составляет около 10 кВт (100% мощности компрессора).

Приведенный пример свидетельствует о том, что наличие в одной электрической сети двух и более активных энергетических установок с локальными системами автоматического регулирования (генераторов с АРВ, РПН понижающих трансформаторов, внешний дифференцированный трансформатор ВДТ, АРН сеть контроля регулятора напряжения СКРМ, DVR/DySC,

ИБП и т.п.) может приводить к их несогласованному поведению, сопровождаемому существенными незатухающими колебаниями режимных параметров.

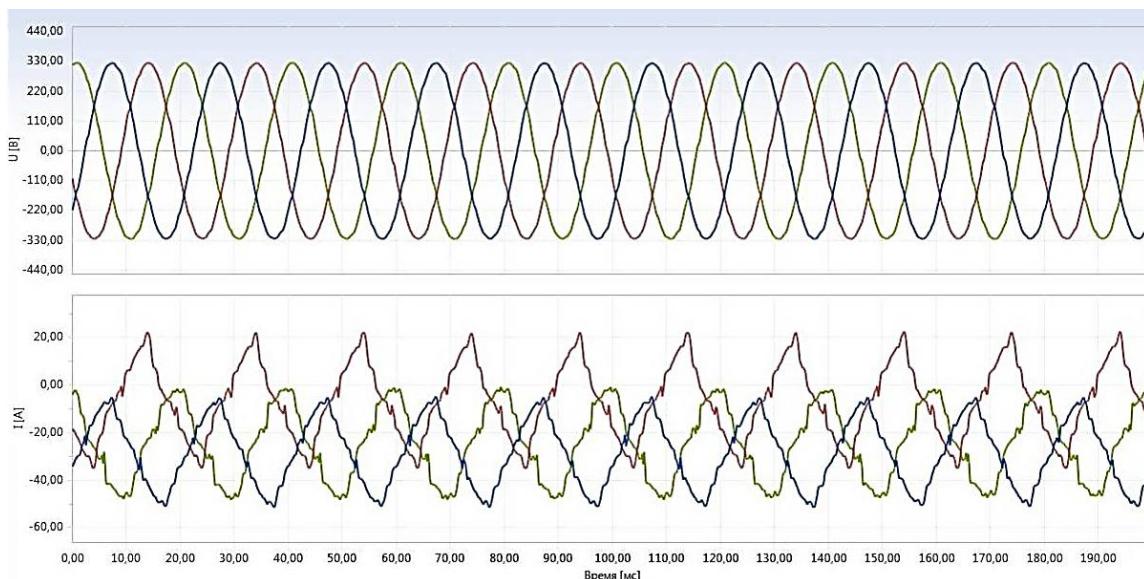
Для предотвращения возникновения описанных режимов необходимо при проектировании или энергетическом обследовании проводить анализ устойчивости функционирования САР активных энергетических установок в различных схемно-режимных ситуациях с применением средств математического моделирования и, в случае необходимости, разрабатывать и реализовывать мероприятия, обеспечивающие их корректную работу [5].

### Асимметрия и нелинейность

Обострение проблемных аспектов с возникновением в сетях асимметрии и нелинейности нагрузки началось с широкого распространения компьютерной техники – электрических потребителей с нелинейной нагрузкой [6], как это представлено на рис. 2.

На рис. 2 видно, что при идеальной форме кривой 3-фазного напряжения токи в компьютерной нагрузке носят ярко выра-

женный несинусоидальный и асимметричный характер. Нелинейность фазных токов в четырехпроводной электрической сети, даже в случае равенства их действующих значений (симметричности нагрузки фаз), приводит к появлению значительных токов в нейтральном проводе с амплитудой приблизительно равной амплитудам фазных токов, но при существенно более высоком действующем значении тока в нейтрали.



*Рис. 2. Осциллограмма измеренных напряжений (сверху) и токов (снизу) в электрической сети, питающей компьютерную технику*

*Fig. 2. Oscillogram of measured voltages (top) and currents (bottom) in an electrical network feeding computer equipment*

Учитывая, что нулевые провода обычно имеют меньшее сечение, чем фазные, нелинейность нагрузки может создавать реальную угрозу их перегрева и даже возгорания [7]. Факт перегрузки нейтрали может оставаться незамеченным эксплуатационным персоналом в том случае, если в сетях не применяются системы сигнализации и защиты, работающие на дифференциальном принципе.

В настоящее время значительная часть проблем в системах электроснабжения, связанных с асимметрией и нелинейностью нагрузки, решается на предприятиях за счет внедрения СГБП. Современные СГБП, использующие принцип двойного преобра-

зования тока AC-DC-AC и снабженные трансформаторами гальванической развязки на выходе от инвертора в сеть бесперебойного питания, являются непреодолимым барьером, отделяющим эти асимметричные и нелинейные нагрузки от резервных источников электроснабжения и других трехфазных нагрузок, включенных в сеть гарантированного питания.

Однако, непрекращающийся рост нелинейных нагрузок охватывает все новые области электропотребления, не защищенные СГБП, и этот факт требует внимательного к себе отношения как при проектировании сетей внутреннего электроснабжения, так и при проведении их обследований.

### Неуспешные пуски крупных электродвигателей

В процессе обследования было выявлено, что успешному запуску крупных электродвигателей напряжением 6 кВ могут предшествовать несколько неуспешных, что усиливает риски отключения генераторов на объекте РГ из-за возникающих провалов напряжения и способствует ускоренному износу оборудования, по которому протекают пусковые токи.

Для обеспечения успешного запуска электродвигателей понижающие трансформаторы на ПС 110/6 кВ включаются персоналом на параллельную работу (путем замыкания секционных выключателей), что

уменьшает величину провалов напряжения до 7%, но создает риск остановки основного технологического процесса на предприятии в случае любого КЗ на шинах 6 кВ. Если шины 6 кВ не включать на параллельную работу, запуск электродвигателей приводит к перегрузке соответствующего понижающего трансформатора 110/6 кВ и к недопустимому для генераторов объекта РГ и других работающих электродвигателей провалу напряжения до 15% и более.

На рис. 3 представлены фактические измеренные профили провала действующего линейного напряжения на шинах 6 кВ

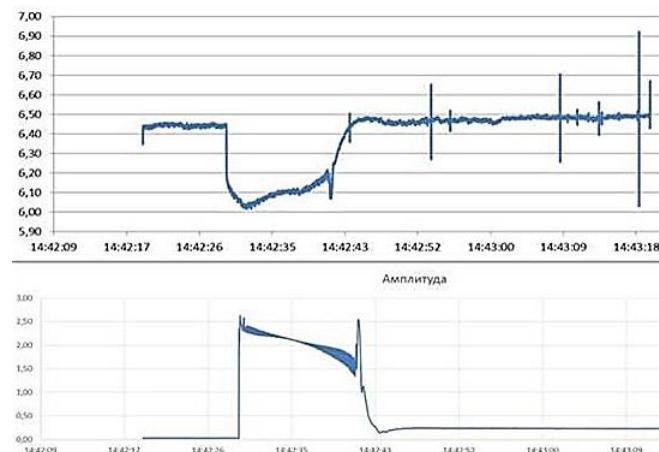


Рис. 3. Профили провала линейного напряжения на шинах 6 кВ (сверху) и всплеска тока (снизу) при пуске электродвигателя

Fig. 3. Profiles of the line voltage failure on 6 kV buses (top) and current surge (bottom) when starting the motor

и всплеска фазного тока в одной из фаз трансформатора во время запуска одного из крупных электродвигателей (2 100 кВт), который продолжается 13,8 с.

По данной причине на предприятии введен запрет на самозапуск крупных ответственных электродвигателей, хотя, если обеспечить приемлемые условия, самозапуск мог бы быть крайне полезен для предотвращения остановки основного производственного процесса при провалах напряжения, даже при работе объекта РГ в островном режиме.

Эффективно противодействовать динамическим провалам напряжения возможно за счет применения динамических компенсаторов реактивной мощности (ДКРМ). Действие ДКРМ заключается в «мгновенной» (до 20 мс) инъекции реактивной мощности, необходимой для запуска электродвигателей, обеспечиваемой за счет присоединения электрических емкостей тиристорными ключами. Надежность схемы электроснабжения в процессе пусков (самозапусков) крупных электродвигателей может быть таким образом повышена.

### Нарушение динамической устойчивости ДГУ

На основании расчетов переходных процессов был выявлен ряд проблемных аспектов, связанных с надежностью электроснабжения потребителей, при работе в изолированном режиме с питанием от ДГУ.

Для этого были смоделированы ситуации отключения близких и удаленных трехфазных КЗ, при этом в расчетах учитывалось наличие асинхронной нагрузки (двигатели компрессоров кондиционеров и холодильных установок). На рис. 4 представлены графики изменения механического момента на валу (слева) и частоты генератора ДГУ (справа) при близком и удаленном трехфазном КЗ.

Анализ переходных процессов позволил выявить риск нарушения динамической устойчивости ДГУ при отключении удаленных трехфазных КЗ с выдержкой времени более 0,3 с (работа максимальной токовой защиты). В целом удаленные КЗ воспринимаются ДГУ как «эффект наброса нагрузки». За счет повышенных потерь активной мощности при протекании тока КЗ по цепи со значительно большим активным сопротивлением возникает эффект торможения генератора ДГУ со снижением частоты до 39 Гц [8].

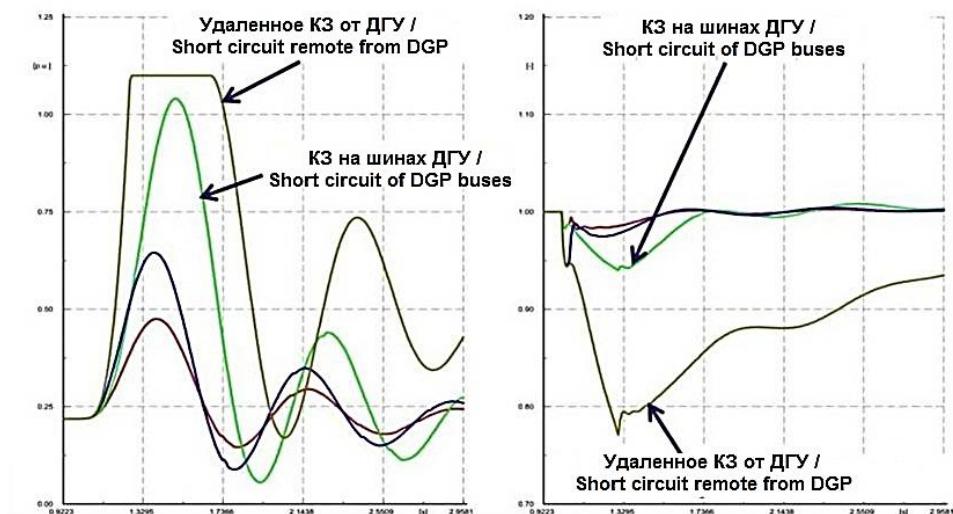


Рис. 4. Графики изменения механического момента на валу (слева) и частоты генератора ДГУ (справа)

Fig. 4. Alteration graphs of the mechanical moment on the shaft (on the left) and DGP generator frequency (on the right)

Для исключения нарушений динамической устойчивости ДГУ необходимо обес-

печить отключения КЗ при работе в изолированном режиме действием токовой отсечки без выдержки времени [9].

### Анализ показателей качества электроэнергии

Проектные расчеты электрических нагрузок РИСЭ нередко выполняются со значительным запасом мощности и двойным учетом резервирования технологических потребителей, при этом фактические замеры показывают, что фактическая средняя мощность СБЭ меньше расчетной более чем в 3 раза, фактическая мощность СГЭ – более чем в 3,5 раза.

Выявлен риск нарушения электроснабжения потребителей по причине внесения ИБП максимально возможных искажений в показатели качества электроэнергии в сети внутреннего электроснабжения при питании от ДГУ, т.к. фактическая загрузка ИБП как правило не превышает 30%. На рис. 5 представлена зависимость коэффициента гармонических искажений по току (THDi) или «коэффициента искажения синусоидальности кривой тока» от загрузки ИБП.

Данная техническая проблема известна в течение долгого времени и решалась различными способами [10, 11], но до конца не решена и в настоящее время [12].

Величина THDi равна отношению действующего значения суммы гармониче-

ских составляющих к действующему значению основной составляющей переменного тока. Коэффициент THDi позволяет одним числом выразить степень искажений, влияющих на ток в любом месте электроустановки. Выявление источников искажений производится посредством проведения замеров на входах и выходах различных цепей, позволяя отследить пути протекания гармоник. Ниже приведены значения THDi и соответствующие им явления, происходящие в электроустановках:

–  $THDi < 0,1$  – нормальная ситуация, отсутствие сбоев в работе электрооборудования;

–  $0,1 < THDi < 0,5$  – значительное загрязнение сети гармониками с опасностью повышения температуры и обусловленной этим необходимостью перехода на кабели большего сечения и ДГУ большей мощности;

–  $THDi > 0,5$  – большая степень загрязнения сети гармониками, возможны сбои в работе оборудования, необходима установка фильтро-компенсирующих устройств.

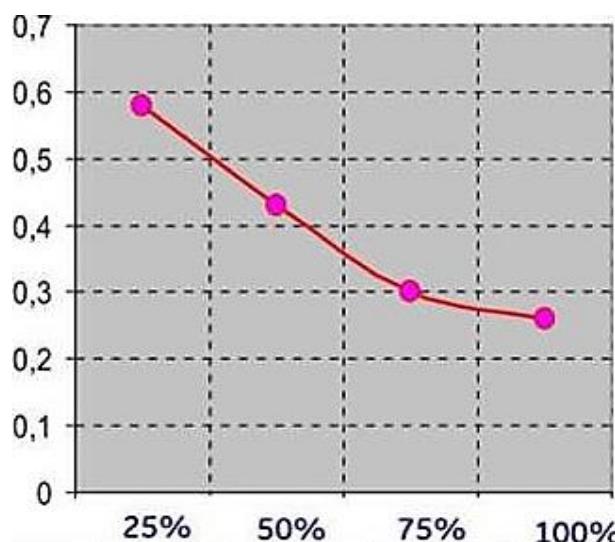


Рис. 5. Зависимость величины THDi (о.е.) от загрузки ИБП (%)  
Fig. 5. Dependence of THDi (pu) on UPS load (%)



При переводе электроснабжения вычислительного центра, в котором проводились натурные испытания и измерения, в режиме автономной работы длительность электроснабжения нагрузки от ДГУ не превышала 10 минут по причине отключения ДГУ защитой от перегрева генератора. Наличие в сети большого количества ИБП приводило к существенному росту гармонических составляющих в токе нагрузки, что вызывало перегрев генератора ДГУ и его отключение технологической защитой. Было выявлено, что в проектной документации отсутствует раздел по анализу показателей качества электрической энергии в сети внутреннего электроснабжения.

Дополнительно при обследовании были выявлены недопустимые отклонения

напряжения, превышение допустимых значений коэффициента несимметрии напряжений по обратной и нулевой последовательности, превышение допустимых значений гармонических составляющих напряжения, превышение допустимых значений кратковременной и длительной дозы фликера. Анализ проводился на соответствие показателей качества электроэнергии в сети внутреннего электроснабжения при питании от РИСЭ (ДГУ) требованиям, изложенным в ГОСТ 32144-2013<sup>2</sup>.

В данном случае даны рекомендации по замене ИБП на агрегаты меньшей мощности (в соответствии с максимальной фактической нагрузкой), либо проведению расчетов по обоснованию применения в сети внутреннего электроснабжения фильтро-компенсирующего устройства.

### Особенности выбора систем возбуждения ДГУ

Как показали результаты энергетических обследований нескольких энергообъектов, в проектной документации не предъявляются технические требования к системе возбуждения генераторов РИСЭ (ДГУ), поэтому, как правило, в качестве РИСЭ устанавливаются ДГУ с наиболее дешевой системой возбуждения типа SHUNT.

Однако, при выборе ДГУ необходимо обращать особое внимание на тип системы возбуждения, так как ее характеристики оказывают существенное влияние на обеспечение динамической устойчивости генератора при внешних возмущениях [13], успешных запусках двигательной нагрузки, допустимых уровнях напряжения в послеаварийных режимах и скорости его восстановления после ликвидации КЗ, а также селективной работы устройств. РЗА и надежного срабатывания автоматических выключателей со встроенными защитами [14, 15]. На рис. 6

представлена зависимость напряжения на выводах генератора от тока статора при использовании на ДГУ различных систем возбуждения.

Следует отметить, что в соответствии с требованиями ГОСТ Р 53471-2009<sup>3</sup> значение тока статора генератора в режиме установившегося трехфазного короткого замыкания на выводах генератора, с учетом действия АРВ, должно быть не менее трехкратного номинального значения, а сами генераторы должны выдерживать его без повреждения в течение 5 секунд. Основываясь на паспортных данных самых распространенных систем возбуждения РИСЭ (ДГУ), можно прийти к следующим выводам:

– AREP (марка регулятора возбуждения – R450), максимально допустимый ток КЗ –  $3^*I_{\text{ном}}$  в течение 10 с. (соответствует требованиям);

<sup>2</sup>ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». Введен 01 июля 2014 г. / GOST 32144-2013 "Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical facilities. Quality standards of electrical energy in general-purpose power supply systems". Introduced 1 July, 2014.

<sup>3</sup>ГОСТ Р 53471-2009 «Генераторы трехфазные синхронные мощностью свыше 100 кВт. Общие технические условия». Введен 01 января 2011 года./ GOST R 53471-2009 "Three-phase synchronous generators with the power of more than 100 kW. General specifications." It was put into operation 1 January, 2011.

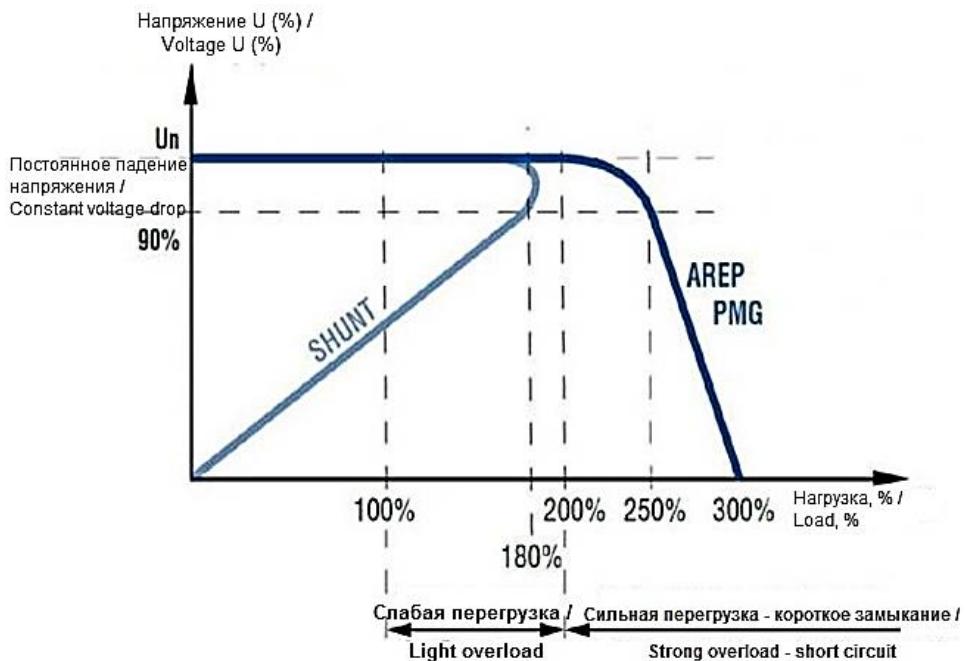


Рис. 6. Зависимость напряжения на выводах генератора от тока нагрузки для различных систем возбуждения

Fig. 6. Voltage dependence on generator terminals on the load current for various excitation systems

– PMG (марка регулятора возбуждения – R450M), максимально допустимый ток КЗ –  $3*I_{ном}$ . в течение 10 с. (соответствует требованиям);

– SHUNT (марка регулятора возбуждения – R230), максимально допустимый ток –  $1,5*I_{ном}$ . в течение 2 мин. (не соответствует требованиям).

Нередко производители генераторов с системой возбуждения SHUNT указывают в конкурсной документации, что их генераторы соответствуют требованиям ГОСТ Р 52776-2007<sup>3</sup> однако п.9.3.2 устанавливает требование к допустимости кратковременной перегрузки генератора по току статора, равной  $1,5*I_{ном}$ . в течение 2 мин., а не к величине допустимого тока статора генератора в режиме установившегося трехфазного КЗ на его выводах [16].

Учитывая вышеизложенное, формирование технических требований к системе возбуждения РИСЭ (ДГУ) и ее выбор должны основываться на результатах расчетов электрических режимов в различных схемно-режимных ситуациях для обеспечения надежного электроснабжения электроприемников потребителей. В случае невозможности обеспечения надежного срабатывания автоматических выключателей со встроеннымми защитами при возникновении КЗ в изолированном режиме необходимо выполнить замену системы возбуждения на ДГУ, а в случае отсутствия технической возможности предусмотреть установку выносных устройств РЗА с воздействием на независимые расцепители автоматических выключателей.

### Неселективная работа автоматических выключателей

Как показывает опыт эксплуатации сетей внутреннего электроснабжения предприятий напряжением 0,4 кВ, некорректный выбор технических параметров автоматических выключателей и уставок встроенных

защит приводит, в ряде случаев, к их неселективной работе (отключение КЗ происходит автоматическим выключателем более близким к источнику питания), а также к не-

чувствительности или отказу в срабатывании в отдельных аварийных режимах работы сети [17].

Особенно это опасно в тех случаях, когда питание нагрузки осуществляется от РИСЭ (ДГУ) и неправильная работа автоматических выключателей может привести к обесточению электроприемников особой группы первой категории надежности. Пример такого случая, который был выявлен в процессе проведения обследования, представлен на рис. 7.

На основании проведенных расчетов были даны рекомендации по изменению уставок автоматических выключателей, а также замене некоторых из них для обеспечения селективности и чувствительности в сети внутреннего электроснабжения предприятия напряжением 0,4 кВ [18].

Все перечисленные в статье проблемные аспекты возникают по причине недостаточного исследования электрических режимов на стадии проектирования энергообъектов, их реконструкции, а также при проведении энергетических обследований. Предотвращение возникновения подобных ситуаций, своевременное выявление фак-

тических причин некорректного функционирования отдельных элементов систем внешнего и внутреннего электроснабжения предприятий невозможно без комплексного математического моделирования электрических режимов, которые требуется производить с применением специализированного программного обеспечения.

Учитывая вышеизложенное, перечень работ, осуществляемых при проведении традиционных энергетических обследований, должен быть дополнен работами:

1. Осуществляемыми в рамках документального, визуального и инструментального обследований, необходимыми и достаточными для формирования расчетных математических моделей обследуемых энергообъектов, включающими:

- определение узловых нагрузок исследуемой электрической сети;
- получение количественных характеристик реальных отклонений параметров качества электроэнергии в части: провалов напряжения и перенапряжений, изменений частоты, фазной асимметрии, высших и интергармоник, а также алгоритмов работы и параметров настройки систем автоматичес-

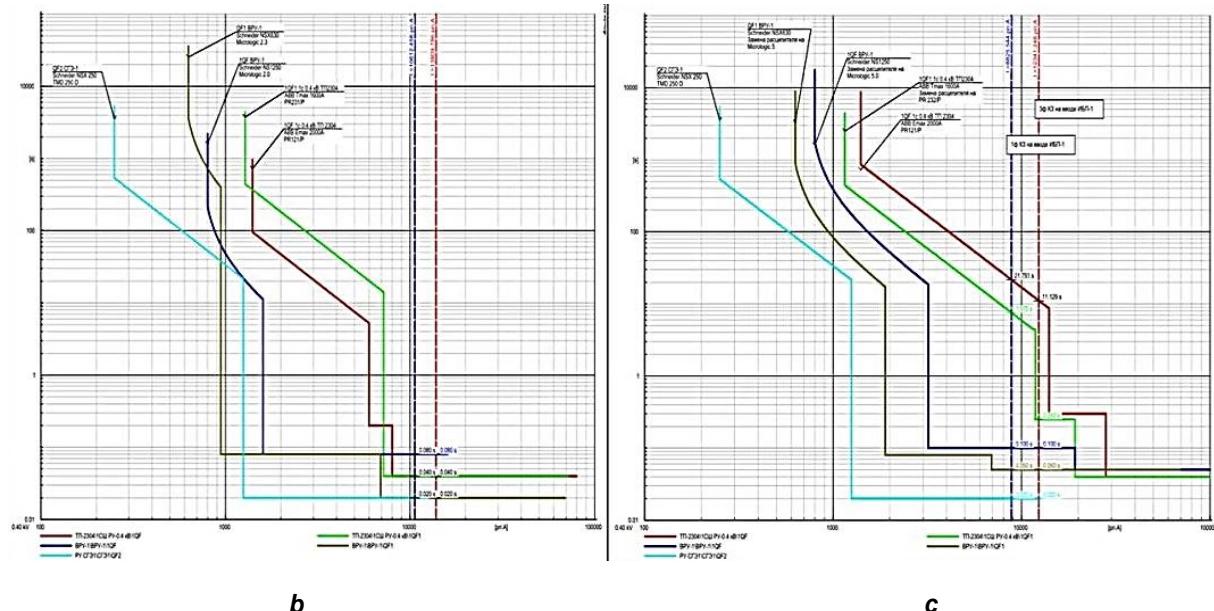


Рис. 7. Действующие (а) и планируемые (б) защитные характеристики с величинами токов однофазного (левая пунктирная линия) и трехфазного КЗ (правая пунктирная линия)

Fig. 7. Operating (a) and planned (b) protective characteristics with single-phase currents (left dashed line) and three-phase short-circuit (right dashed line)



кого регулирования, регуляторов возбуждения и скорости вращения генераторов, установок устройств РЗА и технологических защит;

– уточнение фактических режимов заземления нейтралей трансформаторов и другого оборудования.

2. Новым видом исследования – комплексным моделированием нормальных,

ремонтных, аварийных и послеаварийных стационарных и переходных режимов, расчетами токов короткого замыкания и замыкания на землю, анализом вероятных аварийных событий с определением мероприятий, предотвращающих возникновение и развитие аварий.

## Выводы

Необходимо повысить требования к моделированию электрических режимов на стадии проектирования новых энергообъектов, реконструкции схем внутреннего электроснабжения предприятий при подключении объектов РГ, а также при проведении энергетических обследований для выявления рисков возникновения аварий с нарушением электроснабжения потребителей.

Внедрение объектов РГ, включая РИСЭ, в схемы внутреннего электроснабжения требует выполнения всего комплекса расчетов электрических режимов (установившихся, токов короткого замыкания, электромеханических переходных процессов, показателей качества электроэнергии), как это принято для сетей высокого напряжения.

При внедрении объектов РГ необходим пересмотр алгоритмов работы и пара-

метров настройки устройств РЗА, а также проверка селективности и чувствительности встроенных защит автоматических выключателей при параллельной работе с энергосистемой и в изолированном режиме.

Необходимо обеспечить совместимость работы локальных САР множества активных элементов управления (РПН/ВДТ понижающих трансформаторов, АРН СКРМ и ДКН/ДКПН, ИБП, АРВ генераторов, фильтрокомпенсирующих устройств, накопителей энергии и т.д.).

Снизить вероятность возникновения аварий с нарушением электроснабжения потребителей возможно только за счет комплексного подхода к решению выявленных при обследовании проблемных аспектов посредством реализации намеченных организационных и технических мероприятий.

## Библиографический список

1. Непомнящий В.А. Экономические потери от нарушения электроснабжения. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. 188 с.
2. Кучеров Ю.Н., Гуревич Ю.Е. Проблемы обеспечения безопасности потребителей и объектов электроэнергетики при нарушениях работы энергосистемы // Энергетик. 2007, № 8. С. 8–12.
3. Шарыгин М.В. Оценка последствий отключений потребителей электроэнергии. Методы и модели. Нижний Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. 2014. 202 с.
4. Хорольский В.Я., Таранов М.А. Надежность электроснабжения. М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2014. 128 с.
5. Шубин Н.Г. Проблемы и средства автоматизации управления локально районированными энергосистемами (MicroGrid) // Материалы к докладу на заседании секции «Распределенные источники энергии» НП «НТС ЕЭС» от 29.03.2017.
6. Корнилов Г.П., Шеметов А.Н., Осипов А.В. Современные проблемы электромагнитной совместимости в системах электроснабжения с резкопеременными и нелинейными нагрузками // Известия вузов. Электромеханика. 2006. № 4. С. 89–93.
7. Mayer J., Turner R. 3rd Harmonic current in a generator neutral earthing resistor connected to a large cable network // The Proceedings of the 2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2017, Cincinnati, USA.
8. Бернер М.С., Брухис Г.Л., Гуревич Ю.Е., Кучеров Ю.Н. Проблемы применения аварийной разгрузки больших распределительных сетей // Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2008. № 5. С. 10–17.
9. Назарычев А.Н., Илюшин П.В. Анализ результатов проведения обследований сетей внешнего и внутреннего электроснабжения предприятий // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Исследование и обеспечение надежности систем энергетики. 2017. № 68. С. 525–534.
10. Wu J.C.; Jou H.L. A new UPS scheme provides harmonic suppression and input power factor correction //



- IEEE Transactions on Industrial Electronics. 1995. Vol. 42. No. 6. P. 629–635.
11. Choi J.H., Kim J.H. A bi-directional UPS with the performance of harmonic and reactive power compensation // The Proceedings of the 1997 International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 1997, Singapore.
12. Setiawan D.K., Megantara Y., Syah B.N. Three phase inverter of UPS control system for harmonic compensator and power factor correction using modified synchronous reference frame // The Proceedings of the 2015 International Electronics Symposium (IES), 2016, Surabaya, Indonesia.
13. IEEE standard 421.5-2016. IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. Date of Publication: 26 Aug. 2016.
14. Samoylenko, V.O., Korkunova O.L., Pazderin A.V., Novikov N.N. Overcurrent protection adjustment when connecting synchronous generation to power supply systems // The Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2015, Seville, Spain.
15. Илюшин П.В., Гуревич Ю.Е. О специальном воздействии на систему возбуждения автономно работающих генераторов при больших набросах нагрузки // Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2016. № 2. С. 2–7.
16. Илюшин П.В., Перевалов К.В. Анализ технических требований к системам автоматического регулирования возбуждения генерирующих установок объектов распределенной генерации // Релейная защита и автоматизация. 2016. № 4. С. 23–27.
17. Илюшин П.В. Анализ особенностей сетей внутреннего электроснабжения промышленных предприятий с объектами распределенной генерации // Энергетик. 2016. № 12. С. 21–25.
18. Шарыгин М.В., Куликов А.Л. Защита и автоматика систем электроснабжения с активными промышленными потребителями. Нижний Новгород: НИУ РАН-ХиГС, 2017. 286 с.

### References

1. Nepomnyashchij V.A. *Ekonomicheskie poteri ot narusheniya ehlektrosnabzheniya* [Economic losses from a power supply interruption]. M.: Izdatel'skij dom MEHI, 2010, 188 p.
2. Kucherov YU.N., Gurevich YU.E. Problems of ensuring the safety of consumers and electric power industry facilities in case of power system disturbances. *Energetik* [Power and Electrical Engineering], 2007, no. 8, pp. 8–12.
3. Sharygin M.V. Ocenka posledstvij otklyuchenij potrebitelj ehlektroehnergii. Metody i modeli [Assessment of customer load disconnection effects. Methods and models]. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseeva. 2014, 202 p.
4. Horol'skij V.YA., Taranov M.A. *Nadezhnost' ehlektrosnabzheniya* [Reliability of power supply]. Moscow: FORUM: INFRA-M, 2014, 128 p.
5. Shubin N.G. *Problemy i sredstva avtomatizacii upravleniya lokal'no rajonirovannymi ehnergosistemami (MicroGrid)* [Problems and means of automatic control of locally distributed power systems (MicroGrid)]. Materialy k dokladu na zasedanii sektsii «Raspredelennye istochniki ehnergiij» NP «NTS EEHS» ot 29.03.2017 [Materials to the report at the meeting of the section “Distributed energy sources” of Noncommercial Partnership “Scientific and Technical Council of the Unified Energy System” from 29 March 2017]
6. Kornilov G.P., Shemetov A.N., Osipov A.V. Modern problems of electromagnetic compatibility in the power supply systems with sharply alternating and nonlinear loads. *Izvestiya vuzov. EHlektromekhanika* [Russian Electromechanics]. 2006, no. 4, C. 89–93.
7. Mayer J., Turner R. 3rd Harmonic current in a generator neutral earthing resistor connected to a large cable network. The Proceedings of the 2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2017, Cincinnati, USA.
8. Berner M.S., Bruhis G.L., Gurevich Yu.E., Kucherov Yu.N. Application problems of load shedding in large distribution networks. *Elektrotehnika, ehlektroehnergetika, ehlektrotehnicheskaya promyshlennost'* [Journal «EL-EKTRO» Electrical engineering, electric power industry, electrotechnical industry]. 2008, no. 5, pp. 10–17.
9. Nazarychev A.N., Ilyushin P.V. Analysis of the results of the inspection of external and internal power supply networks of enterprises. *Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shih sistem ehnergetiki. Issledovanie i obespechenie nadezhnosti sistem ehnergetiki* [Methodological issues of large energy system reliability research. Research and provision of energy system reliability], 2017, no. 68, pp. 525–534.
10. Wu J.C.; Jou H.L. A new UPS scheme provides harmonic suppression and input power factor correction // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 1995, vol. 42, no. 6, pp. 629–635.
11. Choi J.H., Kim J.H. A bi-directional UPS with the performance of harmonic and reactive power compensation. The Proceedings of the 1997 International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 1997, Singapore.
12. Setiawan D. K., Megantara Y., Syah B. N. Three phase inverter of UPS control system for harmonic compensator and power factor correction using modified synchronous reference frame. The Proceedings of the 2015 International Electronics Symposium (IES), 2016, Surabaya, Indonesia.
13. IEEE standard 421.5-2016. IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. 26 Aug. 2016.
14. Samoylenko, V.O., Korkunova O.L., Pazderin A.V., Novikov N.N. Overcurrent protection adjustment when connecting synchronous generation to power supply systems // The Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2015, Seville, Spain.



Conference on Industrial Technology (ICIT), 2015, Seville, Spain.

15. Ilyushin P.V., Gurevich YU.E. On the special effect on the excitation system of stand-alone generators under large loads rise. *Elektrotehnika, elektroehnergetika, ehlektrotehnicheskaya promyshlennost'* [Journal «EL-EKTRO» Electrical engineering, electric power industry, electrotechnical industry], 2016, no. 2, pp. 2–7.

16. Ilyushin P.V., Perevalov K.V. Analysis of technical requirements for automatic systems controlling excitation of distributed generation facility generating units.

*Relejnaya zashchita i avtomatizaciya* [Relay Protection and Automation], 2016, no. 4, pp. 23–27.

17. Ilyushin P.V. Analysis of internal electric power supply grid features of industrial facilities with distributed generation. *Energetik* [Power and Electrical Engineering] 2016, no. 12, pp. 21–25.

18. SHarygin M.V., Kulikov A.L. *Zashchita i avtomatika sistem ehlektronnabzheniya s aktivnymi promyshlennymi potrebitelyami* [Protection and automation of power supply systems with active industrial consumers], Nizhniy Novgorod: NIU RANHiGS Publ., 2017, 286 p.

#### Критерии авторства

Илюшин П.В. подготовил рукопись и несет ответственность за plagiat.

#### Authorship criteria

Ilyushin P.V. has prepared the manuscript and bears the responsibility for plagiarism.

#### Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

#### Conflict of interests

The author declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.314

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-136-147>

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ПУСКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА МЕТОДОМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© В.Е. Павлов<sup>1</sup>

Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

**РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ.** Провести исследование режимов пуска электропривода ленточного конвейера, механическая часть которого представляет собой сложную систему с распределенными по длине конвейера параметрами: массой перемещаемого груза, массой и упругостью тягового органа, усилиями статического сопротивления. **МЕТОДЫ.** Теоретические исследования проводились с применением математического аппарата систем линейных и нелинейных дифференциальных уравнений, реальная механическая система представлена упрощенной динамической моделью, в которой распределенные массы упругости и силы заменены эквивалентными сосредоточенными. Экспериментальные исследования проводились методами моделирования. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Получены переходные процессы по токам статора, скорости, моментам вращения и силам сопротивления на валу асинхронного двигателя при пуске ленточного конвейера. Получены осциллограммы хода, скорости, ускорения и набегающих усилий натяжения на отдельные участки ленты конвейера. **ВЫВОДЫ.** Разработанная математическая модель ленточного конвейера позволяет проводить исследования статических и динамических режимов работы, как приводного двигателя, так и механической части конвейера, состоящей из отдельных участков, на каждом из которых могут быть рассчитаны усилия натяжения при пусках с различными нагрузками.

**Ключевые слова:** ленточный конвейер, асинхронный двигатель, приводной барабан, усилие натяжения ленты, рабочая и холостая ветвь, эквивалентная жесткость.

**Информация о статье.** Дата поступления 31 января 2018 г.; дата принятия к печати 2 марта 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2018 г.

**Формат цитирования.** Павлов В.Е. Исследование режимов пуска электропривода ленточного конвейера методом компьютерного моделирования // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 4. С. 136–147. DOI: [10.21285/1814-3520-2018-4-136-147](http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-136-147)

### RESEARCH OF BELT CONVEYOR ELECTRIC DRIVE START MODES BY A COMPUTER SIMULATION

V.E. Pavlov

Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

**ABSTRACT.** The Purpose of the paper is to study the starting modes of the belt conveyor electric drive, the mechanical part of which is a complex system of parameters distributed along the conveyor length: weight of the transported load, weight and elasticity of the traction organ, forces of static resistance. **METHODS.** The theoretical studies were carried out using the mathematical apparatus of linear and nonlinear differential equation systems. The real mechanical system is represented by a simplified dynamic model where the distributed masses of elasticity and force are replaced by equivalent lumped masses. Experimental studies were carried out by modeling methods. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** Transient processes are obtained for stator currents, speed, torque and resistance forces on the shaft of the induction motor when the belt conveyor is started. The oscillograms of stroke, speed, acceleration, and incident tension forces for specific sections of the conveyor belt are received. **CONCLUSIONS.** The developed mathematical model of the belt conveyor allows to study the static and dynamic operation modes of both the drive motor and the conveyor mechanical part consisting of separate sections, on each of which tension forces can be calculated for the starts with different loads.

**Keywords:** belt conveyor, induction motor, driven drum, belt tension force, working and idle branch, equivalent rigidity

<sup>1</sup>Павлов Владимир Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и электрического транспорта, e-mail: [pview52@mail.ru](mailto:pview52@mail.ru)

Vladimir E. Pavlov, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Electric Drive and Electric Transport, e-mail: [pview52@mail.ru](mailto:pview52@mail.ru)



**Information about the article.** Received January 31, 2018; accepted for publication March 2, 2018; available online April 30, 2018.

**For citation.** Pavlov V.E. Research of belt conveyor electric drive start modes by a computer simulation // Proceeding of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 4, pp. 136–147. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-136-147

## Введение

Конвейеры являются наиболее распространенными механизмами непрерывного транспорта различных материалов. В ленточных конвейерах лента конвейера одновременно выполняет функции несущего и тягового органов. При движении конвейера приводной двигатель должен преодолевать нагрузку, обусловленную силами трения во всех движущихся элементах, а также составляющую силы тяжести транспортируемого груза на наклонных участках конвейера.

Механическая часть конвейеров представляет собой сложную систему с распределенными по длине конвейера параметрами: массой перемещаемого груза, массой и упругостью тягового органа усилиями статического сопротивления<sup>2</sup> [1, 2].

Наличие упругих механических связей является фактором, способствующим возникновению колебаний, которые при неблагоприятных условиях существенно увеличивают динамические нагрузки рабочего оборудования [3, 4, 5]. Движение системы с распределенными параметрами описывается дифференциальными уравнениями в частных производных, решение которых в общем виде представляет значительные математические трудности [6, 7, 8]. Однако для качественного рассмотрения физических процессов, возникающих в пусковых режимах конвейеров, реальная механическая система может быть представлена упрощенной динамической моделью, в которой распределенные массы упругости и силы заменены эквивалентными сосредоточенными. Наиболее тяжелый режим колебаний возникает при пуске ленточных конвейеров длиной в тысячи метров. Такие конвейеры применяются на открытых разработках

полезных ископаемых. При пуске таких конвейеров необходимо учитывать скорость распространения упругих колебаний вдоль ленты. Если время пуска двигателя меньше времени распространения упругой волны от приводного барабана до натяжного, то двигатель успевает приобрести полную рабочую скорость, а хвостовой конец тягового элемента остается еще неподвижным. Когда упругая волна дойдет до конца конвейера, то к его хвостовым массам прикладывается импульс полной рабочей скорости. Происходит упругий удар. Упругая волна, отражаясь, возвращается к приводному барабану. Для того чтобы ослабить упругий удар, в таких конвейерных линиях используют пуск на пониженную скорость и уже с этой скорости выполняют пуск на полную рабочую скорость. Для крупных конвейерных установок часто применяют вспомогательное натяжное устройство, создающее дополнительное натяжение ленты только на период пуска конвейера. Кроме того, иногда на тяговом элементе для снижения максимального натяжения ленты до допустимого уровня устанавливают несколько приводных станций.

Динамические нагрузки при упругих колебаниях могут значительно превысить статические и инерционные нагрузки и привести к перегрузкам и поломкам деталей, а также к затягиванию времени пуска.

Методы компьютерного моделирования с применением имитационной среды *Simulink* пакета *Matlab* используются в настоящее время для исследования объектов в системах практически любой сложности [9, 10, 11, 12]. К немаловажным достоинствам данного метода можно отнести возможность наблюдения за процессом во времени.

<sup>2</sup>Ключев В.И., Терехов В.М. Электропривод и автоматизация общепромышленных установок: учебник. М.: Энергия, 1980. 360 с. / Klyuchev V.I., Terekhov V.M. Electric drive and automation of general industrial installations: a textbook. M.: Energia, 1980. 360p.

Цель настоящей работы заключается в том, чтобы разработать математическую модель электропривода ленточного

конвейера с учетом основных нелинейностей, позволяющую исследовать статические и динамические показатели работы электропривода при пуске конвейера.

### Математическое описание ленточного конвейера

Механическая часть конвейеров представляет собой сложную систему, состоящую из массы ленты конвейера и перемещаемого груза, сил сопротивления движению на прямолинейных участках и на участках изгиба ленты.

Кроме того, наличие упругих механических связей между связанными массами способствует возникновению колебаний, которые существенно увеличивают динамические нагрузки рабочего оборудования. Движение системы с распределенными параметрами описывается дифференциальными уравнениями в частных производных, решение которых в общем виде представляет значительные математические трудности. Для рассмотрения физических процессов при пусках конвейеров реальная механическая система может быть представлена упрощенной динамической моделью, в которой распределенные массы упругости и силы заменены эквивалентными сосредоточенными.

Для составления модели можно использовать диаграмму натяжений ленты конвейера в режиме пуска<sup>2</sup>. Если в качестве условия эквивалентности принять равенство натяжений тягового органа на приводном элементе реальной системы натяжениям в соответствующих точках приводного элемента на модели, то динамическая мо-

дель подвижной части конвейера, приведенная к поступательному движению, будет иметь вид, представленный на рис. 1.

На рис. 1:  $m_p$ ,  $m_o$  – результирующие массы соответственно рабочей и холостой ветвей конвейера с учетом приведенной к поступательному движению массы натяжного барабана;  $m_p = (J_p + J_{дв}i_p^2/R_p)$  – масса привода, приведенная к поступательному движению;  $c_{т,эк}$  – эквивалентная жесткость ветвей тягового органа;  $x_p$ ,  $x_{p,0}$ ,  $x_o$  – координаты сосредоточенных масс соответственно  $m_p$ ,  $m_p$ ,  $m_o$ ;  $F_p = c_{т,эк}(x_p - x_{p,0})$  и  $F_o = c_{т,эк}(x_p - x_o)$  – упругие усилия рабочей и холостой ветвей тягового органа;  $F_{ct,p}$ ,  $F_{ct,o}$  – результирующие усилия статического сопротивления рабочей и холостой ветвей тягового органа, причем  $F_{ct,p} + F_{ct,o} = F_c$ ;  $F_p = M_p i_p / R_p$  – тяговое усилие привода.

Движение привода, согласно полученной динамической модели, описывается системой дифференциальных уравнений<sup>2</sup>:

$$F_p - c_{т,эк}(x_p - x_{p,0}) - c_{т,эк}(x_p - x_{p,0}) = m_p d^2 x_p / dt^2; \quad (1)$$

$$c_{т,эк}(x_p - x_o) - F_{ct,o} + T_o = m_o d^2 x_o / dt^2; \quad (2)$$

$$c_{т,эк}(x_p - x_{p,0}) - F_{ct,p} - T_o = m_p d^2 x_{p,0} / dt^2. \quad (3)$$

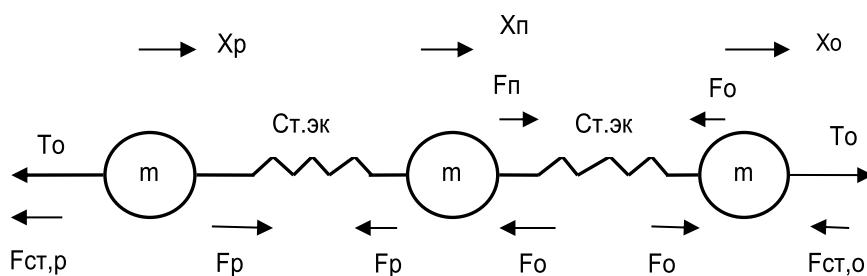


Рис. 1. Расчетная динамическая модель конвейера  
Fig. 1. Analytic dynamic model of a conveyor

Разрешая систему уравнений (1), (2), (3), относительно координаты перемещения  $x_{\Pi}$ , получаем после преобразования по Лапласу уравнение вида:

$$(T_{P1}p^2 + 1)(T_{P2}p^2 + 1)p^2 x_{\Pi} = (F_{\Pi} - F_c) / (m_{\Pi} + m_P + m_O), \quad (4)$$

где  $T_{P1} = 1/\Omega_{P1}$ ;  $T_{P2} = 1/\Omega_{P2}$ .

Резонансные частоты механической части в (4) выражаются через собственные частоты свободных колебаний отдельных масс формулой:

$$\Omega_{P1, P2} = \sqrt{\frac{1}{2} [2\Omega_{\Pi}^2 + \Omega_P^2 + \Omega_0^2 \pm \sqrt{(\Omega_0^2 - \Omega_P^2) + 4\Omega_{\Pi}^4}]}, \quad (5)$$

где  $\Omega_{\Pi} = \sqrt{C_{T, \text{ЭК}} / m_{\Pi}}$ ;

$\Omega_P = \sqrt{C_{T, \text{ЭК}} / m_P}$ ;  $\Omega_0 = \sqrt{C_{T, \text{ЭК}} / m_O}$ .

Уравнение в силу принятого условия эквивалентности позволяет получить не только качественную картину движения привода, но и достаточно точные количественные результаты.

Таким образом, в процессе пуска при  $F_{\Pi} = \text{const}$  на среднее значение ускорения, определяемое правой частью уравнения (4), накладываются колебания с частотами  $\Omega_{P1}$  и  $\Omega_{P2}$ . Для тяжелых и длинных конвейеров из-за больших поступательно движущихся

масс частоты  $\Omega_P$  и  $\Omega_0$  существенно меньше  $\Omega_{\Pi}$  и, вследствие этого, резонансные частоты  $\Omega_{P1}$  и  $\Omega_{P2}$  значительно отличаются друг от друга. Пренебрегая значением  $(\Omega_0^2 - \Omega_P^2)$  в (5) получаем:

$$\Omega_{P1} \approx \sqrt{2\Omega_{\Pi}^2 + (\Omega_P^2 + \Omega_0^2)/2}; \quad (6)$$

$$\Omega_{P2} \approx \sqrt{(\Omega_P^2 + \Omega_0^2)/2}. \quad (7)$$

Амплитудные значения ускорения создают опасность проскальзывания ленты относительно приводного барабана.

Колебательный характер процесса пуска обусловливает динамические перегрузки тягового элемента. Возникшие при пуске колебания в действительности демпфируются за счет вязкого трения во всей подвижной части привода и главным образом внутри тягового элемента.

В конце процесса пуска, когда двигатель выходит на жесткую механическую характеристику, колебания эффективно демпфируются за счет самого привода.

В качестве примера рассмотрим ленточный конвейер, имеющий две рабочие ветви и две ветви холостого хода, конфигурация которого показана на рис. 1.

Для расчета ленточного конвейера целесообразно пронумеровать все прямолинейные участки и участки изгиба, следя от точки сбегания приводного барабана по направлению движения ленты (рис. 2).

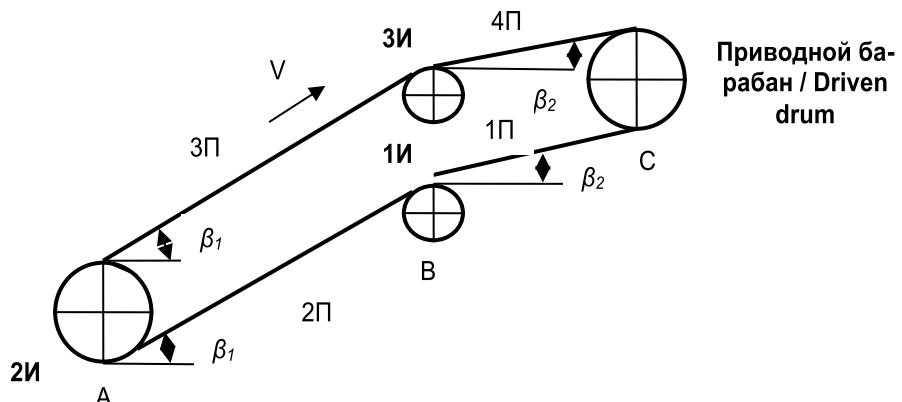


Рис. 2. Схема ленточного конвейера  
Fig. 2. Belt conveyor diagram



Для определения натяжений в ленте транспортера предварительно необходимо найти:

1) массу 1м транспортируемого груза:

$$m_r^* = \Pi/v \text{ (кг/м)}, \quad (8)$$

где  $\Pi$  – производительность конвейера, кг/с;  $v$  – скорость движения ленты, м/с;

2) весовую нагрузку, определяемую массой полезного груза:

$$q_r = 9,81 m_r^* \text{ (Н/м)}; \quad (9)$$

3) весовую нагрузку, определяемую массой ленты:

$$q_0 = q_r \cdot (q_0/q_{ном}) \text{ (Н/м)}; \quad (10)$$

4) силы сопротивления движению на прямолинейных участках:

$$\Delta F_{Pi} = q_i l_i (C_{Pi,i} \cos \beta_i \pm \sin \beta_i), \quad (11)$$

где  $q_i$  – весовая нагрузка участка на 1м пути (для рабочей ветви конвейера  $q_3 = q_4 = q_0 + q_r$ , а для холостой ветви  $q_1 = q_2 = q_0$ );  $l_i$  – длина участка, м;  $C_{Pi,i}$  – коэффициент сопротивления движения на прямолинейном участке (на всех участках одинаковы и равны  $C_P$ );  $\beta_i$  – угол наклона участка.

В формуле (11) знак « + » соответствует участкам, где лента движется на подъем, а знак « - » при движении на спуск. Для схемы конвейера на рис. 1:

$$\Delta F_{P1} = q_1 l_1 (C_P \cos \beta_2 - \sin \beta_2);$$

$$\Delta F_{P2} = q_2 l_2 (C_P \cos \beta_1 - \sin \beta_1);$$

$$\Delta F_{P3} = q_3 l_3 (C_P \cos \beta_1 + \sin \beta_1);$$

$$\Delta F_{P4} = q_4 l_4 (C_P \cos \beta_2 + \sin \beta_2);$$

5) результирующие усилие сопротивления на прямолинейных участках, которое равно величине усилий на отдельных участках с учетом увеличения натяжений на всех

участках изгиба, кроме приводного барабана:

$$F_n = \Delta F_{P4} + \Delta F_{P3} K_i + \Delta F_{P2} K_i^2 + \Delta F_{P1} K_i^3, \quad (12)$$

где  $K_i$  – коэффициенты увеличения натяжения на участках изгиба:

$$K_i = 1 + C_i, \quad (13)$$

где  $C_i$  – коэффициенты сопротивления на участках изгиба.

Натяжение в сбегающей точке приводного барабана определяется следующим образом:

$$T_{CB} = \frac{F_n \times K_{дин}}{e^{\alpha \mu} - K_i}, \quad (14)$$

где  $K_{дин}$  – коэффициент запаса, учитывающий динамические нагрузки при пуске конвейера (при расчетах можно принять, что  $K_{дин} = 1,2 \div 1,3$ );  $\mu$  – коэффициент трения между тяговым и приводным элементами;  $\alpha$  – угол обхвата барабана лентой, рад;  $K_i$  – результирующий коэффициент увеличения натяжения, который определяется произведением аналогичных коэффициентов  $K_i$  всех участков изгиба (кроме приводного барабана).

Имея натяжение в сбегающей точке приводного барабана, можно рассчитать и построить диаграмму натяжений ленты конвейера.

Натяжение на каждом участке определится следующим образом:

– для прямолинейных участков

$$T_{CB,P,i} = T_{HB,P,i} + \Delta F_{Pi,i}, \quad (15)$$

– для участков изгиба

$$T_{CB,I,i} = K_i i T_{HB,I,i}. \quad (16)$$

При этом необходимо учесть, что

$$T_{HB,P,i} = T_{CB,I,i-1} \text{ и } T_{HB,I,i} = T_{CB,P,i}.$$

Для участков конвейера, показанного на рис. 1.

$$\begin{aligned}
 T_{НБ,П,1} &= T_{СБ} ; \\
 T_{СБ,П,1} &= T_{НБ,П,1} + \Delta F_{П,1} ; \\
 T_{СБ,И,1} &= K_{и,1} T_{СБ,П,1} ; \\
 T_{НБ,П,2} &= T_{СБ,И,1} ; \\
 T_{СБ,П,2} &= T_{НБ,П,2} + \Delta F_{П,2} ; \\
 T_{СБ,И,2} &= K_{и,2} T_{НБ,И,2} ; \\
 T_{НБ,П,3} &= T_{СБ,И,2} ; \\
 T_{СБ,П,3} &= T_{НБ,П,3} + \Delta F_{П,3} ; \\
 T_{СБ,И,3} &= K_{и,3} T_{НБ,И,3} ; \\
 T_{НБ,П,4} &= T_{СБ,И,3} ; \\
 T_{НБ,И,4} &= T_{НБ,П,4} + \Delta F_{П,4} .
 \end{aligned}$$

По диаграмме натяжений определяется наибольшее и наименьшее натяжение в ленте конвейера. Результирующая сила сопротивления движению  $F_{ct}$  определяется как разность натяжений на приводном барабане:

$$F_{ct} = T_{НБ} - T_{СБ}. \quad (17)$$

Модель электропривода конвейера показана на рис. 3. Она содержит источник трехфазного сетевого напряжения, асинхронный двигатель, измерительные приборы, механизм конвейера, измерительные приборы.

Модель механизма конвейера, построенная на основании уравнения (4), приведена на рис. 4. Для учета затухающего характера колебаний в результате демпфирующего действия сил вязкого трения в модель введен коэффициент затухания  $K_{зат}$ ,

обеспечивающий снижение амплитуды колебаний ускорения  $a$  в функции времени  $t$ . В модели определяется скорость ленты  $v$  и координата  $x = x_l$ . Для расчета результирующие усилия статического сопротивления рабочей и холостой ветвей тягового органа  $F_c$  используется БЛОК1, внутренняя структура которого показана на рис. 4. Расчет проводится для ленточного конвейера, рассмотренного ранее, в соответствии с методикой, изложенной в [1]. Отличительной особенностью расчета на рис. 4 является возможность использования вычисляемых значений ускорения  $a$ , что позволяет сделать расчет более точным.

Исходными данными для получения динамической модели электропривода конвейера (рис. 2) являются размеры ветвей конвейера ( $l_1, l_2, \dots, l_i, \dots, l_n$ ) и их весовая нагрузка ( $q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_n$ ). На основании этих данных рассчитываются массы ветвей конвейера:

$$m_i = l_i q_i / 9,81; \quad (18)$$

– определяется эквивалентная жесткость ветвей конвейера:

$$C_{T,ЭКВ} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \times 9,81}{\sum_{i=1}^n l_i}; \quad (19)$$

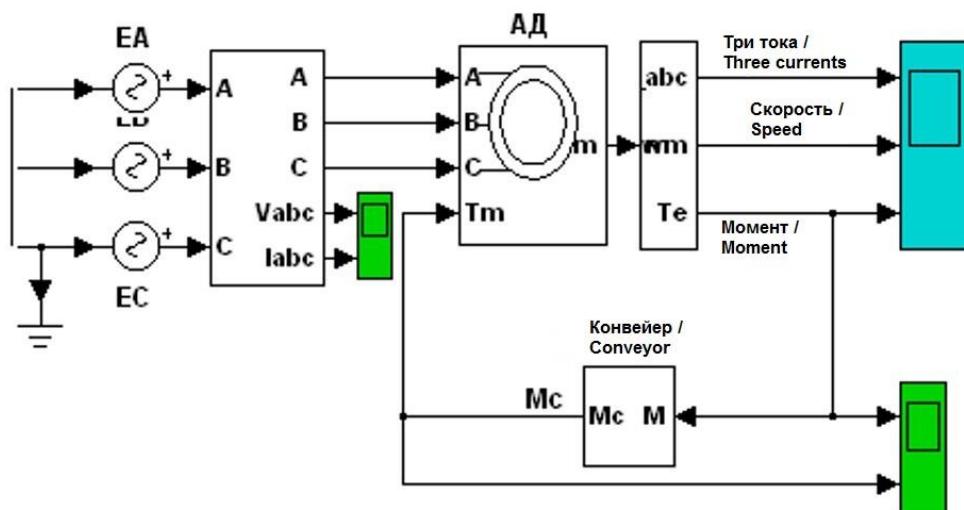


Рис. 3. Модель электропривода конвейера  
Fig. 3. Model of a conveyor electric drive

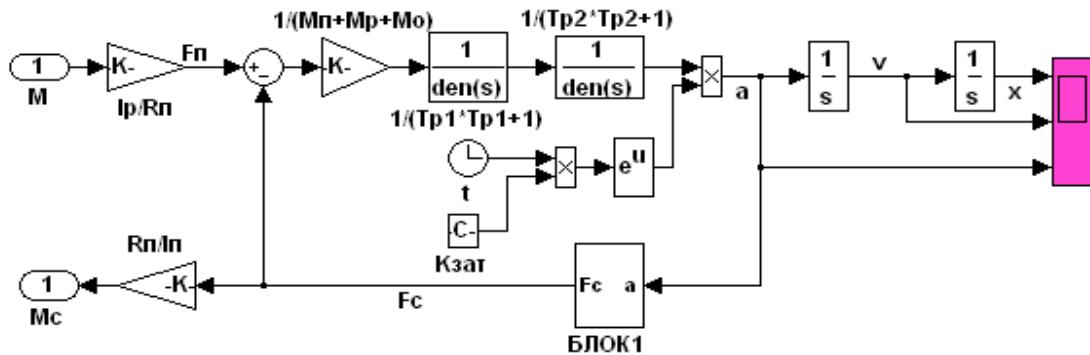


Рис. 4. Модель конвейера  
 Fig. 4. Conveyor model

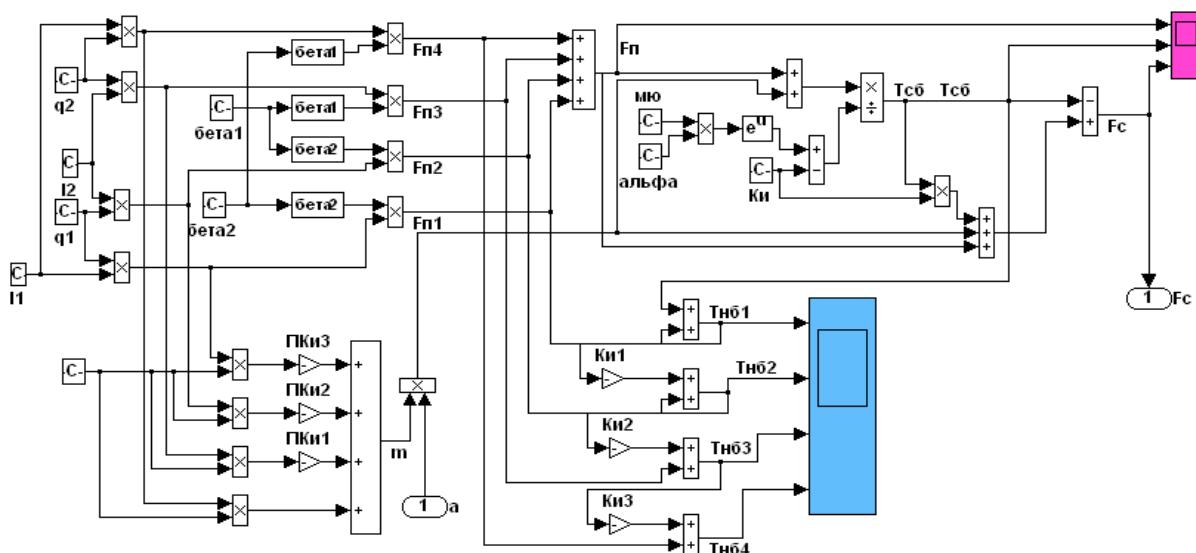


Рис. 5. Модель расчета усилий на участках конвейера  
 Fig. 5. Model of forces calculation on conveyor sections

– рассчитываются значения собственных частот колебаний ветвей конвейера: рабочей

$$\Omega_p = \sqrt{C_{T,EK} / m_p} \quad (20)$$

и холостой

$$\Omega_o = \sqrt{C_{T,EK} / m_o}. \quad (21)$$

Для определения значения собственной частоты колебаний привода  $\Omega_p$  необходимо найти массу привода, приведенную к поступательному движению:

$$m_p = (J_p + J_{dB} i_p^2) / R_p, \quad (22)$$

где  $J_p$ ,  $R_p$  – момент инерции и радиус приводного барабана, соответственно,  $J_{dB}$  – момент инерции двигателя;  $i_p$  – передаточное число редуктора. Собственная частота колебаний привода может быть определена по формуле:

$$\Omega_p = \sqrt{C_{T,EK} / m_p}. \quad (23)$$

Значения резонансных частот могут быть рассчитаны по (5) или (6), (7).

## Результаты и их обсуждение

Показаны полученные на модели переходные процессы по токам статора, скорости, моментам вращения и силе сопротивления на валу асинхронного двигателя при первом пуске ленточного конвейера (рис. 6 а) и при пуске с загруженными рабочими участками (рис. 6 б).

Анализ осциллограмм на рис. 6 позволяет определить:

– при первом пуске ленточного конвейера пусковой ток асинхронного двигателя составляет 361 А и превышает номинальное значение тока в 3,5 раза, такой ток протекает в цепи статора в течение 1,6 сек; в дальнейшем значение тока почти плавно нарастает от 16 А до 62 А, время переходного процесса по току до установившегося значения составляет 100 сек;

– при пуске с загруженными рабочими участками пусковой ток асинхронного двигателя составляет 365 А и превышает номинальное значение тока в 3,5 раза, такой ток протекает в цепи статора в течение 7 сек; в дальнейшем переходный процесс по току носит колебательный характер с затуханием, время переходного процесса по току до установившегося значения 62 А составляет 75 сек;

– при первом пуске ленточного конвейера скорость асинхронного двигателя

нарастает плавно, время переходного процесса по скорости составляет 1,6 сек;

– при пуске с загруженными рабочими участками скорость асинхронного двигателя нарастает плавно, время переходного процесса по скорости составляет 7 сек;

– при первом пуске ленточного конвейера максимальный момент асинхронного двигателя составляет 330 нм (нанометр) и превышает номинальное значение момента в 3,5 раза; в дальнейшем значение момента почти плавно нарастает от 0 до 116 нм, время переходного процесса по моменту до установившегося значения составляет 100 сек;

– при пуске с загруженными рабочими участками максимальный момент асинхронного двигателя такой же; в дальнейшем переходный процесс по моменту носит колебательный характер с затуханием, время переходного процесса по моменту до установившегося значения 116 нм составляет 75 сек;

– при первом пуске ленточного конвейера момент сил сопротивления на валу асинхронного двигателя плавно нарастает без перерегулирования; время переходного процесса по моменту сил сопротивления до установившегося значения 116 нм составляет 100 сек;

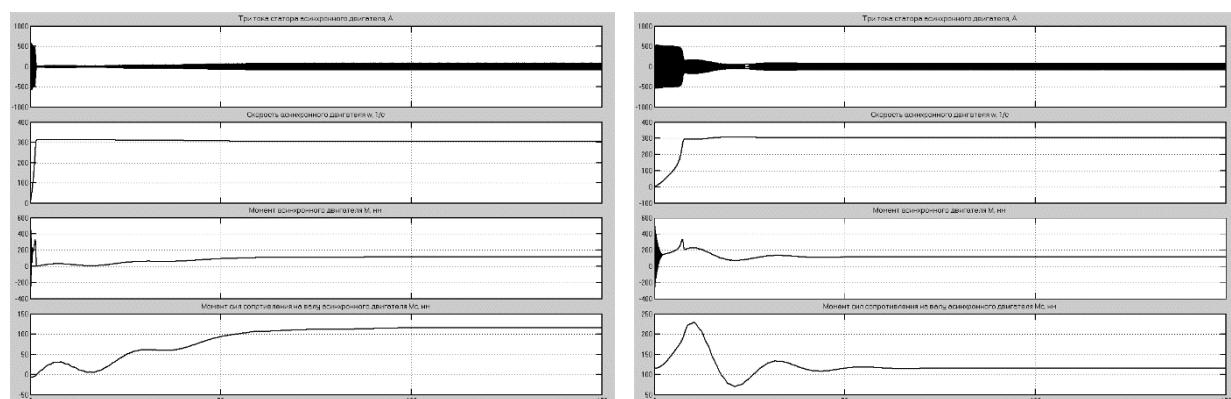


Рис. 6. Переходные процессы по токам статора, скорости, моментам вращения и силе сопротивления на валу асинхронного двигателя при первом пуске ленточного конвейера (а) и при пуске с загруженными рабочими участками (б)

Fig. 6. Transient processes for stator currents, speed, torques and resistance forces on the shaft of an induction motor at the first start of the belt conveyor (a) and at the start with loaded work areas (b)

– при пуске с загруженными рабочими участками переходный процесс по моменту сил сопротивления на валу асинхронного двигателя носит колебательный характер с перерегулированием  $G\% = 102,6\%$ , время переходного процесса по моменту сил сопротивления до установившегося значения 116 нм составляет 75 сек.

На рис. 7 показаны осциллограммы хода, скорости и ускорения ленты конвейера при первом пуске ленточного конвейера (рис. 7 а) и при пуске с загруженными рабочими участками (рис. 7 б).

Анализ осциллограмм на рис. 7 позволяет определить:

– при первом пуске ленточного конвейера переходный процесс по скорости ленты имеет перерегулирование  $G\% = 3\%$ , время переходного процесса по скорости ленты до установившегося значения 2 м/с составляет 2 сек;

– при пуске с загруженными рабочими участками переходный процесс по скорости без перерегулирования, время переходного процесса по скорости ленты до установившегося значения 2 м/с составляет 7 сек;

– при первом пуске ленточного конвейера переходный процесс по ускорению ленты носит колебательный характер: максимальное ускорение  $a = 3,93 \text{ } 1/\text{c}^2$ , мини-

мальное ускорение  $a = -1,64 \text{ } 1/\text{c}^2$ ; время переходного процесса по ускорению составляет 100 сек;

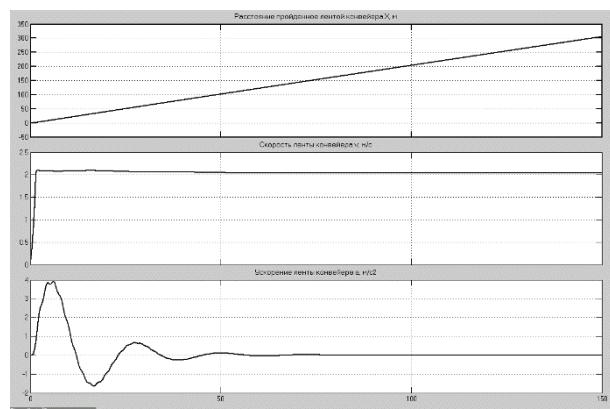
– при пуске с загруженными рабочими участками переходный процесс по ускорению ленты носит колебательный характер: максимальное ускорение  $a = 2,24 \text{ } 1/\text{c}^2$ , минимальное ускорение  $a = -0,88 \text{ } 1/\text{c}^2$ ; время переходного процесса по ускорению составляет 75 сек.

На рис. 8 показаны осциллограммы набегающих усилий натяжения на первый, второй, третий и четвертый участки ленты конвейера при первом пуске ленточного конвейера (рис. 8 а) и при пуске с загруженными рабочими участками (рис. 8 б).

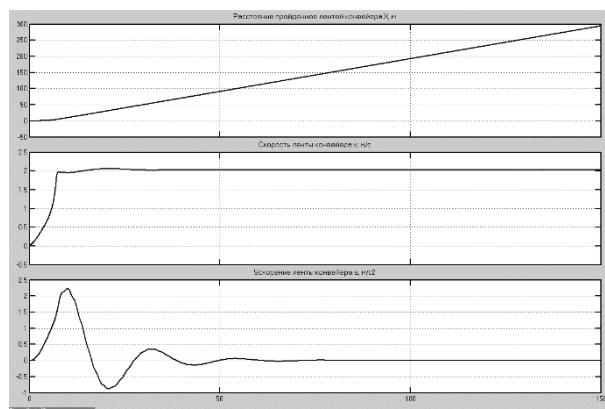
Анализ осциллограмм на рис. 8 позволяет определить:

– при первом пуске ленточного конвейера набегающее усилие натяжения ленты на первом участке нарастает плавно в пределах от -400 н до 9900 н, время переходного процесса по этому параметру до установившегося значения 9900 н составляет 100 сек;

– при пуске с загруженными рабочими участками набегающее усилие натяжения ленты на первом участке носит колебательный характер с перерегулированием  $G\% = 85\%$ , время переходного процесса по этому параметру до установившегося значения 9900 н составляет 75 сек;



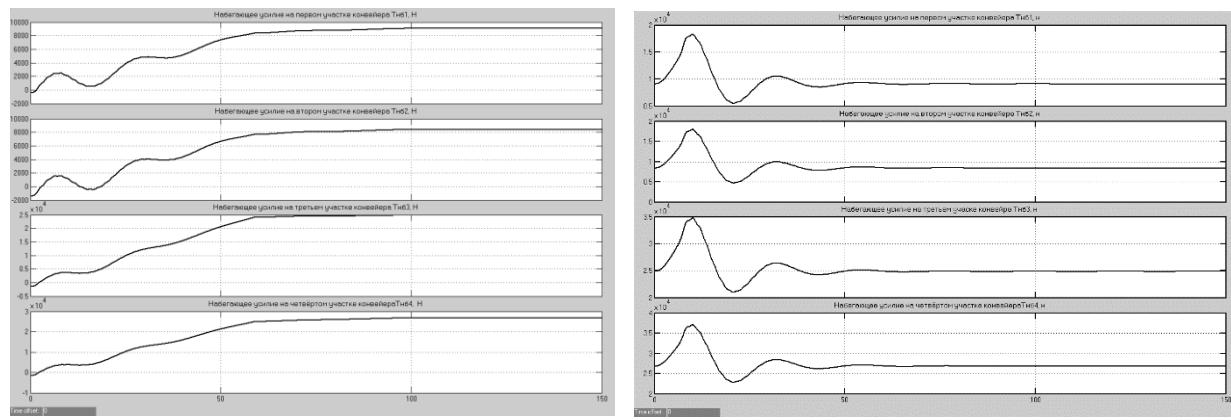
**a**



**b**

**Рис. 7. Осциллограммы хода, скорости и ускорения ленты конвейера при первом пуске ленточного конвейера (а) и при пуске с загруженными рабочими участками (б)**

**Fig. 7. Oscillograms of the stroke, speed and acceleration of the conveyor belt at the first start of the conveyor belt (a) and at the start with loaded work areas (b)**



a

b

**Рис. 8. Осциллограммы набегающих усилий натяжения на первый, второй, третий и четвертый участки ленты конвейера при первом пуске ленточного конвейера (а) и при пуске с загруженными рабочими участками (б)**

**Fig. 8. Oscillograms of incident tension forces on the first, second, third and fourth sections of the conveyor belt at the first start of the belt conveyor (a) and at the start with loaded work areas (b)**

– при первом пуске ленточного конвейера набегающее усилие натяжения ленты на втором участке нарастает плавно в пределах от -1400 н до 8400 н, время переходного процесса по этому параметру до установившегося значения 8400 н составляет 100 сек;

– при пуске с загруженными рабочими участками набегающее усилие натяжения ленты на втором участке носит колебательный характер с перерегулированием  $G\% = 114\%$ , время переходного процесса по этому параметру до установившегося значения 8400 н составляет 75 сек;

– при первом пуске ленточного конвейера набегающее усилие натяжения ленты на третьем участке нарастает плавно в пределах от -1450 н до 24870 н, время переходного процесса по этому параметру до установившегося значения 24870 н составляет 100 сек;

– при пуске с загруженными рабочими участками набегающее усилие натяжения ленты на третьем участке носит колебательный характер с перерегулированием  $G\% = 40\%$ , время переходного процесса по этому параметру до установившегося значения 24870 н составляет 75 сек;

– при первом пуске ленточного конвейера набегающее усилие натяжения ленты на четвертом участке нарастает плавно в пределах от -1500 н до 26840 н, время переходного процесса по этому параметру до установившегося значения 26840 н составляет 100 сек;

– при пуске с загруженными рабочими участками набегающее усилие натяжения ленты на четвертом участке носит колебательный характер с перерегулированием  $G\% = 38\%$ , время переходного процесса по этому параметру до установившегося значения 26840 н составляет 75 сек.

## Выводы

Разработана математическая модель электропривода ленточного конвейера, механическая часть которого представляет собой сложную систему с распределенными по длине конвейера параметрами: массой перемещаемого груза, массой и упругостью тягового органа, усилиями статического сопротивления.

Получены переходные процессы по токам статора, скорости, моментам вращения и силе сопротивления на валу асинхронного двигателя при пуске ленточного конвейера. Получены осциллограммы хода, скорости, ускорения и набегающих усилий натяжения на отдельные участки ленты конвейера. Исследования показали, что:



– при пуске с загруженными рабочими участками время переходного процесса по скорости в 4,375 раза превышает это же время при первом пуске;

– при пуске с загруженными рабочими участками переходный процесс по моменту сил сопротивления на валу асинхронного двигателя носит колебательный характер с перерегулированием  $G\% = 102,6\%$ , а при первом пуске этот момент плавно нарастает без перерегулирования;

– при пуске с загруженными рабочими участками набегающее усилие натя-

жения ленты на каждом из участков носит колебательный характер с перерегулированием  $G\%$  в пределах от 38% до 114%.

Таким образом, разработанная математическая модель ленточного конвейера позволяет проводить исследования статических и динамических режимов работы как приводного двигателя, так и механической части конвейера, состоящей из отдельных участков, на каждом из которых могут быть рассчитаны усилия натяжения при пусках с различными нагрузками.

#### Библиографический список

1. Куземкин Д.М., Довгяло В.А. Способы снижения динамических нагрузок в конструкциях ленточных конвейеров // Горная механика и машиностроение. 2014. № 3. С. 73–85.
2. Тарасов А.С. Механическая часть электропривода с распределенными параметрами как объект управления // Информационные технологии моделирования и управления. 2007. № 8 (42). С. 981–986.
3. Кузин Е.Г., Герике Б.Л. Мониторинг технического состояния редукторов частотно-регулируемого электропривода шахтных ленточных конвейеров // Горные науки и технологии. 2016. № 1 (1). С. 13–18.
4. Габигер В.В. Моделирование динамических и контактных процессов ленточных конвейеров // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2008. № 8. С. 123–125.
5. Реутов А.А. Имитационное моделирование ступенчатого регулирования скорости конвейера // Проблемы недропользования. 2017. № 2 (13). С. 26–32.
6. Ковалчук М.С., Поддубный Д.А. Моделирование и разработка алгоритма управления многодвигательным электроприводом конвейерного транспорта // Современная наука и практика. 2017. № 3 (20). С. 10–15.
7. Gudova A.V., Tcachenko O.Yu. Results of experimental researches of scraper conveyor are for transporting of agricultural loads // Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2014. № 196-2. С. 193–200.
8. Печеник Н.В., Бурьян С.А. Энергоэффективные режимы работы электромеханических систем ленточных конвейеров // Технічна електродинаміка. 2014. № 5. С. 122–124.
9. Ещин Е.К. Моделирование электромеханической системы скребкового конвейера в SIMULINK // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2015. № 3 (109). С. 83–92.
10. Kwon Y.W. The Finite Element Method Using MATLAB. Boca Raton a. o.: CRC Press, 1997. 519 p.
11. Павлов В.Е. Моделирование нагрузок электроприводов типовых производственных механизмов с применением системы «преобразователь частоты асинхронный двигатель» // Вестник ИрГТУ. 2011. № 9 (56). С. 168–173.
12. Реутов А.А. Моделирование стационарных режимов работы приводов ленточных конвейеров // Тяжелое машиностроение. 2007. № 2. С. 34–36.

#### References

1. Kuzemkin D.M., Dovgjalo V.A. Ways of dynamic load reduction in designs of belt conveyors (review). *Gornaja mehanika i mashinostroenie* [Mining Mechanical Engineering and Machine Building], 2014, no. 3, pp. 73–85. (In Russian).
2. Tarasov A.S. Mechanical part of an electric drive with distributed parameters as an object of control. *Informacionnye tehnologii modelirovaniya i upravlenija* [Information Technologies of Modeling and Control], 2007, no. 8 (42), pp. 981–986. (In Russian).
3. Kuzin E.G., Gerike B.L. Monitoring the condition of gear units for variable-frequency drives of mine belt conveyors. *Gornye nauki i tehnologii* [Mining Science and Technology], 2016, no. 1 (1), pp. 13–18. (In Russian).
4. Gabiger V.V. Modeling of dynamic and contact processes of belt conveyors. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Gornij zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal], 2008, no. 8, pp. 123–125. (In Russian).
5. Reutov A.A. Simulation of the conveyor speed step control. *Problemy nedropol'zovanija* [Subsoil Use Problems], 2017, no. 2 (13), pp. 26–32. (In Russian).
6. Koval'chuk M.S., Poddubnyj D.A. Modeling and control algorithms of the cross conveyors line with multi-engine variable speed drivers. *Sovremenennaja nauka i praktika* [Modern Science and Practice], 2017, no. 3 (20), pp. 10–15. (In Russian).



7. Gudova A.V., Tcachenko O.Yu. Results of experimental researches of scraper conveyer are for transporting of agricultural loads // Naukovij visnik NUBiP Ukraïni. Serija: Tehnika ta energetika APK., 2014, no. 196-2, pp. 193–200.
8. Pechenik N.V., Bur'jan S.A. Energy-efficient modes of belt conveyor electromechanical systems. Tehnichna elektrodinamika [Technical electrodynamics.], 2014, no. 5, pp. 122–124. (In Russian).
9. Eshhin E.K. Simulation of electromechanical system of scraper conveyor in SIMULINK. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta [Proceedings of Kuzbass State Technical University], 2015, no. 3 (109), pp. 83–92. (In Russian).
10. Kwon Y.W. The Finite Element Method Using MATLAB. Boca Raton a. o.: CRC Press, 1997, 519 p.
11. Pavlov V.E. Load simulation of electric drives of standard production machinery with the use of the system frequency converter - induction motor. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2011, no. 9 (56), pp. 168–173. (In Russian).
12. Reutov A.A. Modeling stationary operation modes of belt conveyor drives. Tjazheloe mashinostroenie [Heavy mechanical engineering], 2007, no. 2, pp. 34–36. (In Russian).

**Критерии авторства**

Павлов В.Е. подготовил статью и несет ответственность за plagiat.

**Конфликт интересов**

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Authorship criteria**

Pavlov V.E. has prepared the article for publication and bears the responsibility for plagiarism.

**Conflict of interests**

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this paper.



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.311

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-148-157>

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПОИСКА УРОВНЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ В КОНТРОЛЬНЫХ УЗЛАХ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ СНИЖЕНИЕ САЛЬДО-ПЕРЕТОКА АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В КОНТРОЛИРУЕМОМ СЕЧЕНИИ

© В.В. Петров<sup>1</sup>

Самарский государственный технический университет,  
443100, Российская Федерация, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.

**РЕЗЮМЕ.** Данная статья посвящена разработке алгоритма поиска уровней напряжений и коэффициентов трансформации контрольных пунктов, при которых достигается снижение превышения сальдо-перетока активной мощности своего максимально допустимого значения в контролируемом сечении, что позволяет минимизировать объемы вводимых ограничений электроснабжения. **МЕТОДЫ.** В основу алгоритма положен алгоритм оптимизации электрического режима методом приведенного градиента, отличающийся тем, что в качестве целевой функции оптимизации выступает функция, отражающая недопустимое превышение сальдо-перетока активной мощности в контролируемом сечении. Реализация алгоритма произведена в ПК Mathcad. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** На примере синтезированной модели шестиузловой электрической сети в ПК Mathcad, благодаря применению алгоритма, было достигнуто снижение сальдо-перетока активной мощности на 3,64% от его номинального значения. **ВЫВОДЫ.** Установлено, что регулирование напряжения в контрольных пунктах позволяет снизить значение сальдо-перетока активной мощности в сечении и минимизировать объемы вводимых ограничений электроснабжения, необходимых для ввода сальдо-перетока активной мощности в область допустимых значений.

**Ключевые слова:** энергосистема, максимально-допустимый переток активной мощности, сальдо-переток активной мощности, напряжение, контрольные пункты, приведенный градиент.

**Информация о статье.** Дата поступления 26 марта 2018 г.; дата принятия к печати 9 апреля 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2018 г.

**Формат цитирования.** Петров В.В. Разработка алгоритма поиска уровней напряжений в контрольных узлах, обеспечивающих снижение недопустимого значения сальдо-перетока активной мощности в контролируемом сечении // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 4. С. 148–157. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-148-157

## DEVELOPMENT OF A SEARCH ALGORITHM OF CONTROL NODE VOLTAGE LEVELS ENSURING ACTIVE POWER FLOW BALANCE REDUCTION IN A CONTROLLED SECTION

V.V. Petrov

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya St., Samara, 443100, Russian Federation

**ABSTRACT.** The article deals with the development of a search algorithm of voltage levels and transformation coefficients of measure points under which the increased value of the net power flow of the active power reduces in the controlled section that allows to minimize the volumes of introduced restrictions of power supply. **METHODS.** The algorithm is based on electric mode optimization by the reduced gradient method featuring the target optimization function represented by the function that reflects an inadmissible exceedance of the active power flow balance in the controlled cross-section. The algorithm is implemented in PTC Mathcad. **RESULTS.** On example of the model of a six-node electric network synthesized in the PTC Mathcad we showed a 3.64% reduction in the active power flow balance through the use of the developed algorithm. **CONCLUSIONS.** It has been found out that voltage regulation in the measure points allows to reduce the values of the active power flow balance in the cross-section and minimize the voulumes of introduced restrictions of power supply required to enter the active power flow balance in the range of permissible values.

<sup>1</sup>Петров Вячеслав Валерьевич, аспирант, e-mail: Petrov.v.163@yandex.ru  
Vyacheslav V. Petrov, Postgraduate student, e-mail: Petrov.v.163@yandex.ru



**Keywords:** power system, maximum admissible flow of active power, active power flow balance, voltage, measure points, reduced gradient

**Information about the article.** Received March 26, 2018; accepted for publication April 9, 2018; available online April 30, 2018.

**For citation.** Petrov V.V. Development of a search algorithm of control node voltage levels ensuring active power flow balance reduction in a controlled section. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 4, pp. 148–157. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-148-157

## Введение

Единая Энергосистема нашей страны характеризуется большим количеством удаленных друг от друга крупных энергоузлов, которые связаны между собой обширной сетью линий высокого, сверхвысокого и ультравысокого напряжения. Каждый день по межсистемным связям передаются колоссальные объемы электроэнергии, которые оказывают существенное влияние на электрические режимы как отдельных энергоузлов, так и всей энергосистемы в целом. Ввиду этого значения сальдо-перетоков активной мощности находятся на строгом контроле у персонала организаций, ответственных за поддержание безаварийной работы энергосистемы. При превышении в контролируемом сечении сальдо-перетока активной мощности своего максимально допустимого значения, рассчитанного для текущей схемы, оперативным персоналом должны предприниматься мероприятия, по вводу сальдо-перетока в область допустимых значений. Несмотря на обширные исследования по поиску методов снижения недопустимых перегрузок сети, как путем использования текущих свойств энергосистемы [1–5], так и за счет возможностей дополнительного оборудования [6–9], в данное время в диспетчерском управлении получили распространение следующие мероприятия: изменение уровней генерации в рассматриваемых энергоузлах, изменение топологии сети, а также ввод ограничений электроснабжения, который применяется в случае недостаточной эффективности первых двух мероприятий.

В рамках научных исследований автором предлагается использовать альтернативное мероприятие, предшествующее вводу ограничений электроснабжения, основанное на использовании регулирующего эффекта нагрузки по напряжению, обусловленного ее статическими характеристиками [10–12].

Целью данной работы является разработка алгоритма поиска уровней напряжений и коэффициентов трансформации контрольных узлов, при которых достигается снижение сальдо-перетока активной мощности в контролируемом сечении, что позволяет минимизировать объемы ограничений электроснабжения необходимых для решения задачи ввода сальдо-перетока в область допустимых значений.

## Материалы и методы исследования

Для достижения поставленной цели был проведен анализ алгоритма оптимизации электрического режима методом приведенного градиента [13], ключевым местом которого является целевая функция по вектору независимых переменных. В результате анализа была выявлена возможность использования данного алгоритма в качестве основы для разрабатываемого алгоритма. Для адаптации данного алгоритма под решение задачи снижения превышения сальдо-перетоком активной мощности своего максимально допустимого значения был проведен анализ стандартов АО «СО ЕЭС» по предотвращению развития и ликвидации нарушений нормального режима энергосистем. По результатам анализа автором была сформирована целевая функция, отражающая недопустимое превышение сальдо-перетока активной мощности в контролируемом сечении:



$$I(k_{mp}, U_{n-n}) = P_{\text{сальдо\_исх}} - \Delta P - P_{\text{сальдо\_расч}}, \quad (1)$$

где  $P_{\text{сальдо\_исх}}$  – исходное значение сальдо-перетока активной мощности в контролируемом сечении;  $P_{\text{сальдо\_расч}}$  – расчетное значение сальдо-перетока активной мощности в контролируемом сечении;  $\Delta P$  – необходимое значение снижения сальдо-перетока активной мощности в контролируемом сечении;  $U_{n-n}$  – напряжение в узле, балансирующем по реактивной мощности. Согласно этому, значение сальдо-перетока должно быть меньше максимально допустимого перетока активной мощности в контролируемом сечении для рассматриваемой схемы:

$$P_{\text{сальдо}} < P_{M_{ДП}}. \quad (2)$$

Следовательно,  $\Delta P$  рассчитывается следующим образом:

$$\Delta P = P_{\text{сальдо\_расч}} - P_{M_{ДП}}; \quad (3)$$

$$P_{\text{сальдо}} = \sum \left[ P_{n_{ном\_n}} \cdot \left[ a_0 - a_1 \cdot \frac{U_{y_n}}{U_{ном}} + a_2 \cdot \left( \frac{U_{y_n}}{U_{ном}} \right)^2 \right] + P_{\text{ген}} \right], \quad (4)$$

где  $P_{n_{ном\_n}}$  – номинальная активная мощность нагрузки в узле  $n$  (со знаком минус);  $P_{\text{ген}}$  – мощность генерации всех узлов рассматриваемой части энергосистемы;  $U_{ном}$  – номинальное напряжение узла;  $U_{y_n}$  – установившееся напряжение в узле  $n$ ;  $a_0, a_1, a_2$  – коэффициенты полиномов, отражающие состав комплексного узла нагрузки для активной мощности.

Для расчета исходного значения сальдо-перетока активной мощности  $P_{\text{сальдо\_исх}}$  используются данные исходного режима, а определение расчетного значения  $P_{\text{сальдо\_расч}}$  производится после каждого шага итерации в соответствии с новыми расчетными значениями напряжений в узлах нагрузки.

В итоге выражение (1) примет следующий вид:

$$I(k_{mp}, U_{n-n}) = P_{\text{сальдо\_исх}} - \Delta P - \sum \left[ P_{n_{ном\_n}} \cdot \left[ a_0 - a_1 \cdot \frac{U_{y_n}}{U_{ном}} + a_2 \cdot \left( \frac{U_{y_n}}{U_{ном}} \right)^2 \right] + P_{\text{ген}} \right]. \quad (5)$$

Благодаря данной целевой функции разработанный алгоритм оптимизации будет искать такие значения напряжений и коэффициентов трансформации в управляемых узлах нагрузки, при которых будет достигаться снижение сальдо-перетока активной мощности на величину  $\Delta P$  с учетом заданных ограничений.

Общая структура алгоритма будет следующая:

1. Расчет электрического режима методом Ньютона по известным значениям сопротивлений ветвей, активным и реактивным мощностям узлов.

Формирование матрицы узловых проводимостей



$$Y_{k,j} = \begin{pmatrix} \sum \frac{1}{Z_{1,j}} & -\frac{1}{Z_{1,2}} & \dots & -\frac{1}{Z_{1,j}} \\ -\frac{1}{Z_{2,1}} & \sum \frac{1}{Z_{2,j}} & \dots & -\frac{1}{Z_{2,j}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\frac{1}{Z_{k,1}} & -\frac{1}{Z_{k,2}} & \dots & \sum \frac{1}{Z_{k,j}} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где  $Z_{k,j}$  – комплексное сопротивление ветви  $k-j$ .

Формирование матрицы уравнений небалансов мощностей для каждого узла:

$$W(X) = 0; \quad (7)$$

$$X = \begin{pmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \dots \\ \delta_{n-1} \\ U_1 \\ U_2 \\ \dots \\ U_{n-1} \end{pmatrix}; W(X) = \begin{pmatrix} w_{P_1}(x) \\ w_{P_2}(x) \\ \dots \\ w_{P_{n-1}}(x) \\ w_{Q_1}(x) \\ w_{Q_2}(x) \\ \dots \\ w_{Q_{n-1}}(x) \end{pmatrix}; \quad (8)$$

$$w_{P_k} = P_k - g_{k,k}U_k^2 - U_k \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{n+1} U_j (g_{k,j} \cos \delta_{k,j} - b_{k,j} \cos \delta_{k,j}); \quad (9)$$

$$w_{Q_k} = Q_k - b_{k,k}U_k^2 - U_k \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{n+1} U_j (b_{k,j} \cos \delta_{k,j} - g_{k,j} \cos \delta_{k,j}). \quad (10)$$

где  $X$  -вектор – столбец искомых переменных;  $W(X)$  – система уравнений балансов мощностей для каждого узла;  $\delta$  – угол отклонения между фаз напряжений;  $U$  – напряжение в узле;  $w_P(x)$  – уравнение небаланса активной мощности узла,  $w_Q(x)$  – уравнение небаланса реактивной мощности узла (не записывает для узлов-генераторов реактивной мощности);  $n$  – количество узлов схемы;  $P, Q$  – активные и реактивные мощности узла;  $g, b$  – активная и реактивная проводимости ветви;  $k, j$  – номера узлов.

Для узлов, представляющих собой шины низкого напряжения трансформаторной подстанции в уравнениях небаланса активной и реактивной мощности, необходимо учесть коэффициент трансформации  $k_{mp}$ . Все напряжения, участвующие в расчете небаланса, приводятся к базисному напряжению, которым является напряжение узла, для которого рассчитывается небаланс мощности.

Выбор начальных приближений для искомых переменных.



Для первого шага итерации начальные приближения будут следующие:  $\delta_k^0 = 0$ ,  $U_k^0 = U_{\text{ном}}$ . Для последующих шагов в качестве начальных приближений используются значения, полученные в результате решения системы уравнений методом Гаусса в пункте 1.5. При этом значение напряжений узлов-генераторов является неизменным.

Формирование матрицы Якоби.

$$\frac{\partial W}{\partial X} = \begin{vmatrix} \frac{\partial W_P}{\partial U} & \frac{\partial W_P}{\partial \delta} \\ \frac{\partial W_Q}{\partial U} & \frac{\partial W_Q}{\partial \delta} \end{vmatrix}, \quad (11)$$

где  $\frac{\partial W_P}{\partial U}$ ,  $\frac{\partial W_Q}{\partial U}$  – частные производные небаланса активной и реактивной мощности, соответственно, по модулю напряжения узла;  $\frac{\partial W_P}{\partial \delta}$ ,  $\frac{\partial W_Q}{\partial \delta}$  – частные производные небаланса активной и реактивной мощности, соответственно, по фазе напряжения узла.

Определение неизвестных переменных методом Гаусса.

На данном этапе осуществляется значение заданных неизвестных переменных с использованием ранее сформированной матрицы Якоби.

Для учета регулирующего эффекта нагрузки по напряжению в тело цикла были введены дополнительные функции, отражающие зависимость потребляемой активной и реактивной мощности от напряжения узла [14]:

$$P_n = Fp(P_{\text{ном}}, U_{y_n}) = P_{\text{ном}} \cdot \left[ 0,83 - 0,3 \cdot \frac{U_{y_n}}{U_{\text{ном}}} + 0,47 \cdot \left( \frac{U_{y_n}}{U_{\text{ном}}} \right)^2 \right]; \quad (12)$$

$$Q_n = Fq(Q_{\text{ном}}, U_{y_n}) = Q_{\text{ном}} \cdot \left[ 3,7 - 7 \cdot \frac{U_{y_n}}{U_{\text{ном}}} + 4,3 \cdot \left( \frac{U_{y_n}}{U_{\text{ном}}} \right)^2 \right], \quad (13)$$

где  $U_{y_n}$  – установившееся напряжение в узле  $n$ .

Пересчет значений мощности нагрузки производится после каждого шага итерации, исходя из данных, полученных на предыдущем шаге. Для первого (нулевого) шага итерации  $U_{y_n}^0 = U_{\text{ном}}$ .

2. Определение токовой нагрузки ветвей схемы.

На данном этапе определяется токовая загрузка ветвей схемы в соответствии с результатами вычислений предыдущего шага с помощью действительных  $U'_n$  и мнимых  $U''_n$  значений напряжения:

$$U'_n = U_{y_n}; \quad (14)$$

$$U''_n = U_{y_n} \cdot \sin(\delta_{y_n}). \quad (15)$$

где  $\delta_{y_n}$  – установившееся значение угла отклонения между фаз напряжений в узле  $n$ ,  $U'_n$  – действительное значение напряжения,  $U''_n$  – мнимое значение напряжения.



По полученным значениям затем определяются действительные и мнимые значения токов ветвей с приведением к базисному напряжению, которым является напряжение узла начала. При этом для трансформаторной ветви также необходимо учитывать коэффициент трансформации.

$$I'_{y_{k,j}} = -\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (U'_k - U'_j) \cdot g_{k,j} - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (U''_k - U''_j) \cdot b_{k,j}; \quad (16)$$

$$I''_{y_{k,j}} = -\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (U'_k - U'_j) \cdot b_{k,j} - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (U''_k - U''_j) \cdot g_{k,j}. \quad (17)$$

Затем, исходя из полученных значений токов и напряжений, производится расчет переходов активной и реактивной мощностей в ветвях схемы, также полной мощности. Данный этап необходим для контроля выполнения установленных ограничений по длительно допустимому току элемента в полученном электрическом режиме.

3. Определение объемов необходимого снижения потребления  $\Delta P$ .

Расчет  $\Delta P$  производится в соответствии с формулами (2) и (3).

4. Формирование целевой функции.

На данном шаге формируется целевая функция, изменение которой от выбранных переменных будет отслеживаться в процессе выполнения оптимизации градиентным методом. Целевая функция будет определяться по выражению (5), синтезированному автором и упомянутом выше.

5. Проверка выполнения заданных ограничений.

На данном этапе проверяется соблюдение заданных в виде неравенств ограничений по длительно допустимой токовой нагрузке ветви, а также минимально и максимально допустимым уровням напряжений. Ограничения по коэффициенту трансформации  $k_{mp}$  зависят от интервала регулирования устройства РПН или ПБВ.

$$U_{\min} < U_n < U_{\max}; \quad (18)$$

$$I_{k,j} < I_{\max k,j}; \quad (19)$$

$$k_{\min} < k_{mp} < k_{\max}. \quad (20)$$

6. Определение градиента неявной функции.

Для оптимизации градиентным методом необходимо рассчитать градиент неявной функции  $\frac{\partial I}{\partial Y'}$ . Расчет производится формуле (0.33):

$$\frac{\partial I}{\partial Y'} = \frac{\partial I}{\partial Y'}|_0 + \frac{\partial I}{\partial W} \cdot \frac{\partial W}{\partial Y'}. \quad (21)$$

Для выбранных независимых переменных вектор  $\frac{\partial I}{\partial Y'}|_0$  при записи в матричной форме примет следующий вид:



$$\frac{\partial I}{\partial Y'}|_0 = \begin{pmatrix} \frac{\partial \sum S_n}{\partial U_{n-n}^0} & \frac{\partial \sum S_n}{\partial k_{mp}^0} \end{pmatrix}. \quad (22)$$

Матрица  $\frac{\partial W}{\partial Y'}$ , являющаяся матрицей частных производных уравнений небаланса активной и реактивной мощности  $\frac{\partial w_{P,k}}{\partial Y'_j}, \frac{\partial w_{Q,k}}{\partial Y'_j}$  по оптимизируемым переменным представляет собой матрицу Якоби, аналогичную матрице в п 1.3 алгоритма, с тем лишь отличием, что производные берутся по вектору оптимизируемых переменных  $U_{n-n}$  и  $k_{mp}$ .

Матрица  $\frac{\partial I}{\partial W}$  определяется по формуле:

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial W_P}{\partial U} & \frac{\partial W_P}{\partial \delta} \\ \frac{\partial W_Q}{\partial U} & \frac{\partial W_Q}{\partial \delta} \end{vmatrix}^T \cdot \begin{vmatrix} \frac{\partial I}{\partial W_P} \\ \frac{\partial I}{\partial W_Q} \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} \frac{\partial I}{\partial U} \\ \frac{\partial I}{\partial \delta} \end{vmatrix}, \quad (23)$$

где первый множитель является транспонированной матрицей Якоби из п. 1.3 алгоритма, второй множитель – искомой матрицей, третий множитель – матрицей частных производных целевой функции по вектору зависимых переменных.

#### 7. Определение независимых переменных.

На данном шаге производится определение новых значений оптимизируемых переменных. В расчетах используются поправочные коэффициенты  $t_{01}$  и  $t_{02}$ , необходимые для корректировки расчетов.

$$k_{mp}^i = k_{mp}^{i-1} - \frac{\partial \left( P_{\text{сальдо\_исх}} - \Delta P - \sum \left[ P_{\text{ном\_н}} \cdot \left[ a_0 - a_1 \cdot \frac{U_{y_n}}{U_{\text{ном}}} + a_2 \cdot \left( \frac{U_{y_n}}{U_{\text{ном}}} \right)^2 \right] + P_{\text{зен}} \right] \right)}{\partial k_{mp}} \cdot t_{01}; \quad (24)$$

$$U_{n-n}^i = U_{n-n}^{i-1} - \frac{\partial \left( P_{\text{сальдо\_исх}} - \Delta P - \sum \left[ P_{\text{ном\_н}} \cdot \left[ a_0 - a_1 \cdot \frac{U_{y_n}}{U_{\text{ном}}} + a_2 \cdot \left( \frac{U_{y_n}}{U_{\text{ном}}} \right)^2 \right] + P_{\text{зен}} \right] \right)}{\partial U_{n-n}} \cdot t_{02}. \quad (25)$$

#### 8. Определение зависимых переменных.

Путем расчета электрического режима методом Ньютона, в соответствии с п. 1.2–1.4, определяются новые значения зависимых переменных, в соответствии с полученными в п. 5 значениями независимых переменных:

9. Для решения поставленной задачи с заданной точностью необходимо повторить выполнение п. 1–8 вплоть до достижения допустимой погрешности расчетов.

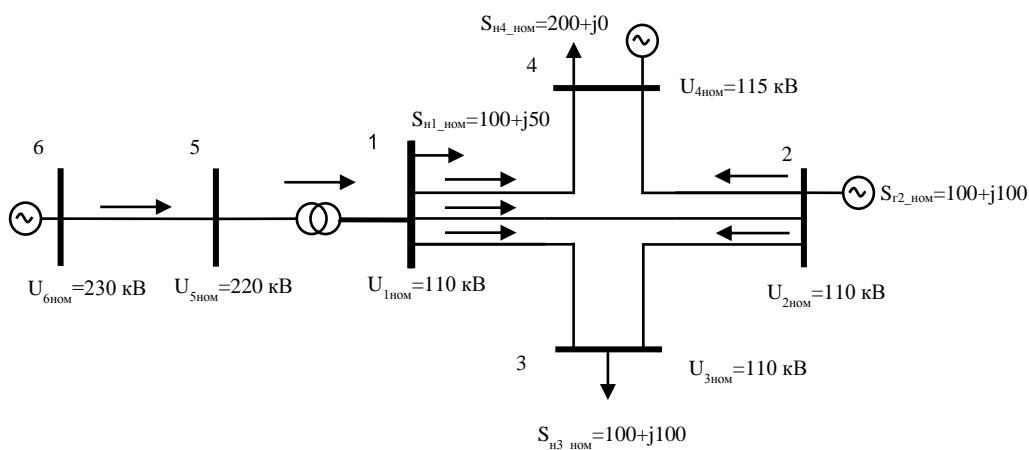


## Результаты исследований

Данный алгоритм был использован при решении задачи для электрической сети простой структуры (рисунок), состоящей из четырех узлов с номинальным напряжением 110 кВ, двух узлов напряжением 220 кВ, пяти ветвей 110 кВ, одной ветви 220 кВ и одной трансформаторной ветви с номинальным коэффициентом трансформации  $k_{mp} = 2$ .

Узел № 4 является балансирующим по реактивной мощности, узел № 6 является балансирующим по активной и реактивной мощности, узел № 2 является узлом-генератором активной и реактивной мощности, узлы № 1, 3–5 являются узлами нагрузки. Ветвь между узлами № 6 и № 5 моделирует связь изолированной энергосистемы с внешней энергосистемой. По условию  $P_{MДП} = 400$  МВт.

После расчета электрического режима в соответствии с п. 1 алгоритма получен режим, в котором зафиксировано  $P_{сальдо} = P_{5-6} = 416,83$  МВт. Следовательно, наблюдается превышение сальдо-перетока активной мощности на 16,83 МВт.



Принципиальная схема рассматриваемой сети  
Schematic diagram of the network under consideration

В результате выполнения разработанного алгоритма, на 74 итерации был получен режим, в котором достигнуто новое значение сальдо-перетока активной мощности в сечении, равном  $P_{сальдо} = 401,29$  МВт (таблица).

Расчетные данные исходного и оптимизированного режимов  
Calculated data of initial and optimized modes

		Исходный режим Initial mode		Оптимизированный режим Optimized mode	
		$\delta$ , рад/rad	$U$ , кВ/кВ	$\delta$ , рад/rad	$U$ , кВ/кВ
№ узла Node no.	1	-0,21763	113,98222	-0,211	108,9935
	2	-0,23415	115,03111	-0,22747	109,87956
	3	-0,24895	111,02709	-0,2442	105,9974
	4	-0,25482		-0,24829	
	5	-0,0153	227,8353	-0,01435	227,74487
P	$P_{сальдо}$	416,83 МВт/MW		401,29 МВт/MW	
	$P_{ЭЭС}$	509,59 МВт/MW		494,35 МВт/MW	



Данные результаты достигаются при  $k_{mp} = 2,069$ ,  $U_4 = 109,54$  кВ. Остановка процесса вычисления вызвана нарушением одного из ограничений по напряжению.

## Выводы

1. Разработан алгоритм поиска уровней напряжений и коэффициентов трансформации в контрольных узлах, обеспечивающих снижение сальдо-перетока активной мощности, отличающийся тем, что в нем в качестве целевой функции использован минимум изменения сальдо-перетока активной мощности в сечении от заданного значения.

2. Определены уровни напряжения и коэффициенты трансформаций в контрольных пунктах рассматриваемой энергосистемы, при которых достигается снижение сальдо-перетока активной мощности на 3,64% при выполнении заданных ограничений, а объем необходимых ограничений снижается с 16,83 МВт до 1,29 МВт.

3. Результаты работы могут быть использованы в практике планирования и оперативного управления электрическими режимами энергосистем с целью минимизации объемов вводимых ограничений электроснабжения.

## Библиографический список

1. Хозяинов М.А. О задаче устранения перегрузок в электрической системе изменением конфигурации сети // Электричество. 1993. № 2. С. 9–18.
2. Пономаренко И.С., Уссама Даак. Автоматизированный анализ послеаварийных режимов электроэнергетических систем // Электричество. 1994. № 8. С. 1–4.
3. Пономаренко И.С., Скорняков А.Ю. Анализ послеаварийных режимов и управление ими в распределительных электрических сетях // Электричество. 2006. № 1. С. 27–32.
4. Mazi A.A., Wollenberg B.F., Hesss M.H. Corrective control of power system flows by line and bus-bar switching. IEEE Trans on Power Systems, 1986. Vol. 1. No. 3.
5. Glavitch H. Switching as means of control in the Power Systems // Electric Power and Energy Systems, 1985. Vol. 7. No. 2.
6. Koglin H. J., Muller H. Corrective switching; a new dimension in optimal load flow // Electric Power and Energy Systems. 1982. Vol. 4. No. 2. 142–149.
7. Bakirtzis A.J., Sakis Meliopoulos A.P. Incorporation of switching operations on Power System corrective control computations // IEEE Trans. on Power Systems, 1987. Vol. 2. No. 3.
8. Фролов О.В. «Применение фазорегулирующих устройств в ОЭС Северо-запада» // Фундаментальные исследования в технических университетах: материалы XI Всерос. конф. по проблемам науки и высшей школы. Сер. Труды СПбГПУ (Санкт-Петербург, 18–19 мая 2007 г.). Санкт-Петербург, 2007. С. 463–464.
9. Кузнецов М.И., Ромодин А.В., Костыгов А.М. Экспериментальное исследование управления потоком реактивной мощности в электрической системе с трехобмоточным трансформатором // Электротехника. 2011. № 11. С. 46–50.
10. Петров В.В., Альмендеев А.А., Котенев В.И. Использование статических характеристик крупных узлов нагрузки при ликвидации аварийных режимов энергосистем // Оперативное управление в электроэнергетике. 2016. № 2. С. 42–46.
11. Петров В. В., Альмендеев А. А. Влияние уровней напряжения в контрольных пунктах энергосистемы на значения максимально допустимого перетока мощности в сечении // Оперативное управление в электроэнергетике. 2017. № 6. С. 54–56.
12. Петров В.В., Альмендеев А.А. Ликвидация токовой перегрузки оборудования путем изменения напряжения в узлах, балансирующих по реактивной мощности // Электроэнергетика глазами молодежи-2016: материалы науч. тр. VII Междунар. молодежной науч.-техн. конф. (Казань, 19–23 сентября 2016 г.). Казань, 2016, Ч. 2. С. 353–356.
13. Идельчик В.И. Электрические системы и сети. Москва: Энергоатомиздат, 1989. 592 с.
14. Инструкция по использованию ПК RastWin 3.0. 2014 г. [Электронный ресурс]. URL: <http://allrefrs.ru/2-9865.html> (24.02.2018).

## References

1. Hozjainov M.A. On the problem of overload elimination in the electrical system by network configuration alteration. *Elektrичество* [Electricity], 1993, no. 2, pp. 9–18. (In Russian).



2. Ponomarenko I.S. Automated analysis of post-emergency modes of electric power systems. *Jelektrichestvo* [Electricity], 1994, no. 8, pp. 1–4. (In Russian).
3. Ponomarenko I.S. Analysis and control of post-emergency modes in distribution electric networks. *Jelektrichestvo* [Electricity], 2006, no. 1, pp. 27–32. (In Russian).
4. Mazi A.A., Wollenberg B.F., Hesse M.H. Corrective control of power system flows by line and bus-bar switching. *IEEE Trans on Power Systems*, 1986, vol. 1, no. 3. (In Russian).
5. Glavitch H. Switching as means of control in the Power Systems. *Electric Power and Energy Systems*, 1985, vol. 7, no. 2.
6. Koglin H. J., Muller H. Corrective switching; a new dimension in optimal load flow // *Electric Power and Energy Systems*, 1982, vol. 4, no. 2, 142–149.
7. Bakirtzis A.J., Sakis Meliopoulos A.P. Incorporation of switching operations on Power System corrective control computations // *IEEE Trans. on Power Systems*, 1987, vol. 2, no. 3.
8. Frolov O.V. *Primenenie fazoregulirujushhih ustrojstv v OJeS Severo-zapada* [Application of phase-regulating devices in the Combined Power System of the North-West]. *Materialy XI Vserossijskoj konferencii po problemam nauki i vysshej shkoly "Fundamental'nye issledovaniya v tehnicheskikh universitetakh"* [Proceedings of XI All-Russia Conference. on the problems of science and higher education "Fundamental research in technical universities", Saint-Petersburg, 18–19 May 2007]. Saint-Petersburg, 2007, pp. 463–464. (In Russian).
9. Kuznecov M.I. Romodin A.V., Kostygov A.M. Experimental study of reactive power flow control in an electrical system with a triple-wound transformer. *Jelektrotehnika* [Electrical Engineering], 2011, no. 11, pp. 46–50. (In Russian).
10. Petrov V.V., Al'mendeev A.A., Kotenev V.I. Use of static characteristics of large load buses in the elimination of emergency modes of power systems. *Operativnoe upravlenie v jeklektroenergetike* [Operational management in electric power industry], 2016, no. 2, pp. 42–46. (In Russian).
11. Petrov V.V., Al'mendeev A.A. Influence of voltage levels on measure points of the power system on the values of maximum allowable power flow in the cross section. *Operativnoe upravlenie v jeklektroenergetike* [Operational management in electric power industry], 2017, no. 6, pp. 54–56. (In Russian).
12. Petrov V.V., Al'mendeev A.A. *Likvidacija tokovoj peregruzki oborudovanija putem izmenenija naprjazhenija v uzlah, balansirujushhih po reaktivnoj moshhnosti* [Elimination of current overloading of equipment by voltage change in the nodes balancing by the reactive power]. *Materialy VII Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii "Jeklektroenergetika glazami molodezhi"* [Proceedings of VII International Youth scientific and technical conference "Electrical power engineering through the eyes of youth", 19–23 September 2016]. Kazan, 2016, Part 2, pp. 353–356. (In Russian).
13. Idel'chik V.I. *Jeklekticheskie sistemy i seti* [Electrical systems and networks]. Moscow: Jenergoatomizdat Publ., 1989, 592 p.
14. Instrukcija po ispol'zovaniju PK RastrWin 3.0. [PC RastrWin 3.0. Manual]. Available at: <http://allrefs.ru/2-9865.html> (24 February 2018).

#### Критерии авторства

Петров В.В. создал рукопись и несет ответственность за плагиат.

#### Authorship criteria

Petrov V.V. has prepared the manuscript and bears the responsibility for plagiarism.

#### Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

#### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.311.1

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-158-171>

## РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ ИНТЕГРИРОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕД

© О.В. Свеженцева<sup>1</sup>, М.О. Умнова<sup>2</sup>, В.А. Бутьков<sup>3</sup>

Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

**РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ.** В данной работе описано разработанное программное обеспечение, удовлетворяющее следующим требованиям: универсальности подхода к хранению исходной информации, визуализации электроэнергетических систем с большим количеством узлов и связей. Данное программное обеспечение предоставляет возможности создания пользовательских объектов, привязки объектов визуализации к пространственным координатам, интеграции в различные вычислительные среды. **МЕТОДЫ.** Учитывая, что при работе с виртуальной моделью системы визуализация может проводиться несколько раз и что в системе могут быть выполнены различные расчеты, сам процесс визуализации принципиально не отличается при реализации различных вычислительных процедур. Однако невозможно и нерационально реализовывать все возможные вычислительные алгоритмы в одной среде, поэтому предлагается интегрировать приложение визуализации в другие приложения и реализовать канал связи между ними. Данная концепция канала связи была названа Мост (Visualization Engine Bridge). При данном подходе использует сторонний файл для обмена необходимой информацией между вычислительным и визуальным приложениями. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Протестированный канал связи между приложением и вычислительной средой MATLAB на примере 18-узловой схемы. Визуализационное приложение инициализировало расчет установившегося режима методом Ньютона – Рафсона со всеми включенными линиями связи и с одной отключенной линией связи. Полученные результаты продемонстрировали работоспособность предложенного подхода. **ВЫВОДЫ.** Разработано программное обеспечение, удовлетворяющее требованиям универсальности подхода к хранению информации, визуализации сетей с большим числом узлов и связей. Данная программа позволяет создавать пользовательские объекты, графически отображать соединения между узлами в виде полилиний, интегрироваться в различные вычислительные среды, привязывать данные к географическим координатам.

**Ключевые слова:** визуализация, программное обеспечение, граф электроэнергетической системы, узел, связь, расчет установившегося режима.

**Информация о статье.** Дата поступления 30 января 2018 г.; дата принятия к печати 1 марта 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2018 г.

**Формат цитирования.** Свеженцева О.В., Умнова М.О., Бутьков В.А. Разработка средств интегрирования различных вычислительных сред // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 4. С. 158–171. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-158-171

## DEVELOPING INTEGRATION TOOLS FOR VARIOUS COMPUTING ENVIRONMENTS

О.В. Svezhentseva, М.О. Umnova, В.А. Butkov

Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

**ABSTRACT. PURPOSE.** The paper describes the developed software that meets the requirements of the approach universality to storing of the initial information, visualization of power systems with a large number of nodes and connections.

<sup>1</sup>Свеженцева Ольга Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, e-mail: [ocweg1@mail.ru](mailto:ocweg1@mail.ru)

Olga V. Svezhentseva, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, e-mail: [ocweg1@mail.ru](mailto:ocweg1@mail.ru)

<sup>2</sup>Умнова Марина Олеговна, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, e-mail: [umn-mo@mail.ru](mailto:umn-mo@mail.ru)

Marina O. Umnova, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Supply and Electrical Engineering, e-mail: [umn-mo@mail.ru](mailto:umn-mo@mail.ru)

<sup>3</sup>Бутьков Виктор Алексеевич, магистрант, e-mail: [wc\\_off@mail.ru](mailto:wc_off@mail.ru)

Viktor A. Butkov, Master's Degree student, e-mail: [wc\\_off@mail.ru](mailto:wc_off@mail.ru)



This software provides the possibility to create user objects, bind visualization objects to spatial coordinates, and integrate them into various computing environments. **METHODS.** Taking into consideration the fact that when working with the virtual model of the system visualization can be performed several times and that different calculations can be performed in the system, the visualization process itself does not differ fundamentally in the implementation of various computational procedures. However, it is impossible and irrational to implement all possible computational algorithms in one environment, so it is proposed to integrate the visualization application into other applications and implement a communication channel between them. This concept of the communication channel was named the Bridge (Visualization Engine Bridge). This approach uses a third-party file to exchange the necessary information between the computational and visual applications.

**RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The tested communication channel between the application and the MATLAB computing environment is exemplified by the 18-node scheme. The visualization application initialized the calculation of the steady-state mode by the Newton-Raphson method with all connected communication lines and with one disabled communication line. The obtained results have demonstrated the operating capacity of the proposed approach. **CONCLUSIONS.** The software has been developed that meets the universality requirement of the approach to information storage, visualization of networks with a large number of nodes and connections. This program allows to create user objects, display graphically connections between the nodes in the form of polylines, integrate into various computing environments and bind data to geographic coordinates.

**Keywords:** visualization, software, power system graph, node, connection, calculation of the steady state mode

**Information about the article.** Received January 30, 2018; accepted for publication March 1, 2018; available online April 30, 2018.

**For citation.** Svezhentseva O.V., Umnova M.O., Butkov V.A. Developing integration tools for various computing environments. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 4, pp. 158–171. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-158-171

## Введение

В области электроэнергетики существует множество различных задач, при решении которых на выходе образуются большие объемы данных. Для правильной и быстрой обработки результатов расчета необходимо уметь структурировать данные в специальном виде, в котором восприятие полученной информации было бы наиболее простым и наглядным.

Визуализация данных является одним из ключевых пунктов в процессе обработки данных. Визуализация – это описание исходных данных в визуальном контексте. Результатом визуализации является графическая интерпретация данных, которая позволяет пользователю лучше понять смысл этих данных.

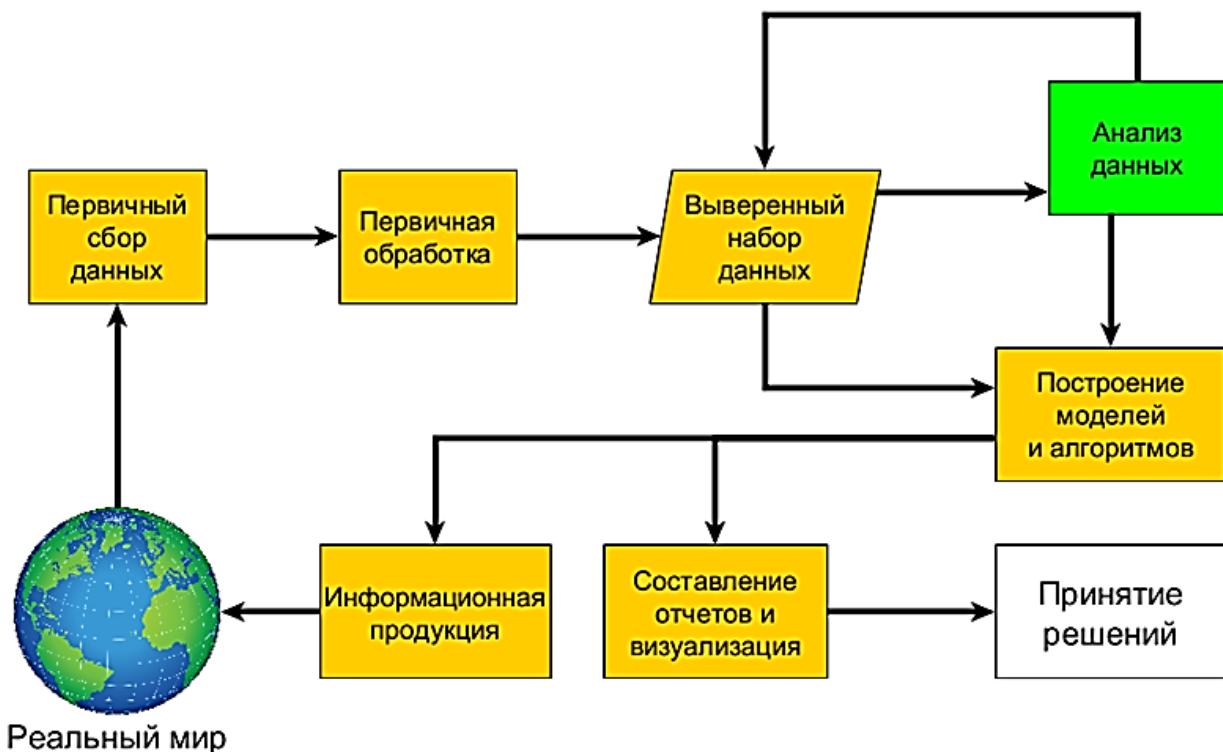
Одной из главных заявленных целей работы является разработка такого визуализационного программного обеспечения, которое можно было бы интегрировать в различные вычислительные приложения, в частности MATLAB или SCILAB, как наиболее широко используемые в электроэнергетических расчетах [1]. Согласно [2], визуализация данных является одним из этапов

процесса научной обработки данных.

Упрощенная схема процесса научной обработки данных представлена на рис. 1 [3].

Основная цель визуализации – отправить сообщение пользователю. Это сообщение закодировано в графическом виде [2]. В зависимости от метода визуализации сообщение может передавать различное содержимое [4].

- Номинальное сравнение – сравнение разных значений без какого-либо определенного порядка.
- Временной ряд – значения записываются с определенными временными интервалами.
- Ранжирование – сравниваемые значения распределяются в порядке возрастания или убывания.
- Значение интерпретируется как часть целого – значение может быть пересчитано в относительных единицах или процентах.
- Отклонение – при этом подходе должно быть задано контрольное значение и с этим значением будут сравниваться все другие значения.



Примечание. Реальный мир / real world; первичный сбор данных / primary data collection; первичная обработка / primary processing; выверенный набор данных / validated data collection; анализ данных / analysis of data; построение моделей и алгоритмов / принятие решений / construction of models and decision-making algorithms; составление отчетов и визуализация / reporting and visualization; информационная продукция / information products.

**Рис. 1. Схема процесса научной обработки данных**  
*Fig. 1. Diagram of scientific processing of data*

- Распределение по частоте – отображает значения переменных в заданный интервал, например, 0–10%, 10–20% и т.д.
- Корреляция – сравнивает значения двух переменных, чтобы определить, коррелируются они или нет.
- Географическое или геопространственное сравнение – сравнивает значения, привязанные к конкретным географическим точкам или регионам.

Анализ существующих подходов визуализации электроэнергетических систем показал, что наилучшим решением является использование комбинированного подхода [1, 5, 6]. Это означает, что для достижения более полного результата визуализации необходимо применять несколько различных подходов и методов одновременно [7, 8].

К любому разрабатываемому приложению всегда предъявляется ряд требований. В данном случае (помимо очевидных

требований, таких как эргономичный интерфейс) скорость работы, оптимальное использование ресурсов и т.д. К разрабатываемому программному обеспечению предъявляется еще ряд специфических требований, обусловленных особенностью решаемых задач. Всего можно выдвинуть довольно много специфических требований, но наиболее важные из них приведены ниже.

1. Универсальность подхода к хранению информации.
2. Визуализация электроэнергетических систем с большим количеством узлов и связей.
3. Возможность создания пользовательских объектов в дальнейшем.
4. Возможность привязки географических данных.
5. Графическое отображение соединений между узлами в виде полилиний.



## 6. Возможность интеграции в различные вычислительные среды.

Универсальность подхода к хранению информации означает использование наиболее распространенного и удобного способа хранения информации, необходимой для работы с алгоритмами. Данная проблема рассмотрена в работе [1], предложено использовать таблицы Microsoft Excel в качестве базы данных. Такой подход имеет свои преимущества и недостатки. Самым значительным недостатком является более длительный процесс записи и чтения информации по сравнению с классическими базами данных. Также, при данном подходе требуется установка Microsoft Excel для использования библиотеки Microsoft Office.Library.Interop.Excel.dll. С другой стороны, использование Excel предполагает ряд преимуществ по сравнению с другими способами хранения информации. Во-первых, большинство прикладных программных продуктов, которые используются для компьютерных вычислений, могут считывать и записывать информацию в приложении Excel. Во-вторых, это возможность легко изменять структуру хранимой информации, что позволяет пользователям настраивать базы данных, добавлять или удалять необходимые поля и даже целые пользовательские объекты.

Для визуализации электроэнергетической системы с большим числом узлов и связей в дополнение к правильному распределению вычислительных ресурсов предлагается использовать особый подход, позволяющий агрегировать несколько элементов графа в отдельные группы (контейнеры, области), что позволяет отображать больше элементов в рабочем пространстве.

Зачастую возникает задача отображения электрической системы, привязанной к географическим координатам [9]. Этот метод визуализации сети наиболее полно отображает реальную систему электроснабжения. Что касается программной реализации, привязка узлов к определенным координатам не является сложной задачей. Единственным требованием является нали-

чие соответствующей системы координат. Однако при работе со связями сети ситуация значительно осложняется. Если детализированная визуализация связей между узлами не требуется, то в данном случае можно просто провести прямую линию между двумя узлами. Но для более точного отображения возникает необходимость в использовании полилиний (сложный 2D-графический объект, состоящий из нескольких отрезков или дуг). Для отображения сложной линии необходимо иметь информацию о точках излома. В таком случае отображение полилиний с большим количеством промежуточных точек, характеризующих реально существующую в географических координатах связь, может значительно увеличить объем базы данных [10].

При работе с моделью электроэнергетической системы визуализация может проводиться несколько раз. Для данной электроэнергетической системы могут быть выполнены различные расчеты и произведены различные вычислительные процедуры. Сам процесс визуализации принципиально не отличается при использовании различных вычислительных алгоритмов [11, 12]. Однако невозможно и нерационально реализовать все возможные вычислительные процедуры в одном программном приложении, поэтому необходимо предусмотреть возможность интегрирования приложения визуализации в другие приложения (вычислительные) или реализовать канал связи между ними. В данной работе предлагается использовать концепцию канала связи, она была названа Мост (Visualization Engine Bridge). При данном подходе используется сторонний файл для обмена необходимой информацией между вычислительным и визуальным приложениями. Чтобы начать процесс расчета, необходимо указать путь к базе данных и вычислительный скрипт. Эти данные будут собраны в текстовый файл с именем «vis\_app\_bridge.txt». Структура данного файла показана в табл. 1.

После создания файла инициализируется функция передачи требуемых данных в алгоритм расчета.



Таблица 1

Структура файла «vis\_app\_bridge.txt»

Table 1

"Vis\_app\_bridge.txt" file structure

№	Строка / String	Значение / Value
1	Visualization Software v2.0	Отображает имя приложения и текущую версию. Может использоваться вычислительным скриптом для проверки совместимости версий / It displays the application name and the current version, can be used by a computational script to check version compatibility
2	Calculation log #13.04.2017 10:02:21	Отображает данные о дате и времени / It displays the data on date and time
3	[dataBase path and DataBase filename]	Строчный указатель, показывающий, что следующие две строки – это путь к файлу базы данных и имя базы данных / A string pointer indicating that the next two lines are the path to the database file and the name of the database
4	C:\path\to\the\database\	Путь к папке базы данных / Path to the database folder
5	DataBase.xlsx	Имя файла базы данных / Database file name

### База данных

Чтобы объяснить, как должна строиться структура базы данных, необходимо представить пример и тщательно проанализировать все поля, которые присутствуют в базе данных.

Как упоминалось ранее, приложение визуализации использует таблицы Microsoft Excel в качестве базы данных. База данных состоит из двух частей: структурная и непосредственно с данными. Структурные данные используются для построения структуры сети и для хранения некоторых параметров визуализации. Эта часть базы данных имеет строго фиксированную структуру, нарушение которой может привести к некорректной работе алгоритма или даже всего приложения. В части с данными хранится необходимая информация для расчетов. Эта часть базы данных может быть полностью сгенерирована пользователем.

Информация в структурной части и части с данными структурирована одинаковым образом. После прочтения информации данные из таблиц Excel будут сгруппированы в массив «System.Data.DataTable».

База данных содержит информацию с разными типами данных. В зависимости от типа данных алгоритмы визуализации могут работать по-разному. Поэтому, должна быть реализована процедура, которая позволяет пользователю определять тип данных в отдельных полях.

Чтобы определить тип данных некоторого поля в базе данных, необходимо записать определенное значение типа в последней строке поля.

В табл. 2 показан пример кода для объектов типа «узел» или «контейнер».

Пример кода для объекта типа «связь» или «область» показан в табл. 3. Кроме того, в данном приложении используются в качестве кодов специальные типы #mini, которые даны для построения графических элементов класса System.Windows.Forms в библиотеке Net Framework. Данная кодировка употребляется для описания кривых и сплайнов.

База данных, разработанная в приложении, состоит из структурных листов и листов с данными.



Таблица 2

Пример кода для объектов типа «узел» или «контейнер»

Table 2

Code example for the objects of a «node» or «container» type

№	Значение / Value	Обозначение / Indication
1	40	Ширина объекта / Object Width
2	40	Высота объекта / Object Height
3	0	Угол поворота / Angle of rotation
4	255, 144, 238, 144	Цвет заливки (ARGB) / Fill color (ARGB)
5	255, 0, 0, 0	Цвет границы (ARGB) / Border Color (ARGB)
6	3	Толщина границы / Border Thickness
7	-1*	Код штриховки границы / Border Hatching Code
8	3	Слой расположения объекта / Object Location Layer
Финальная строка в базе данных / The final line in the database		40; 40; 0; 255,144,238,144; 255,0,0,0; 3; -1; 3

Таблица 3

Пример кода для объектов типа «связь» или «область»

Table 3

Code example for the objects of a «link» or «region» type

№	Значение / Value	Обозначение / Indication
1	255, 0, 255, 255	Цвет заливки (ARGB) / Fill color (ARGB)
2	255, 144, 238, 144	Цвет границы (ARGB) / Border Color (ARGB)
3	8	Толщина границы / Border Thickness
4	-1*	Код штриховки границы / Border Hatching Code
5	5	Слой расположения объекта / Object Location Layer
Финальная строка в базе данных/ The final line in the database		255,0,255,255; 255,144,238,144; 8; -1; 5

Структурные листы:

1. Graph Nodes – данные узлов.
2. Graph Edges – данные связей.
3. Polyline Data – данные о географических координатах для построения сложных связей.

4. Containers Data – данные о контейнерах, в которых содержатся узлы.

5. Area Data – данные об областях, в которых содержатся другие элементы.

Основные листы с данными (приводятся в качестве примера) содержат необходимую информацию:

1. Generator – о генераторах.

2. Load – о нагрузках.

3. 2winding Transformer – о двухобмоточных трансформаторах.

4. Power Line – о линиях электропередачи.

Приведем примеры структурных листов и листов с данными, разработанными в приложении. В табл. 4 в качестве примера представлена детальная структура листа «Graph Nodes», в котором содержится вся необходимая информация для визуализации узлов сети.

В табл. 5 представлена подробная структура листа с данными «Generator».



Таблица 4  
Структура листа «Graph Nodes»

Table 4

Graph Nodes sheet structure

№	Имя / Name	Тип данных / Data type	Описание / Specification
1	Name	Целое / Integer	Отображает счетчик узлов. Счет начинается с единицы. Если данное поле отсутствует, оно будет создано автоматически / It displays a node counter. Count starts from one. If this field is missing, it will be created automatically
2	ID	Текст / Text	Идентификационный код узла. В одной базе данных не может быть два одинаковых идентификационных значения / Node identification code. There can not be two identical identification values in one database.
3	Asset ID	Текст / Text	Идентификационные данные соответствующего оборудования / Identification data of the relevant equipment
4	x	Целое / Integer	Координата узла по оси абсцисс / Node coordinate along the abscissa
5	y	Целое/ Integer	Координата узла по оси ординат / Node coordinate along the ordinate axis
6	Name	Текст / Text	Информация об имени узла. Данное поле может быть использовано для поиска необходимого узла / Information about the node name. This field can be used to find the required node
7	Property Source	Enum	Определяет источник данных с соответствующими визуализационными свойствами элемента / Defines the data source with the corresponding visualization properties of the element

Таблица 5  
Структура листа «Generator»

Table 5

Structure of the "Generator" sheet

№	Имя / Name	Тип данных / Data type	Описание / Specification
1	Number	Счетчик / Counter	Отображает счетчик. Счет начинается с единицы. Если данное поле отсутствует, оно будет создано автоматически / It displays a counter. Count starts from one. If this field is missing, it will be created automatically
2	ID	Текст / Text	Идентификационный код генератора. Идентификационные данные разных объектов не могут быть одинаковыми / Generator identification code. Identification data of different objects can not be alike
3	Name	Текст / Text	Имя, присвоенное генератору / Name assigned to the generator
4	Active Power, MW	Число / Real number	Генерируемая активная мощность, если узел не является балансирующим / Generated active power, if the node is not a balancing one
5	Reactive Power, Mvar	Число / Real number	Генерируемая реактивная мощность, если узел не является балансирующим / Generated reactive power, if the node is not a balancing one
6	Pmax, MW	Число / Real number	Максимальное возможное количество генерируемой активной мощности / The maximum possible amount of the generated active power
7	Pmin, MW	Число / Real number	Минимально возможное количество генерируемой активной мощности / The minimum possible amount of the generated active power
8	Qmax, Mvar	Число / Real number	Максимальное возможное количество генерируемой реактивной мощности / The maximum possible amount of the generated reactive power
9	Qmin, Mvar	Число / Real number	Минимально возможное количество генерируемой реактивной мощности / The minimum possible amount of the generated reactive power
10	Energy source	Текст / Text	Тип источника энергии / Type of an energy source
11	Power Control	Логический / Boolean	Наличие автоматического управления генератором / Availability of automatic generator control
12	Storage	Логический / Boolean	Возможность накопления энергии / Possibility of energy accumulation

## Тестирование вычислительной среды

Канал связи между приложением и вычислительной средой будет протестирован на 18-узловой схеме, представленной на рис. 2.

Для этого теста визуализационное приложение инициализирует расчет устано-

вившегося режима методом Ньютона-Рафсона в среде MATLAB<sup>4</sup> [13].

Необходимые для расчета данные были выбраны из базы данных и включены в табл. 6-7.

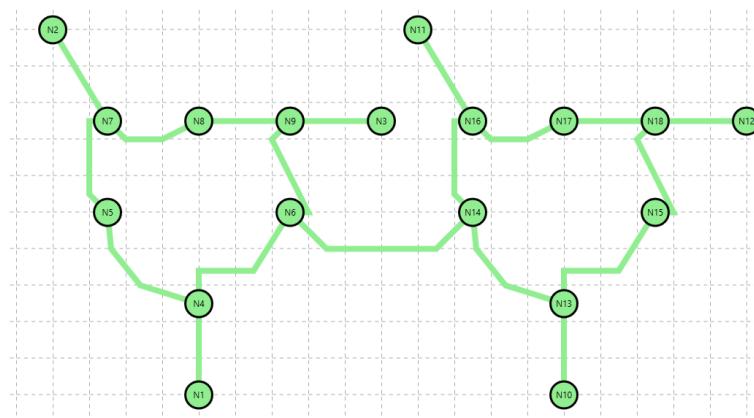


Рис. 2. 18-узловая схема  
Fig. 2. 18-node circuit

Исходные данные узлов для расчета установившегося режима

Таблица 6

Table 6

Initial node data for steady-state mode calculation

Индивидуальный № / Individual number	Тип узла/ Node Type	Начальное напряжение, кВ / Initial voltage, kV	Начальный угол, град / Starting angle, degrees	Активная мощность, МВт / Active power, MW	Реактивная мощность, Мвар / Reactive power, Mvar
NOD00100001	Slack	15.75	0	0	0
NOD00100002	PU	19	0	-85	0
NOD00100003	PU	13.5	0	-71.95	0
NOD00100004	PQ	230	0	0	0
NOD00100005	PQ	230	0	120	50
NOD00100006	PQ	230	0	90	30
NOD00100007	PQ	230	0	0	0
NOD00100008	PQ	230	0	100	35
NOD00100009	PQ	230	0	0	0
NOD00100010	PU	15.75	0	-163	0
NOD00100011	PU	19	0	-85	0
NOD00100012	PU	13.5	0	-71.95	0
NOD00100013	PQ	230	0	0	0
NOD00100014	PQ	230	0	120	50
NOD00100015	PQ	230	0	90	30
NOD00100016	PQ	230	0	0	0
NOD00100017	PQ	230	0	100	35
NOD00100018	PQ	230	0	0	0

<sup>4</sup>Ананичева С.С. Схемы замещения и установившиеся режимы электрических сетей: учеб. пособие. Екатеринбург: Уральский федеральный университет, 2012. 80 с. / Ananicheva S.S. Equivalent circuits and steady-state modes of electrical networks: Learning aids. Ekaterinburg: Ural Federal University, 2012. 80p.



В табл. 7 не содержится данных о сопротивлениях связей, поскольку эти данные вычисляются непосредственно в среде MATLAB. Сопротивление связи рассчитывается на основе исходных данных для трансформаторов и линий электропередачи. Эти данные размещены в листах «2winding Transformer» и «Power Line» базы данных.

На рис. 3 изображена 18-узловая схема системы электроснабжения в среде разработанного приложения с учетом использования объекта типа контейнер: элементы С1...С6. Внутри каждого контейнера имеется соответствующий генератор, трансформатор и узел присоединения к кольцевой сети. После запуска процесса вычисления инициализируется командная

строка MATLAB, и вычислительная процедура выполняет расчет установившегося режима. После завершения расчета новые данные заносятся в базу данных.

Результаты расчета перетоков мощности для узлов и связей представлены в табл. 8–9. В данном случае расчет проводился для системы со всеми связями, находящимися в рабочем состоянии.

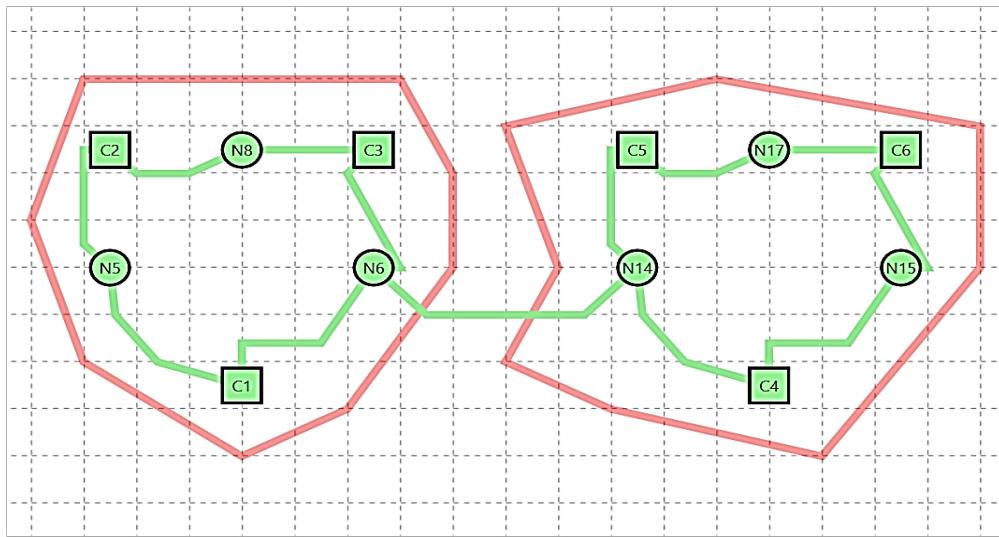
Чтобы выполнить более наглядную демонстрацию работы алгоритма визуализации, необходимо провести расчет установившегося режима системы электроснабжения с отключенной линией электропередачи (показан на рис. 4). Второй расчет выполняется с отключенной линией 14-С4. Результаты расчетов представлены в табл. 10–11.

**Исходные данные связей для расчета установившегося режима**  
*Initial link data for steady-state mode calculation*

**Таблица 7**

**Table 7**

Индивидуальный № исходящего узла / Individual outbound node number	Индивидуальный № входящего узла / Individual incoming node number	Тип / Type	Предельный ток нагрузки, кА / Load current limit, kA	Длина, км / Length, km	Состояние (вкл/выкл) / Status (on / off)
NOD00100007	NOD00100005	Power Line	1.1	1	1
NOD00100007	NOD00100008	Power Line	0.9	1	1
NOD00100008	NOD00100009	Power Line	1	1	1
NOD00100009	NOD00100006	Power Line	1.1	1	1
NOD00100005	NOD00100004	Power Line	1.25	1	1
NOD00100006	NOD00100004	Power Line	1.25	1	1
NOD00100007	NOD00100002	Transformer	–	–	1
NOD00100009	NOD00100003	Transformer	–	–	1
NOD00100004	NOD00100001	Transformer	–	–	1
NOD00100016	NOD00100014	Power Line	1.1	1	1
NOD00100016	NOD00100017	Power Line	0.9	1	1
NOD00100017	NOD00100018	Power Line	1	1	1
NOD00100018	NOD00100015	Power Line	1.1	1	1
NOD00100014	NOD00100013	Power Line	1.25	1	1
NOD00100015	NOD00100013	Power Line	1.25	1	1
NOD00100016	NOD00100011	Transformer	–	–	1
NOD00100018	NOD00100012	Transformer	–	–	1
NOD00100013	NOD00100010	Transformer	–	–	1
NOD00100006	NOD00100014	Power Line	1.25	3	1



**Рис. 3. Система электроснабжения в среде приложения визуализации (все линии в работе)**  
**Fig. 3. Power supply system in the visualization application environment (all lines are in operation)**

**Таблица 8**  
**Результаты расчета установившегося режима для узлов (все линии в работе)**  
**Table 8**  
**Calculation results of the steady-state mode for nodes (all lines are in operation)**

Индивидуальный № / Individual number	Тип узла / Node type	Номинальное Напряжение, кВ / Rated voltage, kV	Напряжение в узле, о.е. / Voltage in the node, per unit value	Угол, град./ Angle, degrees	Активная мощность, МВт / Active power, MW	Реактивная мощность, Мвар / Reactive power, Mvar
NOD00100001	Slack	15.75	1	0	-149.54	-32.74
NOD00100002	PU	19	1.05	-3.26	-85	-62.21
NOD00100003	PU	13.5	1.05	-2.91	-71.95	-49.43
NOD00100004	PQ	230	0.992	-2.38	0	0
NOD00100005	PQ	230	0.966	-6.78	120	50
NOD00100006	PQ	230	0.980	-5.61	90	30
NOD00100007	PQ	230	1.034	-4.49	0	0
NOD00100008	PQ	230	1.015	-6.46	100	35
NOD00100009	PQ	230	1.037	-3.95	0	0
NOD00100010	PU	15.75	1.05	2.10	-163	-68.33
NOD00100011	PU	19	1.05	-0.89	-85	-47.34
NOD00100012	PU	13.5	1.05	-0.55	-71.95	-35.52
NOD00100013	PQ	230	1.033	-0.27	0	0
NOD00100014	PQ	230	0.993	-4.60	120	50
NOD00100015	PQ	230	1.006	-3.48	90	30
NOD00100016	PQ	230	1.038	-2.12	0	0
NOD00100017	PQ	230	1.019	-4.08	100	35
NOD00100018	PQ	230	1.041	-1.59	0	0

Таблица 9  
Результаты расчета установившегося режима для связей (все линии в работе)  
Table 9  
Calculation results of the steady-state mode for links (all lines are in operation)

Индивидуальный № исходящего узла / Individual outbound node number	Индивидуальный № входящего узла / Individual incoming node number	Ток (RMS), кА / Current (RMS), kA	Потери акт. мощности, МВт / Losses of active power, MW	Потери реакт. мощности, Мвар / Losses of reactive power, Mvar
NOD00100007	NOD00100005	0.340	0.74	3.73
NOD00100007	NOD00100008	0.389	0.26	2.18
NOD00100008	NOD00100009	0.349	0.29	2.45
NOD00100009	NOD00100006	0.26	0.53	2.29
NOD00100005	NOD00100004	0.658	0.87	7.36
NOD00100006	NOD00100004	0.43	0.63	3.40
NOD00100007	NOD00100002	0.709	0	2.77
NOD00100009	NOD00100003	0.588	0	1.90
NOD00100004	NOD00100001	1.083	0	6.45
NOD00100016	NOD00100014	0.271	0.47	2.37
NOD00100016	NOD00100017	0.388	0.26	2.17
NOD00100017	NOD00100018	0.347	0.29	2.43
NOD00100018	NOD00100015	0.197	0.30	1.31
NOD00100014	NOD00100013	0.715	1.02	8.69
NOD00100015	NOD00100013	0.478	0.78	4.20
NOD00100016	NOD00100011	0.655	0	2.36
NOD00100018	NOD00100012	0.54	0	1.61
NOD00100013	NOD00100010	1.19	0	7.79
NOD00100006	NOD00100014	0.054	0.03	0.16

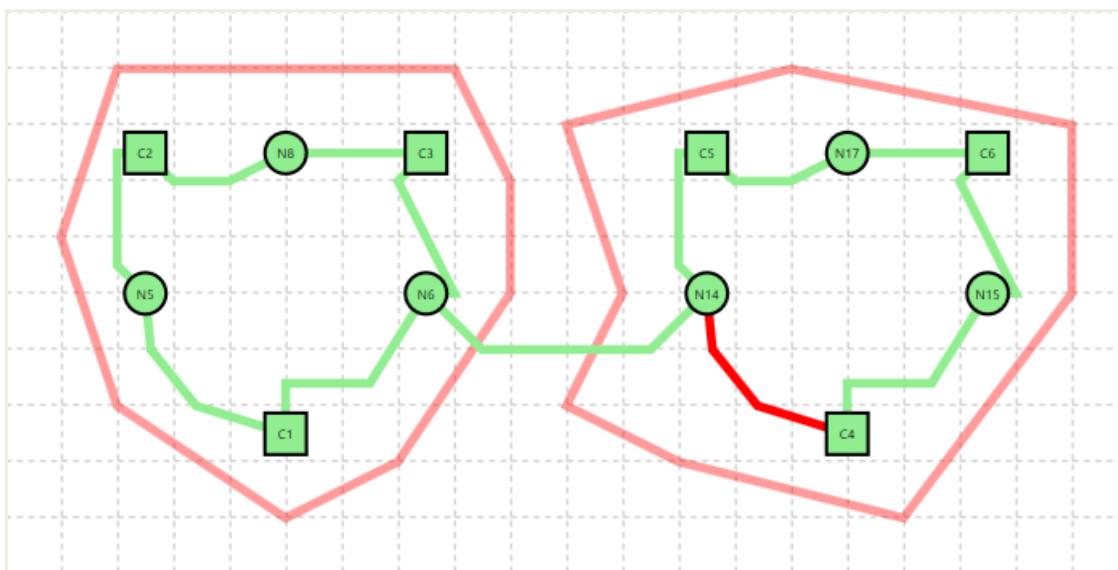


Рис. 4. Система электроснабжения в среде приложения визуализации  
(линия 13-С4 отключена)

Fig. 4. Power supply system in the visualization application environment  
(line 13-C4 is disabled)



Таблица 10  
Расчет установившегося режима для узлов (линия 13-С4 отключена)

Table 10

Calculation of the steady-state mode for the nodes (line 13-C4 is disabled)

Индивидуальный № / Individual number	Тип узла / Node Type	Номинальное Напряжение, кВ / Rated Voltage, kV	Напряжение в узле, о.е. / Voltage in the node, per unit value	Угол, град./ Angle, degrees	Активная мощность, МВт / Active power, MW	Реактивная мощность, Мвар / Reactive power, Mvar
NOD00100001	Slack	15.75	1	0	-161.58	-47.31
NOD00100002	PU	19	1.05	-3.79	-85	-64.79
NOD00100003	PU	13.5	1.05	-3.6	-71.95	-58.28
NOD00100004	PQ	230	0.99	-2.58	0	0
NOD00100005	PQ	230	0.96	-7.12	120	50
NOD00100006	PQ	230	0.96	-6.31	90	30
NOD00100007	PQ	230	1.03	-5.02	0	0
NOD00100008	PQ	230	1.01	-7.06	100	35
NOD00100009	PQ	230	1.04	-4.64	0	0
NOD00100010	PU	15.75	1.05	30.97	-163	-31.32
NOD00100011	PU	19	1.05	5.59	-85	-98.18
NOD00100012	PU	13.5	1.05	14.58	-71.95	-62.5
NOD00100013	PQ	230	1.04	28.62	0	0
NOD00100014	PQ	230	0.91	-6.54	120	50
NOD00100015	PQ	230	1	20.62	90	30
NOD00100016	PQ	230	1.03	4.35	0	0
NOD00100017	PQ	230	1.01	5.95	100	35
NOD00100018	PQ	230	1.034	13.53	0	0

Таблица 11  
Результаты расчет установившегося режима для связей (линия 13-С4 отключена)  
Table 11

Calculation results of the steady-state mode for links (line 13-C4 is disabled)

Индивидуальный № исходящего узла / Individual outbound node number	Индивидуальный № входящего узла / Individual incoming node number	Ток (RMS), кА / Current (RMS), kA	Потери акт. мощности, МВт / Losses of active power, MW	Потери реакт. мощности, Мвар / Losses of reactive power, Mvar
NOD00100007	NOD00100005	0.341	0.75	3.75
NOD00100007	NOD00100008	0.404	0.28	2.35
NOD00100008	NOD00100009	0.336	0.27	2.27
NOD00100009	NOD00100006	0.32	0.8	3.48
NOD00100005	NOD00100004	0.671	0.9	7.66
NOD00100006	NOD00100004	0.52	0.92	4.97
NOD00100007	NOD00100002	0.72	0	2.85
NOD00100009	NOD00100003	0.624	0	2.14
NOD00100004	NOD00100001	1.191	0	7.8
NOD00100016	NOD00100014	0.937	5.62	28.26
NOD00100016	NOD00100017	0.337	0.19	1.64
NOD00100017	NOD00100018	0.96	2.19	18.58
NOD00100018	NOD00100015	0.52	2.14	9.34
NOD00100014	NOD00100013	0	0	0
NOD00100015	NOD00100013	1.118	4.25	22.99
NOD00100016	NOD00100011	0.875	0	4.21
NOD00100018	NOD00100012	0.642	0	2.27
NOD00100013	NOD00100010	1.118	0	6.87
NOD00100006	NOD00100014	0.139	0.19	1.05



## Заключение

Разработано программное обеспечение, удовлетворяющее требованиям универсальности подхода к хранению информации, визуализации сетей с большим числом узлов и связей. Данная программа позволяет создавать пользовательские объекты, графически отображать соединения между узлами в виде полилиний, интегрироваться в различные вычислительные среды, привязывать данные к географическим координатам.

Направлением дальнейших исследований и совершенствования предложенного

программного обеспечения можно считать:

1. Расширение существующей функциональности графического интерфейса. Добавление новых параметров для настройки рабочего пространства и рабочих панелей.
2. Внедрение более сложных алгоритмов навигации и сортировки. Возможность выбора нескольких объектов в рабочей области и поиска объектов по разным полям данных.
3. Дополнение и совершенствование существующих алгоритмов визуализации.

## Библиографический список

1. Comparing methods for network visualization, submitted on 30.01.2016 Non-Technical Project by Viktor Butkov, Supervisor: M. Sc. C. Klabunde, LENA, Otto-von-Guericke-Universitat-Magdeburg, 2016. 44 p.
2. Data Visualization and Infographics // Articles [Электронный ресурс]. URL: <https://www.smashingmagazine.com/2008/01/monday-inspiration-data-visualization- and -infographics> (24.12.2017).
3. What Is Data Science, and What Does a Data Scientist Do? [Электронный ресурс]. URL: <http://www.innoarchitech.com/what-is-data-science-does-data-scientist-do> (24.12.2017).
4. Project analysis – grading [Электронный ресурс]. URL: <https://lumnify.com/grades/?rel=libhunt-cmp> (24.12.2017).
5. Becker R.A., Eick S.G., Wilks A.R. Visualizing Network Data. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1995. Vol. 1. No. 1. P. 16–21.
6. Cherven K., Mastering Gephi Network Visualization, Packt Publishing Ltd., January 2015, ISBN 978-1-78398-734-4.
7. Top 20 NuGet chart Packages // NuGet Must Haves [Электронный ресурс]. URL: <http://nugetmusthaves.com/Tag/Chart?page=1>
8. Compare Live-Charts and Oxyplot's popularity and activity // Awesome.NET [Электронный ресурс]. URL: <https://dotnet.libhunt.com/project/oxyplot/vs/live-charts>
9. Pagani G.A., Aiello M. The Power Grid as a Complex Network: a Survey, Johann Bernoulli Institute for Mathematics and Computer Science, University of Groningen, Groningen, The Netherlands, March 22, 2012.
10. WPF Shapes - Path - Combined Geometry, Richard Carr [Электронный ресурс]. URL: <http://www.blackwasp.co.uk/WPFCreatedGeometry.aspx> (12.05.2017)
11. J. Thomas. Overbye Visualization of Power Systems and Components. Final Project Report., Project Leader, University of Illinois at Urbana-Champaign (UIUC), PSERC. Publication 05-65, November 2005.
12. Overbye J.T., Weber J.D., Visualization of Power System Data, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL 61801 USA.
13. Идельчик В.И. Расчет установившихся режимов электрических систем. М.: «Энергия», 1977. 192 с.

## References

1. Comparing methods for network visualization, submitted on 30 January 2016 Non-Technical Project by Viktor Butkov, Supervisor: M. Sc. C. Klabunde, LENA, Otto-von-Guericke-Universitat-Magdeburg, 2016, 44 p.
2. Data Visualization and Infographics // Articles. Available at: <https://www.smashingmagazine.com/2008/01/monday-inspiration-data-visualization- and -infographics> (accessed 24 December 2017).
3. What Is Data Science, and What Does a Data Scientist Do? Available at: <http://www.innoarchitech.com/what-is-data-science-does-data-scientist-do/> (accessed 24 December 2017).
4. Project analysis – grading. Available at: <https://lumnify.com/grades/?rel=libhunt-cmp> (accessed 24 December 2017).
5. Becker R.A., Eick S.G., Wilks A.R. Visualizing Network Data. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1995. Vol. 1. No. 1. P. 16–21.
6. Cherven K., Mastering Gephi Network Visualization, Packt Publishing Ltd., January 2015, ISBN 978-1-78398-734-4.
7. Top 20 NuGet chart Packages // NuGet Must Haves Available at: <http://nugetmusthaves.com/Tag/Chart?page=1>



8. Compare Live-Charts and Oxyplot's popularity and activity // Awesome.NET [Electronic resource]. URL: <https://dotnet.libhunt.com/project/oxyplot/vs/live-charts>
9. Pagani G.A., Aiello M. The Power Grid as a Complex Network: a Survey, Johann Bernoulli Institute for Mathematics and Computer Science, University of Groningen, Groningen, The Netherlands, March 22, 2012.
10. WPF Shapes - Path - Combined Geometry, Richard Carr. Available at: <http://www.blackwasp.co.uk/WPFCreatedGeometry.aspx> (accessed 12 May 2017).
11. J. Thomas. Overbye Visualization of Power Systems and Components. Final Project Report., Project Leader, University of Illinois at Urbana-Champaign (UIUC), PSERC. Publication 05-65, November 2005.
12. Overbye J.T., Weber J.D., Visualization of Power System Data, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL 61801 USA.
13. Idel'chik V.I. Raschet ustannovivshih rezhimov elektricheskikh system [Calculation of steady-state modes of electrical systems]. Moscow: Energy Publ., 1977, 192 p. (In Russian).

**Критерии авторства**

Свеженцева О.В., Умнова М.О., Бутьков В.А. подготовили статью и несут ответственность за plagiat.

**Authorship criteria**

Svezhentseva O.V., Umnova M.O., Butkov V.A. have prepared the article for publication and bear the responsibility for plagiarism.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interests**

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.311.001.57

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-172-182>

## ПРОБЛЕМА АДЕКВАТНОГО АНАЛИЗА УСТОЙЧИВОСТИ УЗЛОВ ДВИГАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ, УСЛОВИЙ ЕЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ И СРЕДСТВА ЕЕ РЕШЕНИЯ

© В.А. Сулайманова<sup>1</sup>, А.С. Гусев<sup>2</sup>, А.В. Киевец<sup>3</sup>, М.В. Андреев<sup>4</sup>

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
634050, Российская Федерация, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ.** Обусловлена необходимостью повышения полноты и достоверности анализа устойчивости работы синхронных и асинхронных двигателей узлов нагрузки систем электроснабжения и условий ее обеспечения, в значительной мере определяющих эффективность и нередко безопасность функционирования крупных промышленных предприятий. Состоит в разработке методов и средств достоверного всережимного моделирования в реальном времени и на неограниченном интервале непрерывного спектра нормальных и аномальных квазистабилизировавшихся и переходных процессов в синхронных и асинхронных двигателях и системах электроснабжения, электроэнергетической системе в целом, обеспечивающего соответствующую реальным условиям адекватность вышеуказанного анализа. **МЕТОДЫ.** Математическое и физическое моделирование, теория методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений, непрерывное неявное параллельное методически точное интегрирование дифференциальных уравнений, схемотехника на базе интегральной микрэлектроники и микропроцессорной техники, ИТ-технологии. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Выявлены и обоснованы причины существования проблемы адекватного анализа устойчивости узлов двигательной нагрузки и условий ее обеспечения, связанные с ограничениями применимости методов численного интегрирования дифференциальных уравнений математических моделей. Для решения проблемы разработана концепция, основанная на применении комплексного подхода, позволяющего получать достаточно полную и достоверную информацию о непрерывном спектре нормальных и аномальных квазистабилизировавшихся и переходных процессов, протекающих синхронных и асинхронных двигателей и систем электроснабжения, электроэнергетической системы в целом. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Созданные средства позволяют проводить необходимые для адекватного анализа устойчивости работы синхронных и асинхронных двигателей узлов нагрузки систем электроснабжения и условий ее обеспечения экспериментальные исследования.

**Ключевые слова:** синхронные и асинхронные двигатели, система электроснабжения, устойчивость узлов двигательной нагрузки, математическое моделирование, адекватность, достоверность.

**Информация о статье.** Дата поступления 13 марта 2018 г.; дата принятия к печати 6 апреля 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2018 г.

**Формат цитирования.** Сулайманова В.А., Гусев А.С., Киевец А.В., Андреев М.В. Проблема адекватного анализа устойчивости узлов двигательной нагрузки систем электроснабжения, условий ее обеспечения и средства ее решения // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 4. С. 172–182. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-172-182

<sup>1</sup>Сулайманова Венера Алмазовна, аспирант, ассистент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики; e-mail: [venera20@tpu.ru](mailto:venera20@tpu.ru)

Venera A. Sulaymanova, Postgraduate, Assistant of the Department of Electric Power Engineering and Electrical Engineering of the Energy Engineering School, e-mail: [venera20@tpu.ru](mailto:venera20@tpu.ru)

<sup>2</sup>Гусев Александр Сергеевич, доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики; e-mail: [gusev\\_as@tpu.ru](mailto:gusev_as@tpu.ru)

Aleksandr S. Gusev, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Electric Power Engineering and Electrical Engineering of the Energy Engineering School, e-mail: [gusev\\_as@tpu.ru](mailto:gusev_as@tpu.ru)

<sup>3</sup>Киевец Антон Владимирович, аспирант, e-mail: [Kievec.v.l@gmail.com](mailto:Kievec.v.l@gmail.com)

Anton V. Kievets, Postgraduate, e-mail: [Kievec.v.l@gmail.com](mailto:Kievec.v.l@gmail.com)

<sup>4</sup>Андреев Михаил Владимирович, кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики; e-mail: [andreevmv@tpu.ru](mailto:andreevmv@tpu.ru)

Mikhail V. Andreev, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Electric Power Engineering and Electrical Engineering of the Energy Engineering School, e-mail: [andreevmv@tpu.ru](mailto:andreevmv@tpu.ru)



## PROBLEM OF ADEQUATE ANALYSIS OF PSS MOTOR LOAD NODE STABILITY, ITS PROVISION CONDITIONS AND SOLUTION TOOLS

V.A. Sulaymanova, A.S. Gusev, A.V. Kievets, M.V. Andreev

National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin pr., Tomsk, 634050, Russian Federation

**ABSTRACT. PURPOSE.** A justification is given to the need to increase the completeness and reliability of the analysis of operation stability of synchronous and induction motors (SM and IM) of power supply system (PSS) load nodes and its provision conditions which to a considerable extent determine the efficiency and often operation safety of large industrial enterprises. The purpose of the paper is to develop the methods and tools for reliable real-time simulation in an unlimited interval of the continuous spectrum of normal and abnormal quasi-steady and transient processes in SM, IM, PSS, and in the electric power system (EPS) as a whole that ensures the adequacy of the above analysis corresponding to real conditions. **METHODS.** The study uses the following methods of scientific research: mathematical and physical simulation, the theory of discretization methods for ordinary differential equations, methodologically accurate parallel implicit continuous integration of differential equations, circuit technology based on integrated microelectronics and microprocessor technology, and IT technology. **RESULTS.** The paper has revealed and justified the causes of the problem of adequate analysis of the motor load node stability and its provision conditions related to the applicability conditions of the methods of numerical integration of differential equations of mathematical models. To solve this problem a concept has been developed based on a complex approach that provides sufficiently complete and reliable information about the continuous spectrum of normal and abnormal quasi-steady and transient processes occurring in SM, IM, PSS, and EPS as a whole. **CONCLUSION.** Developed tools enable experimental researches necessary for the adequate analysis of the operation stability of synchronous and induction motors of PSS load nodes and the conditions for its provision.

**Keywords:** synchronous and induction motors (SM and IM), power supply system (PSS), stability of motor load nodes, mathematical simulation, adequacy, reliability

**Information about the article.** Received March 13, 2018; accepted for publication April 6, 2018; available online April 30, 2018.

**For citation.** Sulaymanova V.A., Gusev A.S., Kievets A.V., Andreev M.V. Problem of adequate analysis of PSS motor load node stability, its provision conditions and solution tools. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 4, pp. 172–182. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-172-182

### Введение

Технологическая, экономическая эффективность и нередко безопасность функционирования большинства промышленных предприятий, особенно нефте-, газо-, химических отраслей, в значительной мере зависят от устойчивой работы двигательной нагрузки, главным образом синхронных и асинхронных двигателей (СД и АД). Наиболее вероятными причинами нарушения устойчивой работы СД и АД служат кратковременные снижения или исчезновения напряжения, связанные в основном с различными короткими замыканиями (КЗ) и действием релейной защиты, автоматики (РЗА), приводящие к их торможениям, успешным или неуспешным самозапускам и отключениям. Поэтому задача достоверного всережимного анализа этих процессов и условий устойчивости работы СД и АД узлов двигательной нагрузки систем электроснабжения (СЭС) является весьма актуальной.

Ввиду недопустимости натурных экспериментов и невозможности из-за сложности полноценного физического моделирования, единственным путем получения достаточно полной и достоверной информации о данных процессах является преимущественно математическое моделирование. Однако необходимая для этого математическая модель двигательной нагрузки и СЭС, электроэнергетической системе (ЭЭС) в целом всегда содержит жесткую нелинейную систему дифференциальных уравнений высокого порядка, которая плохо выражена в условиях применимости методов их численного интегрирования согласно теории методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений и не может быть удовлетворительно решена. Для улучшения обусловленности необходимо снижать жесткость, нелинейность, диффе-



ренциальный порядок и ограничивать интервал решения, осуществимый только за счет декомпозиции процессов, значительного упрощения математических моделей оборудования, СЭС, ЭЭС в целом и ограничения интервала воспроизведения процессов. В результате этих упрощений и ограничений, а также присущей численному интегрированию неизвестной методической ошибки, возникает проблема полноты и достоверности такого моделирования. Поскольку данную проблематику неизбежно наследуют все современные программно-вычислительные комплексы (ПВК) расчета режимов и процессов в ЭЭС, то в рамках доминирующего в настоящее время сугубо численного подхода эта проблема оказывается неразрешимой. Принципиальной альтернативой является комплексный подход, позволяющий для каждого аспекта сложной проблемы разрабатывать и применять наиболее эффективные методы и средства, обеспечивающие в совокупности успешное решение проблемы в целом.

### Теоретическое обоснование причин существования проблемы

Согласно теории методов дискретизации для обыкновенных дифференциальных уравнений, применимость наиболее распространенных методов численного интегрирования, основанных на использовании в качестве аппроксимирующего выражения на шаге интегрирования усеченного ряда Тейлора (обычно в пределах 4-го порядка), ограничена следующими условиями [1–7]:

- решения дифференциальных уравнений должны быть разложимыми в ряд Тейлора в окрестности каждой точки дискретизации:

$$y(t) = \sum_{p=0}^n \frac{y^p(t_n)}{p!} (t - t_n)^p + r_n(t),$$

где  $y^p(t_n) = \frac{d^p y}{dt^p} \Big|_{t=t_n}$ ,  $r_n(t)$  – остаточный член ряда Тейлора при его усечении до члена степени  $p$ ;  $t_n = t_0 + nh$ , ( $n = 0, 1, \dots$ ) – точки дискретизации,  $t_0$  – точка начала интервала интегрирования;  $h$  – шаг интегрирования;  $p$  – степень согласованности;

- решения дифференциального уравнения должны быть ограничены, как минимум, условием нуль-устойчивости, в соответствии с которым корни  $\xi_i$  его характеристического полинома

$$\Pi(\xi) = \sum_{i=0}^k a_i \xi_i$$

должны удовлетворять требованиям: для всех корней  $|\xi_i| \leq 1$ , корни  $|\xi_i| = 1$  должны быть обязательно простыми, где  $a_i$  – коэффициенты характеристического полинома,  $k$  – порядок метода численного интегрирования;

- методы дискретизации для дифференциальных уравнений должны быть согласованными:

$$d = \max |\tilde{y}(t_n) - y(t_n)| \rightarrow O(h^p), \text{ при } h \rightarrow 0,$$

где  $d$  – локальная ошибка аппроксимации,  $\tilde{y}(t_n)$  – численное решение дифференциального уравнения  $\frac{dy}{dt} = f(t, y)$  в точке  $t_n$ ,  $y(t_n)$  – действительное решение дифференциального



уравнения  $\frac{dy}{dt} = f(t, y)$  в точке  $t_n$ ,  $O(h^p)$  – ошибка за счет отбрасывания членов ряда Тейлора при его усечении;

- решения дифференциального уравнения должны удовлетворять условию Липшица:

$$|f(t, y_n) - f(t, y_j)| \leq L |y_n - y_j|,$$

где  $y_n, y_j$  – любая пара значений из области решения дифференциального уравнения  $\frac{dy}{dt} = f(t, y)$ , а  $L$  – константа Липшица;

- интервал решения разностного уравнения ограничен условием теоремы Далквиста:

$$|\tilde{y}(t_n) - y(t_n)| \leq \frac{G}{1 - \left| h \frac{b_k}{a_k} \right| \cdot M} \left[ \left( 1 + \left| h \frac{b_k}{a_k} \right| \cdot M \right) d + \frac{t_n}{|a_k|} \left( \frac{\sigma}{h} + K h^p \right) \right] \cdot e^{G h t_n},$$

где  $G, M, K$  – постоянные, определяемые коэффициентами решаемого разностного уравнения,  $a_k, b_k$  – коэффициенты, определяемые аппроксимирующим многочленом конкретного метода численного интегрирования,  $\sigma = \max |\sigma_n|$  – ошибка округления, определяемая разрядной сеткой используемого компьютера.

Применительно к решениям систем дифференциальных уравнений, достаточно полно и достоверно описывающих единый непрерывный спектр квазиустановившихся и переходных нормальных и аномальных процессов в оборудовании, в том числе в СД и АД и СЭС, ЭЭС в целом, их разложимость в ряд Тейлора практически недоказуема, а согласно исследованиям, даже многие элементарные функции не разлагаются в ряд Тейлора [7]. В соответствии с условием Липшица, удовлетворительное решение систем дифференциальных уравнений оказывается неопределенным, если их жесткость, определяемая отношением наибольшей постоянной времени  $T_{\max}$  к наименьшей  $T_{\min}$  [8]:

$$S = \frac{T_{\max}}{T_{\min}} \geq 10.$$

Между тем жесткость адекватных математических моделей электрических машин, другого оборудования и СЭС, ЭЭС в целом превышает  $10^3$ . Теоремой Далквиста часто неприемлемо ограничивается интервал воспроизведения процессов.

Для ориентировочной оценки обусловленности математической модели и ошибки численного решения обычно используются полуэмпирические формулы. Такая всесторонне исследованная и рекомендованная формула приведена в [9]:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^n e^{\lambda_i h_i} (d_i + \sigma_i),$$



где  $\lambda_i$  – собственные значения матрицы Якоби решаемой системы дифференциальных уравнений, а  $e^{\lambda_i h_i}$  является по существу коэффициентами чувствительности к пошаговым ошибкам решения,  $n$  – общее количество пошаговых вычислений, определяемое интервалом решения  $t_u$  [с], величиной шага  $h_i = \Delta t$  [с] и дифференциальным порядком решаемой системы уравнений  $N$ , которое при  $h_0 = \text{const}$  (для упрощения оценки)  $n = \frac{t_u}{\Delta t} \cdot N$ .

Если для примера задать почти идеальные условия численного решения математической модели средней ЭЭС:  $N = 5 \cdot 10^3$ ,  $t_u = 20$  с,  $h_i = 10^{-5} = \text{const}$  – нереализуемый в современных ПВК шаг интегрирования,  $\lambda_i = 0$  – нежесткая система,  $d_i = 10^{-10} = \text{const}$  – беспрецедентная малая пошаговая ошибка,  $\sigma_i = 0$  – бесконечно большая разрядная сетка компьютера, то получим значение ошибки численного решения:

$$\varepsilon = \frac{t_u}{h_i} \cdot N \cdot d_i \approx \frac{20}{10^{-5}} \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 10^{-10} \cdot 100\% \approx 100\%.$$

Указанные ограничительные условия определяют необходимость применения в ПВК: декомпозиции единого непрерывного спектра процессов на установившиеся и переходные, которые, в свою очередь, подразделяются на электромагнитные и электромеханические, однолинейные расчетные схемы вместо трехфазных, существенные упрощения при расчете переходных процессов математических моделей электрических машин и систем регулирования, особенно электросетевого оборудования в виде алгебраических уравнений, и СЭС, ЭЭС в целом, а также ограничение интервала воспроизведения процессов. Данные упрощения и ограничения в совокупности с неизвестной методической ошибкой являются строгим обоснованием причин неразрешимости рассматриваемой проблемы в рамках существующего методологически одностороннего сугубо численного подхода. Поэтому разработка необходимых для адекватного анализа устойчивости узлов двигательной нагрузки и условий ее обеспечения методов и средств достоверного всережимного моделирования процессов в СД, АД и СЭС, ЭЭС в целом является весьма актуальной.

### Концепция адекватного анализа устойчивости узлов двигательной нагрузки и условий ее обеспечения

В соответствии с комплексным подходом и анализом всех аспектов решаемой проблемы разработана концепция достоверного всережимного моделирования в реальном времени и на неограниченном интервале непрерывного спектра нормальных и аномальных квазиустановившихся и переходных процессов в СД, АД и СЭС, ЭЭС в целом состоящая из следующих положений:

1. Для обеспечения адекватного анализа устойчивости узлов двигательной нагрузки и условий ее обеспечения синтезируются и применяются всережимные динамические бездекомпозиционные математические модели, достаточно полно и достоверно описывающие весь непрерывный спектр нормальных и аномальных квазиустановившихся и переходных процессов в СД и АД, системах автоматического регулирования (САР), приводимых механизмах (ПМ) и СЭС, ЭЭС в целом.

2. Обеспечение гарантированной точности решения системы дифференциальных уравнений синтезированных математических моделей осуществляется применением способа методически точного непрерывного неявного параллельного интегрирования в реальном времени и на неограниченном интервале дифференциальных уравнений.



3. Для адекватного воспроизведения коммутационных процессов, включая различные К3 естественного объединения, математически моделируемого оборудования и неограниченного наращивания модели СЭС, ЭЭС, получаемые в результате решения, представленные напряжениями, непрерывные математические переменные входных-выходных токов моделируемого оборудования преобразуются в соответствующие им модельные физические токи и узлы моделируемых трехфазных схем СЭС, ЭЭС, формируются, а также все вышеобозначенные коммутации осуществляются на модельном физическом уровне.

4. Дистанционное интерактивное и автоматическое, в том числе функциональное, управление параметрами моделируемого оборудования, а также обеспечение современных эффективных информационно-управляющих свойств и возможностей и предоставление, преобразование информации осуществляется путем использования аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразования (АЦП и ЦАП).

5. Указанный в п. 2 способ реализуется путем разработки и использования соответствующих параллельных цифро-анalogовых структур, образующих специализированные гибридные сопроцессоры (ГС) математически моделируемого оборудования, которые в совокупности с реализацией положения п. 3, выполняемого преобразователями напряжение-ток (ПНТ), повторителями напряжения (ПН), цифро-управляемыми продольно-поперечными коммутаторами (ППК) с учетом соответствующих переходных сопротивлений  $R_{PA}$ ,  $R_{PB}$ ,  $R_{PC}$ ,  $R_{PD}$ , и п. 4, осуществляемого посредством процессора АЦП, функционально-ориентированных периферийных процессоров в центрального процессора (ЦП), составляющих микропроцессорный узел (МПУ), образуют универсальные для каждого вида моделируемого оборудования специализированные процессоры (СП).

6. Для реализации системных информационно-управляющих возможностей и взаимодействия с внешними программными средствами разрабатывается и применяется необходимая информационно-управляющая система, состоящая из МПУ СП, Сервера и соответствующего программного обеспечения, объединенных локальной компьютерной сетью (ЛКС).

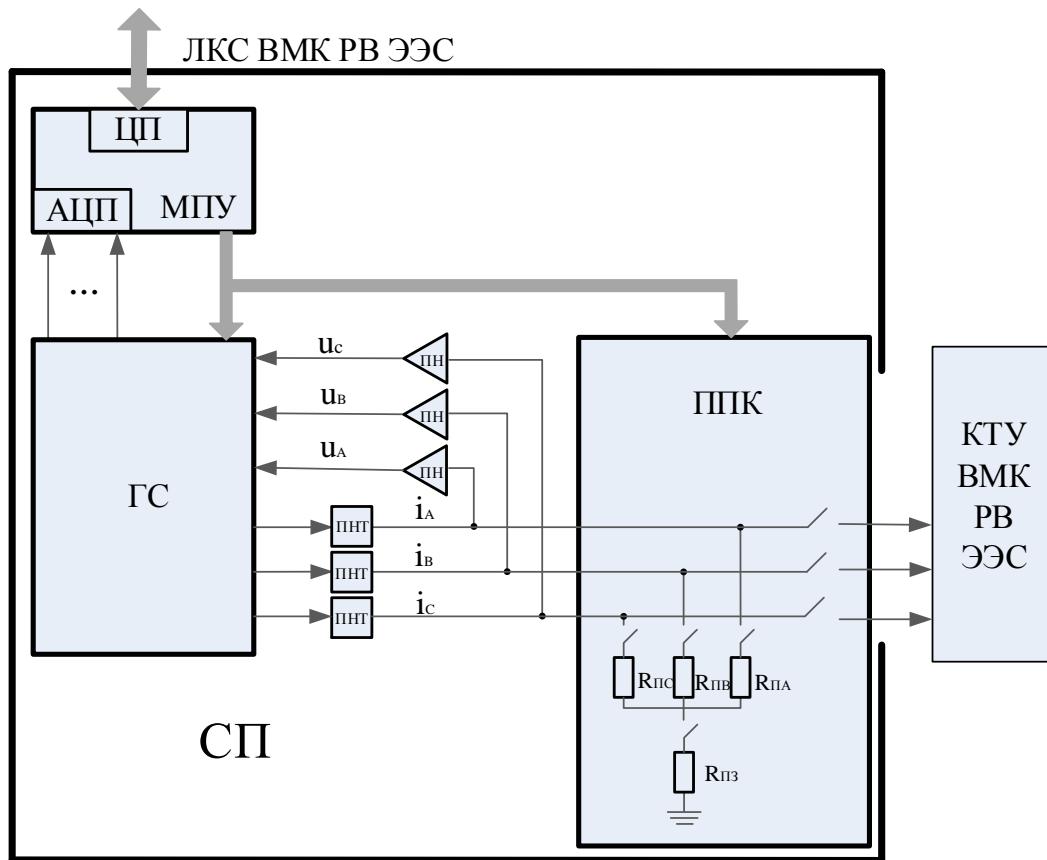
7. Обеспечение высоких современных информационно-управляющих и метрологических свойств и возможностей достигается применением новейших достижений интегральной микроэлектроники, микропроцессорной техники и IT-технологий.

### **Принципы построения средств реализации концепции адекватного анализа устойчивости узлов двигательной нагрузки и условий ее обеспечения**

Разработанные в соответствии с рассмотренной концепцией средства ее реализации для СП электрических машин, другого оборудования и СЭС, ЭЭС в целом, образуют Всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС) [10–12], обеспечивающий достаточно полное и достоверное воспроизведение непрерывного спектра нормальных и аномальных квазиустановившихся и переходных процессов в электрических машинах, другом оборудовании и СЭС, ЭЭС в целом. Основным источником информации при решении проблемы адекватного анализа устойчивости узлов двигательной нагрузки и условий ее обеспечения служат универсальные СП электрических машин, адаптируемые для моделирования различных типов синхронных и асинхронных электрических машин с учетом ПМ, средств регулирования и защиты. Обозначенная структура СП электрической машины представлена на рисунке, где КТУ – коммутатор трехфазных узлов естественного модельного физического объединения всех СП СЭС, ЭЭС<sup>5</sup>.

<sup>5</sup>Боровиков Ю.С. Мультипроцессорная моделирующая система реального времени электроэнергетических систем с активно-адаптивными сетями: дис. ... док-ра техн. наук: 05.14.02 / Ю.С. Боровиков; Новосибирская государственная академия водного транспорта. Томск: 2014. 273 с. / Borovikov Yu.S. Multiprocessor real time modeling system of electropower systems with active-adaptive networks: Doctoral Dissertation in technical sciences: 05.14.02 / Yu.S. Borovikov; Novosibirsk State Academy of Water Transport. Tomsk: 2014. 273 p.

Воспроизводимая в СП базовая математическая модель собственно электрических машин, ввиду широкой распространенности в виде системы уравнений в координатах  $d, q$  [13], и ее взаимодействие с другим моделируемым оборудованием в трехфазной системе  $A, B, C$ , осуществляется путем взаимного преобразования переменных систем  $d, q \leftrightarrow A, B, C$ .



**Структурная схема специализированного процессора моделирования электрической машины**  
*Structural diagram of a specialized processor for modeling an electrical machine*

Данная математическая модель СД и АД СП электрических машин содержит следующую систему уравнений:

- уравнение движения ротора:

$$T_j \frac{d\omega}{dt} + K_M \omega = -M_{\text{mex}} + (\psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d),$$

где  $T_j$  – постоянная инерции ротора,  $\omega$  – частота вращения ротора,  $K_M$  – многофункциональный коэффициент учета потерь на трение в подшипниках вала ротора и деформаций на его скручивание,  $M_{\text{mex}}$  – для двигателей момент сопротивления приводимого механизма  $M_{\text{mex}} = M_{\text{cm}} + M_{\omega} \omega^n$ , в котором  $M_{\text{cm}} = m_{\text{cm}} \cdot K_3 \cdot \cos \varphi_n$  – частотно-независимая составляющая  $M_{\text{mex}}$ ,  $M_{\omega} = \frac{(1 - M_{\text{cm}}) \cdot K_3 \cdot \cos \varphi_n}{\omega_n^n}$  – частотно-зависимая часть  $M_{\text{mex}}$  и  $m_{\text{cm}}$  – статический момент,  $K_3$  – коэффициент загрузки,  $\cos \varphi_n$  – нагрузки,  $\omega_n$  – номинальная частота вращения,  $n$  – показатель степени определяется спецификой конкретных приводимых механизмов,  $\psi_d, \psi_q$  и  $i_d, i_q$  – потокосцепления и токи статора;



- уравнения напряжения статора

$$\frac{d\psi_d}{dt} = -\omega\psi_q - r_a i_d - u_d,$$

$$\frac{d\psi_q}{dt} = +\omega\psi_d - r_a i_q - u_q,$$

где  $\frac{d\psi_d}{dt}, \frac{d\psi_q}{dt}$  и  $\omega\psi_q, \omega\psi_d$  – соответствующие трансформаторная электродвижущая сила (ЭДС) и ЭДС вращения,  $r_a$  – активное сопротивление статорной обмотки,  $u_d, u_q$  – напряжения статора;

- уравнение контура возбуждения:
- 

$$\frac{d\psi_f}{dt} = u_f - r_f i_f,$$

где  $\psi_f$  и  $r_f$  – потокосцепление и активное сопротивление обмотки возбуждения,  $u_f$  и  $i_f$  – напряжение и ток возбуждения;

- уравнения демпферных контуров:
- 

$$\frac{d\psi_{D1}}{dt} + r_{D1} \cdot i_{D1} = 0, \frac{d\psi_{Q1}}{dt} + r_{Q1} \cdot i_{Q1} = 0,$$

$$\frac{d\psi_{D2}}{dt} + r_{D2} \cdot i_{D2} = 0, \frac{d\psi_{Q2}}{dt} + r_{Q2} \cdot i_{Q2} = 0,$$

$$\frac{d\psi_{D3}}{dt} + r_{D3} \cdot i_{D3} = 0, \frac{d\psi_{Q3}}{dt} + r_{Q3} \cdot i_{Q3} = 0,$$

$$\frac{d\psi_{Q4}}{dt} + r_{Q4} \cdot i_{Q4} = 0,$$

где  $\psi_{D1}, \psi_{Q1}, \psi_{D2}, \psi_{Q2}, \psi_{D3}, \psi_{Q3}, \psi_{Q4}$ ,  $r_{D1}, r_{Q1}, r_{D2}, r_{Q2}, r_{D3}, r_{Q3}, r_{Q4}$  и  $i_{D1}, i_{Q1}, i_{D2}, i_{Q2}, i_{D3}, i_{Q3}, i_{Q4}$  – потокосцепления, активные сопротивления и токи соответствующих демпферных контуров;

- уравнение внутренних ЭДС в воздушном зазоре
- 

$$E_{id} = x_{ad}(i_f + i_d + i_D), E_{iq} = x_{aq}(i_q + i_Q),$$

где  $x_{ad}, x_{aq}$  – сопротивления взаимоиндукции в соответствующих осях между контурами ротора и статора;

- уравнение для токов статорных, роторных и демпферных контуров

$$i_d = \frac{1}{x_\sigma}(\psi_d - E_{id}), i_q = \frac{1}{x_\sigma}(\psi_q - E_{iq}),$$



$$i_f = \frac{1}{x_{\sigma f}} (\psi_f - E_{id}), i_D = \frac{1}{x_{\sigma D}} (\psi_D - E_{iq}),$$

$$i_Q = \frac{1}{x_{\sigma Q}} (\psi_Q - E_{iq}),$$

где  $x_{\sigma}, x_{\sigma f}, x_{\sigma D}, x_{\sigma Q}$  – реактивные сопротивления рассеяния контуров статора, возбуждения и соответствующих демпферных контуров;

- уравнения координатных преобразований  $d, q \Leftarrow A, B, C$ .

$$i_A(t) \equiv U_{Am} \cdot \sin(\omega t) = i_d \cdot U_m \cdot \cos(\omega t) + i_q \cdot U_m \cdot \sin(\omega t),$$

$$i_B(t) \equiv U_{Bm} \cdot \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) = i_d \cdot U_m \cdot \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) + i_q \cdot U_m \cdot \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi),$$

$$i_C(t) \equiv U_{Cm} \cdot \sin(\omega t - \frac{4}{3}\pi) = i_d \cdot U_m \cdot \cos(\omega t - \frac{4}{3}\pi) + i_q \cdot U_m \cdot \sin(\omega t - \frac{4}{3}\pi),$$

$$u_d = \frac{2}{3} \left[ u_A(t) \cdot U_m \cdot \cos(\omega t) + u_B(t) \cdot U_m \cdot \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) + u_C(t) \cdot U_m \cdot \cos(\omega t - \frac{4}{3}\pi) \right],$$

$$u_q = \frac{2}{3} \left[ u_A(t) \cdot U_m \cdot \sin(\omega t) + u_B(t) \cdot U_m \cdot \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) + u_C(t) \cdot U_m \cdot \sin(\omega t - \frac{4}{3}\pi) \right],$$

где  $i_A(t), i_B(t), i_C(t)$ ,  $u_A(t), u_B(t), u_C(t)$  – мгновенные значения токов и напряжений,  $U_m \cdot \cos(\omega t), U_m \cdot \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi), U_m \cdot \cos(\omega t - \frac{4}{3}\pi)$  и  $U_m \cdot \sin(\omega t), U_m \cdot \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi), U_m \cdot \sin(\omega t - \frac{4}{3}\pi)$  – ортогональные трехфазные базисы координатных преобразований.

Выходящие за рамки данной статьи результаты экспериментальных исследований, подтверждающие успешное решение проблемы адекватного анализа устойчивости узлов двигательной нагрузки и условий ее обеспечения с помощью рассмотренных средств, а также методика выполнения этого анализа является темой дальнейших публикаций.

## Выводы

1. Необходимые для адекватного анализа устойчивости узлов двигательной нагрузки и условий ее обеспечения всережимные динамические бездекомпозиционные математические модели, достаточно полно и достоверно описывающие весь непрерывный спектр нормальных и аномальных квазиустановившихся и переходных процессов в СД и АД, САР, ПМ и СЭС, ЭЭС в целом, и обеспечивающие гарантированную точность средства их решения, нереализуемы в рамках доминирующего в настоящее время одностороннего сугубо численного подхода и используемые для его реализации ПВК в силу рассмотренных и теоретически обоснованных причин, обусловленных ограничительными условиями применимости методов численного интегрирования, не обеспечивают достоверность воспроизведения процессов.

2. Предложенная концепция и разработанные для ее реализации средства, основанные на анализе всех аспектов решаемой проблемы, обеспечивают строго обоснованное успешное



решение проблемы адекватного анализа устойчивости узлов двигательной нагрузки и условий ее обеспечения.

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках проекта № 14. Y30.18.2379-МК.*

*The reported study was funded by Ministry of Education and Science of Russian Federation, according to the research project No. 14. Y30.18.2379-МК.*

#### **Библиографический список**

1. Холл Дж., Уатт Дж. Современные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений. М.: Мир, 1979. 312 с.
2. Бабушка И., Витасек Э., Прагер М. Численные процессы решения дифференциальных уравнений. М.: Мир, 1969. 368 с.
3. Вержбицкий В.М. Численные методы (математический анализ и обыкновенные дифференциальные уравнения). М.: Высш. шк., 2001. 382 с.
4. Buckingham R.A. Numerical Methods. London: Sir Isaak Pitman & Sons, 1957.
5. Hildebrand F.B. Introduction to Numerical Analysis. New York: McGraw – Hill book Company, 1956.
6. Hartree D.R. Numerical Analysis. London: Oxford University Press, 1958.
7. Хеминг Р.В. Численные методы. М.: Наука, 1968. 400 с.
8. Ракитский Ю.В., Устинов С.М., Черноруцкий И.Г. Численные методы решения жестких систем. М.: Наука, 1979. 208с.
9. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М.: Высш. шк., 1985. 536 с.
10. Андреев М.В., Боровиков Ю.С., Гусев А.С., Сулайманов А.О., Суворов А.А., Рубан Н.Ю., Уфа Р.А. Концепция и базовая структура всережимного моделирующего комплекса // Газовая промышленность: научно-технический и производственный журнал. 2017. № 5 (752). С. 18–27.
11. Андреев М.В., Боровиков Ю.С., Гусев А.С., Сулайманов А.О., Суворов А.А., Рубан Н.Ю., Уфа Р.А. Практическое применение всережимного моделирующего комплекса электроэнергетических систем // Газовая промышленность: научно-технический и производственный журнал. 2017. № 6 (753). С. 94–104.
12. Ruban, N.Y., Gusev A.S., Sulaymanova V.A. Real-time comprehensive simulation of electric power systems for the task of overvoltages value determination. IOP Conference series: Materials Science and Engineering, (Tomsk, 5 October 2015). Tomsk, Russia, 2015, 93 (1).
13. Kundur P. Power system stability and control. New York: McGraw – Hill, 1994.

#### **References**

1. Hall G., Watt JM. Sovremennee chislenue metodi resheniya obiknovenih differencialnih yravnenui [Modern Numerical Methods for Solving Ordinary Differential Equations]. Moscow: Mir Publ., 1979, 312 pp. (In Russian).
2. Babushka I., Vitasek E., Prager M. Chislenue procesi resheniya differencialnih yravnenui [Numerical processes in solving differential equations]. Moscow: Mir Publ., 1969, 368 pp. (In Russian).
3. Verjbitskui V. Chislenue metodi (matamaticeskui analiz i obiknovenue differencialhue yravneniya) [Numerical methods (mathematical analysis and ordinary differential equations)]. Moscow: Higher school Publ., 2001, 382 pp. (In Russian).
4. Buckingham R.A. Numerical Methods. London: Sir Isaak Pitman & Sons, 1957.
5. Hildebrand F.B. Introduction to Numerical Analysis. New York: McGraw – Hill book Company, 1956.
6. Hartree D.R. Numerical Analysis. London: Oxford University Press, 1958.
7. Hamming R. Chislenyye metodi [Numerical methods for scientists and engineers]. Moscow: Nauka Publ., 1968, 400 p. (In Russian).
8. Rakitsky, Yu.V., Ustinov, S.M., Chernorutsky, I.G. Chislenyye metody resheniya zhestkikh sistem [Numerical methods of solving rigid systems]. Moscow: Nauka Publ., 1979. 208 p. (In Russian).
9. Venikov V.A. Perekhodnye elektromekhanicheskie protsessy v electricheskikh sistemakh [Electromechanical transients in electrical systems]. Moscow, High school Publ., 1985, 536 p. (In Russian).
10. Andreyev M.V., Borovikov Yu.S., Gusev A.S., Sulaymanov A.O., Suvorov, A.A., Ruban, N.Y., Ufa R.A. Concept and basic structure of the hybrid real-time simulator. *Gazovaya promyshlennost': nauchno-tehnicheskiy zhurnal* [Gas Industry magazine], 2017, no. 5 (752), pp. 18–27. (in Russian)
11. Andreyev M.V., Borovikov Yu.S., Gusev A.S., Sulaymanov A.O., Suvorov A.A., Ruban N.Y., Ufa R.A. Practical application of the hybrid real-time power system simulator. *Gazovaya promyshlennost': nauchno-tehnicheskiy zhurnal* [Gas Industry magazine], 2017, no. 6 (753), pp. 94–104. (in Russian)



12. Ruban, N.Y., Gusev A.S., Sulaymanova V.A. Real-time comprehensive simulation of electric power systems for the task of overvoltages value determination. IOP Conference series: Materials Science and Engineering, (Tomsk, 5 October 2015). Tomsk, Russia, 2015, 93 (1).
13. Kundur P. Power system stability and control. New York: McGraw – Hill, 1994.

**Критерии авторства**

Сулайманова В.А., Гусев А.С., Киевец А.В., Андреев М.В. имеют на статью равные авторские права. Сулайманова В.А. несет ответственность за плагиат.

**Authorship criteria**

Sulaymanova V.A., Gusev A.S., Kievets A.V., Andreev M.V. have equal author's rights. Sulaymanova V.A. bears the responsibility for plagiarism.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interests**

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article

УДК 669.054.83

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-183-190>

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПЕРЕРАБОТКИ ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

© А.Е. Патрушов<sup>1</sup>, Н.В. Немчинова<sup>2</sup>, В.Е. Черных<sup>3</sup>, А.А. Тютрин<sup>4</sup>

<sup>1,2,4</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

<sup>3</sup>ООО «ИТЭМ-инжиниринг»,  
664075, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Байкальская, 244/3.

**РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ.** В работе проведен анализ современных технологий переработки мелкодисперсного техногенного сырья электросталеплавильного производства; показано, что предлагаемые способы не имеют обширного внедрения в производстве; авторами предложена технология переработки пыли электросталеплавильного производства в кольцевой печи с получением двух ценных продуктов – гранулированного чугуна и оксида цинка. **МЕТОДЫ.** Проведен анализ технико-экономических показателей известных и предлагаемой технологий переработки техногенного сырья. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** На основе проведенных экспериментов по получению гранулированного чугуна и оксида цинка показано преимущество предлагаемой авторами технологии по показателям качества конечных продуктов: гранулированного чугуна (содержание основного элемента не менее 95 %, серы – 0,04–0,05 % мас.) и цинкового концентраты (содержание оксида цинка – 86–91 % мас. при минимальном содержании галогенов (Cl, F). **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Предлагаемая авторами технология в сравнении с существующими способами переработки техногенного сырья электросталеплавильного производства имеет ряд конкурентных преимуществ по химическому составу конечной продукции и может быть рекомендована для внедрения в производство. **Ключевые слова:** техногенное сырье, пыль электросталеплавильного производства, кольцевая печь, гранулированный чугун, оксид цинка.

**Информация о статье.** Дата поступления 16 марта 2018 г.; дата принятия к печати 5 апреля 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2018 г.

**Формат цитирования.** Патрушов А.Е., Немчинова Н.В., Черных В.Е., Тютрин А.А. Современные методы переработки техногенного сырья электросталеплавильного производства // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 4. С. 183–190. DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-183-190>

### MODERN PROCESSING METHODS OF TECHNOGENIC RAW MATERIALS OF ELECTRIC FURNACE STEELMAKING

A.E. Patrushov, N.V. Nemchinova, V.E. Chernykh, A.A. Tyutrin

Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation.

"ITEM-Engineering" LLC,  
244/3, Baikalskaya St., Irkutsk, 664075, Russian Federation

<sup>1</sup>Патрушов Алексей Евгеньевич, аспирант, e-mail: [apatrushov@38.mtrci.ru](mailto:apatrushov@38.mtrci.ru)  
Aleksei E. Patrushov, Postgraduate, e-mail: [apatrushov@38.mtrci.ru](mailto:apatrushov@38.mtrci.ru)

<sup>2</sup>Немчинова Нина Владимировна, профессор, доктор технических наук, заведующая кафедрой металлургии цветных металлов, e-mail: [ninavn@yandex.ru](mailto:ninavn@yandex.ru)

Nina V. Nemchinova, Professor, Doctor of technical sciences, Head of the Department of Non-Ferrous Metals Metallurgy, e-mail: [ninavn@yandex.ru](mailto:ninavn@yandex.ru)

<sup>3</sup>Черных Владимир Евгеньевич, генеральный директор ООО «ИТЭМ-инжиниринг»; e-mail: [vchernih@38.mtrci.ru](mailto:vchernih@38.mtrci.ru)  
Vladimir E. Chernykh, Director General of "ITEM-Engineering" LLC, e-mail: [vchernih@38.mtrci.ru](mailto:vchernih@38.mtrci.ru)

<sup>4</sup>Тютрин Андрей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии цветных металлов; e-mail: [an.tu@inbox.ru](mailto:an.tu@inbox.ru)

Andrei A. Tyutrin, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Non-Ferrous Metals Metallurgy; e-mail: [an.tu@inbox.ru](mailto:an.tu@inbox.ru)



**ABSTRACT. PURPOSE.** The work carries out the analysis of modern processing technologies of fine-dispersed technogenic raw material of electric furnace steelmaking. It is shown that the proposed methods are not widely used in production. The authors propose a processing technology for electrosmelting dust in a rotary hearth furnace with the production of two valuable products - granulated iron and zinc oxide. **METHODS.** The analysis of technical and economic indicators of the known and proposed technologies for technogenic raw material processing is carried out. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The conducted experiments on the production of granulated iron and zinc oxide allowed to demonstrate the advantage of the proposed technology by the quality indicators of the end products: granulated iron (the content of the main element is not less than 95%, sulfur – 0.04-0.05% by weight) and zinc concentrate (the content of zinc oxide is 86–91% by weight with the minimum content of halogens (Cl, F)). **CONCLUSIONS.** The technology proposed by the authors has a number of competitive advantages in the chemical composition of the end product as compared with the existing processing methods of technogenic raw materials of electric furnace steelmaking and can be recommended for introduction into production.

**Keywords:** technogenic raw material, electrosmelting dust, rotary hearth furnace, granulated iron, zinc oxide

**Information about the article.** Received March 16, 2018; accepted for publication April 5, 2018; available online April 30, 2018.

**For citation.** Patrushov A.E., Nemchinova N.V., Chernykh V.E., Tyutrin A.A. Modern processing methods of technogenic raw materials of electric furnace steelmaking. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 4, pp. 183–190. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-183-190

## Введение

Стремительный рост производства стали в мире в последние 20–30 лет привлек внимание специалистов к возрастающему вредному воздействию деятельности предприятий черной металлургии на окружающую среду в связи с образованием трудноутилизируемых техногенных отходов [1–4].

При производстве стали образуются шламы и пыли, содержащие до 60 % мас. железа (в виде оксидов) и до 2,5 % мас. цинка, присутствие последнего в данном техногенном сырье препятствует последую-

щей их утилизации в доменных печах [5]. Аналогичная ситуация и с доменными шламами, которые кроме железа и углерода (25–30 % мас.) также содержат до 1,5 % мас. цинка [6]. Ежегодный суммарный мировой прирост цинкодержащей пыли оценивается в 10–15 млн т [7].

Таким образом, разработка эколого-экономических технологий переработки шламов и пылей предприятий черной металлургии является актуальной задачей.

## Методы переработки техногенного сырья

В настоящее время в решении задачи переработки техногенного сырья электросталеплавильного производства достигнуты определенные успехи. По данным проведенного нами литературного обзора, существующие методы переработки данного вида сырья делятся на две категории: гидро- и пирометаллургические.

**Гидрометаллургические методы переработки железоцинкодержащих шламов и пылей.** Применяют кислотные и щелочные методы выщелачивания. Кислотные способы обеспечивают высокое извлечение цинка, но получаемые растворы содержат значительное количество примесей,

в особенности железосодержащих соединений. Выделение цинка из растворов по данной технологии происходит путем электролиза [8], что требует высокой степени предварительной очистки растворов и вызывает дополнительные затраты. В качестве основного растворителя при кислотных методах переработки техногенных шламов и пылей используют серную кислоту, которая обеспечивает большую степень извлечения цинка в раствор и является более дешевым реагентом, чем соляная и азотная кислоты.

Щелочные методы переработки шламов и пылей обладают высокой селективностью по отношению к цинку, но для процесса



выщелачивания требуется высокая температура (более 100°C) и значительная концентрация щелочи (порядка 250–300 г/дм<sup>3</sup>). Существенным недостатком данного метода является невозможность его использования при переработке сырья, содержащего нерастворимый феррит цинка. В результате, большинство предприятий черной металлургии в настоящее время складируют данный вид техногенного сырья на шламовых полях, что приводит к ухудшению экологической обстановки.

**Пирометаллургические методы переработки железоцинкодержащих шламов и пылей.** Разработаны и используются в промышленности несколько технологических процессов утилизации железоцинкодержащих шламов и пылей:

- вельц-процесс – металлизация отходов во вращающихся печах с извлечением цинка [9];
- процесс OXY Cup – проплавка брикетов из железоцинкодержащих материалов в кислородной вагранке [10];
- металлизация рудоугольных окатышей или брикетов в камерных печах кольцевого типа с вращающимся подом (Fastmet, RedIron) [11, 12];
- технология Fastmelt – металлизация окатышей или брикетов в печи с вращающимся подом с последующим получением из металлизированного продукта чугуна в дуговой электропечи [11];
- технология Primus – металлизация неокускованных дисперсных отходов в многоподовой печи с последующей выплавкой из металлизированного продукта чугуна в дуговой электропечи [13].

**1. Вельц-процесс** заключается в углеродическом восстановлении цинка и последующей его возгонке в газовую фазу. Перерабатываемые цинкодержащие шламы и пыли, окомкованные с твердым восстановителем (коксиком), загружают во вращающуюся трубчатую печь, где происходит нагрев шихты до 1 200 °C. Шихта в печи перемещается в противотоке с отходящими газами. В ходе процесса происходит восстановление цинка и свинца, которые возгоня-

ются и удаляются из печи вместе с отходящими газами, а затем улавливаются в системе газоочистки. Уловленный продукт содержит в среднем 50–60 % мас. Zn с некоторым содержанием других примесей (Pb, Cd и др.). Побочным продуктом является смесь шлака с металлическим железом, которая имеет ограниченную сферу использования и низкую цену для реализации возможным потребителям. Главными недостатками данной технологии являются большой расход топлива и загрязнение цинкового концентрата оксидами железа.

**2. Процесс OXY Cup** – это технология переработки окускованной шихты из пыли и шламов металлургических заводов в шахтой печи OXY Cup, которая представляет собой современную модификацию вагранки. В верхней части печи (колошник) располагается загрузочный бункер, ниже находится камера газоотвода. При такой конструкции исключается задымление колошника печи во время работы. Средняя часть печи (шахта) служит для предварительного нагрева шихтовых материалов и завершается зоной расплавления металла и шлака. В нижней части (горн) размещаются металлоприемник и устройство для разделения металла и шлака. Частицы ZnO, образующиеся при окислении газообразного цинка в области низких температур, имеют очень небольшие размеры и уносятся из печи с пылью. В результате переработки по технологии OXY Cup получают горячий металл, шлак и колошниковую пыль с содержанием цинка 25–30 % мас., что является сырьем для дальнейшей переработки. Основными недостатками технологии являются большее потребление топлива по сравнению с другими технологиями переработки пылей и шламов металлургического производства и получение полупродукта в виде колошниковой пыли, которую необходимо направить на дальнейшую переработку с целью извлечения цинка.

**3. Технология Fastmet** – это переработка пылей и шламов, основанная на углеродическом восстановлении железа и цинка в кольцевой печи. Железо прямого



восстановления, полученное в данном процессе, имеет следующий химический состав, % мас., соответственно: С – 3,0–4,0; S – 0,15–0,5; Fe<sub>общ.</sub> – 85–90; Fe<sub>мет</sub> – 75–78; FeO – 10–15; оксиды пустой породы – 5–10. Данный продукт (с высоким содержанием оксидов пустой породы и вредных примесей) не является высококачественным и может использоваться только в качестве добавки в шихту доменных печей и кислородных конвертеров. Использование такого сырья в электросталеплавильных печах недопустимо. Одним из немногих преимуществ данного процесса является возможность переработки шламов и пыли доменного, конвертерного и электросталеплавильного производств, имеющих повышенное содержание цинка, с получением железа прямого восстановления.

**4. Технология Fastmelt** появилась в результате дальнейшего развития технологии Fastmet, что было связано с необходимостью поиска путей очистки цинкодержащего продукта от оксидов пустой породы и вредных примесей (S, P и т.д.). Данная технология по сути представляет собой процесс Fastmet, дополненный электропечью чугуноплавильной (ЭЧП) для производства чугуна из железа прямого восстановления, полученного по технологии Fastmet. Переплавленные в ЭЧП металлизованные продукты очищаются от оксидов пустой породы, частично рафинируются от

вредных примесей. В результате получается чугун, близкий по составу доменному, но, как правило, имеющий повышенное содержание серы и фосфора. Основные проблемы процесса Fastmelt связаны с низкой термостойкостью оgneупоров ЭЧП и высоким энергопотреблением.

**5. Процесс Primus** является двухстадийным, включающим на первой стадии использование многоподовой печи MHF (MHF от английского «multiple-hearth furnace»), предназначенный для сушки, нагрева и начального восстановления железа, на второй – электродуговой печи EAF (EAF от английского «electric arc furnace») с плавильным блоком Primus. При таком аппаратурном оформлении технология позволяет провести полное восстановление железа из шихты и получить расплав металла, а также извлечь цинк, который окисляется и конденсируется. Высокое потребление энергоресурсов при переработке пылей и шламов является недостатком данной технологии, что сказывается на себестоимости конечных продуктов.

**Разработка технологии переработки железоцинкодержащего технологического сырья.** Авторами предложен метод переработки пылей и шламов металлургического производства, основанный на восстановительной плавке брикетированной шихты в кольцевой печи с вращающимся подом (рис. 1) [14].

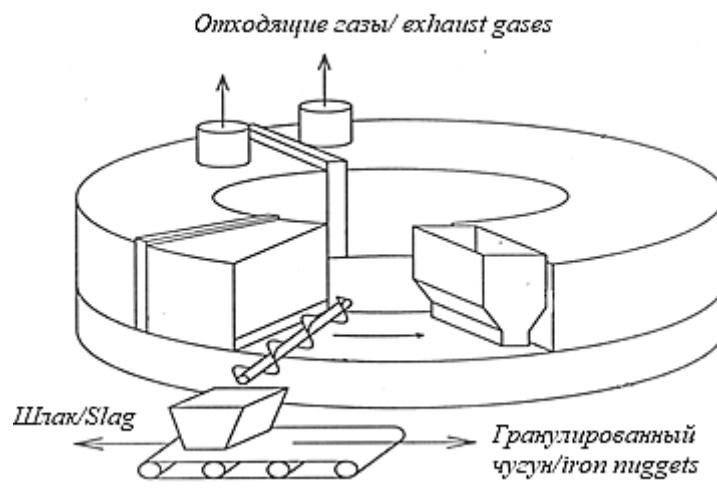
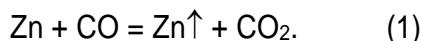


Рис. 1. Кольцевая печь с вращающимся подом  
Fig. 1. Rotary hearth furnace

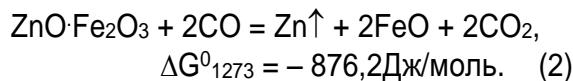


Извлечение железа и цинка из пылевидного техногенного сырья металлургического производства основано на восстановлении ценных компонентов из их кислородсодержащих форм углеродсодержащими материалами. За счет твердого углерода ценные элементы из шихты восстановливаются частично, данный процесс играет второстепенную роль. Основным восстановителем является CO (твердофазный углерод участвует в разложении CO<sub>2</sub> с получением угарного газа, способствующего ускорению получения элементарного цинка). Поскольку железо содержится в шихте в виде оксидов Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, то при термическом воздействии CO восстанавливает их до чистого железа по схеме: Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> → Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> → FeO → Fe. Часть восстановленного железа соединяется с углеродом коксовой подсыпки и образуется карбид железа Fe<sub>3</sub>C (т.е. происходит науглероживание железа).

Активное восстановление цинка моноксидом углерода наступает при 906 °С с переходом его в парообразное состояние:



Основная часть цинка переходит в парообразное состояние при 1100 °С. Большая часть цинка связана в пыли с железом в виде феррита ZnO·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, который довольно хорошо восстанавливается моноксидом углерода:



Цинк из феррита цинка восстанавливается быстрее, чем из чистого оксида цинка при более низкой температуре, и процесс идет ступенчато, но оксид цинка восстанавливается только после полного восстановления железа из оксида железа; при этом ZnO может восстанавливаться образованным элементарным железом [15]. Восстановленный цинк вместе с печными газами отводится из печи и улавливается в аппаратах газоочистки. Затем уловленные цинковые возгонки направляются на окисли-

тельный обжиг в тарельчатую печь для удаления галогеносодержащих компонентов (Cl, F).

Гранулы металлического железа получают нагревом материала: оксид металла, содержащийся в шихте, взаимодействует с углеродсодержащим восстановителем и восстановительным газом, полученным в результате восстановления оксида металла. Для того, чтобы оксид металла восстанавливался из твердого состояния, необходим дальнейший нагрев полученного восстановленного железа в восстановительной атмосфере, который обеспечит его науглероживание, получение расплава железа с дальнейшей коагуляцией частиц восстановленного железа без попадания в него включений шлака. Для этого в шихту необходимо добавить источник CaO (например, известняк) для регулирования основности шлаковых компонентов в брикете, т.е. для поддержания CaO/SiO<sub>2</sub> в диапазоне от 0,6 до 1,8 [16]. При правильно подобранный основности шлаковых компонентов содержащаяся в брикете сера поглощается шлаком, полученным во время восстановительной плавки, и полученные гранулы чугуна имеют содержание данного примесного элемента на уровне ≤ 0,05 %. После восстановительного обжига в печи продукты выгружаются и отправляются на охлаждение, а затем при помощи магнитной сепарации производится отделение гранулированного чугуна от шлака (рис. 2).

Предлагаемый метод аналогичен технологии Fastmet, но имеются различия в температурных режимах обжига, а также в качественных характеристиках готовой продукции. Если по технологии Fastmet полученное железо прямого восстановления (губчатое железо) имеет содержание основного элемента 85–90% с включениями оксидов пустой породы, то по предлагаемой авторами технологии получения железа прямого восстановления (гранулированный чугун) содержание основного металла составляет не менее 95 % при отсутствии в его составе оксидов пустой породы. Также важным различием в химических составах гранулированного чугуна и губчатого железа



является содержание серы, которое составляет 0,04–0,05% мас. и 0,15–0,5% мас., соответственно.

Цинковый концентрат (рис. 3), получаемый по предложенной технологии, по своему химическому составу является более качественным продуктом. Содержание оксида цинка в цинковом концентрате, получаемого по технологии Fastmet, составляет 60–65 % мас., тогда как по предложенной нами технологии – 86–91% мас. при минимальном содержании галогенов.

По технологиям Fastmelt, Primus технологенные отходы проходят две стадии обработки перед получением чугуна, что увеличивает энергетические затраты: первая ста-

дия – это обработка в кольцевой печи, вторая – обработка в рудотермической печи. При сопоставлении с энергетическими показателями данных способов меньший расход энергии предложенной авторами технологии обеспечивается за счет одностадийности собственно технологического процесса. А при сравнении с технологией OXY Cup, где главным агрегатом является печь шахтного типа (минианалог доменной печи как по конструкции, так и по осуществлению технологического процесса), в предлагаемой технологии для получения чугуна требуется меньше энергетических затрат и меньшее количество дорогих сырьевых материалов (например, кокса).



Рис. 2. Гранулированный чугун (экспериментальные образцы)  
Fig. 2. Granulated iron (experimental samples)



Рис. 3. Цинковый концентрат, полученный при переработке пылей электросталеплавильного производства  
Fig. 3. Zinc concentrate obtained in electrosmelting dust processing



## Заключение

В настоящее время разработано большое количество различных технологий по переработке техногенного сырья электросталеплавильного производства. Однако не все предложенные способы внедрены в производство. Важнейшими критериями при выборе любой технологии для переработки техногенного сырья являются экономические и экологические показатели. Предложенная авторами технология отвечает данным критериям. При расчете эффективности системы очистки отходящих газов на основе подбора газоочистных аппаратов, хорошо себя зарекомендовавших в производстве, было получено значение концентра-

ции суммы твердых веществ в выбросах после газоочистки не выше 20 мг/м<sup>3</sup>, что отвечает экологическим нормам. Также за счет меньшего расхода энергии (тепловой и электрической) получаемый по предложенной технологии гранулированный чугун имеет более низкую себестоимость в сравнении с основными методами переработки техногенного сырья электросталеплавильного производства.

*Работа выполнена по НИР 11.7210.2017/8.9 в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ.*

## Библиографический список

1. Стovпченко А.П., Камкина Л.В., Пройдак Ю.С. Процессы утилизации пыли сталеплавильного производства. Ч. 1. Высокопроизводительные промышленные процессы переработки пыли и других железосодержащих отходов // Электрометаллургия. 2010. № 1. С. 25–32.
2. Gasik M. Handbook of Ferroalloys: Theory and Technology. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. P. 536.
3. Лисин В.С., Юсфин Ю.С. Ресурсо-экологические проблемы XXI века в металлургии. М.: Высшая школа, 1998. 446 с.
4. Стovпченко А.П., Пройдак Ю.С., Камкина Л.В. Современное состояние проблемы переработки пыли дуговой сталеплавильной печи // Сотрудничество для решения проблемы отходов: материалы VI Междунар. конф. (Харьков, апрель 2009). Харьков, 2009. С. 61–63.
5. Айзатулов Р.С., Харлашин П.С., Протопопов Е.В., Назюта Л.Ю. Теоретические основы сталеплавильных процессов. М.: МИСиС, 2002. 319 с.
6. Коваленко А.М. О шламах газоочисток доменного и сталеплавильного производств // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2013. № 56. С. 4–8.
7. Курунов И.Ф. Экологический аспект промышленных технологий утилизации железоцинкодержащих шламов и пылей // Металлург. 2011. № 9. С. 35–39.
8. Журавлев В.В., Кобелев В.А. Анализ существующих технологий переработки сталеплавильной цинкодержащей пыли и направления дальнейших исследований // Черная металлургия. 2012. № 10. С. 80–83.
9. Козлов П.А. Вельц-процесс. М.: Руда и металлы, 2012. 176 с.
10. Lemperle M., Rachner H.-J. Liquid Hot Metal from OXYCUP: Proc. of the 6th Europ. Coke and Ironmaking Congr. (27 June–1 July 2011. Dusseldorf, Germany). pp. 12–15.
11. Jumbo J., Tanaka H., Kuwata Y. New coal-based ironmaking FASTMET/FASTMELT // 4th European Coke and Ironmaking Congress. Paris La Défense, France, June 19–22, 2000. Proceedings, Vol. II. pp. 492–497.
12. Gugliemini A., Pensieri G., De Simoni F. et al. RedIron: The best Available Cost-effective Solution for Recycling Ironbearing Waste from Integrated Iron and Steel Plants: AIST Proc (2–5 May 2011. Indianapolis, Ind., USA). P. 56–61.
13. Roth J.L., Frieden R., Hansmann T., Monai J., Solvi M. PRIMUS, a new process for recycling by-products and producing virgin iron // Revue de Metallurgie. 2001. Vol. 98. P. 987–996.
14. Пат. 2626371 РФ, МПК C22B7/02, C21B11/06, C22B19/38. Способ переработки отходов металлургического производства / С.Ю. Одегов, И.Б. Федосов, А.П. Баранов, В.Е. Черных, А.Е. Патрушов; заявитель и патентообладатель: ООО «Урал-рециклинг». № 2016135884; заявл. 05.09.2016; опубл. 26.07.2017. Бюл. № 21.
15. Немчинова Н.В., Черных В.Е., Тютрин А.А., Патрушов А.Е. Переработка пылей электросталеплавильного производства с целью извлечения цинка и железа // Сталь. 2016. №. 5. С. 68–72.
16. Немчинова Н.В., Тютрин А.А., Патрушов А.Е. К вопросу переработки пылевых отходов электросталеплавильного производства // Металлургия: технологии, инновации, качество «Металлургия – 2015»: материалы XIX Междунар. науч.-практ. конф. (г. Новокузнецк, 15–16 декабря 2015 г.). Новокузнецк, 2015. Ч. 2. С. 318–322.



### References

1. Stovpchenko A.P., Kamkina L.V., Proidak Yu.S. Processes of steelmaking production dust utilization. Part 1. High-performance industrial processes of dust and other iron-containing waste products processing. *Elektrometallurgiya* [Electrometallurgy.], 2010, no. 1, pp. 25–32. (in Russian).
2. Gasik M. Handbook of Ferroalloys: Theory and Technology. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013, 536 p.
3. Lisin V.S., Yusfin Yu.S. *Resurso-ekologicheskiye problemy XXI veka v metallurgii* [Metallurgy resource-environmental problems of XXI century]. Moscow: Higher School Publ., 1998, 446 p. (in Russian).
4. Stovpchenko A.P., Proidak Yu.S., Kamkina L.V. Sovremennoe sostoyanie problemy pererabotki pyli dugovoj staleplavil'noj pechi [Current state of the problem of arc steel-making furnace dust processing]. *Materialy VI Mezhdunarodnoj konferencii "Sotrudnichestvo dlya resheniya problemy othodov"* [Proceedings of VI International Conference "Collaboration to solve the problem of waste", Kharkov, April 2009]. Kharkov, 2009. pp. 61–63.
5. Aizatulov R.S., Kharlashin P.S., Protopopov E.V., Nazyuta L.Yu. *Teoreticheskiye osnovy staleplavilnykh protsessov* [Theoretical foundations of steelmaking processes]. Moscow: MISiS Publ., 2002, 319 p. (in Russian).
6. Kovalenko A.M. About gas purification sludges of domain and steel smelting manufactures. *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredoviyh tekhnologij* [East-European Journal of Advanced Technologies], 2013, no. 56, pp. 4–8.
7. Kurunov I.F. Environmental aspect of industrial technologies of iron-zinc-containing slime and dust recycling. *Metallurg* [Metallurgist], 2011, no 9, pp. 35–39. (in Russian).
8. Zhuravlev V.V., Kobelev V.A. Analysis of existing technologies of steel-smelting zinc-containing dust processing and directions of further research. *Chernaya metallurgiya* [Ferrous Metallurgy], 2012, no. 10, pp. 80–83. (in Russian).
9. Kozlov P.A., *Velts-protsess* [The Waelz process]. Moscow: Ore and metals Publ., 2012, 176 p. (in Russian).
10. Lemperle M., Rachner H.-J. Liquid Hot Metal from OXYCUP: Proc. of the 6th Europ. Coke and Ironmaking Congr. (27 June–1 July 2011. Dusseldorf, Germany). pp. 12–15.
11. Jumbo J., Tanaka H., Kuwata Y. New coal-based ironmaking FASTMET/FASTMELT. 4th European Coke and Ironmaking Congress. (Paris La Defense, June 19–22, 2000). Paris La Defense, 2000., vol. II. pp. 492–497.
12. Gugliemini A., Pensieri G., De Simoni F. et al. RedIron: The best Available Cost-effective Solution for Recycling Iron bearing Waists from Integrated Iron and Steel Plants. AIST Proc (Indianapolis, Ind., USA 2–5 May 2011). Indianapolis, 2011, pp. 56–61.
13. Roth J.L., Frieden R., Hansmann T., Monai J., Solvi M. PRIMUS, a new process for recycling by-products and producing virgin iron. *Revue de Metallurgie*, 2001, vol. 98, pp. 987–996.
14. Odegov S.Yu., Fedosov I.B., Baranov A.P., Chernykh V.E., Patrushov A.E. *Sposob pererabotki otkhodov metallurgicheskogo proizvodstva* [Method of metallurgical production waste processing]. Patent RF, no. 21, 2017.
15. Nemchinova N.V., Chernykh V.E., Tyutrin A.A., Patrushov A.E. Extraction of Zinc and Iron from Electrosmelting dust. *Steel*. 2016, no. 5, pp. 68–72.
16. Nemchinova N.V., Tyutrin A.A., Patrushov A.E. *[To the problem of electrosmelting dust waste processing]*. Materialy XIX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoi konferentsii [Proceedings of XIX International Scientific and Practical Conference: "Metallurgy: Technologies, Innovations, Quality "Metallurgy – 2015", Novokuznetsk, 15–16 December 2015]. Novokuznetsk, 2015, part. 2, pp. 318–322.

### Критерии авторства

Патрушов А.Е., Немчинова Н.В., Черных В.Е., Тютрин А.А. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за plagiat.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Authorship criteria

Patrushov A.E., Nemchinova N.V., Chernykh V.E., Tyutrin A.A. have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article

УДК 669.71

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-191-202>

## ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССОВ СГУЩЕНИЯ И ПРОМЫВКИ КРАСНЫХ ШЛАМОВ ИЗ НИЗКОКРЕМНИСТЫХ БОКСИТОВ

© В.И. Саламатов<sup>1</sup>, О.В. Саламатов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

<sup>2</sup> Восточно-Сибирский филиал ЗАО «Север Минералс», 664050, Российская Федерация, Иркутск, ул. Байкальская, 280/1.

**РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ.** Изучение влияния основных параметров на кинетику процессов сгущения и промывки красных шламов из низкокремнистых бокситов. **МЕТОДЫ.** Для исследования кинетики процесса сгущения пульп красных шламов использовалась методика контроля уровня пульпы в ходе процесса отстаивания. Исследование противоточной промывки проводили по специально разработанной методике с учетом сорбционных свойств дисперсной фазы. Для расчета параметров процесса декантационной противоточной многофазной промывки использовались уравнения, выведенные на основе решения системы балансовых уравнений. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Проведены исследования кинетики процессов сгущения и промывки красных шламов из низкокремнистых бокситов. Изучено влияние основных параметров на потери ценного растворенного вещества в ходе противоточной промывки красных шламов, формирование зон осаждения. Исследование противоточной декантационной промывки показало, что для определенной ступени промывки отмечается максимальное значение скорости осветления, соответствующее изоэлектрическому состоянию. Изоэлектрическому состоянию отвечает наименьшее влагосодержание в осадке, что определяется наименьшим развитием сольватных оболочек частиц дисперсной фазы в зоне компрессии. Показано, что явление перезарядки поверхности частиц шлама обусловливает наличие двух зон относительной устойчивости пульп. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Предложен метод расчета показателей незамкнутых схем противотока с заключенным циклом многофазной промывки в сгустителях-промывателях. Установлен характер влияния расхода промывной жидкости на потери растворенного вещества с окончательно промытым осадком. Изучено влияние разбавления пульпы красных шламов на процесс формирования зон сгущения: показано, что средняя величина  $R=J:T$  в переходной зоне составляет  $(2.2-2.4):1$  для широкого ряда начальных значений  $R_0=J_0:T$ , установлено, что увеличение  $R_0$  ведет к образованию более плотных осадков в зоне компрессии, показано, что наименьшая продолжительность периода коллективного осаждения дисперсных частиц отвечает изоэлектрическому состоянию пульп красных шламов ( $20 \text{ г/л } \text{Na}_2\text{O}_\text{K}$ ).

**Ключевые слова:** сгущение, промывка, красный шлам, декантация, изоэлектрическое состояние, ступени промывки.

**Информация о статье.** Дата поступления 6 марта 2018 г.; дата принятия к печати 6 апреля 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2018 г.

**Формат цитирования.** Саламатов В.И., Саламатов О.В. Исследование кинетики процессов сгущения и промывки красных шламов из низкокремнистых бокситов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 4. С. 191–202. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-191-202

## STUDY OF THICKENING AND WASHING KINETICS OF RED MUDS FROM LOW-SILICA BAUXITES

V.I. Salamatov, O.V. Salamatov

National Research Irkutsk State Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

**ABSTRACT.** The **PURPOSE** of the article is to study the effect of the main parameters on the kinetics of thickening and

<sup>1</sup> Саламатов Виктор Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроительных технологий и материалов; e-mail: Salamatov\_52@mail.ru

Viktor I. Salamatov, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Machine-Building Technologies and Materials, e-mail: Salamatov\_52@mail.ru

<sup>2</sup> Саламатов Олег Викторович, директор; e-mail: auto@istu.edu  
Oleg V. Salamatov, Director, e-mail: auto@istu.edu



washing processes of red mud from low-silica bauxites. **METHODS.** To study the kinetics of red mud pulp thickening the control method of the pulp level was used in the settling process. The countercurrent washing was studied according to a specially developed method taking into account the sorption properties of the dispersed phase. The parameters of the decanting countercurrent multiphase washing were calculated using the equations derived on the basis of the solution of the system of balance equations. **RESULTS.** The thickening and washing kinetics of red muds from low-silica bauxites is studied. Consideration is given to the effect of the main parameters on the loss of valuable dissolved matter under the countercurrent washing of red muds and the formation of precipitation zones. The study of the countercurrent decantation washing has showed that a certain washing stage features the maximum value of the clarification rate corresponding to the isoelectric state. The isoelectric state corresponds to the lowest moisture content in the sediment, which is determined by the smallest development of solvate shells of particles in the dispersed phase in the compression zone. The phenomenon of charge exchange of sludge particle surface causes the presence of two zones with relative stability of pulps. **CONCLUSION.** A method is proposed for calculating the indices of non-closed countercurrent circuits with a complete cycle of multiphase washing in thickening-washing facilities. The nature of the effect of the flow rate of the washing liquid on the dissolved material loss with the finally washed sediment is determined. The influence of red mud pulp dilution on the formation process of condensation zones is studied: it is shown that the average value of  $R = L:S$  is (2.2 - 2.4) in the transition zone: 1 for a wide range of initial values  $R_0 = L:S$ , it is determined that the increase in  $R_0$  leads to the formation of more dense precipitation in the compression zone, while the shortest duration of the period of collective precipitation of dispersed particles corresponds to the isoelectric state of red mud pulps (20 g/l Na<sub>2</sub>O<sub>k</sub>).

**Keywords:** thickening, washing, red mud, decantation, isoelectric state, washing stages

**Information about the article.** Received March 6, 2018; accepted for publication April 6, 2018; available online April 30, 2018.

**For citation.** Salamatov V.I., Salamatov O.V. Study of thickening and washing kinetics of red muds from low-silica bauxites. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 4, pp. 191–202. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-191-202

## Введение

Производство глинозема из алюминиевых руд является первой необходимой стадией получения алюминия [1, 2]. Способы получения глинозема из разных руд различны [3]. Самый распространенный способ производства глинозема – метод Байера. После подготовки боксита (дробление и измельчение) проводится его выщелачивание в водном растворе щелочи. Измельченный боксит загружают в автоклав и смешивают с щелочным раствором. Примерно через четыре часа в растворе получается алюминат натрия, а другие компоненты боксита образуют осадок (красный шлам). Из автоклавов пульпа поступает для дальнейшей обработки: проводят отделение алюминатного раствора от красного шлама. После отделения алюминатного раствора проводят его разложение в присутствии кристаллической гидроокиси алюминия Al(OH)<sub>3</sub>. Процесс протекает в ряде камер (8–10 штук), в результате из алюминатного раствора выделяется кристаллическая гидроокись алюминия. Полученную пульпу подвергают сгущению, фильтрации и промывке. В результате получают кристаллическую гидроокись алюминия с 3–4% влажности. После этого осуществляют кальцинацию. Кальцинация заключается в обезвоживании гидроокиси алюминия. Ее проводят в трубчатых вращающихся печах длиной 50–70 метров и диаметром 4 м. При 40...200° С материал высушивается, при 200...950° С из него удаляется гидратная вода и образуется безводная окись алюминия, которая прокаливается при температуре 950...1200° С. В конце печи (зоны охлаждения) температура полученного глинозема снижается до 60...70° С и его выгружают из печи. В алюминиевой промышленности красные шламы составляют большинство отходов (до 1.5 млрд. т.) [4, 5]. После обезвоживания и промывки шламы направляются в шламохранилище. Каждое из них занимает от 50 до 110 га земли высотой до 50 м. Поэтому в настоящее время существует высокая актуальность их переработки. Однако разработанные технологии переработки не реализуются ввиду отсутствия гарантий окупаемости инвестиций в строительство отгрузочных комплексов [6, 7]. В этом направлении проводят экспериментальные и укрупненные опытно-промышленные испытания по извлечению скандия и алюминия с получением оксидов скандия и иттрия и возвра-



щением щелочи в основной производственный цикл [8]. В производственных условиях для промывки красного шлама обычно используют воду из барометрических зумпфов выпарной станции или внутрицеховую воду, содержащую определенное количество отмываемого растворенного вещества (0,1...1,0%  $\text{Na}_2\text{O}_\text{K}$ ) [9].

При использовании исходной промывной воды, не содержащей ценного вещества, усиление промывки, с четырехкратной до пятикратной, существенно снижает потери растворенного (2,1 до 0,62 кг на 1 т. шлама). Однако эффективность пятой ступени заметно снижается, если для промывки употребляется исходный промывной раствор.

При противоточной промывке эффективность отмывки алюминатного раствора находится в большой зависимости от расхода исходной промывной воды и числа ступеней промывки. Основными показателями процесса сгущения и последующих ступеней промывки являются степень уплотнения шлама и удельная производительность по сливу. Степень уплотнения характеризуется отношением  $\text{Ж:Т}$  в сгущенном шламе, а под удельной производительностью понимают объем осветленного раствора (в  $\text{м}^3$ ), выходящий из сгустителя на каждый квадратный метр площади осаждения за один час (скорость слива) [1].

Пульпы красных шламов характеризуются сравнительно медленным осветлением, что объясняется наличием в них коллоидных дисперсий, образующихся в жестких условиях выщелачивания бокситов в результате глубокого химического разложения отдельных минералов. Пептизация агрегатов коллоидных дисперсий сильно затрудняет процессы сгущения и промывки шлама, а в некоторых случаях и делает практически невозможным нормальное продолжение указанных процессов [10].

В то же время пульпы красных шламов являются неустойчивыми системами в агрегативном и кинетическом отношениях. Укрупнение частиц в ходе коагуляции с образованием агрегатов определяет агрегативную неустойчивость, а выпадение крупных агрегатов частиц в осадок кинетическую [11, 12].

Для ускорения процесса отстаивания пульп красных шламов применяются как природные (мука, крахмал), так и синтетические флокулянты (полиакриламид, К-4 и др.).

Промывке обычно подвергаются осадки, имеющие высокую концентрацию поровой жидкости. Наличие ионов в растворе ведет к образованию ДЭС и, следовательно, к появлению энергетического барьера. Для пульп красных шламов отмечается существование зоны коагуляции, соответствующее изоэлектрическому состоянию. Так для алюминатного раствора минимальное значение дзета-потенциала отвечает концентрации 20–25 г/л, а для щелочного (6...7) г/л  $\text{Na}_2\text{O}_\text{K}$ . Наличие зоны коагуляции обуславливает существование двух зон устойчивости. Это явление связано с перезарядкой частиц красного шлама с отрицательного на положительный.

В ходе промывки наблюдается снижение вязкости жидкой фазы, что также благоприятно сказывается на процессе отстаивания пульп шламов.

Процессы сгущения и промывки осадков красных шламов сопровождается действием различных факторов, как способствующих эффективности отмывки алюминатного раствора (разбавление, температура, ввод флокулянтов и др.) так и препятствующие процессу отмывки (сорбция растворенного вещества, низкое значение  $\text{R}=\text{Ж:Т}$  и др.).

## Цель и методика исследования

Целью наших исследований являлось изучение влияния основных параметров (расход промывной воды, отношение  $\text{Ж:Т}$ , количество ступеней промывки, концентрации алюминатного раствора) на кинетику процессов сгущения и промывки красных шламов из низкокремнистых бокситов.

Для проведения опытов использовали пульпы красных шламов: пробы пульпы Богословского алюминиевого завода; пульпы, полученные в лабораторных условиях при автоклавном выщелачивании бокситов Североуральского месторождения; пульпы, полученные из заводских



проб отмытого красного шлама. Отстаивание проводили в мерных цилиндрах емкостью 100, 200, 500 мл. пульпы нагретой до 96–98°C.

Учет характера сорбционных свойств шлама требует проводить исследование противоточной промывки по специально разработанной методике:

- 1) по результатам исследования сорбционных свойств шлама строится график зависимости равновесной концентрации от начальной:  $\alpha_p = f(\alpha_0)$ ;
- 2) по заданной величине  $\alpha_p$  в исходной сгущенной пульпе рассчитываются промежуточные концентрации в промывных растворах;
- 3) проводится определение начальных значений  $\alpha_{0i}$ , соответствующих равновесным концентрациям;
- 4) проводится подготовка проб пульпы, в количестве меньшем на единицу заданной кратности промывки в мерных цилиндрах;
- 5) осуществляется сгущение проб пульпы до определенного принятого в опытах отношения;
- 6) проводится противоточная промывка осадков красных шламов.

### Методика расчета параметров промывки

Конечные уравнения, по которым осуществляется расчет показателей противоточной декантационной промывки, получены на основе решения системы балансовых уравнений для N-кратной противоточной промывки.

$$\left\{ \begin{array}{l} R_o\alpha_o + R_s\alpha_s = R_s\alpha_1 + R_o\alpha_N \\ R_o\alpha_o + R_s\alpha_N = R_s\alpha_1 + R_o\alpha_{N-1} \\ R_o\alpha_o + R_s\alpha_{N-1} = R_s\alpha_1 + R_o\alpha_{N-2} \\ \cdots \\ R_o\alpha_o + R_s\alpha_3 = R_s\alpha_1 + R_o\alpha_2 \\ R_o\alpha_o + R_s\alpha_2 = R_s\alpha_1 + R_o\alpha_1 \end{array} \right.$$

Расчет концентрации растворенного в первом промывателе:

$$\alpha_1 = \frac{R_o\alpha_o[1+(P_s)_{N-1}] + P_s^{N-1} * R_s * \alpha_s}{R_o + R_s[1+(P_s)_{N-1}]}.$$

В N-м промывателе:

$$\alpha_N = \frac{B + R_s + \alpha_s}{R_o}.$$

И в остальных промывателях :

$$\alpha_{N-K} = \frac{B[1+(P_s)_K] + P_s^K * R_s * \alpha_s}{R_o},$$

где  $R_o$  – весовое отношение Ж:Т в сгущенной пульпе, которое постоянно для всех промывателей;  $R_s$  – количество слива в тоннах на 1 т твердого осадка из каждого промывателя, которое соответствует расходу промывной воды;  $\alpha_1$ ;  $\alpha_2$ ;  $\alpha_3$  ...  $\alpha_N$  – концентрация растворенного отмываемого вещества в первом, втором, третьем ... N-м промывателях;  $\alpha_o$  – концентрация растворенного вещества в сгущенной пульпе, поступающей в первый промыватель;  $\alpha_s$  – концентрация растворенного вещества в промывном фильтрате.

## Результаты исследований

В работе экспериментальную оценку получили схемы противоточной промывки при условии, что потери растворенного в окончательно промытом осадке не превышают:  $\beta \leq 3.2$ ; 2.8; 2.4; 2.0; 1.0; 0.4; 0.2.

Количество ступеней промывки  $n$ , расход промывной воды ( $p_s$ ) взяты из выгодного сочетания, определенных по вышепредложенным уравнениям.

- |    |                    |                         |  |
|----|--------------------|-------------------------|--|
| 1) | $\beta \leq 3.2\%$ | $n = 8, 7, 6, 5, 4, 3;$ | $p_s = 1.3; 1.4; 1.6; 1.8; 2.15; 3.1;$     |
| 2) | $\beta \leq 2.8\%$ | $n = 8, 7, 6, 5, 4, 3;$ | $p_s = 1.25; 1.37; 1.55; 1.75; 2.1; 2.85;$ |
| 3) | $\beta \leq 2.4\%$ | $n = 8, 7, 6, 5, 4, 3;$ | $p_s = 1.3; 1.4; 1.6; 1.8; 2.15; 3.1;$     |
| 4) | $\beta \leq 2.0\%$ | $n = 6, 5, 4, 3;$       | $p_s = 1.7; 1.9; 2.4; 3.3;$                |
| 5) | $\beta \leq 1.0\%$ | $n = 6, 5, 4, 3;$       | $p_s = 2.0; 2.3; 2.9; 4.25;$               |
| 6) | $\beta \leq 0.4\%$ | $n = 6, 5, 4, 3;$       | $p_s = 2.3; 2.8; 3.7; 6.0;$                |
| 7) | $\beta \leq 0.2\%$ | $n = 6, 5, 4, 3;$       | $p_s = 2.65; 3.5; 4.6; 7.5;$               |

Как показывают исследования противоточной промывки красных шламов для определения ступени отмечается максимальное значение скорости осветления. На рис. 1 приведены зависимости скорости  $W_{осв.}$  от номера ступени  $N$  противоточной промывки для вариантов, когда потери растворенного в осадке составляют  $\beta = 1.0\%$

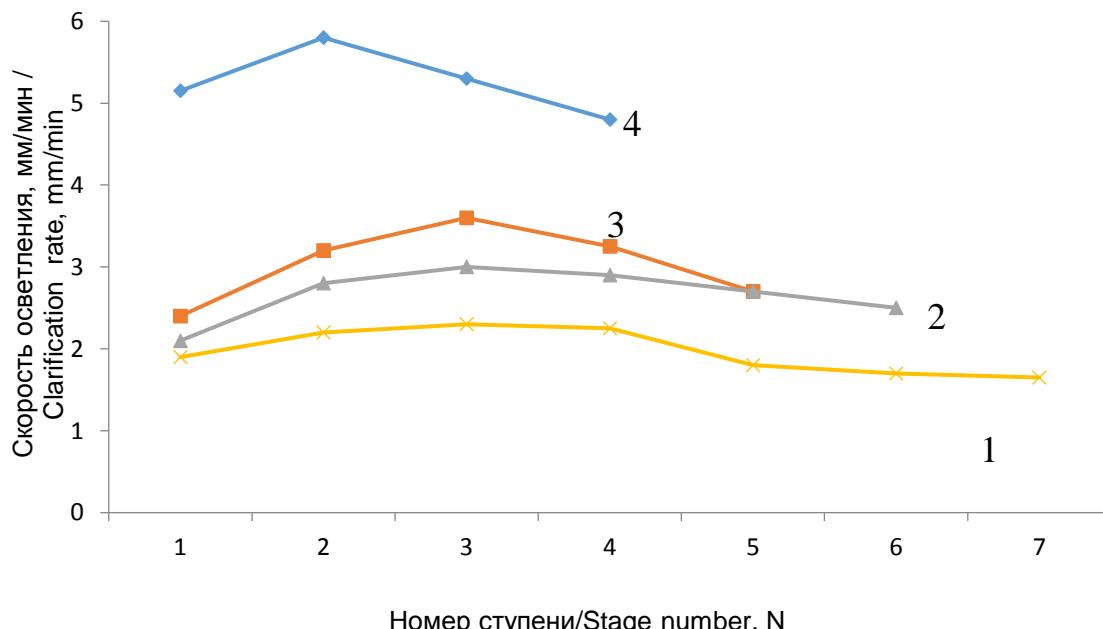


Рис. 1. Влияние расхода промывного раствора на скорость осветления красных шламов в ходе противоточной промывки ( $\beta = 1.0\%$ ); 1 –  $p_s = 2.8$ ; 2 –  $p_s = 2.21$ ; 3 –  $p_s = 1.89$ ; 4 –  $p_s = 1.69$

Fig. 1. Effect of the water wash solution flow on the red mud clarification rate in the countercurrent washing ( $\beta = 1.0\%$ ); 1  $p_s = 2.8$ ; 2  $p_s = 2.21$ ; 3  $p_s = 1.89$ ; 4  $p_s = 1.69$

На рис. 2 приведены зависимости скорости осветления от номера ступени для прямоточной декантационной промывки. Для всех вариантов схем промывки наблюдается максимальная производительность, для определенной ступени промывки.

В ходе промывки кинетические кривые, характеризующие процесс осаждения частиц красного шлама по ступеням промывки показывают наличие изоэлектрического состояния. На рис. 3 приведены графики  $h_{oc} = f(t)$  для 4-кратной противоточной промывки ( $ps = 2.8$ ).

Изоэлектрическому состоянию соответствует наименьшее влагосодержание в осадке, что определяется наименьшим развитием сольватных оболочек частиц дисперсной фазы в зоне компрессии. Пограничная точка перехода зоны коллективного осаждения к переходной зоне соответствует значению  $R = \dot{J} : T$ , называемым критическим отношением  $R_{kp}$ . Изоэлектрическому состоянию отвечают наименьшие значения  $R_{kp}$ , соответствующие второй ступени.

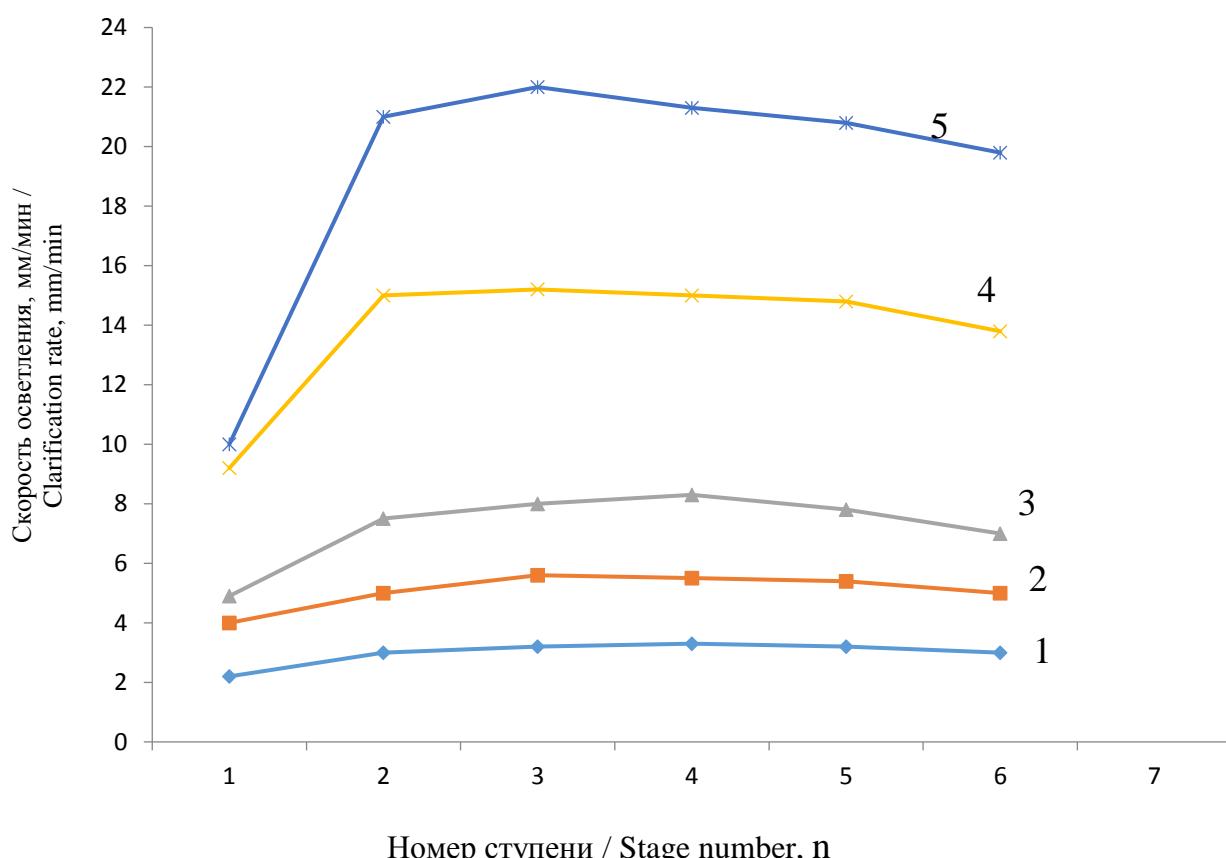


Рис. 2. Влияние разбавления пульпы красных шламов на скорость осветления: 1 – 2  $m^3/m$ ; 2 – 2.7  $m^3/m$ ; 3 – 3  $m^3/m$ ; 4 – 5  $m^3/m$ ; 5 – 6  $m^3/m$   
Fig. 2. Effect of red mud pulp dilution on the clarification rate:  
1 – 2  $m^3/m$ ; 2 – 2.7  $m^3/m$ ; 3 – 3  $m^3/m$ ; 4 – 5  $m^3/m$ ; 5 – 6  $m^3/m$

Наличие максимума на кривой  $W_{oc} = f(CNa_2O)$  объясняется явлением автокоагуляции частиц красного шлама, удерживающих в условиях изоэлектрического состояния наименьшее количество воды, препятствующей их агрегации. При промывке концентрация щелочи влияет, прежде всего, на электрические свойства двойного слоя окружающей частицы шлама. В щелочном растворе низкой концентрации дисперсные частицы имеют отрицательный заряд, обусловленный адсорбцией потенциалоопределяющих гидроксильных ионов. С увеличением концентрации каустической щелочи слой Гуи сжимается, и все большее число противоионов попадает в слой Гельмгольца, что в конечном итоге приводит к нулевому значению дзета-потенциала.

При дальнейшем росте концентрации растворенного в пульпе, вследствие адсорбции, большого количества противоинов  $\text{Na}^+$  частицы шлама приобретают положительный заряд. Явление перезарядки поверхности частиц шламов обусловливает наличие двух зон относительной устойчивости пульп красных шламов.

Обычно в качестве основного фактора устойчивости дисперсных систем с водной дисперсионной средой принимается электрический заряд частиц, обусловливающий так называемый электрохимический потенциал, или дзета-потенциал ( $\xi$ -потенциал), обнаруживаемый при движении частиц в электрическом поле.

Весьма существенно, что величина электрохимического потенциала самым тесным образом связана с наличием и концентрацией ионов в дисперсной среде, окружающей частицу. Поэтому добавка в суспензии электролитов в большинстве случаев резко изменяет агрегатное состояние частиц и, следовательно, устойчивость суспензии. Экспериментальные исследования, выполненные в этой области указывают [13, 14], что электрохимический потенциал частиц изменяется не только в зависимости от концентрации добавляемого в суспензию электролита, но и от валентности его ионов.

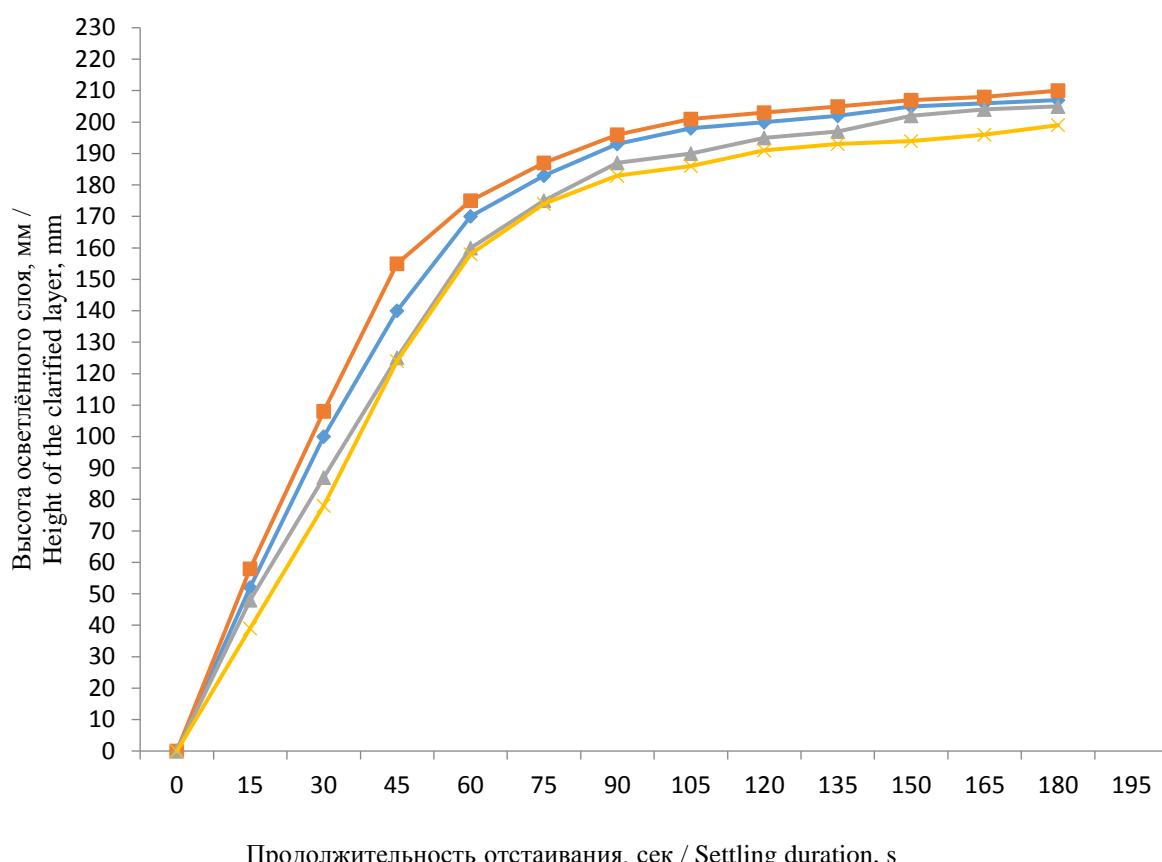


Рис. 3. Кинетика процесса осветления красных шламов в ходе четырехкратной противоточной промывки ( $P_s = 2.8$ ). 1 – первая ступень (27,69 г/л  $\text{Na}_2\text{O}_k$ ); 2 – вторая ступень (4,92 г/л  $\text{Na}_2\text{O}_k$ ); 3 – третья ступень (0,13 г/л  $\text{Na}_2\text{O}_k$ ); 4 – четвертая ступень (0,02 г/л  $\text{Na}_2\text{O}_k$ )

Fig. 3. Red mud clarification kinetics in the course of a four-time countercurrent washing ( $P_s = 2.8$ ).  
1 –first stage (27.69 g / l  $\text{Na}_2\text{O}_k$ ); 2 –second stage (4.92 g / l  $\text{Na}_2\text{O}_k$ );  
3 –third stage (0.13 g / l  $\text{Na}_2\text{O}_k$ ); 4 –fourth stage (0.02 g / l  $\text{Na}_2\text{O}_k$ )

При добавках электролитов к дисперсным системам падение потенциала на различных участках поверхности частицы происходит неодинаково [15, 16, 17]. Вследствие наличия на поверхности особых активных участков (углы, выступы, пики, ребра) адсорбция добавляемых

ионов происходит неравномерно по всей поверхности частицы и поэтому двойной электрический слой в результате адсорбции оказывается измененным неравномерно, и, как правило, наиболее развит на особых активных участках поверхности. При коагуляции системы таким образом сцепление частиц происходит лишь на участках с наименее развитым диффузным слоем и, следовательно, вероятность слипания не будет являться функцией только вероятности столкновения и величины суммарной поверхности частиц, но также и величины характеризующей часть суммарной поверхности, обладающей развитой диффузной оболочкой.

По современным представлениям, связь между обоими факторами: электрохимическим потенциалом и сольватацией является весьма сложной и, по-видимому, следует допустить существование динамического равновесия между ними, чем более развит диффузный слой, тем больше гидратация, и наоборот [13, 18].

Таким образом, взаимодействие между частицами дисперсной фазы и молекулами дисперсной среды является причиной образования некоторого переходного слоя на границе раздела частица-среда, предохраняющего частицы от слипания и сообщающего им как бы «индуцированную» растворимость. Такая растворимость может быть вызвана, как мы уже видели, наличием в системе посторонних ионов и молекул, которые, таким образом, являются стабилизаторами.

На рис. 4 представлена диаграмма, характеризующая влияние расхода промывной жидкости ( $R = Ж:Т$ ) на потери растворенного вещества с окончательно промытым осадком, выходящим с последней ступени промывки.

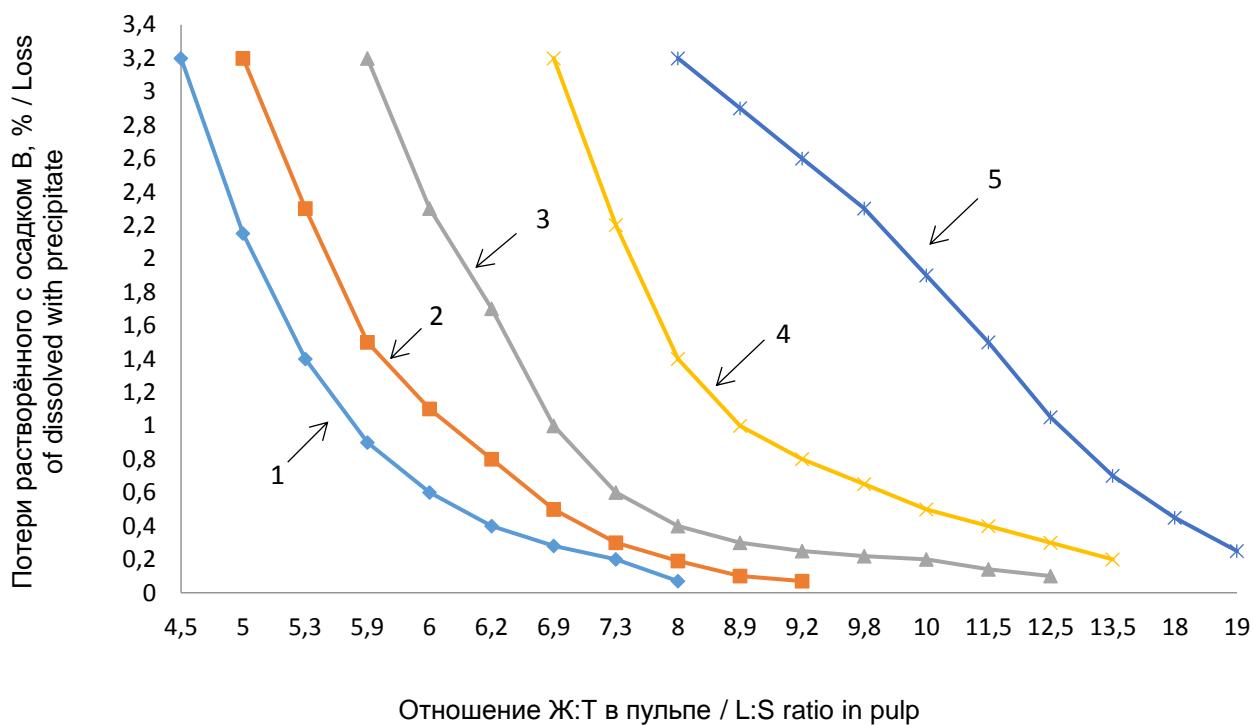


Рис. 4. Влияние расхода промывного раствора на потери растворенного с осадком: 1 – трехкратная промывка; 2 – четырехкратная промывка; 3 – пятикратная промывка; 4 – шестикратная промывка; 5 – семикратная промывка

Fig. 4. Effect of washing solution flow on the loss of dissolved with precipitate: 1 – three-time washing; 2 – four-time washing; 3 – five-time washing; 4 – six-time washing; 5 – seven-time washing

Для получения низкого содержания ценного, растворенного в осадке, необходимо увеличить расход промывного раствора ( $P_s$ ). Так, для того, чтобы обеспечить потери растворенного



с осадком на уровне  $\beta = 0,4\%$  при четырехкратной промывке необходимо обеспечить разбавление пульпы при следующем значении  $R = \text{Ж:Т} = 11,2$ , для получения  $\beta = 0,2\%$  значение  $R = \text{Ж:Т} = 13,8$  и т.д.

Диаграмма показывает, что потери растворенного вещества с отвальным шламами уменьшаются с увеличением числа ступеней промывки при заданном суммарном расходе промывного раствора.

Эксперимент показывает, что снижение потерь растворенного с окончательно промытым осадком требует большого разубоживания пульпы на ступенях промывки, что ведет к увеличению  $R = \text{Ж:Т}$  в промывателях. В свою очередь рост  $R = \text{Ж:Т}$  в промывателях положительно сказывается на росте производительности отстойников.

Расход промывной воды ( $P_s$ ) соответствует определенному отношению  $R = \text{Ж:Т}$  (весовые) на каждой ступени (см. рис. 5) и определенному числу ступеней промывки.

В ходе сгущения и промывки весовое отношение  $\text{Ж:Т}$  в сгущенных шламах понижается постепенно по движению пульпы от первичного сгустителя к последнему промывателю. При этом после каждой стадии сгущения шлам увлекает примерно одинаковый объем жидкого на одну тонну твердого. В соответствии с этим весовые отношения  $\text{Ж:Т}$  в сгущенных шламах первого, второго, третьего и т.д. промывателей определяют по ориентировочным соотношениям:

$$R_1 = \frac{R_0 \gamma_1}{\gamma_0}; R_2 = \frac{R_0 \gamma_2}{\gamma_0}; R_3 = \frac{R_0 \gamma_2}{\gamma_0}; \dots R_N = \frac{R_0 \gamma_N}{\gamma_0},$$

где,  $R_0$  – весовое отношение  $\text{Ж:Т}$  в первичной сгущенной пульпе;  $R_1, R_2, R_3 \dots R_N$  –  $\text{Ж:Т}$  в сгущенной пульпе, соответственно, первого, второго, третьего ...  $N$ -го промывателей;  $\gamma_0, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3 \dots \gamma_N$  – плотности раствора, соответственно, в пульпе первичного сгустителя и в пульпе первого, второго, третьего и  $N$ -го промывателей.

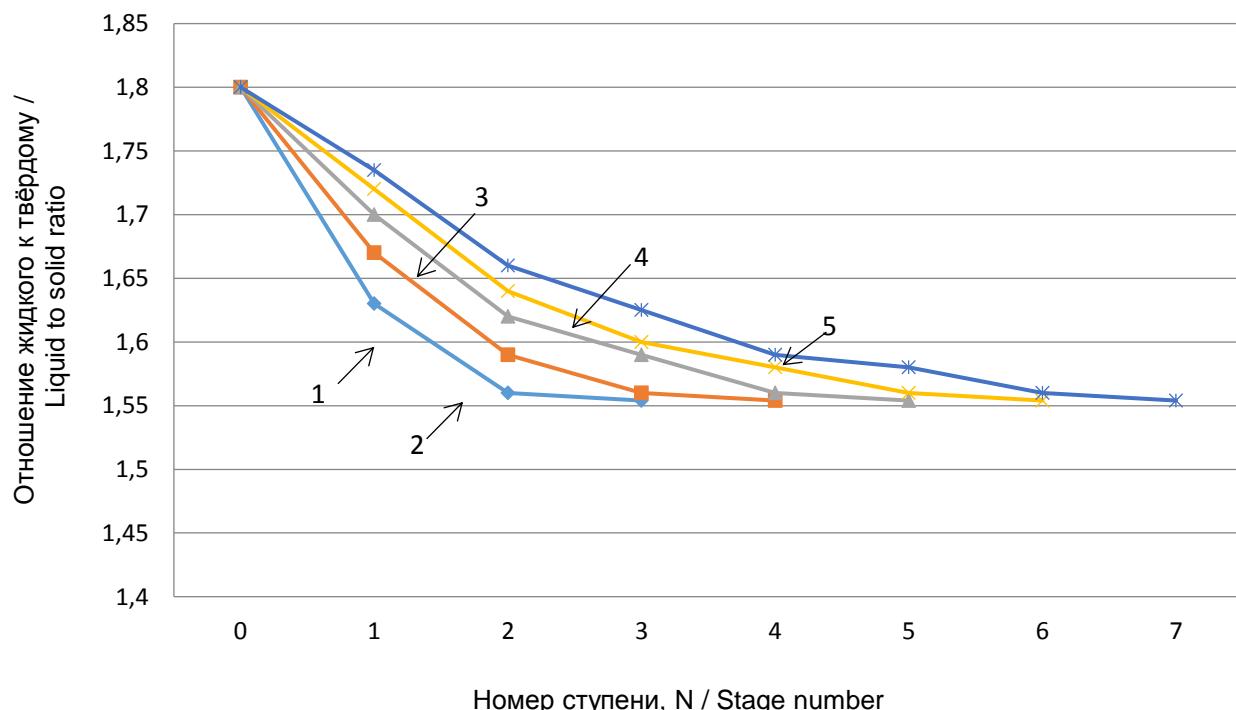


Рис. 5. Кинетика процесса осветления красных шламов в ходе противоточной промывки:

1–3-кратная; 2–4-кратная; 3–5-кратная; 4–6-кратная; 5–7-кратная

Fig. 5. Red mud clarification kinetics in the course of countercurrent washing:  
1–3-time; 2–4-time; 3–5-time; 4–6-time; 5–7-time

Из соотношения получаем следующую приблизительную закономерность изменения соотношений Ж:Т в сгущенных пульпах первичного сгустителя и промывочного сгустителях:  $R_1, R_2, R_3 \dots R_N = \gamma_0, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3 \dots \gamma_N$ .

Разбавление пульпы ( $R = \text{Ж:Т}$ ) существенно сказывается на кинетике процесса осаждения дисперсных частиц. Для пульп красных шламов при отношении  $R = \text{Ж:Т} = 10:1$  и более: переход от зоны коллективного осаждения к зоне компрессии наблюдается за более короткое время, чем для более плотных пульп.

Изучено влияние плотности исходной пульпы на кинетику формирования переходной зоны. Средняя величина  $R = \text{Ж:Т}$  в переходной зоне составляет  $(2,2 \dots 2,4):1$ . Это значение наблюдается для широкого ряда значений начальных  $R_0 = \text{Ж:Т}$ .

С увеличением разбавления пульпы осаждение дисперсных частиц при отстаивании происходит с образованием более плотных осадков (рис. 6), а с уменьшением  $R = \text{Ж:Т}$  образуются более рыхлые осадки, особенно с ростом концентрации растворенного, что сопровождается ростом содержания маточной влаги в осадке.

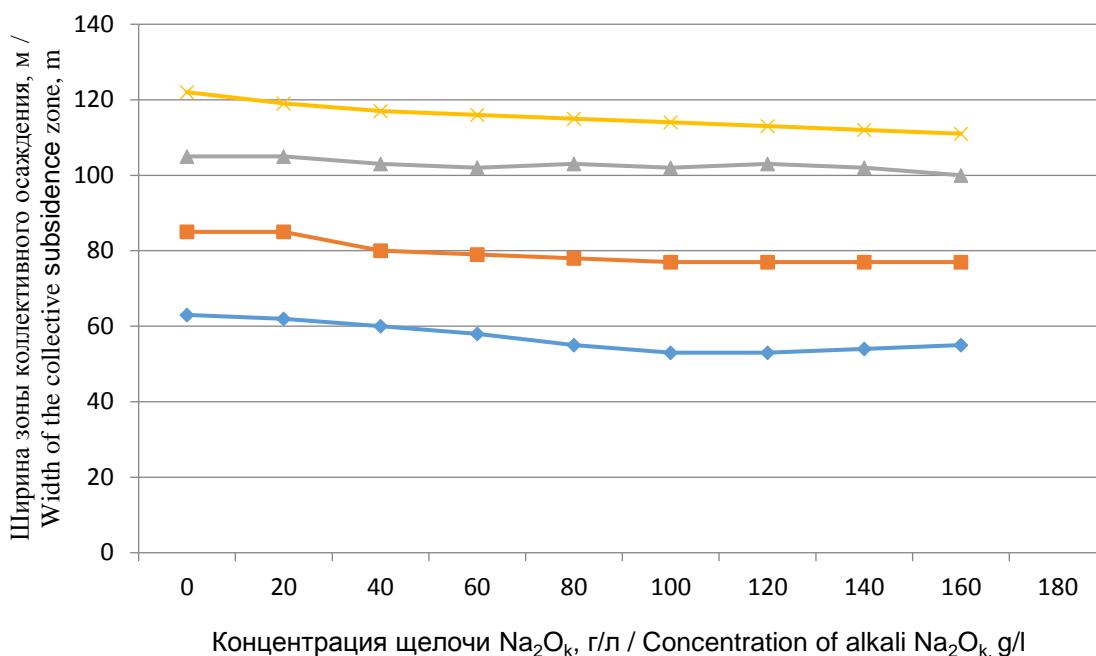


Рис. 6. Влияние концентрации  $\text{Na}_2\text{O}_k$  на кинетику процесса осветления пульп красных шламов:

1 – Ж:Т -4,8:1; 2 – Ж:Т -6:1; 3 – Ж:Т -8:1; 4 – Ж:Т -10:1

Fig. 6. Effect of  $\text{Na}_2\text{O}_k$  concentration on the red mud pulp clarification kinetics:

1 - L:S -4.8: 1; 2 - L:S -6: 1; 3 - L: S-8: 1; 4 - L: S -10:1

С ростом концентрации растворенного вещества происходит уменьшение ширины зоны коллективного осаждения и рост ширины переходной зоны и зоны компрессии. Наименьшая продолжительность периода коллективного осаждения отвечает изоэлектрическому состоянию пульпы красных шламов (20 г/л  $\text{Na}_2\text{O}_k$ ) – рис. 7, такая зависимость отмечается для всего интервала  $R = \text{Ж:Т}$  пульпы.

### Заключение

Таким образом, по результатам исследований можно сделать следующие выводы:

1. Исследована кинетика процесса осаждения пульп красных шламов полученных из низкокремнистых бокситов. Рассмотрены особенности формирования зон сгущения в зависимости от  $R = \text{Ж:Т}$  в пульпе концентрации алюминатного раствора. Установлено, что наименьшая величина критического отношения  $R_{\text{кр}} = \text{Ж:Т}$  отвечает изоэлектрическому состоянию.

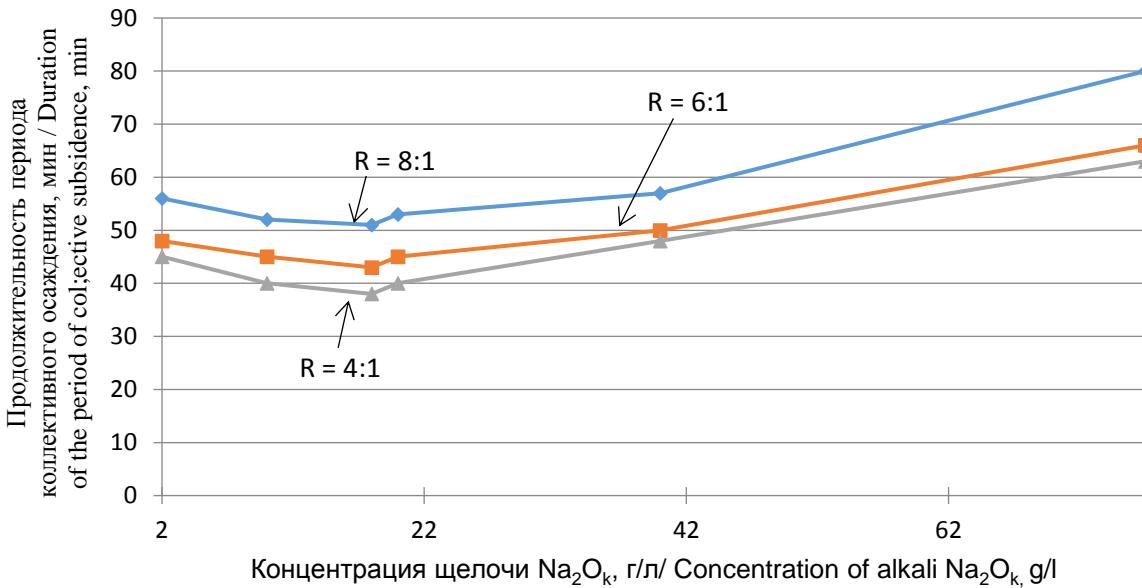


Рис. 7. Влияние разбавления пульп красных шламов на продолжительность периода коллективного осаждения

Fig. 7. Effect of red mud pulp dilution on the duration of the period of collective subsidence

2. Предложен метод расчета параметров противоточной декантационной промывки незамкнутых схем противотока с законченным циклом многофазной промывки в сгустителях-промывателях, исследованных в данной работе.

3. Рассмотрено влияние основных параметров (расход промывного расхода, числа ступеней промывки, отношение Ж:Т в промывателях) противоточной промывки на эффективность промывки.

4. Предложена и опробована методика исследования противоточной декантационной промывки с учетом сорбционных свойств твердой фазы.

#### Библиографический список

1. Никольская М.П. Технология получения глинозема из бокситов. Каменск-Уральский, 2007. 184 с.
2. Логинова Н.В., Кырчиков А.В. Технология производства глинозема. Екатеринбург. Изд-во Урал. ун-та. 2015. 336 с.
3. Сизяков В.М. Проблемы развития производства глинозема в России // Цветные металлы Сибири – 2009 г: материалы I Международного конгресса. (г. Красноярск, 8–10 сентября 2009 г.). Красноярск, 2009. С. 120–134.
4. Шморгуненко Н.С. Корнеев В.Н. Комплексная переработка и использование отвальных шламов глиноземного производства. М.: Металлургия, 1982. 128 с.
5. Подгородецкий, Г.С., Ширяева Е.В. и др. Проблемы эффективной переработки красных шламов// Экология и промышленность России. 2015. Т. 19. № 12. С. 46–53.
6. Трушко В.Л., Уткин В.А., Бажин В.Ю. Актуальность и возможность полной переработки красных шламов глиноземного производства // Записки Горного института. 2017. Т. 227. С. 547–553.
7. Пягай И.Н. Блочная переработка бокситовых шламов глиноземного производства // Цветные металлы. 2016. С. 25–32.
8. Pulfda I.D. Hargreaves J.S.J. Carbonised red mud—A new water treat product made from a waste material//J. Environmental Management. 2012. Vol 100, № 6. P. 59–64.
9. Логинова Н.В., Кырчиков А.В. Аппаратурно-технологические схемы в производстве глинозема. Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2011. 233 с.
10. Yatsenko S.P. Pyagai I.N. Red Mud Pulp. Carbonization with Scandium Extraction during Alumina Production. Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2010. Vol. 44. No. 4. P. 563–568.
11. King W. Some Studies in Alumina Trihydroxide Precipitation Kinetics Light metals (AIME). 1979. Vol. 2. P. 551–563.
12. Steven P. Rosenberg and Steven J. Healy. A Thermodynamic Model for Gibbsite Solubility in Bayer liquors. Fourth International Alumina Quality Workshop. Darwin. 2-7 June 1996. P. 301–310.
13. Хорош А.Н., Хорош Н.А. Физическая химия, поверхностные явления и дисперсные системы. СПб.: Лань, 2015. 160 с.



14. Морачевский А.Г., Фирсова Е.Г. Физическая химия. Гетерогенные системы. СПб.: Лань, 2015. 192 с.
15. Зимон А.Д. Физическая химия. М.: Красанд, 2015. 318 с.
16. Хрусталев Е.Н. Физическая химия. Гетерогенные системы. СПб.: Лань, 2015, 192 с.
17. Кругляков П.М. Физическая и коллоидная химия. М.: Высшая школа, 2010. 319 с.
18. Лукъянов А.Б. Физическая и коллоидная химия. М.: Альянс, 2016. 288 с.

#### **Reference**

1. Nikol'skaya M.P. *Tekhnologiya polucheniya glinozema iz boksitov* [Production technology of alumina from bauxite]. Kamensk-Ural'skij, 2007, 184 p. (In Russian).
2. Loginova N.V., Kyrchikov A.V. *Tekhnologiya proizvodstva glinozema* [Alumina production technology]. Ekaterinburg: The Ural Institute Publ., 2015, 336 p. (In Russian).
3. Sizyakov V.M. Problemy razvitiya proizvodstva glinozema v Rossii. [Problems of alumina production development in Russia] Materialy I Mezhdunarodnogo kongressa "Cvetnye metally Sibiri – 2009 g.". [Proceedings of I International Congress "Siberian Non-ferrous Metals- 2009" Krasnoyarsk, 8–10 September 2009]. Krasnoyarsk, 2009, pp. 120–134. (In Russian).
4. Shmorgunenko N.S. Korneev V.N. *Kompleksnaya pererabotka i ispol'zovanie otval'nyh shlamov glinozemnogo proizvodstva* [Complex processing and use of dump sludge of alumina production]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1982, 128 p. (In Russian).
5. Podgorodeckij, G.S., Shiryaeva E.V. Problems of efficient red mud processing. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2015, vol. 19, no. 12, pp. 46–53. (In Russian).
6. Trushko V.L., Utkov V.A., Bazhin V.Yu. Relevance and possibility of alumina production red mud complete processing. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2017, vol. 227, pp. 547–553. (In Russian).
7. Pyagaj I.N. Block processing of bauxite slimes of alumina production. *Cvetnye metally* [Non-ferrous metals], 2016, pp. 25–32. (In Russian).
8. Pulfda I.D. Hargreaves J.S.J. Carbonised red mud—A new water treat product made from a waste material//J. Environmental Management. 2012. Vol 100, № 6. P. 59–64.
9. Loginova N.V., Kyrchikov A.V. *Appaturno-tehnologicheskie skhemy v proizvodstve glinozema* [Process flow diagrams in alumina production]. Ekaterinburg: Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin Publ., 2011, 233 p.
10. Yatsenko S.P. Pyagaj I.N. Red Mud Pulp. Carbonization with Scandium Extraction during Alumina Production. Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2010, vol. 44, no. 4, pp. 563–568.
11. King W. Some Studies in Alumina Trihydroxide Precipitation Kinetics Light metals (AIME), 1979, vol. 2, pp. 551–563.
12. Steven P. Rosenberg and Steven J. Healy. A Thermodynamic Model for Gibbsite Solubility in Bayer liquors. Fourth International Alumina Quality Workshop. (Darwin 2–7 June 1996). Darwin, 1996, pp. 301–310.
13. Horosh A.N., Horosh N.A. *Fizicheskaya himiya, poverhnostnye yavleniya i dispersnye sistemy* [Physical chemistry, surface phenomena and disperse systems]. St. Petersburg: Lan Publ., 2015, 160 p.
14. Morachevskij A.G., Firsova E.G. *Fizicheskaya himiya. Geterogennye sistemy* [Physical chemistry. Heterogeneous systems]. St. Petersburg: Lan Publ., 2015, 192 p.
15. Zimon A.D. *Fizicheskaya himiya* [Physical chemistry]. Moscow: Krasand Publ., 2015, 318 p.
16. Hrustalev E.N. *Fizicheskaya himiya. Geterogennye sistemy* [Physical chemistry. Heterogeneous systems]. St. Petersburg: Lan Publ., 2015, 192 p.
17. Kruglyakov P.M. *Fizicheskaya i kolloidnaya himiya* [Physical and colloid chemistry]. Moscow: High school Publ., 2010, 319 p.
18. Luk'yanov A.B. *Fizicheskaya i kolloidnaya himiya* [Physical and colloid chemistry]. Moscow: Alliance Publ., 2016, 288 p.

#### **Критерии авторства**

Саламатов В.И., Саламатов О.В. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

#### **Authorship criteria**

Salamatov V.I., Salamatov O.V. have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **Conflict of interests**

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this paper.



Оригинальная статья / Original article

УДК 669.712

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-202-214>

## ИЗВЛЕЧЕНИЕ ЦЕННЫХ КОМПОНЕНТОВ ИЗ АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ГЛИНОЗЕМА СПОСОБОМ СПЕКАНИЯ

© И.Н. Шепелев<sup>1</sup>, А.Ю. Сахачев<sup>2</sup>, А.М. Жижаев<sup>3</sup>, Р.Я. Дашкевич<sup>4</sup>, Н.В. Головных<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательская организация ООО «ЭКО-Инжиниринг», 662150, Российская Федерация, г. Ачинск, Южная Промзона, квартал XII, стр.1

<sup>2</sup> Акционерное общество «РУСАЛ Ачинск», 662150, Российская Федерация, г. Ачинск, Южная Промзона, квартал XII, стр.1

<sup>3</sup> Институт химии и химической технологии Сибирского отделения РАН, 660036, Российская Федерация, г. Красноярск, Академгородок, д. 50, стр. 24.

<sup>4</sup> Сибирский федеральный университет, 660025, Российская Федерация, г. Красноярск, пр. Красноярский рабочий, д. 95

<sup>5</sup> Институт Геохимии им. А.П.Виноградова Сибирского отделения РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1а.

**РЕЗЮМЕ ЦЕЛЬ.** Технологическое опробование вовлечения в сырьевую глиноземную шихту алюминийсодержащих видов сырья с доизвлечением из них ценных для технологии получения глинозема компонентов. **МЕТОДЫ.** Используются термоаналитические, электронно-микроскопические и минералогические методы исследования, рентгенофазовый и рентгеноструктурный анализ. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Выполнен краткий анализ использования в технологии приготовления сырьевой шихты АО «РУСАЛ Ачинск» различных глиноземсодержащих добавок. Приготовление шихты с добавлением отработанного шамотного огнеупорного кирпича было опробовано в лабораторном и промышленном масштабах при переработке нефелиновых руд Кия – Шалтырского месторождения в АО «РУСАЛ Ачинск». Проведенными технологическими исследованиями и промышленными испытаниями подтверждено, что добавка отработанного шамотного огнеупорного кирпича в глиноземную шихту даже в минимальных количествах (0,11 % мас., позволяет снизить расход нефелиновой руды не менее, чем на 6000 тонн в год и обеспечить дополнительное извлечение глинозема. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Введение техногенных материалов шамотного кирпича в глиноземную шихту позволяет снизить с 3,6 до 2,8 тонн удельный расход нефелиновой руды на одну тонну выпускаемого глинозема, а также сократить объемы образования данных на 0,5–0,6 т /т  $Al_2O_3$ . Результаты испытаний показали, что при спекании шихты с добавками шамотного кирпича извлечение глинозема находится на уровне 91,0–91,5%. Одновременно с решением задачи ресурсосбережения обеспечивается достижение экологического эффекта за счет вовлечения в производство отработанных и заскладированных техногенных материалов и снижение их вредного воздействия на окружающую природную среду.

**Ключевые слова:** производство глинозема, нефелиновая руда, отработанный шамотный кирпич, дистен-силиманитовые концентраты, известняково-нефелиновая шихта, технологические исследования.

**Информация о статье.** Дата поступления 21 февраля 2018 г.; дата принятия к печати 3 апреля 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2018 г.

**Формат цитирования.** Шепелев И.И., Сахачев А.Ю., Жижаев А.М., Дашкевич Р.Я., Головных Н.В. Извлечение ценных компонентов из алюмосиликатных природных и техногенных материалов при получении глинозема способом спекания // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 4. С. 202–214. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-202-214

<sup>1</sup>Шепелев Игорь Иннокентьевич, доктор технических наук, директор; e-mail: Ekoing@mail.ru

Igor I. Shepelev, Doctor of technical sciences, Director, e-mail: Ekoing@mail.ru

<sup>2</sup>Сахачев Алексей Юрьевич, директор по обеспечению производства; e-mail: Sakhachev\_Aleks@mail.ru

Aleksey Yu. Sakhachev, Director on Production Management, e-mail: Sakhachev\_Aleks@mail.ru

<sup>3</sup>Жижаев Анатолий Михайлович, кандидат технических наук, заведующий лабораторией; e-mail: zhyzhaev@icct.ru  
Anatoly M. Zhyzhaev, Candidate of technical sciences, Head of the Laboratory, e-mail: zhyzhaev@icct.ru

<sup>4</sup>Дашкевич Раиса Яковлевна, кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии цветных металлов; e-mail: dashkevich@mail.ru

Raisa Ya. Dashkevich, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Nonferrous Metal Metallurgy, e-mail: dashkevich@mail.ru

<sup>5</sup>Головных Николай Витальевич, кандидат химических наук, ведущий инженер; e-mail: Golovnykh@igc.irk.ru  
Nikholay V. Golovnykh, Candidate of Chemistry, Leading Engineer, e-mail: Golovnykh@igc.irk.ru



## EXTRACTION OF VALUABLE COMPONENTS FROM ALUMOSILICATE NATURAL AND TECHNOGENIC MATERIALS UNDER ALUMINA PRODUCTION BY SINTERING

I.I. Shepelev, A.Yu. Sakhachev, A.M. Zhyzhaev, R.Ya. Dashkevich, N.V. Golovnykh

Research Institution ECO-Engineering LLC,  
1 bld, XII Kvartal, Yuzhnaya Promzona, Achinsk, 662150, Russian Federation

RUSAL Achinsk JSCo,  
1 ild., XII Kvartal, Yuzhnaya Promzona, Achinsk, 662150, Russian Federation

Institute of Chemistry and Chemical technology of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,  
50, Akademgorodok, 24 bld, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

Siberian Federal University,  
95, Krasnoyarskiy Rabochiy pr., Krasnoyarsk, 660025, Russian Federation

Vinogradov Institute of Geochemistry of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,  
1a, Favorsky St., Irkutsk, 664033, Russian Federation

**ABSTRACT.** The purpose of the paper is technological testing of introduction of aluminum containing kinds of raw material and industrial waste in the primary alumina mixture with the additional extraction of useful components from them. **METHODS.** The study uses the thermoanalytical, electron microscopic and mineralogical research methods as well as X-ray diffractometric and structural analysis. **RESULTS.** A brief analysis is performed on the use of different alumina containing additives in the preparation technology of alumina mixture at Rusal Achinsk JSC. The preparation of mixture with the addition of refractory clay fire brick waste was tested in the laboratory and industrial scale when processing nepheline ores of the Kia-Shaltyr deposit at Rusal Achinsk JSC. Performed technological researches and pilot tests have confirmed that even minimal addition (0.11% weight) of refractory clay fire brick waste in primary alumina mixture allows to reduce the consumption of nepheline ore not less than by 6000 tons per year and ensure additional extraction of alumina. **CONCLUSION.** Addition of clay fire brick fulfilled in primary alumina mixture allows to decrease the specific consumption of nepheline ore from 3.6 to 2.8 ton per ton of the produced alumina and to reduce the technogenic materials formation volumes by 0.5-0.6 ton per a ton of  $Al_2O_3$ . The test results show that the sintering of mixture with the addition of clay fire brick waste results in 91.0-91.5% alumina extraction. It allows both to solve the problem of resource-saving and achieve the ecological effect due to the introduction of spent and dumped technogenic materials in the production as well as reduce their hazardous effect on environment.

**Keywords:** alumina production, nepheline ore, clay fire brick fulfilled, disthen-sillimanite concentrates, limestone-nepheline mixture, technological researches

**Information about the article.** Received February 21, 2018; accepted for publication April 3, 2018; available online April 30, 2018.

**For citation.** Shepelev I.I., Sakhachev A.Y., Zhyzhaev A.M., Dashkevich R.Ya., Golovnykh N.V. Extraction of valuable components from aluminosilicate natural and technogenic materials under alumina production by sintering. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 4, pp. 202-214. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-202-214

### Введение

Известно, что основное количество глинозема в мире производят из бокситов [1, 2]. В России на Ачинском глиноземном комбинате освоена технология получения глинозема из нефелиновых руд по способу спекания с известняком [3, 4]. В ходе выработки месторождений нефелинов наблюдается неуклонное снижение содержания оксида алюминия в природном сырье и промежуточных продуктах глиноземного производства. Сырьевой базой для комбината является Кия-Шалтырское месторождение нефелиновых руд, расположенное в Кемеровской области. В процессе эксплуатации

рудника с 1967 г. произошло снижение содержание оксида алюминия в руде и, как следствие, перед комбинатом стоит задача в поисках резервной сырьевой базы. Однако месторождения аналогичного Кия-Шалтырскому не существует. Все известные месторождения, расположенные вблизи АО «РУСАЛ-Ачинск», обогащены оксидами железа и требуют представительного обогащения. Промышленная переработка руды Горячегорского месторождения, расположенного рядом с Кия-Шалтырским рудником и планируемым ОК РУСАЛ в качестве резервной сырьевой базы, в ближайшие годы потре-



бует для реализации этого проекта значительные инвестиции, связанные с доразведкой месторождения и созданием горнодобывающего предприятия. Основываясь на опыте эксплуатации АО «РУСАЛ Ачинск» можно заключить, что для дальнейшей бесперебойной эксплуатации Кия-Шалтырского нефелинового рудника требуются технические решения по вовлечению в переработку некондиционной руды, размещенной в специальных отвалах. Чтобы обеспечить необходимые технологические параметры и извлечение ценных компонентов по мере обеднения нефелиновых руд, в сырьевую

шихту для повышения в спеке содержания  $Al_2O_3$  можно добавлять глиноземсодержащие минеральные продукты, в том числе техногенного происхождения [4–6]. Вовлечение во вторичную переработку техногенных алюминийсодержащих материалов, не только позволит доизвлечать из них ценные компоненты, но и снизить антропогенную нагрузку на окружающую природную среду. Очевидно, что это существенно повышает эффективность ресурсосберегающих и природоохранных проектов, проводимых компанией «Русский Алюминий».

### Цель и методы исследований

Целью настоящей работы явилось проведение исследований по технологическому опробованию вовлечения в сырьевую глиноземную шихту алюминийсодержащих техногенных материалов с доизвлечением из них ценных для технологии получения глинозема компонентов. В качестве объектов исследований были взяты пробы нефелиновой руды Кия-Шалтырского нефелинового рудника, известняка Мазульского известнякового рудника и различных алюминийсодержащих добавок. Технологические исследования по спеканию известняково-нефелиново-содовых шихт проводили в лабораторном и опытно-промышленном масштабах. Шихты для спекания составляли на основе нефелиновой руды, известняка и белого шлама, образующегося в процессе обескремнивания алюминиатных растворов. Дозировка белого шлама составила 10% от веса рудной смеси по сухим материалам. Дозировка алюминийсодержащего техногенного сырья составляла от 0,5 до 10 % в составе рудной смеси по сухим материалам. В качестве корректирующей добавки использовалась химически чистая сода. Исходные материалы измельчались до крупности –0,08 мм и готовили шихты путем смешения компонентов. Готовые шихты увлаж-

няли и прессовали в брикеты цилиндрической формы диаметром 20 мм и высотой 50–60 мм. Брикеты высушивали на воздухе в течение суток и спекали в лабораторной муфельной печи ПЛ-5-14 при температурах 1200°C, 1225°C, 1250°C, 1275°C. Температурный режим спекания: скорость нагрева от 0°C до 1000°C – 17 град/мин, от 1000°C до заданной температуры – 3–5 град/мин; выдержка при заданной температуре – 15 мин. Охлаждение спеков производили вместе с печью до температуры 100°C и далее на воздухе. Степень оплавления спека определяли по величине усадки брикетов [3]. Оценку качества спека производили по величине химического извлечения глинозема и щелочей в раствор при выщелачивании спеков. Для идентификации присутствующих в алюминийповышающих добавках соединений применялся рентгенофазовый анализ, выполняемый на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М (напряжение 36 кВ, ток 14 мА), излучение  $CuK\alpha$ , шаг сканирования 0,02 град, время накопления в точке 1 с. Определение массовых долей натрия, калия, магния, алюминия, кремния, кальция и железа производилось в пересчете на оксиды рентгеноспектральным методом (спектрометр рентгенофлуоресцентный многоканальный Simultix-14).



## Результаты исследования и их обсуждение

Одним из перспективных вариантов увеличения срока службы Кия-Шалтырского нефелинового рудника является совместная переработка некондиционной нефелиновой руды с бесщелочным глиноземсодержащим сырьем, к которому можно отнести: глины, дистен-силиманитовые руды и алюминийсодержащие шлаки [6–13].

Одной из перспективных для повышения оксида алюминия добавок в шихту можно рассматривать каолиновые глины. Химический состав их – глиноземисто-кремнеземистые гидроксиды в широком диапазоне трех соединений ( $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $H_2O$ ). В настоящее время исследовано несколько месторождений каолиновых глин в Красноярском крае и Кемеровской области: Дубининское, Кантатское, Барапатское и Кампановское.

Кампановское месторождение каолинов и тугоплавких глин расположено на территории Уярского района Красноярского края к северо-востоку от ст. Балай, в 25 км к северо-западу от г. Уяр. Химический состав каолинов характеризуется содержанием  $Al_2O_3$  – 33% и  $SiO_2$  – 51%. Проведенные лабораторные исследования по обогащению глин представленных месторождений показали, что Дубининские и Кантатские глины труднообогатимы дешевыми способами обогащения [4, 14]. Наиболее легкообогатимыми глинами являются Барапатские. При

их обогащении может быть получен концентрат с содержанием  $Al_2O_3$  – около 30% при выходе 70–80%.

Проведенные исследования [14] показали принципиальную возможность переработки некондиционных нефелиновых руд Кия-Шалтырского нефелинового рудника с добавками каолиновых глин по спекательной технологии получения глинозема. В качестве одного из объектов исследований были взяты каолиновые концентраты Кампановского месторождения, расположенного в Уярском районе Красноярского края. Содержание оксида алюминия в концентрате составляло около 35%. Выщелачивание спеков проводили по методике стандартного выщелачивания, согласно которой навески измельченных спеков массой по 25 г выщелачивали в растворе щелочи (количество раствора 100 мл, содержание щелочи в исходном растворе – 7 г/л) в течение 15 мин при температуре 75°C в термостатированных ячейках, снабженных лопастными мешалками. Концентрация  $Al_2O_3$  в алюминиатном растворе после стандартного выщелачивания составляла 32–36 г/дм<sup>3</sup>. Концентрация оксидов натрия и калия ( $R_2O$ ), соответственно, 55–58 г/дм<sup>3</sup>. Влияние каолиновых добавок к рудной шихте на технологические показатели получения глинозема показано в табл. 1.

**Влияние каолиновых добавок к рудной шихте на технологические показатели получения глинозема**

**Таблица 1**

**Table 1**

Добавка каолина в рудную шихту / Kaolin addition in ore charge, %	Содержание $Al_2O_3$ в рудной смеси / Alumina content in ore mixture, %	Содержание $Al_2O_3$ в спеке / Alumina content in sinter, %	Извлечение глинозема при стандартном выщелачивании / Alumina extraction at standard leaching, %
0	24,5	14,79	90,92
10	25,28	14,87	91,98
20	26,06	14,99	93,34
30	28,84	15,14	92,48



Исследованиями было установлено, что добавки каолинового концентрата в количестве до 30% в нефелиновую руду интенсифицируют процесс спекания и выше-лачивания нефелиновых спеков, при этом снижается удельный расход рудных смесей, увеличивается выход глинозема.

Следует отметить, что промышленная технология обогащения глин в настоящее время не реализована. Кроме того, вовлечение белых каолиновых глин в глиноземное производство (со строительством рудников) на данном этапе не представляется возможным в связи с рассредоточением запасов глин на больших площадях, отсутствием достоверных прогнозов по их запасам, неоднородностью и относительно низким содержанием в них глинозема, отсутствием подъездных путей и инфраструктуры.

Другой ценной глиноземной добавкой для получения целевого продукта в АО «РУСАЛ Ачинск» могут стать дистен-силлиманиловые концентраты (ДСК) и кианитовые концентраты, которые получаются при обогащении одноименных руд [14, 15]. Дистен-силлиманиловые руды образуют крупные скопления в России, в том числе в Сибири. Руды, в основном, сложены кварцем, силлиманитом, пиритом и содержат  $Al_2O_3$  – до 18%,  $SiO_2$  – 78–80%. Для этих руд в лабораторных условиях Институтом химии и химической технологии СО РАН (г. Красноярск) разработана схема обогащения, продуктами которой являются силлиманиловый, кварцевый и пиритный концентраты [15]. Особенностью дистен-силлиманиловых руд, в отличие от нефелиновых руд, является их способность к глубокому обогащению, обусловленная хорошей окристаллизованностью и относительно простым вещественным составом, что позволяет сравнительно легко обогащать руды до содержания в концентратах 55–58%  $Al_2O_3$  и до 1,5% оксида железа. Полученный после обогащения дистен-силлиманиловых руд кварцевый концентрат содержал до 93%  $SiO_2$ . Пиритный концентрат содержал до 43% серы. Силлиманитовый концентрат содержал до 55%  $Al_2O_3$ , и он может быть использован в смеси

с нефелиновой рудой для переработки на глинозем методом спекания. Известны два месторождения дистен-силлиманиловых руд наиболее близких к АО «РУСАЛ Ачинск»: Кяхтинское и Бызыбайское [14]. Кяхтинское месторождение расположено в Бурятии, в 15–20 км от железной дороги Улан-Удэ–Наушки. Утвержденные запасы данного месторождения составляют 121 млн т. Бызыбайское месторождение кварц-силлиманиловых руд с содержанием  $Al_2O_3$  – 14–18% и  $SiO_2$  – 78–80% находится на юге Красноярского края (Восточный Саян, междуречье Базыбай–Кызыр), в 150 км от ст. Курагино. Утвержденные прогнозные ресурсы составляют 412 млн т. По лабораторным данным [16] силлиманиловый концентрат может быть использован в смеси с нефелиновой рудой в качестве глиноземсодержащей добавки. Согласно патенту [17], для переработки в качестве сырья могут быть использованы низкокачественные руды в смеси с дистен-силлиманиловым концентратом в массовом соотношении 1:(0,25–1,0). Проведенными исследованиями [14, 15] показано, что добавки ДСК в нефелиновую руду интенсифицируют процесс спекания: начало химического воздействия по данным термографического анализа сдвигается в низкотемпературную область, а температура начала плавления и полной жидкотекучести шихт с увеличением ДСК в них сдвигается в высокотемпературную область, что обусловлено снижением содержания оксидов железа в шихте, образующих легкоплавкие эвтектики в изучаемой системе и увеличением доли алюминиатной фазы в спеках, поэтому, площадка спекообразования расширяется с 50 до 120°C уже при добавке ДСК к нефелиновой руде в количестве 20%.

При совместной переработке нефелиновых руд (в особенности низкокачественных) и ДСК методом спекания взаимно компенсируются их недостатки:

– присутствие в рудной смеси ДСК повышает содержание  $Al_2O_3$  в спеке, снижает расходные коэффициенты основных и вспомогательных материалов, удельный выход шлама, улучшает физико-химические



свойства спеков и за счет этого повышает извлечение ценных компонентов;

– легко осуществляется регулирование соотношения объема выпуска глинозема, содопродуктов и нефелинового шлама на имеющихся производственных мощностях за счет изменения количества добавки ДСК в нефелиновую руду.

Совершенствование процесса шихтоподготовки нефелиновых руд для получения глинозема способом спекания может быть достигнуто с вводом в сырьевую шихту добавок техногенного происхождения: золы ТЭЦ, отработанного огнеупорного шамотного кирпича, алюминий-фтор-углеродсодержащих шламов алюминиевых заводов [18–21]. Опробованы в качестве добавок в сырьевую глиноземную шихту отходы угольной футеровки алюминиевых заводов, имеющие в своем составе фторидные соединения [20–21]. По патенту [22] сырьевую шихту готовят из алюминий-фтор-углеродсодержащих шламов алюминиевого производства и известняка и производят ее спекание при температуре 550–800°C. Показано, что фторидные соединения, содержащиеся в этих техногенных материалах, связываются в нетоксичные фториды кальция при спекании их с известняком, а из спека при выщелачивании получаются гидроксид алюминия и содопродукты.

В АО «РУСАЛ Ачинск» разработаны ресурсосберегающие технологии, направленные на экономию сырья путем вовлечения промышленных отходов и техногенных материалов в процесс переработки нефелиновых руд Кия-Шалтырского месторождения. Для этой цели предложено использовать более доступное вторичное алюминий-содержащее сырье – глиноземсодержащие отходы, что обеспечивает сокращение про-

изводственных отвалов и решение экологических проблем. В качестве ресурсосберегающей добавки в известняково-нефелиновую шихту использован отработанный шамотный огнеупорный кирпич, применяемый для футеровки вращающихся печей и других тепловых агрегатов, взятый из мест их тридцатилетнего складирования, что позволило провести рекультивацию нарушенных земель [6, 23]. Возможность вовлечения этих алюмосиликатных отходов в качестве добавки в глиноземную сырьевую шихту обусловлено сходством их химического состава и физико-химическим характеристикам нефелиновой рудой и при этом более высокое содержание в них оксида алюминия – от 30 до 45% обеспечивает важный технологический эффект. Химический состав отходов шамотного кирпича приведен в табл. 2.

По данным фазового анализа основными фазами, присутствующими в шамотном кирпиче, являются: муллит –  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ , тридимит –  $\text{SiO}_2$ , кварц –  $\alpha\text{-SiO}_2$ . Отслужившие свой эксплуатационный срок шамотные огнеупоры могут включать примеси сырьевых компонентов глиноземной шихты и продуктов производства глинозема. Поскольку содержание оксида алюминия в нефелиновой руде меньше чем в шамотном огнеупорном кирпиче, то вовлечение последнего в шихту позволит снизить расход руды и улучшить качество спека. Химический состав исходных материалов для приготовления шихты и дозировка сырьевых компонентов приведены, соответственно, в табл. 3 и 4. Молекулярные соотношения в приготавливаемых лабораторных шихтах составляли:

$$\text{CaO/SiO}_2 = 1,92; (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3 = 1,08;$$
$$(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{SO}_3) = 0,929.$$

Таблица 2

Химический состав отработанного шамотного огнеупорного кирпича

Table 2

Composition of used fulfilled refractory brick

Наименование добавки / Additive	Содержание компонентов / Composition, %						
	$\text{SiO}_2$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$
Отходы шамотного кирпича / Clay fire brick waste	56,76	1,90	1,56	3,32	33,24	0,1	0,13



Таблица 3  
Химический состав исходных материалов  
Table 3  
Chemical composition of initial materials

Наименование Материала / Component	Содержание основных компонентов / Content of main components, %									
	ППП / LOI	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	R <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
Нефелиновая руда / Nephe- line ore	4,59	40,65	8,84	1,40	5,04	25,65	13,52	11,28	2,24	0,31
Известняк / Limestone	42,43	1,87	53,04	1,02	0,60	0,64	—	—	—	0,4
Белый шлам / White slime	24,14	12,64	26,63	0,67	1,06	21,16	11,75	9,6	2,15	1,95
Отходы шам- отного кир- пича / Clay fire brick waste	2,13	48,05	1,4	0,86	4,05	40,24	2,95	1,08	1,87	0,32

Таблица 4  
Дозировка сырьевых компонентов  
Table 4  
Dosage of mixture components

Наименование материала / Component	Содержание компонентов, г на 100 г / Content of components, g per 100 g					
	Руда / Ore	Отходы шамот- ного кирпича / Clay fire brick waste	Белый шлам / White slime	Известняк / Limestone	Сода / Soda	Всего / Total Σ
Шихта 1 / Charge 1	100	0	10	127,51	13,00	250,51
Шихта 2 / Charge 2	95	5	10	129,68	14,59	254,27
Шихта 3 / Charge 3	90	10	10	131,85	16,19	258,04
Шихта 4 / Charge 4	80	20	10	136,18	19,39	265,57
Шихта 5 / Charge 5	50	50	10	149,18	28,99	288,16

Проведенными исследованиями и промышленными испытаниями подтверждено, что добавка отходов шамотного огнеупорного кирпича в глиноземную шихту

даже в минимальных количествах (0,11% мас.) позволяет снизить расход нефелиновой руды не менее чем на 6000 тонн в год при сохранении тех же технологических по-

казателей по извлечению глинозема. Приготовление шихты с добавлением отработанного шамотного огнеупорного кирпича было опробовано в лабораторном и промышленном масштабах при переработке нефелиновых руд Кия-Шалтырского месторождения в АО «РУСАЛ Ачинск». Результаты лабораторных исследований по спеканию шихты с сырьевой добавкой шамотной футеровки и выщелачиванию спека приведены на рис. 1–3.

Дозировка шамотной футеровки в рудную смесь повышает температуру плавления шихты, что должно положительно сказаться на работе зоны спекания. При периодической дозировке шамотной футеровки 1,5% мас. в сырьевую шихту снижение степени извлечения глинозема при стандартном выщелачивании не превышает 0,04%. Зависимость усадки брикетов от содержания шамотной футеровки в рудной смеси показана на рис. 1.

Дозировка отработанной шамотной футеровки производилась в пределах от 0,1 до 10% от массы нефелиновой руды. Результаты лабораторных исследований показали, что при спекании шихты с добавками

шамотного кирпича степень извлечения глинозема соответствовала данному показателю без добавок шамотного кирпича – 91,0–91,5%. Увеличение добавки отработанного шамотного кирпича в рудную смесь более 10% мас. при температурах спекания 1250–1270°C приводит к некоторому снижению степени извлечения глинозема, а также к снижению содержания щелочей в спеках, что требует увеличения расхода известняка для связывания оксида кремния, а для восполнения недостатка щелочей – дополнительного ввода содового раствора.

При проведении промышленных испытаний шамотный кирпич, отслуживший свой срок, доставляли на площадку узла приема и загрузки материала, затем через питательный бункер подавали на совместное дробление с рудой для подготовки глиноземной шихты. Результаты промышленных испытаний подтвердили, что введение добавки отработанного шамотного огнеупорного кирпича в глиноземную шихту в количестве 0,5–1,5% позволяет снизить расход нефелиновой руды на 6 500–7 000 тонн в год. При этом существенно сокращается

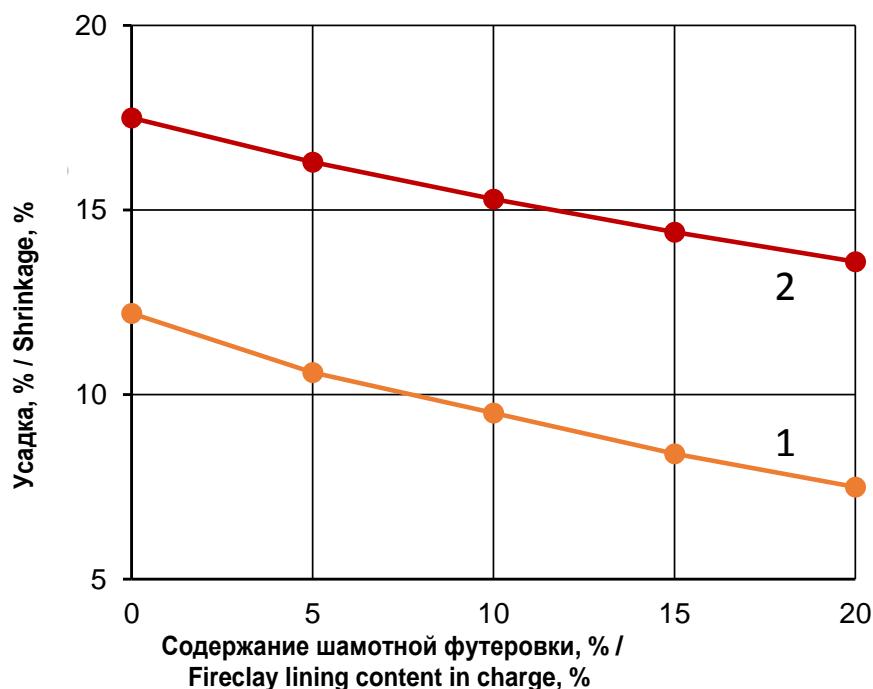


Рис. 1. Зависимость усадки брикетов от содержания добавки шамотной футеровки в рудной смеси:  
1 – температура 1250°C; 2 – температура 1270°C

Fig. 1. Dependence of briquette shrinkage on the addition of fireclay lining  
in ore mixture: 1 – sintering temperature is 1250°C; 2 – sintering temperature is 1270°C

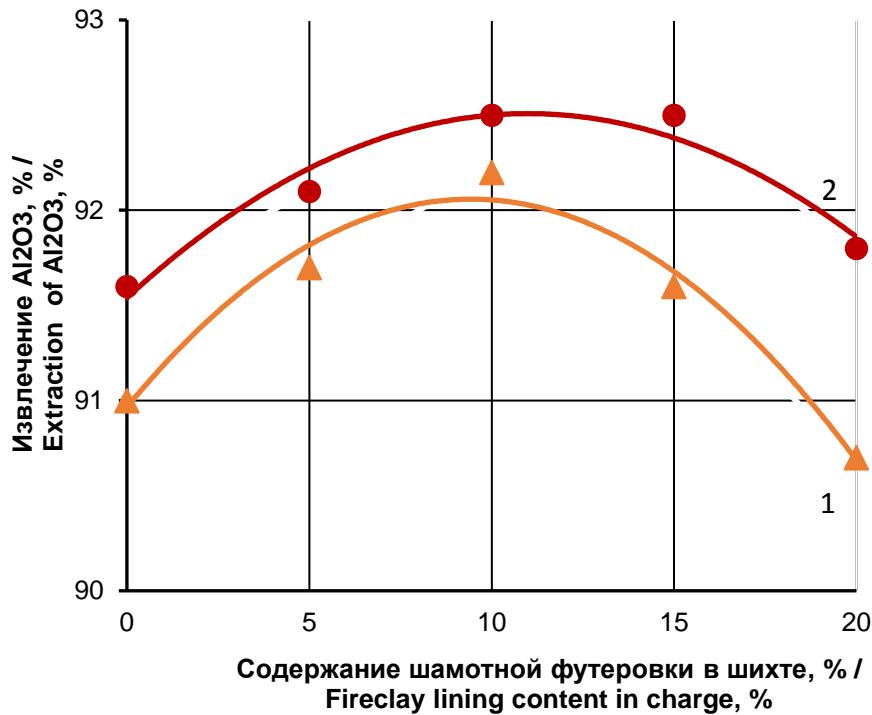


Рис. 2. Зависимость извлечения Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при стандартном выщелачивании от добавок шамотной футеровки в шихту: 1 – температура спекания шихты 1250°C; 2 – температура спекания шихты 1270°C

Fig. 2. Dependence of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> extraction under standard leaching from fireclay lining addition in charge:  
1 – sintering temperature is 1250°C; 2 – sintering temperature is 1270°C

количество образуемого нефелинового шлама, что дает возможность приступить к утилизации складируемых производственных техногенных материалов путем их вовлечения в производственный технологический процесс подготовки сырьевой шихты.

В целом, промышленные испытания показали достаточно высокий уровень извлечения оксида алюминия из шамотной футеровки, что позволяет сделать вывод о возможности ее использования в качестве глиноземсодержащей добавки в нефелиновую шихту [24]. В настоящее время вовлечено в процесс приготовления шихты отработанного огнеупорного шамотного кирпича более 70 000 тонн, при этом достигнута экономия природных сырьевых ресурсов –

нефелиновой руды около 41 800 тонн. Есть все основания утверждать, что опробование аналогичных техногенных материалов с других предприятий отрасли в технологии получения глинозема в АО «РУСАЛ Ачинск» даст возможность не только утилизировать данное техногенное сырье, но и извлекать из них глинозем и другие ценные соединения. Данные технологические решения позволяют практически всю шамотную футеровку огнеупорного кирпича, собранную с предприятий Сибирского региона, использовать в производстве глинозема на АО «РУСАЛ Ачинск» с одновременным решением проблемы рекультивации отвалов и доизвлечением из этого техногенного сырья ценных компонентов.

## Заключение

Таким образом, рассмотрена возможность использования широкого круга алюминийсодержащих материалов в качестве технологических добавок в нефе-

линовую шихту, позволяющих экономить основные запасы Кия-Шалтырского рудника и улучшать технико-экономические показатели глиноземного производства в

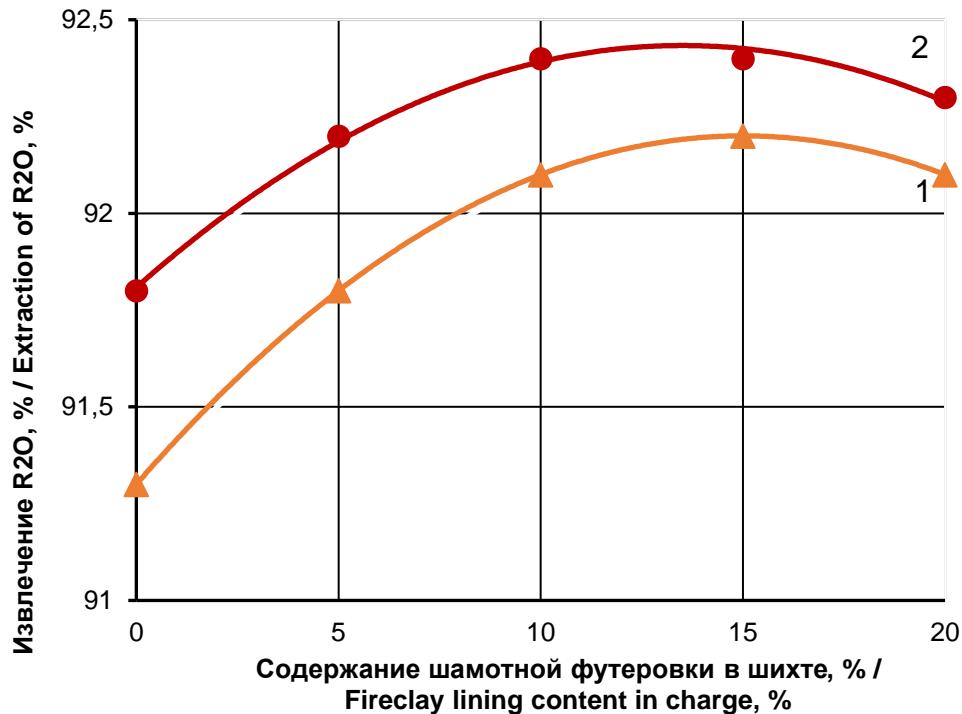


Рис. 3. Зависимость извлечения  $R2O$  при стандартном выщелачивании от добавок шамотной футеровки в шихту: 1 – температура спекания шихты  $1250^{\circ}C$ ;  
2 – температура спекания шихты  $1270^{\circ}C$

Fig. 3. Dependence of  $R2O$  extraction under standard leaching from fireclay lining addition in charge:  
1 – sintering temperature is  $1250^{\circ}C$ ; 2 – sintering temperature is  $1270^{\circ}C$

АО «РУСАЛ Ачинск». С этой целью проведено технологическое опробование и выявлена возможность высокой степени утилизации отработанной шамотной футеровки при получении глинозема. Установлено, что введение отработанного шамотного кирпича в глиноземную сырьевую шихту в количестве 1–1,5% позволяет снизить до 0,75–0,85 т/т  $Al_2O_3$  удельный расход нефелиновой руды. Наиболее высокая степень извле-

чения оксида алюминия из спеков (91–93%) может быть обеспечена при дозировке техногенного сырья в известняково-нефелиновую шихту суммарно до 10% мас. (~ 15–20% от массы нефелиновой руды). За счет вовлечения в производство техногенных материалов достигается ресурсосбережение основных материалов и экологический эффект от снижения их воздействия на окружающую природную среду.

#### Библиографический список

1. Малютин Ю.С., Гальперин В.Г. Состояние сырьевой базы алюминиевой промышленности России // Горная Промышленность. 1996. № 2. С. 10–12.
2. Самойлов А.Г., Копылов А.В., Ломаев В.Г. Бокситы Сибири и возможность их использования для производства глинозема. Минеральные ресурсы России // Экономика и управление. 2006. № 3. С. 8–12.
3. Арлюк Б.И., Шнеер В.Е. Процессы спекания в производстве глинозема. М.: Металлургия, 1970. 120 с.
4. Дацкевич Р.Я. Перспективы расширения минерально-сырьевой базы глиноземной промышленности Сибири // Материалы II Всероссийской научно-практической конференции «Достижения науки и техники – развитию сибирских регионов» (Красноярск, 16–18 марта 2000 г.). Красноярск, 2000. С. 225–226.
5. Петров В.П. Новые небокситовые виды глиноземного сырья. М.: Наука, 1982. 256 с.
6. Шепелев И.И., Пихтовников А.Г., Дацкевич Р.Я., Ребрик И.И., Головных Н.В. Опыт и перспективы использования отходов промышленных предприятий на АГК при комплексной переработке алюминиевого сырья // Материалы IV Междунар. Конгресса «Цветные металлы-2012» (Красноярск, 7–9 сентября 2012 г.). Красноярск, 2012. С. 325–328.
7. Бельков И.В., Горбунов Г.И., Макиевский С.И. Кианитовые месторождения. Минеральные месторождения



Кольского полуострова. Апатиты: Кольский научный центр Российской академии наук, 1981. С. 163–177.

8. Holappa L., Xiao Y. Slags in ferroalloy production – review of present knowledge // Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. 2004. Vol. 104. P. 429–437.

9. ZhangL., Zhang L.N., Wang M.Y. Recovery of titanium compounds from molten Ti-bearing blast furnace slag under the dynamic oxidation condition // Minerals Engineering. 2007. Vol. 20. P. 684–693.

10. Rytin V.M., Perepelitsyn V.A., Ponomarenko A.A., and Gilvarg S.I. Titanium-alumina slag – semifunctional techmogenic resource of high-alumina composition. Part 1. Substance composition and titanium-alumina slag properties // Refractories and Industrial Ceramics. 2017. Vol. 58. No. 2. P. 130–135.

11. Wang Xing Li. Alumina production theory & technology. Changsha: Central South University. 2010. 411 p.

12. Roelof D.Hond. Alumina yield in the Bayer process past present and prospects // Light Metals. 2007. P. 3742–3758.

13. Сахачев А.Ю., Шепелев И.И., Дашкевич Р.Я., Кожевников В.А., Головных Н.В. Опыт совместной переработки нефелиновой руды и бокситового сырья на Ачинском глиноземном комбинате // Материалы XIX Междунар. науч.-техн. конф. «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья» (Екатеринбург, 23–24 апреля 2014 г.). Екатеринбург, 2014. С. 162–167.

14. Шепелев И.И., Дашкевич Р.Я., Головных Н.В., Пихтовников А.Г., Горбачев С.Н. Вовлечение в переработку некондиционного нефелинового сырья с применением глиноземсодержащих добавок // Материалы II Международного конгресса «Цветные металлы Сибири – 2011» (Красноярск, 7–9 сентября 2011 г.). Красноярск, 2011. С. 88–90.

15. Семин В.Д., Медведев Г.П., Семина З.Ф. Пути вовлечения в производство низкокачественных алюмосиликатных руд // Известия вузов: Цветная металлургия. 1983. № 9. С. 43–46.

16. Пат. № 2446103, Российская Федерация. Способ получения глинозема из кианитового концентрат / М.В. Никитин, М.В. Сизяков; заявл. 02.08.2010; опубл. 27.03.2012. Бюл. № 3–5 с.
17. Пат. № 2213057, Российская Федерация. Способ переработки низкокачественного щелочного алюмосиликатного сырья / В.Д. Семин, В.И. Кирко, З.Ф. Семина и др.; заявл. 30.07.2001; опубл. 27.09.2003. Бюл. № 27.
18. Головных Н.В., Швец А.А., Половский С.Б. Перспективы использования минеральных отходов теплоэнергетики в производстве глинозема // Известия вузов: Цветная металлургия. 2008. № 6. С. 16–23.
19. Пат. № 2606821, Российская Федерация. Способ переработки нефелиновой руды / И.И. Шепелев, А.Ю. Сахачев, А.Н. Анушенков и др.; заявл. 03.09.2015; опубл. 10.01.2017. Бюл. № 1.
20. Медведев Г.П., Семин В.Д., Семина З.Ф. Пути решения проблемы обеспечения сибирских алюминиевых заводов местным глиноземом // Алюминий Сибири-2000: материалы VI Междунар. конференции (Красноярск, 5–7 сентября 2000 г.). Красноярск, 2000. С. 258–262.
21. Патрин Р.К., Бажин В.Ю. Отработанная фуговка алюминиевого электролизера как сырье для металлургической, химической и строительной промышленности // Металлург, 2014. № 8. С. 33–36.
22. Пат. № 2312815, Российская Федерация. Способ переработки алюминийсодержащего сырья / Г.П. Медведев, Р.Я. Дашкевич, Б.П. Куликов, В.И. Аникеев; заявл. 10.01.2006; опубл. 20.12.2007. Бюл. № 35.
23. Пат. № 2225357, Российская Федерация. Способ переработки нефелиновых руд / А.Г. Пихтовников, В.И. Аникеев, И.У. Ахметов и др.; заявл. 25.09.2002; опубл. 10.03.2004. Бюл. № 7.

#### References

1. Malyutin Yu.S., Gal'perin V.G. State of the raw materials base of the Russian aluminum industry. *Gornaya promyshlennost'* [Mining Industry], 1996, no. 2, pp.10–12. (In Russian).
2. Samoylov A.G., Kopylov A.V., Lomaev V.G. Siberian bauxites and the possibility to use them for alumina production. *Mineral'nyye resursy Rossii*, [Mineral Resources of Russia. Economy and management] 2006, no. 3, pp. 8–12. (In Russian).
3. Arluk B.I., Sheer V.E. *Prosessi spekanija v proizvodstve glinosema* [Sintering processes in alumina production]. M.: Metallurgy Publ., 1970, 120 p. (In Russian).
4. Dashkevitch R.Ya. *Perspektivi rascirenia mineralnosirevoi bazi glinozomnoi promyshlennosti Sibiri* [Prospects of widening a mineral resources base for Siberian alumina producing industry]. транслитерация [Proceedings of II All-Russia scientific and technical Conference

- “Scientific and technical achievements for Siberian region progress”, Krasnoyarsk, 16–18 March 2000]. Krasnoyarsk, 2000, pp. 225–226. (In Russian).
5. Petrov V.P. *Novie neboksitovye vidi glinozomnogo siria* [New non-bauxite types of alumina resources]. Moscow: Nauka Publ., 1982. 256 p. (in Russian).
  6. Shepelev I.I., Pikhovnikov A.G., Dashkevitch R.Ya, Rebrik I.I., Golovnykh N.V. *Opyt i perspektivy ispol'zovaniya othodov promyshlennyh predpriyatiij na AGK pri kompleksnoj pererabotke alyuminievogo syr'ya* [Experience and application prospects of industrial waste at Achinsk Alumina Combine under complex processing of alumina raw materials]. *Materialy IV Mezhdunar. Kongressa “Cvetnye metally-2012”* [Proceedings of IV International Congress “Non-Ferrous Metals -2012” Krasnoyarsk, 7–9 September 2012]. Krasnoyarsk, 2012, pp. 325–328. (in Russian).



7. Bel'kov I.V., Gorbunov G.I., Makievskiy S.I. Kianitovye mestorozhdeniya. Mineral'nye mestorozhdeniya Kol'skogo poluostrova. Apatity [Kyanite deposits. Mineral deposits of Kola Peninsula]. Apatity: Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences Publ., 1981, pp. 163–177. (In Russian).
8. Holappa L., Xiao Y. Slags in ferroalloy production – review of present knowledge // Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2004, vol. 104, pp. 429–437.
9. Zhang L., Zhang L.N., Wang M.Y. Recovery of titanium compounds from molten Ti-bearing blast furnace slag under the dynamic oxidation condition // Minerals Engineering, 2007, vol. 20, pp. 684–693.
10. Rytvin V.M., Perepelitsyn V.A., Ponomarenko A.A., and Gilvarg S.I. Titanium-alumina slag – semifunctional techmogenic resource of high-alumina composition. Part 1. Substance composition and titanium-alumina slag properties // Refractories and Industrial Ceramics, vol. 58, no. 2, July 2017, pp. 130–135.
11. Wang Xing Li. Alumina production theory & technology. Changsha: Central South University. 2010, 411 p.
12. Roelof D.Hond. Alumina yield in the Bayer process past present and prospects // Light Metals, 2007. pp. 3742–3758.
13. Sakhachev A.Yu., Shepelev I.I., Dashkevitch R.Ya., Kozhevnikov V.A., Golovnykh N.V. Opyt sovmestnoj pererabotki nefelinovoj rudy i boksitovogo syr'ya na Achinskem glinozemnom kombinate [Experience of co-processing of nepheline ore and bauxite raw materials at Achinsk Alumina Combine]. Materialy XIX Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii "Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogenennogo syr'ya" [Proceedings of XIX International scientific and technical Conference "Scientific bases and processing practice of ore and technogenic raw materials"], Ekaterinburg, 23–24 April 2017]. Ekaterinburg, 2014. pp. 162–167 (in Russian).
14. Shepelev I.I., Dashkevitch R.Ya., Golovnykh N.V., Pihtovnikov A.G., Gorbachev S.N. Vovlechenie v pererabotku nekondicionnogo nefelinovogo syr'ya s prime-niem glinozem-soderzhashchih dobavok [Involvement of substandard nepheline raw materials in processing with the use of alumina-containing additives]. Materialy II Mezhdunarodnogo kongressa «Cvetnye metally Sibiri – 2011» [Proceedings of II International Congress "Siberian Non-Ferrous Metals-2011", Krasnoyarsk, 7–9 September 2012]. Krasnoyarsk, 2012, pp. 88–90. (In Russian).
15. Semin V.D., Medvedev G.P., Semina Z.F. Methods to involve low-quality aluminosilicate ores into production. Izvestiya vuzov: Cvetnaya metallurgiya [Proceedings of Higher Schools. Nonferrous Metallurgy], 1983, no. 9, pp. 43–46. (in Russian).
16. Nikitin M.V. Sposob polucheniya glinozema iz kianitovogo koncentrata [Method for obtaining alumina from kyanite concentrate]. Patent RF, no. 2446103, 2012.
17. Semin V.D. Sposob pererabotki nizkokachestvennogo shchelochchnogo alyumosilikatnogo syr'ya [Processing method of low quality alkaline aluminosilicate raw material]. Patent RF, no 2213057.
18. Golovnykh N.V., Shwets A.A., Polonskiy S.B. Perspektivy ispol'zovaniya mineral'nyh othodov teploehnergetiki v proizvodstve glinozema [Application prospects of heat power plant mineral waste in alumina production]. Izvestiya vuzov: Cvetnaya metallurgiya [Proceedings of Higher Schools. Nonferrous Metallurgy], 2008, no. 6, pp. 16–23 (in Russian).
19. Shepelev I.I. Sposob pererabotki nefelinovoj rudy [Processing method of nepheline ore]. Patent RF, no 2606821, 2017.
20. Medvedev G.P., Semin V.D., Semina Z.F. Puti resheniya problemy obespecheniya sibirskikh alyuminievyyh zavodov mestnym glinozemom [Methods to solve the problem of Siberian aluminum plants provision with local alumina]. Materialy VI Mezhdunar. konferentsii "Alyuminiy Sibiri-2000" [Proceedings of VI International Conference "Siberian Aluminium-2000", Krasnoyarsk, 5–7 September 2000]. Krasnoyarsk, 2000, pp. 258–262. (in Russian).
21. Patrin R.K., Bazhin V.Yu. Spent lining of an aluminum electrolyzer as a raw material for metallurgical, chemical and construction industries, Metallurg [Metallurgist], 2014, no. 8, pp. 33–36 (In Russian).
22. Medvedev G.P. Sposob pererabotki alyuminiy-soderzhashchego syr'ya [Processing method of alumina-containing raw material]. Patent RF, no 2312815, 2006.
23. Pichtovnikov A.G. Sposob pererabotki nefelinovykh rud [Processing method of nepheline ores]. Patent RF, no 2225357, 2004.

#### Критерии авторства

Шепелев И.Н., Сахачев А.Ю., Жихаев А.М., Дашкевич Р.Я., Головных Н.В. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Authorship criteria

Shepelev I.I., Sakhachev A.Yu., Zhyzhaev A.M., Dashkevich R.Ya., Golovnykh N.V. have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

#### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article

УДК 007.51.681.518.3

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-215-230>

## СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕЕЗДАХ

© В.В. Демьянов<sup>1</sup>, О.Б. Имарова<sup>2</sup>, М.Э. Скоробогатов<sup>3</sup>

Иркутский государственный университет путей сообщения,  
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

**РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ.** Обеспечение безопасности движения в зоне сближения с неохраняемыми и необслуживаемыми переездами за счет автоматического снижения скорости подвижного состава на участке приближения к переезду в зависимости от текущей ситуации на переезде, без установки на переезде дополнительных устройств, за счет использования средств спутниковой радионавигационной системы. **МЕТОДЫ.** Предложены методы автоматического регулирования скорости подвижного состава на основе использования аппаратуры спутниковой радионавигационной системы GPS – ГЛОНАСС. Зоны сближения с переездами и контрольные точки регулирования и снижения скорости переносятся на цифровую карту пути, которая хранится в блоке памяти системы автоматического регулирования скорости. Текущая путевая ординация поезда и скорость его движения оценивается в непрерывном времени с помощью аппаратуры спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС. Блоком управления системы оценивается текущее местоположение поезда, его скорость, и принимается решение о начале и окончании автоматического торможения поезда, а также выполняется оповещение машиниста о необходимости вмешаться в процесс ведения поезда, происходит запуск устройства контроля бдительности машиниста с автоматической подачей сигнала (1 длинный гудок) в сторону переезда для оповещения водителей автотранспортных средств. На машиниста возлагается принятие окончательного решения о начале увеличения скорости при проследовании переезда либо о необходимости торможения перед переездом средствами служебного торможения в конце автоматического снижения скорости движения перед переездом до безопасного уровня. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** На железнодорожных переездах должны быть выполнены два противоречивых условия: обеспечение безопасности движения и увеличение пропускной способности через переезд с сохранением скорости подвижного состава. В данном случае предложена система технических решений по автоматизированному регулированию движения скорости на необслуживаемых и неохраняемых железнодорожных переездах на основе технологий спутниковой навигации и состояния движения на переезде со стороны автодороги. **ВЫВОДЫ.** Функция обеспечения безопасности движения переносится с переездных устройств на локомотив с автоматизацией автоматического снижения скорости перед переездом и с возможностью окончательного контроля ситуации на переезде машинистом и может быть использована на железнодорожном транспорте в локомотиве подвижного состава, что способствует снижению количества дорожно-транспортных происшествий с тяжелыми последствиями (смертельные случаи, столкновения, количество пострадавших).

**Ключевые слова:** переезд, автоматизация движения, контроль безопасности на переездах, спутниковая навигация на железной дороге.

**Информация о статье.** Дата поступления 6 марта 2018 г.; дата принятия к печати 6 апреля 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2018 г.

**Формат цитирования.** Демьянов В.В., Имарова О.Б., Скоробогатов М.Э. Состояние проблемы и методы обеспечения безопасности движения на железнодорожных переездах // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 4. С. 215–230. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-215-230

<sup>1</sup>Демьянов Владислав Владимирович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автоматики, телемеханики и связи, e-mail:sword1971@yandex.ru

Vladislav V. Demyanov, Doctor of technical sciences, Associate Professor, Professor of the Automatics, Telemechanics and Communication Department, e-mail: sword1971@yandex.ru

<sup>2</sup>Имарова Ольга Борисовна, аспирант, e-mail: imarova2010@mail.ru

Olga B. Imarova, Postgraduate student, e-mail: imarova2010@mail.ru

<sup>3</sup>Скоробогатов Максим Эдуардович, аспирант, e-mail: skor\_maxim@mail.ru

Maxim E. Skorobogatov, Postgraduate student, e-mail: skor\_maxim@mail.ru



## STATE OF THE PROBLEM AND METHODS OF TRAFFIC SAFETY PROVISION ON RAILROAD CROSSINGS

V.V. Demyanov, O.B. Imarova, M.E. Skorobogatov

Irkutsk State Transport University,  
15, Chernyshevsky St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

**ABSTRACT.** The **PURPOSE** of the work is to ensure the traffic safety in the proximity to open and unguarded crossings by automatic reduction of the train speed in the proximity to the railroad crossing depending on the current situation at the railroad crossing, without the installation of additional devices at the railroad crossing but through the use of the satellite radio navigation system. **METHODS.** The methods of automatic train speed control based on the use of satellite radio navigation system GPS-GЛОНАСС are proposed. The proximity zones to railroad crossings and the check points of speed control and reduction are laid on the railway digital map which is stored in the memory unit of the automatic speed control system. The current track ordinate of the train and its speed are estimated in continuous time with the help of the satellite radio navigation system GЛОНАСС. The system control unit evaluates the current location of the train, its speed, makes a decision on the start and end of automatic braking of the train as well as notifies the locomotive driver of the need to intervene in the process of train driving. It also starts the driver's alertness control device with an automatic alarm (1 long whistle) in the direction of the railroad crossing to alert the drivers of vehicles. The locomotive driver is responsible for making the final decision on the start of speed increase when passing the railroad crossing or on the need for braking before the railroad crossing by service brake application at the end of the automatic reduction of speed in proximity to the railroad crossing to a safe level. **RESULTS.** Two contradictory conditions must be met at railroad crossings: traffic safety must be provided and railroad crossing capacity must be increased while maintaining the speed of the railway rolling stock. For this case, the system of technical solutions has been introduced for automated speed control at unguarded and open railroad crossings based on the satellite navigation technologies and the state of traffic at the crossing from the side of a motorway. **CONCLUSIONS.** The function of traffic safety provision is moved from railroad crossing devices to locomotives with the automation of automatic speed reduction in proximity to the railroad crossing and with the possibility for the locomotive driver to perform the final control of the situation at the railroad crossing. The use of this function on railway transport in locomotives will reduce the number of severe road accidents (fatalities, collisions, number of victims).

**Keywords:** railroad crossing, traffic automation, safety control at railroad crossings, satellite navigation on the railroad

**Information about the article.** Received March 6, 2018; accepted for publication April 6, 2018; available online April 30, 2018.

**For citation.** Demyanov V.V., Imarova O.B., Skorobogatov M.E. State of the problem and methods of traffic safety provision on railroad crossings. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 4, pp. 215–230. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-215-230

### Введение

ОАО «РЖД» отмечает рост количества дорожно-транспортных происшествий (ДТП) и тяжесть их последствий на железнодорожных переездах. Так на Красноярской железной дороге за 9 месяцев с начала 2017 года зафиксировано 134 ДТП, отмечается увеличение коэффициента тяжести последствий ДТП на железнодорожных переездах в 2017 г. на 0,30 раза, по сравнению с 2016 г. За указанный период пострадал 171 человек, погибло – 56 человек. Для сравнения: за весь 2016 г на переездах Красноярской железной дороге пострадало 84, а погибло 29 человек. При этом по вине водителей автотранспорта рост ДТП на железнодорожных переездах составил 43% за 2017 г. в

сравнении с 2016 г. Таким образом, остается актуальной задача разработки новых методов, алгоритмов и технических средств для обеспечения и повышения безопасности движения на переездах.

По условиям обслуживания все железнодорожные переезды можно разделить на охраняемые и неохраняемые. Если на охраняемых переездах используется полный комплекс технических средств, позволяющих существенно снизить риск столкновений железной дороги и автотранспорта, то на неохраняемых и, особенно, на необслуживаемых переездах ситуация намного хуже. На сегодняшний день состояние безопасности движения на неохраняемых и нерегулируемых железнодорожных переездах



продолжает оставаться неудовлетворительным [1].

На рис. 1 приведена статистика ДТП на переездах в ОАО «РЖД», по данным таблицы видно, что за 2016 год произошло 109 ДТП, за 2017 г. увеличилось на 47 ДТП, пострадавших в 2017 увеличилось на 48 человек, количество ДТП со смертельным исходом увеличилось на 12. Видно, что с каждым годом происходит увеличение дорожно-транспортных происшествий, увеличение количества пострадавших и ДТП со смертельным исходом.

Всего на Красноярской железной до-

роге эксплуатируется 303 железнодорожных переезда, в том числе: без дежурного по переезду – 147, с дежурным по переезду – 43, необслуживаемых – 113.

Более детальная информация дана в таблице, из нее видно, что на переездах Красноярской железной дороги с начала 2017 года зарегистрировано 6 ДТП, в которых пострадало 4 человека. Троє из них погибли. ДТП произошли по вине водителей, нарушивших правила дорожного движения и выехавших на переезд, на запрещающий сигнал светофора. Рассмотрим данные на примере Красноярской железной дороги.

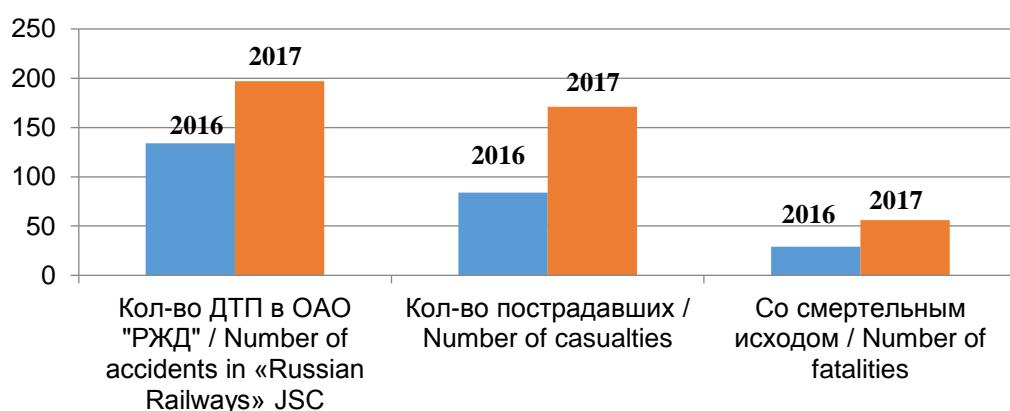


Рис. 1. Анализ ДТП в ОАО «РЖД»  
Fig. 1. Analysis of accidents in «Russian Railways» JSC

**Анализ аварийности на железнодорожных переездах (по состоянию на октябрь 2017)**  
**Analysis of accident rate at railroad crossings (as of October 2017)**

Наименование / Name	Количество ДТП / Number of accidents	
	2016	2017
Кол-во столкновений подвижного состава с автотранспортными средствами на железнодорожных переездах / Number of rolling stock collisions with vehicles on railroad crossings	5	6
Кол-во несанкционированных выездов на путь вне железнодорожного переезда легкового автомобиля / Number of unauthorized driving on railway lines outside the railroad crossing	1	7
– кол-во пострадавших / Number of casualties:	0	4
– из них со смертельным исходом / among them fatalities:	0	3
Кол-во ДТП на железнодорожных переездах, обслуживаемых дежурным по переезду / Number of accidents at guarded railroad crossings	8	6
Кол-во ДТП на необслуживаемых переездах / Number of accidents at open railroad crossings:		
– с автобусами / with buses	5	6
– с пригородными пассажирскими поездами / with suburban passenger trains	2	2
	3	4



Из приведенных данных вытекает высокая актуальность проблемы обеспечения безопасности движения на неохраняемых и необслуживаемых переездах. В настоящее время в ОАО «РЖД» реализован комплекс специальных организационных мероприятий, направленных на предотвращение ДТП, профилактические рейды проходят на всех переездах, где чаще всего фиксируются нарушения ПДД. Такие мероприятия требуют организации регулярного эффективного взаимодействия различных по подчиненности и решаемым задачам структур и ведомств, что очень сложно реализовать на практике единообразно, повсеместно и на регулярной основе. Таким образом, остается единственный эффективный путь решения указанной проблемы – внедрение новых способов и технических реше-

ний по автоматизации безопасного движения на неохраняемых и необслуживаемых переездах. Однако пока еще не существует достаточно эффективного технического решения указанной проблемы [8, 10, 12].

В настоящей статье проведен предварительный анализ возможных технических решений по автоматизированному регулированию движения скорости на необслуживаемых и неохраняемых железнодорожных переездах на основе технологий спутниковой навигации с возможным привлечением минимального количества датчиков состояния движения на переезде со стороны автодороги. Основной акцент в предложенных технических решениях сделан на перенос основной функции автоматизации и обеспечения безопасности движения на переезде с самого переезда на локомотив [5].

### **Основные технические решения по обеспечению автоматизированного регулирования движения на железнодорожных переездах в России и за рубежом**

На отечественных железных дорогах для обеспечения безопасности движения все переезды оборудуют соответствующими средствами сигнализации, информации и контроля. Категорирование переездов и их оборудование средствами заграждения и сигнализации зависит от места расположения переезда и интенсивности движения. На железнодорожных переездах всех категорий должны быть выполнены два противоречивых условия: обеспечение безопасности движения и увеличение пропускной способности через переезд с сохранением скорости подвижного состава [2, 13, 14].

В настоящее время помимо принятых типовых решений по переездной автоматике и сигнализации имеется множество новых предложений следующего характера.

В работе предложено независимое использование радиоконтроля работы автоматики неохраняемых переездов на базе подтонального диапазона частот. Недостатками данного способа являются: недостаточная дальность радиоконтроля, увеличение периода опроса всех контролируемых переездов, дополнительные затраты инфраструктуры на обслуживание, снижение пропускной способности через переезд<sup>4</sup>.

Автор работы предлагает комплексную систему обеспечения безопасности железнодорожных транспортных пересечений при минимальном времени простоя автотранспорта, которая заключается в функционировании датчика первичной информации о скорости и координатах движения поезда, устройств оповещения и заграждении переездов<sup>5</sup>. Недостатком данного метода

<sup>4</sup>Ганичев А.И. Обеспечение безопасности движения на нерегулируемых железнодорожных переездах в системе «Машинист – локомотив – окружающая среда»: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07; 05.22.01. Самара, 2001. 220 с. / Ganichev A.I. Traffic safety provision at open railway crossings in the system "Locomotive Driver - Locomotive - Environment": Candidate's Dissertation in Technical Sciences: 05.22.07; 05.22.01. Samara, 2001. 220 p.

<sup>5</sup>Гатауллин С.Т. Экономическая оценка и пути снижения потерь на железнодорожных переездах: дис. ... канд. эконом. наук: 08.00.05; 08.00.13. Москва, 2009. 21 с. / Gataullin S.T. Economic evaluation and the methods to reduce losses at railway crossings: Candidate's Dissertation in Economy: 08.00.05; 08.00.13. Moscow, 2009. 21 p.



является дискретность определения удаления от переезда и скорость движения поездной единицы. Метод распространяется только на переездах, оборудованных автоматической переездной сигнализацией со шлагбаумом, которые не относятся к категории «неохраняемых» железнодорожных переездов.

В работе создана концепция и модель системы «Оператор – транспорт – дорога – окружающая среда» для обеспечения безопасности движения на нерегулируемых переездах, которая заключается на основе реализации мероприятий по повышению безопасности на переездах. Система имеет недостатки: увеличение дополнительных затрат на функционирование и низкий уровень надежности и безопасности, так как в состав входит человек, действия и ошибки которого влияют на работоспособность системы в целом<sup>6</sup>.

В работе рассмотрены вопросы уменьшения расходов на железнодорожных переездах и способы определения однорядных развязок, требующих замены путепроводами<sup>7</sup>. Согласно выводам по исследованию, замену переездов путепроводами экономически целесообразно при интенсивности движения на железной дороге 70–80 пар поездов в сутки и 5 000–6 000 автомобилей в сутки. Было проанализировано расположение железнодорожных переездов в городах и методики технико-экономического обоснования возможных проектных решений. Указанное решение, очевидно, требует серьезных капитальных вложений и нецелесообразно на малодеятельных участках железных дорог.

Кроме сказанного, на железных до-

рогах России для обеспечения безопасности дорожного движения предлагается на всех железнодорожных переездах, не оборудованных устройствами заграждения переезда, установить «лежачие полицейские», которые будут предотвращать нарушения водителями автомобилей скоростного режима, так как большинство ДТП происходит из-за того, что водители не могут адекватно оценить скорость подвижного состава. Это может стать эффективным и недорогим решением, но не предотвращает возможности заезда автотранспорта на пути с застраиванием на переезде.

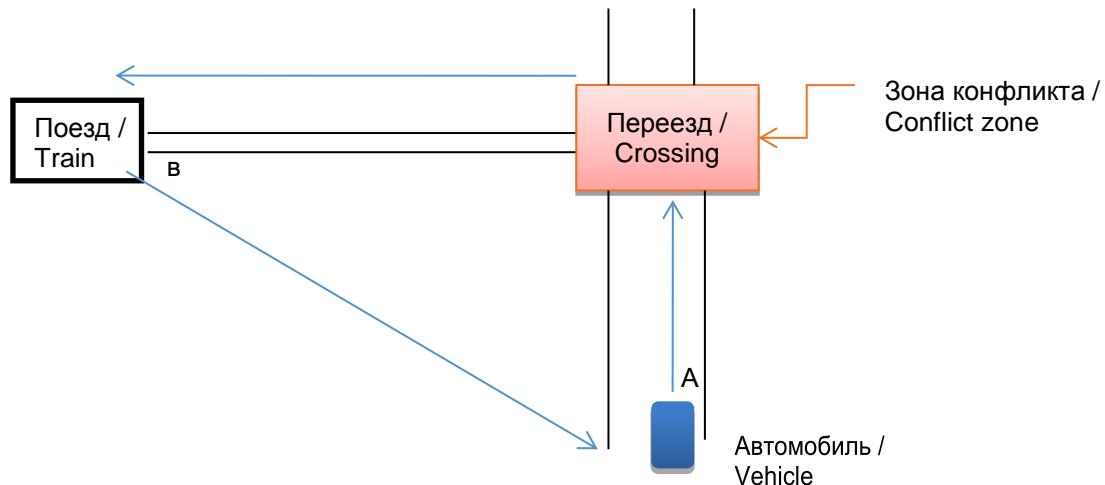
В целом, обзор новых предложений по обеспечению безопасного и автоматизированного движения на неохраняемых и необслуживаемых переездах сводится в основном, к использованию на переездах дополнительной инфраструктуры и технических средств. При этом сохраняется основной принцип обеспечения безопасности движения на переездах: принятие решения и соответствующее техническое обеспечение находится в зоне переезда и возлагается в большей степени на водителей автотранспорта [3].

На нерегулируемых и необслуживаемых переездах водитель несет ответственность за соблюдение мер безопасности и распознавание приближающегося поезда, существует метод определения «визуального треугольника безопасности». Чтобы водитель увидел приближающийся к переезду поезд, необходимо обеспечить отсутствие каких-либо препятствий в зоне «визуального треугольника безопасности» и снизить скорость автотранспорта в этой опасной зоне движения<sup>8</sup>.

<sup>6</sup>Воривошин А.В. Методы радиоконтроля автоматики неохраняемых переездов производственных предприятий железнодорожного транспорта: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.04. Москва, 2008. 139 с. / Vorivoshin A.V. Methods of radio monitoring of automated devices at open crossings of railway transport industrial enterprises: Candidate's Dissertation in Technical Sciences: 05.12.04. Moscow, 2008. 139 p.

<sup>7</sup>Мохонько В.П. Микропроцессорная система обеспечения безопасности функционирования железнодорожных переездов: дис. ... канд. техн. наук: 27.00.02. Самара, 2000. 42 с. / Mokhonko V.P. Microprocessor system to provide railway crossing operation safety: Candidate's Dissertation in Technical Sciences: 27.00.02. Samara, 2000. 42 p.

<sup>8</sup>Teeg G., Власенко С. Системы автоматики и телемеханики на железных дорогах мира: учеб. пособие для вузов ж. д. транспорта. М.: Интект, 2010. 496 с. / Teeg G., Vlasenko S. Systems of automatics and telemechanics on railways around the world: Learning aids for universities of railway transport. M.: Intext, 2010. 496 p.



**Рис. 2. Визуальный треугольник безопасности:**  
A – идентифицируемая точка; B – точка видимости поезда  
**Figure 2. Visual security triangle:**  
A - identifiable point; B - point of train visibility

Сказанное поясняется на рис. 2, где точка А является критической, в которой водитель должен принять решение: остановиться перед переездом или проследовать через него. Расположение точки А зависит от длины тормозного пути автомобиля. Влияющим фактором является то, что чем быстрее движется транспортное средство, тем длиннее его тормозной путь, следовательно, требуется больше времени на его остановку. Размеры визуального треугольника безопасности могут существенно различаться при установленной разрешенной скорости на автомобильной или железной дороге на каждом конкретном переезде. В целом же ясно, что расположение основной ответственности за безопасность движения через неохраняемый (необслуживаемый) переезд на водителя автотранспорта имеет весьма серьезные недостатки [7,11]. А именно:

- 1) высокая степень влияния субъективного фактора на точность оценки безопасной зоны сближения с переездом;
- 2) безопасность движения сильно зависит от окружающих условий, дальности видимости и скорости движения автотранспорта и железнодорожного состава;

3) невозможность «стандартизировать» и автоматизировать безопасное движение через неохраняемый (необслуживаемый) переезд<sup>8,9</sup>.

Перейдем теперь к анализу опыта решения нашей проблемы за рубежом.

В Великобритании в некоторых районах вместо переездов построены путепроводы. Эксплуатируются примерно 1600 охраняемых переездов, огражденных шлагбаумами половинной или полной длины и системами видеонаблюдения. В ближайшее время объектами модернизации станут переезды со световыми сигналами, но без шлагбаумов (140 шт. – 20% риска ДТП). На железнодорожных переездах установлены предикторы («предсказатели») – высокотехнологичные устройства на базе рельсовых цепей, приводящие в действие переездную автоматику независимо от действующей на линии системы сигнализации. Предикторы используют рельсы для передачи сигналов тональной частоты в обоих направлениях от переезда. Предикторы могут оценивать скорость движения поездов. Обычные рельсовые цепи, управляющие оборудованием переезда, выдают сигнал на закрытие переезда в срок, установленный исходя из того,

<sup>8</sup>Об утверждении Условий эксплуатации железнодорожных переездов: приказ Минтранса России № 237 от 31.07.2015 г. / On approval of Operation Conditions of Railway Crossings: the Order of the Ministry of Transport of Russia No. 237 of July 31, 2015.



что вошедший в зону их действия поезд движется с расчетной для данного участка скоростью. Однако если приближающийся поезд движется с меньшей скоростью, до его прибытия на переезд потребуется больше времени, что влечет за собой неоправданное увеличение продолжительности закрытия шлагбаума и простоя автомобильного транспорта. Предикторы через 4 секунды после входа поезда в зону их действия прогнозируют точное время прибытия поезда, собственно, на переезд. Поэтому момент закрытия шлагбаумов можно определить более точно и тем самым сократить до минимума длительность ожидания у закрытого шлагбаума. Важным преимуществом предикторов является возможность исключить подачу сигнала на закрытие шлагбаума во время стоянки поезда на станции вблизи переезда и не держать шлагбаумы закрытыми до момента отправления поезда. Предикторы не нуждаются в путевых датчиках, обустройстве участков приближения и т. п., что необходимо на обычных переездах. Нужны только исполнительные блоки на переезде и шунтирующие цепи между рельсами в контрольной точке. Одним из основных применений предикторов является ограждение переездов. Методы безопасности имеют дополнительные затраты на обслуживание (строительство путепроводов), снижение пропускной способности через переезд (время открытия – закрытия шлагбаума)<sup>10,11,12</sup>.

На железных дорогах Швеции реализована программа по ликвидации переездов в целом и строительство автомобильных дорог без пересечения железнодорожными путями. Недостатком программы является дорогостоящее строительство путепроводов и мостов в местах пересечений.

На железных дорогах в Нидерландах развивается стратегия оснащения участка дороги световыми сигналами, встроенными в асфальтовое покрытие перед переездом, оборудование всех переездов дополнительно к автоматической переездной сигнализацией, шлагбаумами и обработка поверхности резино-кордового настила минеральным порошком на переезде для увеличения внимания водителей. Недостатком являются затраты по оборудованию световыми сигналами всех переездов и низкий уровень безопасности движения при использовании резино-кордовых покрытий на переезде [4].

На железных дорогах США основные мероприятия по обеспечению безопасности движения на переездах ориентированы на ликвидацию переездов, строительство автомобильных дорог параллельно железным (путепроводы, мосты). Недостаток мероприятий – большие затраты при реконструкции дорог параллельно переездам.

Стратегия развития железных дорог Канады в части организации железнодорожных переездов во многом повторяет опыт США. Для увеличения бдительности водителей установлены проблесковые огни на уровне земли и встроены сигнальные светодиодные огни в покрытие автомобильной дороги перед переездами. Недостатком является низкий уровень безопасности движения на переездах [6].

Безопасность движения на железнодорожных переездах Германии достигается за счет:

1) оповещения о переезде участников дорожного движения при помощи дорожных знаков, ограждения переезда со стороны автомобильной дороги;

<sup>10</sup>Об утверждении Правил технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации: приказ № 286 от 21.12.2010 г. / On Approval of the Rules of Technical Operation of Railways of the Russian Federation: Order No. 286 of December 21, 2010.

<sup>11</sup>Инструкция по сигнализации на железнодорожном транспорте. Приложение № 7 к Правилам технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации № 19627 от 28.01.2011 г. / Instruction on signaling in railway transport. Annex No. 7 to the Rules for the Technical Operation of Railways of the Russian Federation No. 19627 of 28 January 2011

<sup>12</sup>Инструкция по движению поездов и маневровой работе на железнодорожном транспорте Российской Федерации № 19627 от 28.01.2011 г. / Instruction on railway traffic and shunting on the railway transport of the Russian Federation No. 19627 of 28 January 2011.



2) реальное действие законов и правил движения и серьезные санкции к нарушителям, независимо от их общественного положения;

3) ликвидация переездов с заменой их на строительство мостов и путепроводов;

4) оборудование переездов уже существующей с автоматической переездной сигнализацией (АПС), но с использованием шлагбаумов, относящихся к категории охраняемых переездов;

5) внедрение начальных технических средств ограждения на переездах устройствами заграждения переездов (УЗП, АПС со шлагбаумами);

6) установка сигнальной зависимости для шлагбаумов полной длины, обслуживаемых дежурным по переезду, с целью предотвращения ошибочных действий со стороны дежурного;

7) размещение дополнительных световых сигналов на уровне земли и в асфальтовом покрытии на неохраняемых переездах;

8) переустройство пешеходных путей и автодорог в зоне переезда с заменой их на резино-кордовое покрытие;

9) замена устаревших сигналов с мигающим огнем на устройства светофорной сигнализации с полушлагбаумами;

10) дополнительное размещение устройств извещения о занятости переезда, установленных в виде мигающих светодиодных огней в шлагбаумах, для предотвращения преждевременного выключения огней переездного светофора.

Вообще, при выборе способа обеспечения безопасности на переезде как в России, так и за рубежом, руководствуются такими критериями, как: интенсивность движения на переезде, скорость движения поездов, эксплуатационно-технические затраты и экономическая целесообразность. В то же время, на линиях со скоростью движения поездов более 160 км/ч переезды в одном уровне железной и автомобильной дороги недопустимы. Это обусловлено тем, что, несмотря на наличие на переездах достаточных средств обеспечения безопасности, сохраняется риск столкновений с поездом, а

их вероятные последствия с ростом скорости становятся чрезвычайно тяжелыми уже для обеих сторон. Поэтому при новом строительстве высокоскоростных линий железной дороги вопрос о дальнейшей модернизации переездных устройств снимается, а на местах переездов строятся путепроводы.

Если говорить об опыте зарубежных стран, то можно сделать следующие выводы. Рассмотренные выше методы и способы обеспечения безопасности движения на переездах имеют ряд следующих общих недостатков:

– снижение пропускной способности при увеличении времени извещения, отсутствие контроля снижения скорости подвижного состава при наличии препятствия на переезде;

– отсутствие автоматического регулирования скорости подвижного состава на участке приближения к переезду;

– отсутствие возможности точной передачи координаты и вектора скорости подвижного состава и расстояния до препятствия на нерегулируемых и необслуживаемых переездах;

– системы безопасности движения сосредоточены на переездах, относящихся к категории охраняемых и регулируемых.

В зарубежных странах активно внедряют стратегию ликвидации переездов с заменой на строительство путепроводов и не предусмотрен контроль скорости подвижного состава при приближении к переезду на неохраняемых и необслуживаемых переездах. Устройства безопасности дополнительно сосредоточены на переездах, оборудованных АПС, относящихся к категории охраняемых, на неохраняемых и необслуживаемых переездах меры безопасности не установлены.

В целом же обзор отечественных и зарубежных организационно-технических решений показывает, что организация безопасного движения через железнодорожные переезды не в полной мере соответствует современным тенденциям развития железнодорожного транспорта. В настоящее время развитие систем интервального регулирования движением поездов (ИРДП) идет



в направлении максимальной автоматизации процесса движения с увеличением участковых скоростей движения и повышением наличной пропускной способности перегонов и станций. В рамках этой тенденции можно указать, что основным системным недостатком в развитии технических решений, позволяющих обеспечить автоматизацию

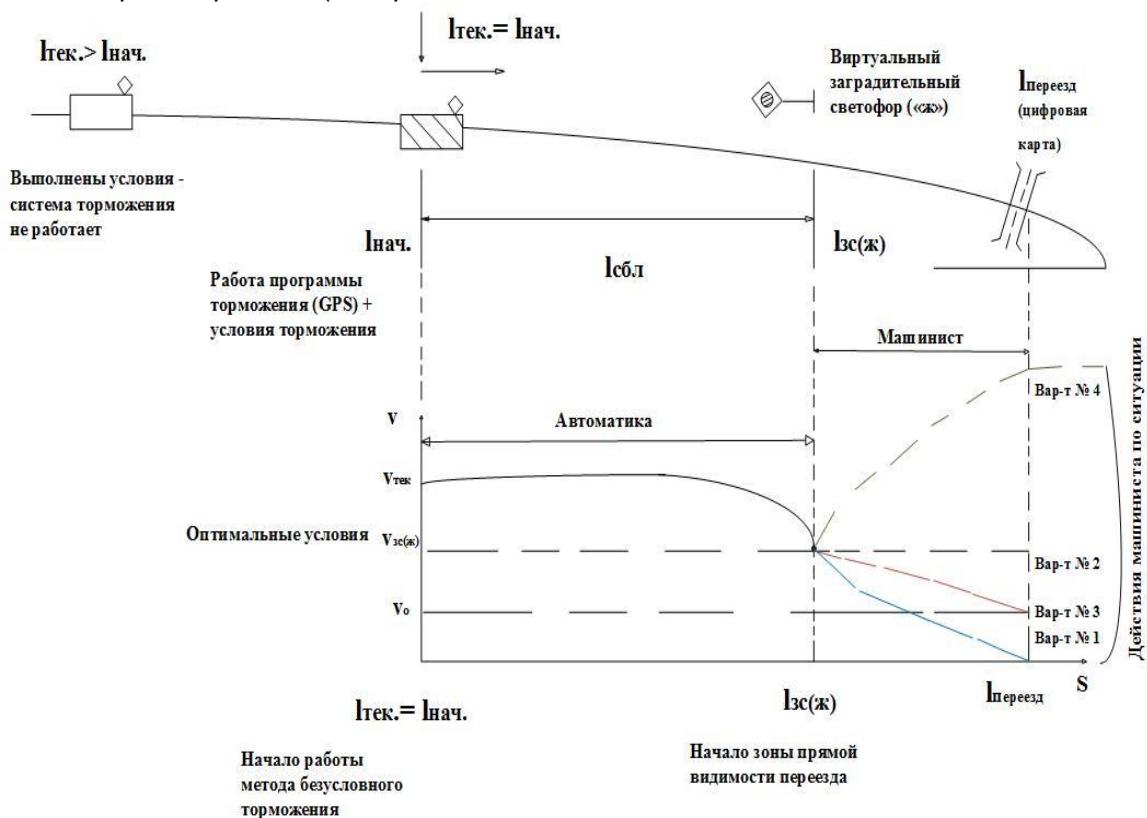
безопасного движения на неохраняемых и необслуживаемых переездах, является недостаточное использование возможности автоматического регулирования скорости подвижного состава на участке приближения к переезду в том числе с учетом текущей ситуации на самом переезде.

### Метод безусловного регулирования скорости подвижного состава на неохраняемом и необслуживаемом переездах

Для обеспечения безопасности движения на неохраняемых и необслуживаемых переездах в данной статье рассмотрен метод безусловного регулирования скорости подвижного состава в зоне сближения с переездом на основе переноса ответственности с переезда и водителей автотранспорта на локомотив. При этом в зависимости от категории переезда (неохраняемый

или необслуживаемый) можно предложить два возможных алгоритма работы системы регулирования движения на переезде.

**Алгоритм 1.** Безусловное регулирование скорости подвижного состава при вступлении в зону сближения с необслуживаемым переездом. Суть действия данного алгоритма поясняется на рис. 2.



Примечание / Note. Виртуальный заградительный светофор / virtual protecting signal;  $I_{\text{переезд}}$  (цифровая карта) /  $I_{\text{crossing}}$  (digital map); выполнены условия – система торможения не работает / conditions are fulfilled – the braking system does not work; работа программы торможения(gps)+условия торможения / braking program running (gps) + braking conditions; автоматика / automation; машинист / locomotive driver; вар-т 1 (2,3,4) / option 1 (2,3,4); действия машиниста по ситуации / situation actions of a locomotive driver; оптимальные условия / optimal conditions; начало работы метода безусловного торможения / start of the unconditional braking method; начало зоны прямой видимости переезда / start of the crossing direct visibility.

**Рис. 3. Графическая схема алгоритма безусловного регулирования скорости локомотива**  
**Fig. 3. Graphic diagram of the algorithm of locomotive speed unconditional control**



Примечание / Note. Фиксация поезда на участок приближения / train fixation on the approach section; безусловное торможение / unconditional braking; система торможения не срабатывает / braking system does not work; конец работы / end; зона прямой видимости переезда до 400м / direct visibility of the crossing is 400m; ТС в пределах треугольника безопасности / vehicle is within the security triangle; переезд занят / crossing is occupied; переезд свободен / crossing is empty.

Рис. 4. Блок-схема алгоритма работы метода безусловного торможения  
Fig. 4. Block diagram of the algorithm of unconditional braking method operation

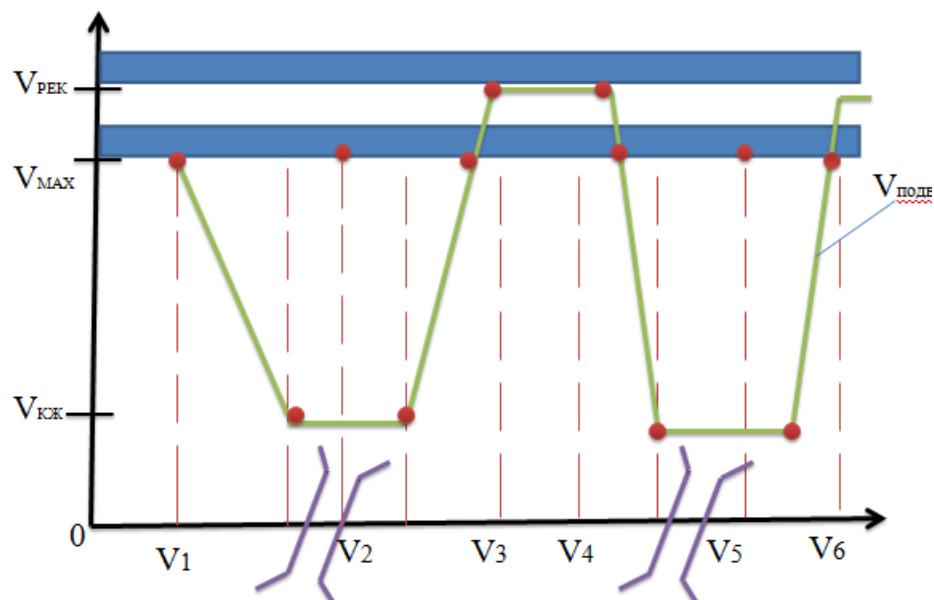


Рис. 5 График уменьшения скорости локомотива перед переездом и увеличения скорости после проследования переезда (при свободности переезда от транспортных средств)  
Fig. 5 Graph of locomotive speed reduction in proximity to crossing and speed increase after passing the crossing (if the crossing is free from vehicles)



Пояснения к алгоритму безусловного регулирования скорости подвижного состава (рис. 2)

В данном случае реализация метода автоматического регулирования движения на переезде базируется на использовании цифровой карты пути и системы спутниковой навигации ГЛОНАСС (GPS), приемник которой встроен в комплексное локомотивное устройство безопасности и обеспечивает определение текущей путевой ординаты и скорости движения поезда. На цифровой карте пути перед каждым переездом нанесены виртуальные (зеленый и желтый) заградительные светофоры, а также заранее рассчитаны пределы, до которых должен повысить скорость машинист после проследования данного переезда, чтобы сохранить требуемую пропускную способность перегона (станции). Первый виртуальный заградительный светофор соответствует ординате начала зоны сближения с конкретным переездом (точка А на рис. 3). Виртуальный желтый светофор соответствует целевой точке вывода поезда к началу защитного интервала с безопасной для данного участка пути и переезда скоростью (точка Б на рис. 3). На участке между точками А и Б тормозная система локомотива осуществляет автоматическое снижение скорости локомотива в соответствии с заданной программой снижения скорости и текущей путевой ординатой и скоростью, определенной с помощью аппаратуры ГЛОНАСС (GPS) (кривая 1, рис. 3).

После вступления поезда в точку А с безопасной скоростью, комплексное локомотивное устройство безопасности автоматически начинает подавать световой и звуковой сигналы в сторону переезда, оповещает машиниста о необходимости принятия решения с подтверждением бдительности. После подтверждения бдительности машинист принимает решение о дальнейшем скоростном режиме проследования через переезд, ориентируясь на текущую визуальную обстановку и окружающие условия ведения поезда. Решение машиниста в точке Б носит вариативный характер:

**Вариант № 1.** Если переезд занят – транспортное средство находится на переезде (ДТП, нарушение эксплуатации автомобиля на переезде и пр., либо в пределах «треугольника безопасности» имеется автотранспортное средство с очевидными признаками «неадекватного вождения»), то машинист снижает скорость подвижного состава средствами служебного торможения до полной остановки перед железнодорожным переездом.

**Вариант № 2.** Если переезд свободен – транспортное средство проследовало железнодорожный переезд и в зоне видимости нет другого транспортного средства в пределах «треугольника безопасности» (рис. 2), то машинист не снижая скорости проследует переезд и начинает увеличивать скорость до рекомендованного уровня (кривая 2 на рис. 3).

**Вариант № 3.** Если переезд «условно» свободен – плохие условия видимости, имеется автотранспортное средство в пределах «треугольника безопасности», то машинист после подтверждения бдительности не вмешивается в процесс ведения поезда и продолжает двигаться с безопасной скоростью. Водитель автотранспортного средства в данном случае получает более безопасные и комфортные условия для проследования переезда или принятия решения об остановке перед переездом. После проследования переезда машинист начинает увеличивать скорость до рекомендованного уровня (кривая 2 на рис. 3);

Зоны видимости железнодорожного переезда при движении скорости подвижного состава в границах с участком приближения:

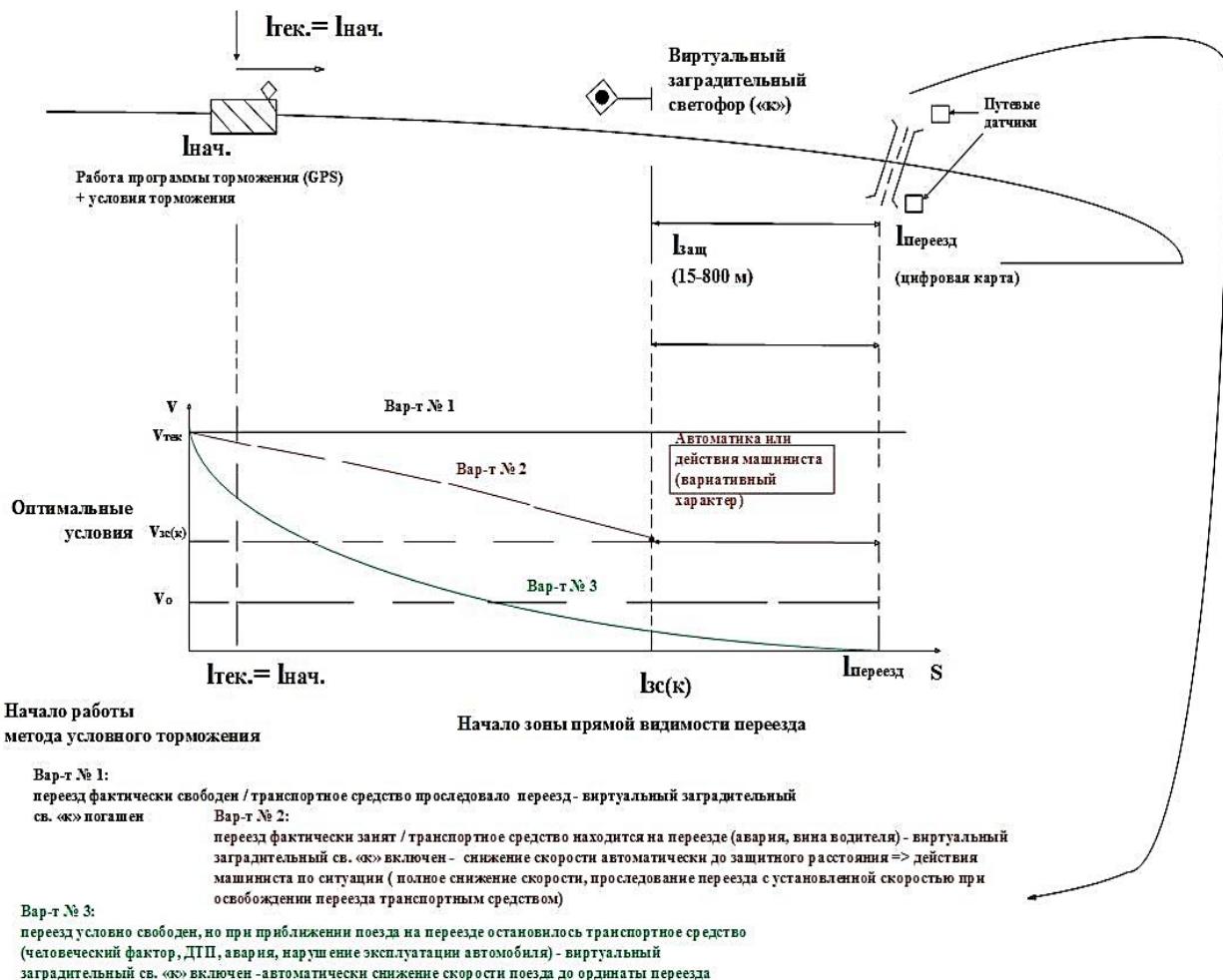
- 1)  $S = 400$  м, при  $V = 120$  км/ч;
- 2)  $S = 200$  м, при  $V = 80$  км/ч;
- 3)  $S = 150$  м, при  $V = 40$  км/ч.

Достоинством безусловного метода являются: высокая надежность системы торможения, минимальная стоимость, габаритные размеры и масса устройств автоматики. Недостатком является низкая пропускная способность при преждевременном снижении скорости подвижного состава.

## Метод условного регулирования скорости подвижного состава на неохраняемом и необслуживаемом переездах

**Алгоритм 2.** Условное регулирование скорости подвижного состава при вступлении в зону с неохраняемым переездом.

Графически принцип действия показан на рис. 6.



Примечание / Note. Виртуальный заградительный светофор / virtual protection signal; путевые датчики / track sensors; работа программы торможения(gps)+ условия торможения / braking program running (gps) + braking conditions;  $l_{\text{переезд}}$  (цифровая карта) /  $l_{\text{crossing}}$  (digital map); автоматика или действия машиниста (вариативный характер) / automation or locomotive driver's actions (variative); оптимальные условия / optimal conditions; переезд / crossing; начало зоны прямой видимости переезда / start of the crossing direct visibility; начало работы метода условного торможения / start of the conditional braking method; вар-т 1 / option 1; переезд фактически свободен / транспортное средство проследовало переезд – виртуальный заградительный св. «к» погашен / crossing is virtually empty/ vehicle has left the crossing/ virtual protection signal “red” is off; вар-т 2- option 2; переезд фактически занят / транспортное средство находится на переезде (авария, вина водителя) – снижение скорости автоматически до защитного расстояния => действия машиниста по ситуации (полное снижение скорости, проследование переезда с установленной скоростью при освобождении переезда транспортным средством) / crossing is actually occupied/ vehicle is on the crossing (accident, driver's fault)- virtual protection signal “red” is on- automatic reduction of speed before the safe distance – locomotive driver situational actions (complete speed drop, passing the crossing with the governed speed when the vehicle leaves the crossing); вар-т 3- option 3; переезд условно свободен, но при приближении поезда на переезде остановилось транспортное средство (человеческий фактор, ДТП, авария, нарушение эксплуатации автомобиля) – виртуальный заградительный св. «к» включен – автоматически снижение скорости поезда до ординаты переезда / crossing is conventionally empty but a vehicle has stopped on the crossing on approaching train (human factor, accident, emergency, vehicle abuse)- virtual protection signal “red” is on – automatic reduction of the train speed before the crossing ordinate.

Рис. 6 Схема алгоритма условного регулирования скорости локомотива  
 Fig. 6. Diagram of the algorithm of locomotive conditional speed control



**Пояснения к алгоритму условного регулирования скорости подвижного состава (рис. 6)**

В этом случае метод основан на использовании путевых (индуктивных) датчиков обнаружения препятствия, установленных в зоне конфликта на переезде, помимо цифровой карты пути и системы спутниковой навигации ГЛОНАСС (GPS) со встроенным приемником в комплексное локомотив-

ное устройство безопасности. Путевой датчик при обнаружении транспортного средства в зоне конфликта на переезде по радиоканалу (рельсовой цепи) передает информацию в кабину машиниста на индикатор со светодиодными лампочками, в течение 5 сек. машинист получает информацию о переезде на индикаторе (рис. 6).



- Индикатор в кабине машиниста локомотива. После получения информации о состоянии на переезде в течение 5 сек загорается лампочка соответствующего цвета / Indicator is in the locomotive driver's cab. In 5 sec after receiving the information about the crossing status the light of the corresponding color is switched on



- переезд свободен, нет транспортных средств / crossing is empty, there are no vehicles

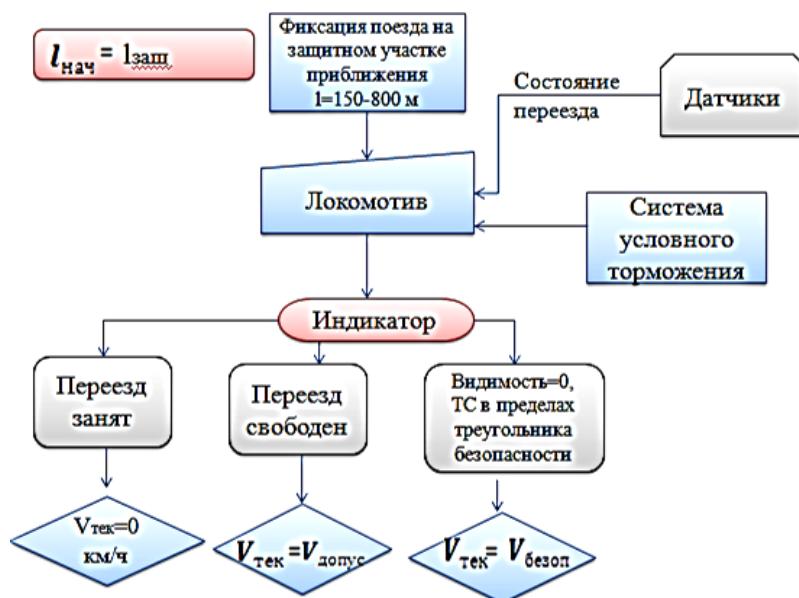


- «прогноз занятости» переезда, транспортное средство находится на расстоянии < 5 м до переезда (движется в сторону зоны конфликта) / crossing occupation prediction, vehicle is in the distance less than 5m from the crossing (moves towards the conflict zone)



- переезд занят, транспортное средство находится на переезде (в зоне конфликта) – ДТП, человеческий фактор, нарушение условий эксплуатации автомобиля / crossing is occupied, vehicle is on the crossing (in the conflict zone) – accident, human factor, vehicle abuse

**Рис. 7. Индикатор состояния переезда (установлен в кабине машиниста локомотива)**  
**Fig. 7. Crossing status indicator (installed in the locomotive driver's cab)**



Примечание / Note. Фиксация поезда на защитном участке приближения / train fixation on the safe approach section; состояние переезда / crossing status; датчики / sensors; переезд занят / crossing is occupied; переезд свободен / crossing is empty; видимость=0, транспортное средство в пределах треугольника безопасности / visibility is 0, vehicle is within the security triangle; индикатор / indicator; локомотив / locomotive; система условного торможения / conditional braking system.

**Рис. 8. Блок-схема алгоритма работы метода условного торможения**  
**Fig. 8. Block diagram of the operation algorithm of the method of conditional braking**



На цифровой карте пути перед каждым неохраняемым и необслуживаемым переездом нанесен виртуальный красный заградительный светофор на защитном расстоянии 150–800 метров (точка Б). Ордината переезда показана в точке А. На защитном участке между точками А и В тормозная система поезда осуществляет автоматическое снижение скорости, если на переезде находится неподвижно транспортное средство (ДТП, авария), в соответствии с заданной программой снижения скорости и текущей путевой ординатой, определенной с помощью аппаратуры ГЛОНАСС (GPS) (кривая 3, рис. 6).

Поле вступления поезда в точку Б с безопасной скоростью комплексное локомотивное устройство безопасности автоматически начинает подавать световой и звуковой сигналы в сторону переезда, оповещает машиниста о необходимости принятия решения с подтверждением бдительности. Путевые датчики передают информацию на индикаторе в кабину машиниста о свободности переезда, машинист проследует через переезд с установленной скоростью (кривая 1, рис. 6).

При нахождении подвижного состава в точке А информация о состоянии переезда через путевые датчики имеет вариативный характер:

**Вариант № 1.** Если переезд занят – транспортное средство находится на переезде (ДТП, нарушение эксплуатации автомобиля на переезде и пр., либо в пределах «треугольника безопасности» имеется автотранспортное средство с очевидными при-

знаками «неадекватного вождения»), то машинист снижает скорость подвижного состава средствами экстренного торможения до полной остановки перед железнодорожным переездом.

**Вариант № 2.** Если переезд «условно» свободен – плохие условия видимости, имеется автотранспортное средство в пределах «треугольника безопасности», то машинист после подтверждения бдительности не вмешивается в процесс ведения поезда и продолжает двигаться с безопасной скоростью. Водитель автотранспортного средства, в данном случае, получает более безопасные и комфортные условия для проследования переезда или принятия решения об остановке перед переездом. После проследования переезда машинист начинает увеличивать скорость до рекомендованного уровня (кривая 2 на рис. 6).

Достоинствами условного метода являются точность передачи координаты подвижного состава, увеличение пропускной способности через железнодорожный переезд. Варианты проследования через переезд по двум случаям (100% свободность или занятность переезда) переносится без подтверждения бдительности машиниста (нет человеческого фактора), система по снижению является более надежной по функционированию. Недостатком является снижение уровня безопасности движения, поскольку при использовании данного метода участвует много звеньев (путевые датчики, GPS, виртуальный заградительный светофор) и нарушение работоспособного состояния любого из них приведет сбою работы всей системы в целом.

## Заключение

На основании опыта России и зарубежных стран вопрос обеспечения безопасности на переездах не изучен, в части автоматизированного снижения скорости подвижного состава на участке приближения к переезду, в зависимости от ситуации на переезде на основе использования средств спутниковой радионавигационной системы

и дополнительных датчиков информации о текущем положении поезда.

При внедрении СРНС будет обеспечена безопасность движения на переездах, а также контроль снижения скорости подвижного состава на участке приближения при наличии препятствия на неохраняемых и необслуживаемых железнодорожных переездах.



Преимущества использования спутниковой радионавигационной системы будут получены следующие результаты:

1) определение местоположения, направления и скорости движения подвижного состава в режиме реального времени;

2) обеспечение автоматического регулирования движения на нерегулируемых и неохраняемых переездах;

3) повышение безопасности движения на малодеятельных участках железной дороги;

4) понижение расходов на содержа-

ние и эксплуатацию железнодорожных переездов на малодеятельных участках железной дороги.

Использование спутниковой системы позволяет увеличить пропускную способность перегонов с переездами за счет перехода к информационно-управляющим системам и контролю дислокации подвижного состава в реальном времени, предотвратить аварии и катастрофы на переездах, обеспечить контроль целостности переезда и доступность системы скорости подвижного состава.

#### Библиографический список

1. Поздняков В.А. Безопасность на железнодорожных переездах [Электронный ресурс]. URL: <http://www.css-rzd.ru/zdm/03-2000/00039.htm>. (24.02.1918).
2. Филюшкина, Т.А. Свою основную задачу сбысты выполнят // Автоматика, связь, информатика. 2014. № 3. С. 2–4.
3. Коваленко В.Н., Катаев М.Н. Современные тенденции автоматизации переездов на железнодорожном транспорте // Инновационный транспорт. 2015. № 3 (17). С. 54–58.
4. Лужицкий О.Ф. Пути снижения аварийности на железнодорожных переездах // Проектирование развития региональной сети железных дорог. 2015. № 3. С. 208–222.
5. Федухин, А.В., Гладков В.А. Муха А.А. Новый подход к автоматизации переездов на железной дороге // Математичні машини і системи, 2011. № 3. 135 с.
6. S.M. Sheikh, Md. Mahbub H., J.R. Khondker, M.R. Gazi. A Radio Based Intelligent Railway Grade Crossing System to Avoid Collision. IJCSI International of Computer Science Issues, 2010. Vol. 7. Issue 6. 139 p.
7. Костаев А.В., Штенгель Ю.Ю. Неохраняемый переезд – зона внедрения современных технологий // Наука и образование транспорту. Самара. 2016. С. 214–216.
8. Верёвкина О.И., Боева А.С. Требования, предъявляемые к обеспечению безопасности движения поездов на переездах, мостах и в тоннелях // Транспорт, наука, образование. 2017. С. 308–311.
9. Комогорцев М.Г, Непомнящих Е.В., Клочков Я.В.,

10. Миненко Е.Ю., Кусморова Ю.А. Оценка мероприятий, повышающих безопасность дорожного движения на железнодорожных переездах // Молодой учёный. 2014. № 20. С. 190–193.
11. Лысенко Н.Н., Державин А.Н. Схема переезда с интенсивным движением автомашин // Мир транспорта. 2017. Т. 15. № 3 (70). С. 188–195.
12. Подскребышева И.А., Седов Д.В. Обеспечение безопасности пересечений автомобильных дорог и железнодорожных путей // Актуальные вопросы транспортной безопасности: материалы Всероссийской науч.-практ. конф. (г. Иркутск, 24 марта 2017 г.). Иркутск, 2014. 2017. С. 58–62.
13. Чернов Ю.В., Маланчева С.Н. Обеспечение безопасности на железнодорожном транспорте // Молодёжная наука и XXI веке: Традиции, инновации, векторы развития: материалы Междунар. науч.-исследовательской конф. молодых ученых, аспирантов, студентов и старшеклассников: в 3 частях. [Самара-Оренбург, 05 апреля 2017 г.]. Самара-Оренбург, 2017. С. 154–155.
14. Баус С.С. Основы и принципы современных систем автоматизации железнодорожных переездов // Транспорт: наука, образование, производство: материалы международной науч.-практ. конф. (г. Ростов-на-Дону, 12–15 апреля 2016 г.). Ростов-на-Дону, 2016, pp. 83–86.

#### References

1. Pozdnyakov V.A. Bezopasnost' na zheleznodorozhnyh pereezdah [Safety at railway grade crossings]. Available at: <http://www.css-rzd.ru/zdm/03-2000/00039.htm>. (24 February 1918).
2. Filyushkina, T.A. The workers of signalisation, centralization and locking gear will perform their main task.

3. Avtomatika, svyaz', informatika [Automation, Communication and Informatics], 2014, no. 3, pp. 2–4. (In Russian).
4. Feduhin, A.V., Gladkov V.A. Muha A.A. A new approach to automation of level crossings on the RAILWAY. Matematichni mashini i sistemi [Mathematical machines Sistemij], 2011, no. 3, 135 p.



6. S.M. Sheikh, Md. Mahbub H., J.R. Khondker, M.R. Gazi. A Radio Based Intelligent Railway Grade Crossing System to Avoid Collision. *IJCSI International of Computer Science Issues*, 2010, vol. 7, issue 6, 139 p.
7. Kostaev, A.V., Shtengel' Yu.Yu. Unguarded moving - zone of introduction of modern technologies. *Nauka i obrazovanie transport* [Science and education transport], 2016, no. 1, pp. 214–216. (In Russian).
8. Veryovkina O.I., Boeva A.S. Requirements to ensure the safe movement of trains at railway crossings, bridges and tunnels. *Trebovaniya, Transport, nauka, obrazovanie* [Transport, science, education], 2017, pp. 308–311. (In Russian).
9. Komogorcev M.G, Nepomnyashchih E.V., Klochkov Ya.V., Maryuhnenko V.S., Kirpichnikov K.A. System on freedom of railway crossings. *Put' i putevye hozyaistvo* [Way and track facilities], 2016, no. 6, pp. 26–28. (In Russian).
10. Minenko E.Yu., Kusmorova Yu.A. Evaluation of measures to improve road safety at level crossings. *Molodoj uchyonij* [Young scientist], 2014, no. 20, pp. 190–193. (In Russian).
11. Lysenko N.N., Derzhavin A.N. Scheme of moving with heavy traffic. *Mir transporta* [The world of transport], 2017, vol. 15, no. 3 (70), pp. 188–195. (In Russian).
12. Podskrebysheva I.A., Sedov D.V. *Obespechenie bezopasnosti pereselenij avtomobil'nyh dorog i zheleznodorozhnyh putej* [Security intersections of automobile roads and Railways]. *Materialov Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Aktual'nye voprosy transportnoj bezopasnosti"* [Topical issues of transport security collection of materials of the all-Russian scientific-practical conference, Irkutsk, 24 March 2017]. Irkutsk, 2017, pp. 58–62. (In Russian).
13. Chernov Yu.V., Malancheva S.N. *Obespechenie bezopasnosti na zheleznodorozhnom transporte* [Security in rail transport]. *Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-issledovatel'skoj konferencii molodyh uchyonij, aspirantov, studentov i starsheklassnikov Molodyozhnaya nauka i XXI veke "Tradicii, innovaci, vektry razvitiya"* [Materials of the International scientific-research conference of young scientists, ASPI-rants, students and high school students. Traditions, innovations, vectors of development of, Samara-Orenburg, April 05, 2017]. Samara-Orenburg, 2017, pp. 154–155. (In Russian).
14. Baus S.S. *Osnovy i principy sovremennoj sistem avtomatizacii zheleznodorozhnyh pereezdov* [Bases and principles of modern systems of automation of railway crossings]. *Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo"* [In the collection: Transport: science, education, production proceedings of the international scientific-practical conference, Rostov-on-Don, 12–15 April 2016]. Rostov-on-Don, 2016, pp. 83–86. (In Russian).
3. Kovalenko V.N., Kataev M.N. Modern trends in automation of level crossings on railway transport. *Innovacionnyj transport* [Innotrans Journal], 2015, no. 3 (17), pp. 54–58. (In Russian).
4. Luzhickij O.F. Methods of reduce the accident rate at railway crossings. *Proektirovanie razvitiya regional'noj seti zheleznyh dorog*. [Designing regional railway network development], 2015, no. 3, pp. 208–222. (In Russian).

#### Критерии авторства

Демьянов В.В., Имарова О.Б., Скоробогатов М.Э. подготовили рукопись, имеют на статью равные авторские права, за plagiat несет ответственность Имарова О.Б.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Authorship criteria

Demyanov V.V., Imarova O.B., Skorobogatov M.E. have prepared the manuscript, have equal author's rights. Imarova O.B. bears the responsibility for plagiarism.

#### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article

УДК 629.421.1

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-231-242>

## АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В СИЛОВЫХ СХЕМАХ ОТЕЧЕСТВЕННОГО МОТОРВАГОННОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

© О.В. Мельниченко<sup>1</sup>, В.С. Иванов<sup>2</sup>

Иркутский государственный университет путей сообщения,  
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

**АННОТАЦИЯ.** Авторами производится анализ применения преобразователей в силовых схемах моторвагонного подвижного состава переменного тока. **ЦЕЛЬ** – провести исторический обзор преобразователей в силовых схемах отечественного моторвагонного подвижного состава переменного тока с коллекторным и асинхронным тяговыми приводами и предложить новую концепцию их развития. Для исследования динамики изменения выпрямительных установок, напрямую зависящую от научно-технического процесса в области силовой электроники, использовался в данной статье **МЕТОД** сравнительного анализа коэффициентов мощности преобразователей моторвагонного подвижного состава, являющийся важным энергетическим показателем как на Российских железных дорогах, так и зарубежных, характеризующий потребление электроэнергии. **РЕЗУЛЬТАТОМ** является выполненный анализ преобразователей отечественного моторвагонного подвижного состава с различными элементными базами, начиная с первых игнитронных установок, применяемых на электропоездах переменного тока с коллекторными тяговыми двигателями серии ЭР7 Рижского вагоностроительного завода, и заканчивая выпрямительно-инверторным преобразователем на базе силовых тиристоров опытного электропоезда серии ЭР29. А также проведено исследование преобразователей асинхронного тягового привода на базе IGBT-тиристоров и IGBT-транзисторов, на примере опытных электропоездов ЭР9А и ЭС250 «Сокол». **ВЫВОДЫ.** Предложена перспективная принципиальная схема электропоезда переменного тока с коллекторными тяговыми электродвигателями и выпрямительно-инверторным преобразователем на базе IGBT-транзисторов, повышающая коэффициент мощности в режиме тяги и рекуперативного торможения в среднем на 22 %.

**Ключевые слова:** моторвагонный подвижной состав, выпрямительная установка, выпрямительно-инверторный преобразователь, тяговый электродвигатель, силовой полупроводниковый прибор, принципиальная схема, игнитрон, кремниевый диод, тиристор, IGBT-транзистор, коэффициент мощности.

**Информация о статье.** Дата поступления 15 февраля 2018 г.; дата принятия к печати 23 марта 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2018 г.

**Формат цитирования.** Мельниченко О.В., Иванов В.С. Анализ применения преобразователей в силовых схемах отечественного моторвагонного подвижного состава переменного тока // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 4. С. 231–242. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-231-242

### ANALYSIS OF CONVERTER APPLICATION IN POWER CIRCUITS OF DOMESTIC AC MULTIPLE UNIT ROLLING STOCK

O.V. Melnichenko, V.S. Ivanov

Irkutsk State Transport University,  
15, Chernyshevsky St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

**ABSTRACT.** The authors analyze the use of converters in the power circuits of AC multiple unit rolling stock. The **PURPOSE** of the study is to carry out a historical review of converters in the power circuits of domestic AC multiple unit rolling stock with commutator and asynchronous traction drives and to propose a new concept of their development. To study

<sup>1</sup>Мельниченко Олег Валерьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроподвижного состава, e-mail: Olegmelnval@mail.ru

Oleg V. Melnichenko, Doctor of technical sciences, Professor, Head of the Department of Electric Rolling Stock, e-mail: Olegmelnval@mail.ru

<sup>2</sup>Иванов Владислав Сергеевич, аспирант, e-mail: Vladislav-Sergeevich-Irgups@mail.ru  
Vladislav S. Ivanov, Postgraduate, e-mail: Vladislav-Sergeevich-Irgups@mail.ru



rectifier variation dynamics, which is directly dependent on the scientific and technical process in the field of power electronics, the article uses the **METHOD** of comparative analysis of power coefficients of multiple unit rolling stock converters which is an important power indicator characterizing electric power consumption both on Russian and foreign railways. The **RESULT** of the study is the analysis of the converters of domestic multiple unit rolling stock with different elemental bases beginning from the first ignitron installations applied on AC electric trains with commutator traction engines of ER7 series of the Riga wagon manufacturer and ending with a power thyristor-based reversible converter of the pilot electric train of ER29 series. Moreover, a study is given to the converters of an asynchronous traction drive based on IGCT-thyristors and IGBT-transistors on example of the pilot electric trains ER9A and ES250 "Falcon". **CONCLUSIONS.** A promising schematic circuit of an AC electric train with commutator traction electric motors and an IGBT-transistor-based reversible converter is proposed. It increases the power factor by an average of 20 % in the traction mode and regenerative braking.

**Keywords:** multiple unit rolling stock (MURS), rectifier unit (RU), reversible converter (RC), traction electric motor (TEM), power semiconductor device (PSD), schematic circuit, ignitron, silicon diode, thyristor, IGBT transistor, power factor

**Information about the article.** Received February 15, 2018; accepted for publication March 23, 2018; available online April 30, 2018.

**For citation.** Melnichenko O.V., Ivanov V.S. Analysis of converter application in power circuits of domestic AC multiple unit rolling stock. Proceeding of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 4, pp. 231–242. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-231-242

## Введение

Моторвагонный подвижной состав (МВПС) предназначен для перевозки пассажиров в пригородном сообщении на электрифицированных линиях железных дорог и является одним из востребованных транспортных средств, от технического уровня, которого зависит коэффициент подвижности населения, характеризующий уровень развития регионов Российской Федерации.

В настоящее время к МВПС, эксплуатируемому на железных дорогах нашей страны, предъявляются особые требования, основные из них<sup>3</sup>:

- обеспечение безопасности движения;
- низкое потребление электроэнергии;
- наличие рекуперативного торможения;
- обеспечение высоких ускорений и замедлений, вследствие частых остановок на коротких перегонах;

### Принципиальные схемы моторвагонного подвижного состава переменного тока с коллекторными тяговыми двигателями

Начиная с 50-х годов прошлого столетия Рижский вагоностроительный завод (РВЗ) реализовывал проектировку и по-

– обеспечение диагностики функций машиниста и управляющих систем;

В настоящее время на железных дорогах нашей страны эксплуатируется МВПС технический уровень которого морально устарел ввиду того, что технологии, которые используются на данных электропоездах были предложены еще в 60-х годах прошлого столетия. А выпускавший на сегодняшний день МВПС Демиховским машиностроительным заводом (ДМЗ) уступает зарубежным аналогам по причине использования в данных электропоездах устаревшей элементной базы в выпрямительной установке (ВУ).

Для того чтобы сегодня предложить усовершенствованный МВПС для пригородного сообщения авторами статьи рассмотрены предыдущие поколения электропоездов с их достоинствами и недостатками.

стройку первых электропоездов, технический уровень которых непрерывно повышался [1]. По мере развития полупроводни-

<sup>3</sup>ГОСТ Р 55434-2013 Электропоезд. Общие технические требования / GOST R 55434-2013 Electric Trains. General specifications.



ковых приборов производилось усовершенствование схем силовых цепей и цепей управления МВПС.

В 1954 г. инженеры и конструкторы завода «Динамо» имени С.М. Кирова спроектировали эскизы электрического оборудования для первого советского электропоезда переменного тока ЭР7-01 с ВУ на базе игнитронов ИС-400/5 с воздушным охлаждением, соединенных по мостовой схеме, запитывающей ТЭД РТ-51 номинальной мощностью 200 кВт [2]. Принципиальная силовая схема электропоезда ЭР7 с ВУ на базе игнитронов представлена на (рис. 1).

Достоинствами ВУ на базе игнитронов является обеспечение плавного регулирования выпрямленного напряжения, путем управления моментом зажигания основной дуги вентиля; незначительное падение напряжения на вентиле, что обеспечивает высокий коэффициент полезного действия 98–99%.

Однако после нескольких лет эксплуатационной работы электропоезда ЭР7-01, был выявлен ряд недочетов в ВУ. При движении состава происходили частые пропуски зажигания в игнитронах, по причине сильных вибрации электропоезда. Также спустя некоторое время, инженеры электропоезда столкнулись с проблемой фазировки системы управления игнитронами.

До начала 1960-х гг. ртутные игнитроны оставались наиболее массово распространенными выпрямителями ввиду отсутствия эффективных альтернатив, имея при этом ряд существенных недостатков: большая масса и габариты конструкции; трудность обеспечения герметичности полупроводниковых приборов в условиях вибрации подвижного состава; необходимость поддержания температуры выпрямителей в узких пределах 35–38 °C, что требовало применять громоздкую систему масляного или водяного охлаждения; для работы игнитрона необходим источник достаточно мощных импульсов зажигания; в случае прожога корпуса игнитрона выпрямитель приводил к загрязнению окружающей среды и возможности отравления парами ртути людей. Коэффициент мощности электропоезда с дан-

ной ВУ составлял 0,86.

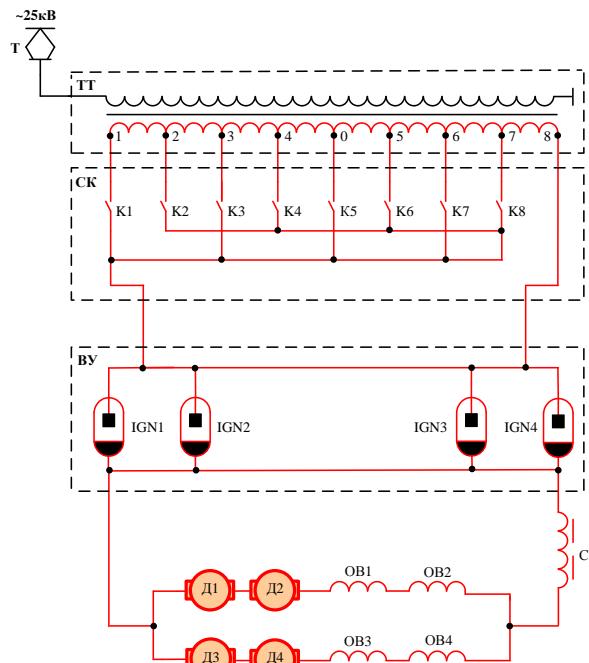
При появлении кремниевых силовых полупроводниковых приборов (СПП), игнитронные выпрямительные установки стали неизбежно вытесняться полупроводниковыми на базе кремниевых диодов.

В мае 1961 г. Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ) под руководством доктора технических наук Б.Н. Тихменева совместно с заводом «Динамо» имени С.М. Кирова произвели модернизацию электропоезда ЭР7-01, с заменой игнитронов ИС-200/5 на кремниевые диоды ВЛ200-12-0.68 с сохранением мостовой схемы соединения выпрямителей и основного электрического оборудования [3]. Принципиальная силовая схема электропоезда ЭР7 с ВУ на базе кремниевых диодов представлена на рис. 2.

Достоинствами ВУ на базе диодов относительно игнитронов являются: значительное сокращение выходов из строя ВУ, за счет высокой надежности диодов; меньшие массогабаритные показатели, и др.

Однако со временем тяговый привод второго поколения с ВУ на базе диодов проявил следующие недостатки: относительно низкая величина коэффициента мощности моторвагона, которая составляет 0.86, что говорит о значительном потреблении реактивной мощности из сети; ступенчатое регулирование напряжения; наличие габаритного силового контроллера; для обеспечения плавного регулирования питающего напряжения на тяговых двигателях при работе МВПС необходимо большое количество рабочих позиций, что характеризуется увеличенным количеством выводов тягового трансформатора, вследствие чего это приводит к увеличенным массогабаритным показателям, расходу меди, стоимости и др.

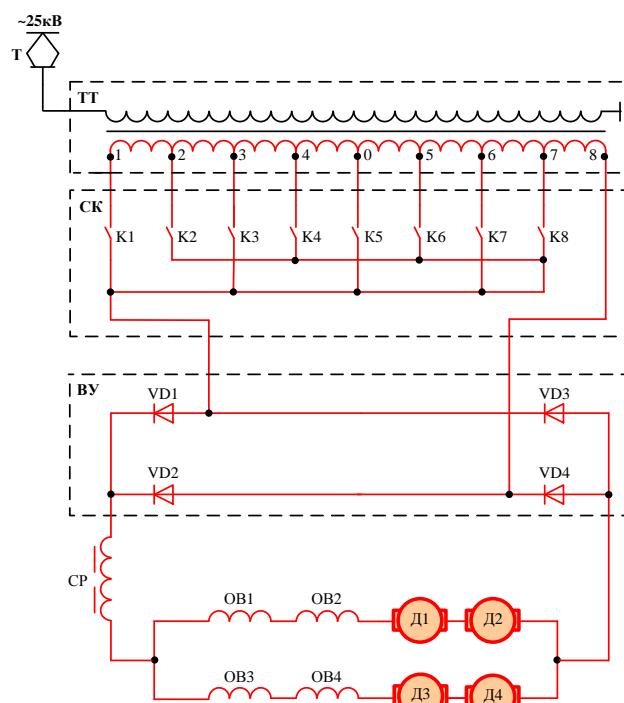
Третье поколение тягового привода основывается на появлении СПП – тиристоров. Данные силовые полупроводниковые приборы обеспечивают не только выпрямление переменного тока, но и плавное регулирование напряжения двигателей, а также обратный выпрямлению процесс – инвертирование постоянного тока в переменный, что



Примечание / Note. Т – токоприемник/ current collector; ТТ – тяговый трансформатор/ traction transformer; СК – силовой контроллер/ power controller; ВУ – выпрямительная установка/ rectifying unit; СР –сглаживающий реактор / smoothing inductor; Д1-Д4 – обмотка якорная ТЭД/ armature winding of the traction motor; ОВ1-ОВ4 – обмотка возбуждения ТЭД/ excitation winding of the traction motor

**Рис. 1. Принципиальная схема электропоезда серии ЭР7 с выпрямительной установкой на базе игнитронов**

**Fig. 1. Schematic circuit of an electric train of ER7 series with an ignitron-based rectifying unit**



Примечание / Note. Т – токоприемник / current collector; ТТ – тяговый трансформатор / traction transformer; СК – силовой контроллер/ power controller; ВУ – выпрямительная установка / rectifying unit; СР –сглаживающий реактор / smoothing inductor; Д1-Д4 – обмотка якорная ТЭД/ armature winding of the traction motor; ОВ – обмотка возбуждения ТЭД/ excitation winding of the traction motor

**Рис. 2. Принципиальная схема электропоезда серии ЭР7 с выпрямительной установкой на базе кремниевых диодов**

**Fig. 2 Schematic circuit of an electric train of ER7 series with a silicon diode-based rectifying unit**

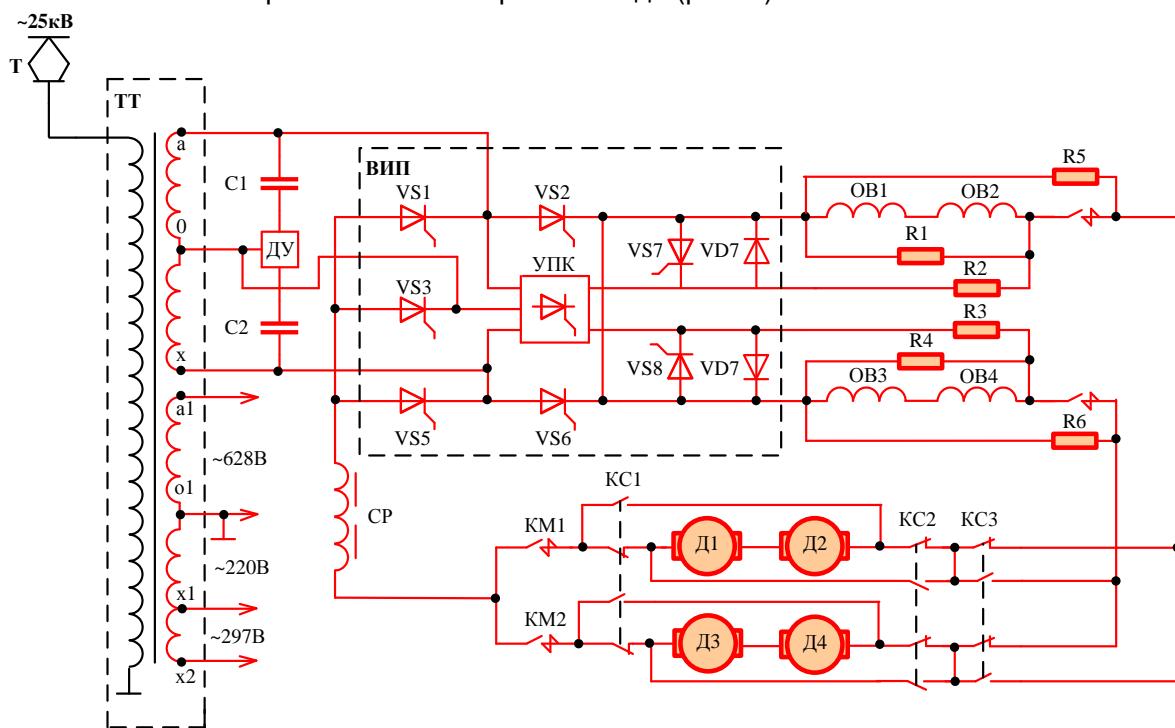


дает возможность моторвагонному подвижному составу применять ресурсосберегающий режим – рекуперативное торможение.

В 1967 г. сотрудниками Отделения электрификации ВНИИЖТа моторный электровагон № 02 двухвагонной опытной секции серии ЭР7 был впервые в Советском Союзе оборудован для экспериментальных целей плавным бесконтактным регулированием выпрямленного напряжения и рекуперативным торможением с использованием тиристоров. Для опытной секции были разработаны силовая схема, схема управления моторным вагоном, схема управления тиристорным преобразователем и тиристорным возбудителем, система их защиты. Были изготовлены и смонтированы силовой преобразователь, преобразователь возбудителя, дополнительные блоки управления и защиты. Ученые ВНИИЖТ сделали вывод, что разработанную и исследованную аппаратуру бесконтактного выпрямительно-инвер-

торного преобразователя на тиристорах целесообразно применить как на электровозах, так и на электропоездах переменного тока [4, 5].

Спустя более пятнадцати лет Советский Союз продолжил разработку МВПС с выпрямительно-инверторным преобразователем (ВИП) на базе тиристоров. С конвейеров Рижского вагоностроительного завода (РВЗ) в конце 1985 г. вышел опытный электропоезд переменного тока ЭР29. Главной особенностью электропоезда являлось применение импульсно-фазового регулирования (РИФ) напряжения на тяговых электродвигателях (ТЭД) [6, 7]. Данная система преобразования была разработана инженерами ВНИИЖТ, с целью снижения искажающего воздействия на форму напряжения в контактной сети и уменьшения реактивной мощности, за счет искусственной коммутации тиристоров в конце каждого полупериода (рис. 3).



Примечание / Note. Т – токоприемник / current collector; ТТ – тяговый трансформатор/ traction transformer; ВИП – выпрямительно-инверторный преобразователь/reversible converter; СР – слаживающий реактор / smoothing inductor; УПК – узел принудительной коммутации/ node of forced commutation; ДУ – демпферное устройство / damper device; Д1-Д4 – обмотка якорная ТЭД / armature winding of the traction motor; ОВ1-ОВ4 – обмотка возбуждения ТЭД / excitation winding of the traction motor

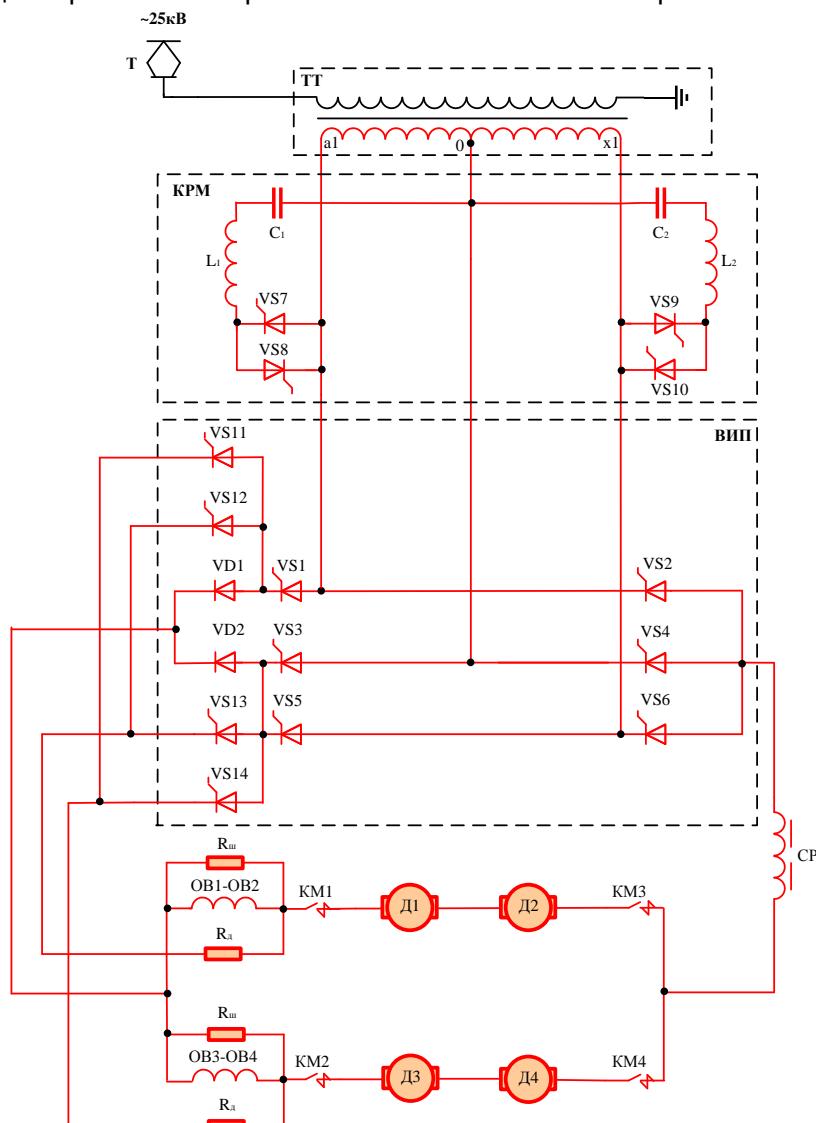
**Рис. 3. Принципиальная схема опытного электропоезда ЭР29 с выпрямительно-инверторным преобразователем на базе тиристоров при импульсно-фазовом регулировании напряжения**  
**Fig. 3. Schematic circuit of the experimental electric train ER29 with a thyristor-based reversible converter under pulse-phase control of voltage**



Однако система импульсно-фазового регулирования на электропоезде работала неустойчиво. Вследствие чего, во второй половине 1989 г, в депо Фастов Юго-Западной железной дороги инженерами Рижский электромашиностроительный завод (РЭЗ) и Всесоюзного научно-исследовательского института вагоностроения (ВНИИВ) была произведена замена данной системы, на тиристорные ВИП с компенсаторами реактивной мощности, (рис 4) [8].

В период с апреля по ноябрь 1991 г.

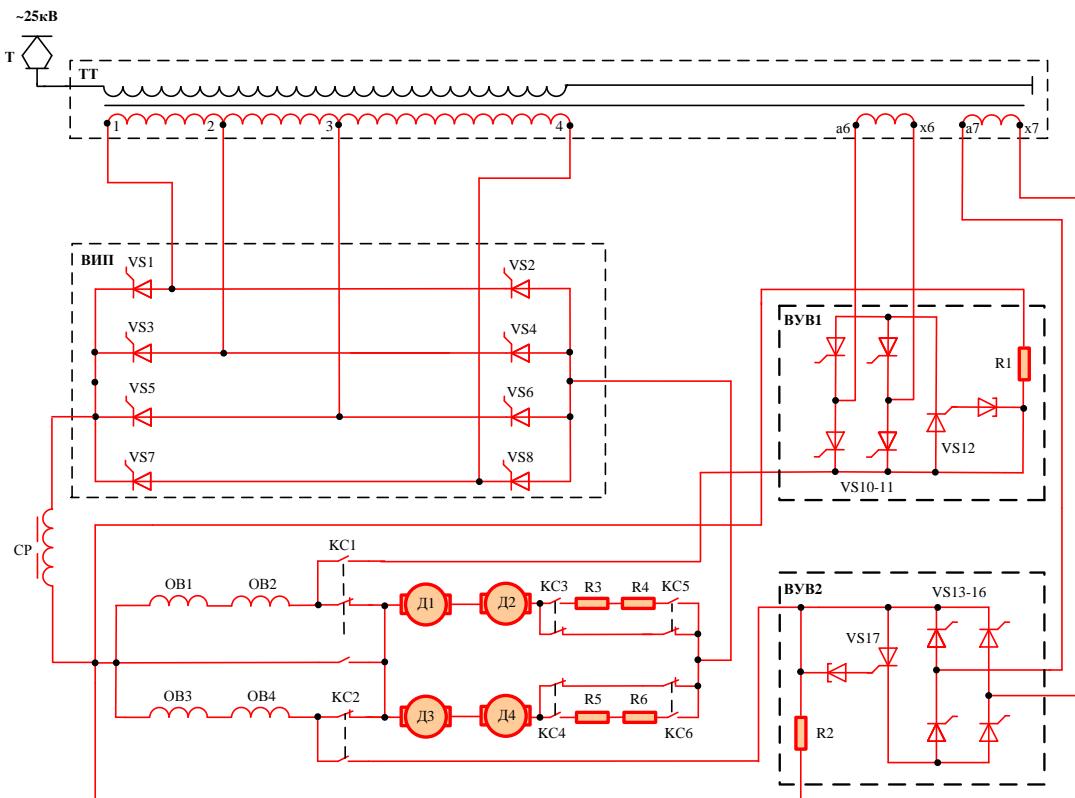
примерно 60% времени электропоезд ЭР29 находился в эксплуатации с пассажирами либо в поездных испытаниях, 30% времени простоявал в депо в результате неисправностей элементов силовой схемы, системы управления, вспомогательного оборудования и 10% времени – простой для выполнения вспомогательных работ. За указанный период эксплуатации были заменены два тяговых двигателя. Трижды зафиксированы неисправности в цепях КРМ, в результате чего с сентября 1991 г. они были отключены



Примечание / Note. Т – токоприемник/ current collector; ТТ – тяговый трансформатор / traction transformer; КРМ – компенсатор реактивной мощности / reactive power compensator; ВИП – выпрямительно-инверторный преобразователь / reversible converter; СР – слаживающий реактор / smoothing inductor; Д1-Д4 – обмотка якорная ТЭД / armature winding of the traction motor; ОВ1-ОВ4 – обмотка возбуждения ТЭД/ excitation winding of the traction motor.

Рис. 4. Принципиальная схема опытного электропоезда ЭР29 с выпрямительно-инверторным преобразователем на базе тиристоров при зонно-фазовом регулировании напряжения

Fig. 4. Schematic circuit of the experimental electric train ER29 with a thyristor-based reversible converter under zone-phase control of voltage



Примечание / Note. Т – токоприемник/ current collector; ТТ – тяговый трансформатор/ traction transformer; ВИП – выпрямительно-инверторный преобразователь/reversible converter; СР – сглаживающий реактор/ smoothing inductor; Д1-Д4 – обмотка якорная ТЭД/ armature winding of the traction motor; ОВ1-ОВ4 – обмотка возбуждения ТЭД/ excitation winding of the traction motor; ВУВ1-ВУВ2 – выпрямительная установка возбуждения/ rectifier excitation unit

**Рис. 5. Принципиальная схема электропоезда ЭД9Э с выпрямительно-инверторным преобразователем на базе тиристоров при зонно-фазовом регулировании напряжения**  
**Fig. 5. Schematic circuit of the electric train ER9E with a thyristor-based reversible converter under zone-phase control of voltage**

и в дальнейшем опытный поезд работал без КРМ. Средний коэффициент мощности составил с КРМ в режиме тяги 0,93–0,94, в режиме рекуперативного торможения 0,79–0,8, (без КРМ 0,72–0,76 и 0,44–0,50 соответственно), вследствие чего работы по внедрению электропоезда ЭР29 в серийном производстве были прекращены.

И только в 2012 году завод Демиховский машиностроительный завод возобновил производство электропоездов переменного тока серии ЭД9Э с тиристорными ВИП и коллекторными тяговыми двигателями (рис. 5). За основу выпрямительно-инверторного преобразователя было использовано техническое решение подобно электровозу серии ВЛ80Р, серийный выпуск которого начался еще с 1973 г.

На сегодняшний день ДМЗ было выпущено 62 электропоезда данной серии, и продолжается до настоящего времени, в виде выпуска электропоезда серии ЭП3Д, являющийся модифицированной версией ЭД9Э, отличающаяся обновленной кабиной машиниста с крэш-системой.

Однако ВИП на базе тиристоров имеет и ряд недостатков: значительное потребление электроэнергии на тягу электропоездов, примерно на 3% выше чем на МВПС на базе диодов; вызывает высокочастотные искажающие воздействия на контактную сеть, что снижает надежность работы электрооборудования. Коэффициент мощности МВПС с тиристорной базой составляет 0,84 в максимальном его проявлении. Кроме того, данный СПП в настоящее время является морально устаревшим.



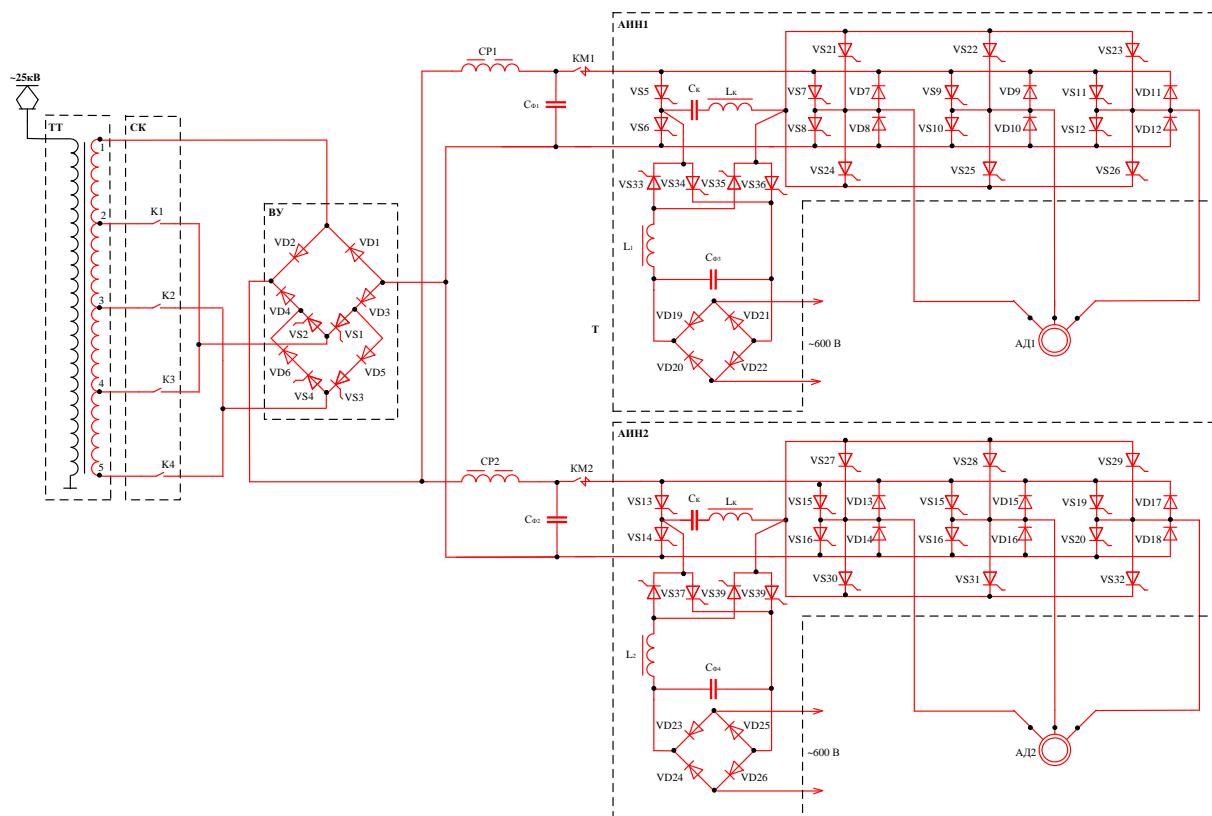
## Принципиальные схемы моторвагонного подвижного состава переменного тока с асинхронным тяговым приводом

В качестве тягового двигателя, как в нашей стране, так и за рубежом, применяются коллекторные машины постоянного или пульсирующего тока. Такие электродвигатели обладают хорошими пусковыми и регулировочными свойствами, а также возможностью получения частоты вращения более 3000 об/мин. В то же время они имеют и недостатки, такие как: низкая надежность коллекторно-щеточного узла (КЩУ); повышенный расход цветного металла и повышенные расходы на техническое обслуживание в условиях эксплуатации и ремонта [9]. Устранение вышеуказанных недостатков возможно при переходе на асинхронные тяговые двигатели (АТД).

Начиная с 1967 г. Всероссийский научно-исследовательский институт элек-

тромеханики (ВНИИЭМ) производил испытания двухвагонной секции электропоезда ЭР9П-134 (рис. 5).

На одной из тележек моторной секции была произведена замена коллекторных тяговых двигателей на асинхронные машины ЭТА-200, с сохранением внешних габаритно-установочных размеров остова предыдущего электродвигателя РТ-51Д. В выпрямительную установку модели УПВ-1 были добавлены тиристорные плечи для реализации плавного межступенчатого регулирования выпрямленного напряжения [10]. Далее однофазно-постоянный ток поступал в автономный инвертор напряжения, который в свою очередь преобразовывал его в трехфазный ток переменной частоты (от 1 до 100 Гц), питающий асинхронные тяговые электродвигатели (рис. 6).



Примечание / Note. Т – токоприемник / current collector; ТТ – тяговый трансформатор / traction transformer; ВУ – выпрямительная установка/ rectifier unit; АИИ1-АИИ2 – автономный инвертор напряжения / autonomous voltage inverter; СР1-СР2 – сглаживающий реактор / smoothing inductor; АД1-АД2 – асинхронный двигатель / asynchronous motor.

Рис. 6. Принципиальная схема опытного электропоезда ЭР9А  
Fig. 6. Schematic circuit of the experimental electric train ER9A



Сотрудниками кафедры «Электрические машины» Ленинградского института инженеров железнодорожного транспорта был разработан проект дооборудования опытного электропоезда системой рекуперативного торможения, который так и не был осуществлен. Электропоезд не был выпущен в эксплуатационную работу из-за сложной системы преобразования электрической энергии которая работала с низкой надежностью, а также трудности обеспечения параллельности работы асинхронных ТЭД.

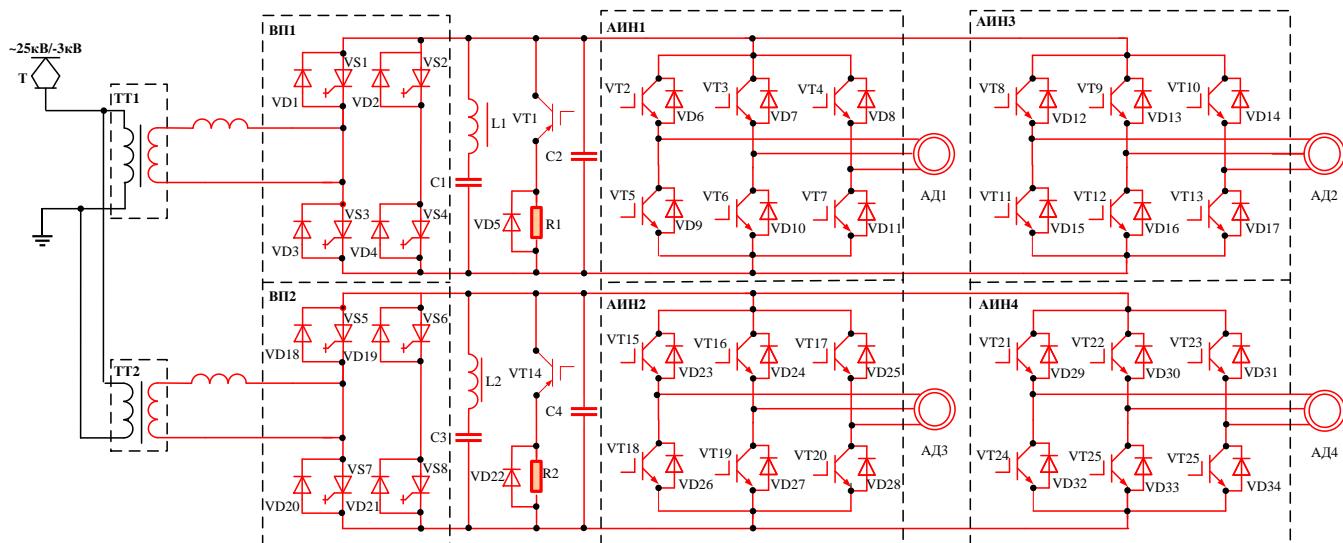
Пятое поколение тягового привода на основе АД появилось с момента появления входных преобразователей на базе запираемых тиристоров, совместно работающих с автономными инверторами напряжения на базе биполярных транзисторов с изолированным затвором (БТИЗ) (англ. IGBT, Insulated Gate Bipolar Transistor). IGBT-транзистор – это трехэлектродный силовой электронный прибор, используемый, в основном, как мощный электронный ключ в источниках питания, инверторах и системах управления электрическими приводами.

БТИЗ имеет следующие достоинства: способность к управляемому запиранию; низкий уровень управляемой мощности от полевых транзисторов с изолированным затвором; малые потери в открытом со-

стоянии при больших токах и высоких напряжениях и др.

Начиная с 1988 по 1990 гг. в Советском Союзе проводились активные обсуждения создания высокоскоростного моторвагонного подвижного состава. В марте 1991 года было принято решение Государственной экспертной комиссии Госплана СССР о целесообразности создания проекта высокоскоростной магистрали (ВСМ) на направлении Ленинград – Москва. Реализацию проекта было поручено осуществлять Российскому открытому акционерному обществу «Высокоскоростные магистрали» (РАО ВСМ).

Спустя 9 лет РАО ВСМ выпустила опытный высокоскоростной электропоезд ЭС250 «Сокол-250» двойного питания (рис 7). Для электропоезда «Сокол» был разработан тяговый преобразователь с встроенной диагностикой на два рода тока (25 кВ, 50 Гц и 3 кВ постоянного тока). Преобразователь создан на элементной базе пятого поколения. Входной преобразователь (в режиме переменного тока – четырехквадратный преобразователь, в режиме постоянного тока – импульсный прерыватель) выполнен на IGCT-тиристорах 4500 В, 4000 А. Инверторы выполнены на IGBT-транзисторах 3,3 кВ, 1200 А. Для преобразователя



Примечание / Note. Т – токоприемник / current collector; ТТ1-ТТ2 – тяговые трансформаторы / traction transformers; ВП1-ВП2 – входные преобразователи / input converters; АИН1-АИН4 – автономные инверторы напряжения / autonomous voltage inverters; АД1-АД4 – асинхронные двигатели / asynchronous motors

Рис. 7. Принципиальная схема высокоскоростного электропоезда ЭС250  
Fig. 7. Schematic circuit of the high-speed electric train ES250



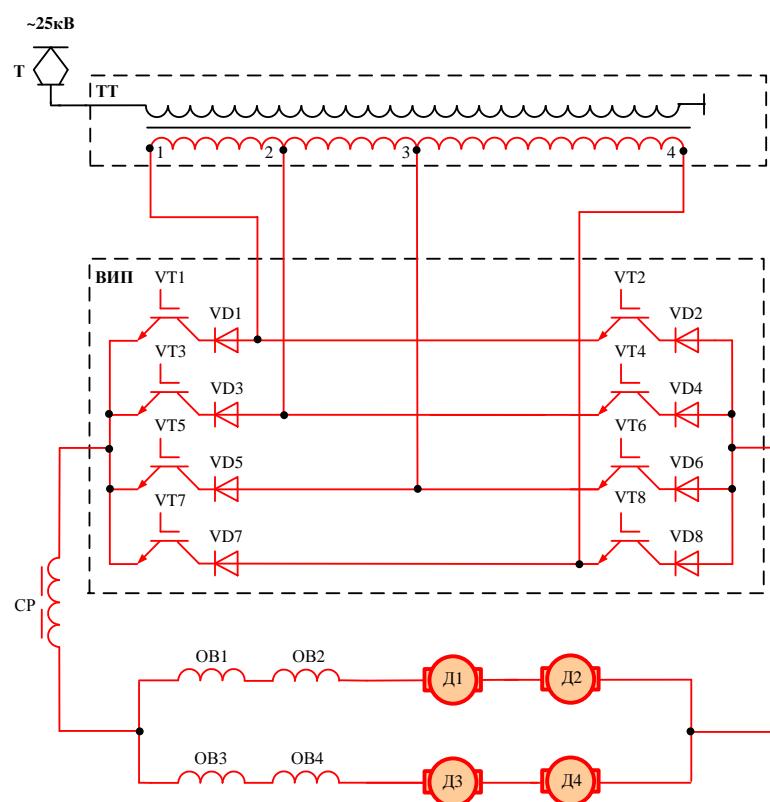
разработана высокоэффективная жидкостная система охлаждения, которая позволяет реализовывать на этой элементной базе мощность до 2700 кВт [11].

Инверторы выполнены на IGBT-транзисторах фирмы HITACHI. Преобразователи 4QS выполнены на полностью управляемых тиристорах IGCT фирмы ABB.

В связи с использованием в преобразователях 4QS тиристоров IGCT частота широтноимпульсной модуляции принята сравнительно низкой. В частности, при выполнении проектных работ она была принята равной 450 Гц. В процессе испытаний частота ШИМ была увеличена до 900 Гц.

Коэффициент мощности электропоездов с данными преобразовательными установками составляет 0,96–0,98. Однако, данный МВПС имеет сложные системы преобразования электрической энергии и управления тяговым приводом.

В настоящее время асинхронный тяговый привод используется в основном на скоростных и высокоскоростных электропоездах зарубежных производителей, таких как компанией Siemens AG и Alstom, а также на МВПС Российского концерна «Уральские локомотивы», созданного группой Синара и Siemens AG. Электропоезда серии ЭВС1 и ЭВС2 «САПСАН», Sm6 «АЛЛЕГРО», ЭС1 и ЭС2Г «ЛАСТОЧКА» производящиеся данными компаниями, эксплуатируются как правило в центральных регионах нашей страны, где возможна реализация высоких скоростей движения поездов. Цена таких электропоездов для многих регионов недоступная. Для многих субъектов РФ цена на такие электропоезда является недоступной, к тому же на большинстве участков железных дорог средняя скорость составляет 50 км/ч. Поэтому нецелесообразно приобретать скоростной МВПС.



Примечание / Note. Т – токоприемник/ current collector; ТТ – тяговый трансформатор/ traction transformer; ВИП – выпрямительно-инверторный преобразователь/ reversible converter; СР – сглаживающий реактор/ smoothing inductor; Д1-Д4 – обмотка якорная ТЭД/ armature winding of the traction motor; ОВ1-ОВ4 – обмотка возбуждения ТЭД/ excitation winding of the traction motor.

**Рис. 8. Принципиальная, предлагаемая схема электропоезда переменного тока с выпрямительно-инверторным преобразователем на базе IGBT-транзисторов**

**Fig. 8. Proposed principle circuit of an AC electric train with an IGBT transistor-based reversible converter**

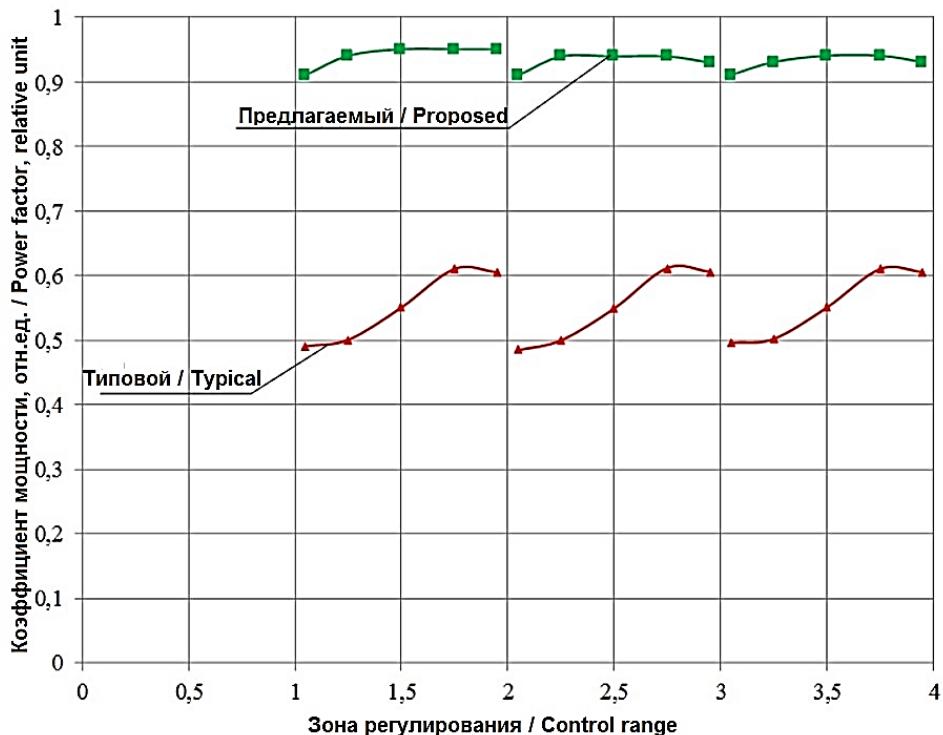


Рис. 9. Зависимость коэффициента мощности от зоны регулирования в типовом и предлагаемом ВИП электропоезда в режиме рекуперативного торможения

Fig. 9. Power factor dependence on the control range in the typical and proposed converter of an electric train in the regenerative braking mode

### Разработанное авторами техническое решение

Исходя из условий эксплуатационной работы, современный МВПС требует особого внимания на стадии проектировки. Необходимо учесть ряд требований излагаемые в ГОСТ-55434-2013, основные из них являются:

- коэффициент мощности МВПС должен быть не ниже 0,95 (для МВПС с асинхронными двигателями);
- наличие рекуперативного торможения;
- низкий расход электроэнергии.

С учетом основных недостатков современных электропоездов с коллекторным тяговым приводом, авторами разработана силовая электрическая принципиальная схема МВПС. Вместо морально устаревших тиристорных преобразователей, используемых на МВПС переменного тока с коллекторным тяговым приводом, использовать ВИП на базе IGBT-транзисторов (рис. 8) с новыми способами их управления в режимах тяги и рекуперативного торможения, позволяющие получить коэффициенты

мощности не ниже, чем у МВПС с асинхронными двигателями. Для этого были разработаны макеты блока управления (БУ) и ВИП на базе IGBT-транзисторов [12].

В лабораторных условиях были проведены испытания макета ВИП на базе IGBT-транзисторов, которые показали повышение коэффициента мощности в режиме рекуперативного торможения в среднем на 22 % (рис. 9).

Кроме того, применение данной системы позволит получить экономию оборудования и материалов. Силовая схема моторвагона при предлагаемой модернизации упрощается, т.к. исключаются главные и тормозные контроллеры, линейные контакторы и др., на общую сумму 800 тыс. руб. Таким образом, годовая экономия денежных средств от снижения расхода электроэнергии и упрощения оборудования составляет 1,056 млн руб. на одну секцию моторвагона. Срок окупаемости предлагаемой модернизации не превысит 3-х лет.



**Библиографический список**

1. Гут В.А. Преобразовательные устройства электропоездов переменного тока: Учебное пособие для учащихся образовательных учреждений ж.-д. транспорта, осуществляющих профессиональную подготовку. – М.: Маршрут, 2006. – 54с.
2. Электропоезд переменного тока ЭР7 / М.Т. Глушков, К.Б. Гончаров // Электрическая и тепловозная тяга, 1961, №4.
3. Электросекция переменного тока с кремниевыми выпрямителями / Б.Н. Тихменев, В.Д. Радченко // Электрическая и тепловозная тяга, 1965, №8.
4. Экспериментальная моторвагонная секция переменного тока с бесконтактным тиристорным преобразователем / Л.Д. Капустин, М.Л. Перцовский // Сб. трудов ЦНИИ МПС, вып. 388. М., Транспорт, 1968.
- 5 Автоматизация управления электроподвижным составом переменного тока с тиристорными преобразователями / Л.Д. Капустин, В.Г. Карпов // Сб. трудов ЦНИИ МПС, вып. 416. М., Транспорт, 1970.
6. Электрооборудование электропоезда ЭР29 / Ю.М. Гальперни, А.П. Доценко, Ю.Н. Дымант и др. // Электрическая и тепловозная тяга, 1988, №1.
7. Электроподвижной состав с импульсным преобразователем / А.В. Каменев, А.Л. Лисицин // Железные дороги мира, 1983, №11.
8. Опытный электропоезд ЭР29. Результаты тягово-энергетических испытаний / Б.И. Хомяков, С.И. Меркушев, О.Н. Назаров, А.П. Савельев, А.В. Шилакин, А.К. Яголковский // Электрическая и тепловозная тяга, 1991, №12.
9. Электромеханика: учебно-методический комплекс / сост.: Е.П. Брандина, О.М. Вальц, В.И. Рябуха, А.А. Томов. СПб.: Изд-во СЗТУ, 2008. –193 с.
10. Опытная двухвагонная электросекция с асинхронными тяговыми двигателями / В.А. Раков, Н.А. Сергеев // Локомотив, 1992, №5.
11. Высокоскоростной поезд нового поколения «Сокол» / В.М.Саввов // Железнодорожный транспорт, 2000, №5.
12. Выпрямительно-инверторный преобразователь на базе IGBT-транзисторов для моторвагонного подвижного состава / В.С. Иванов, О.В. Мельниченко, А.О. Линьков, В.В. Дурных // Scientific research-2017, 2017.

**References**

1. Gut V. A. Converting devices of AC electric trains: Textbook for students of professional educational institutions of railway transport. – M.: The Route, 2006. 54p. (In Russian)
2. AC electric train ER7 / M. T. Glushkov, K. B. Goncharov // Electric and diesel traction, 1961, no. 4
3. AC electrical multiple unit with silicon rectifiers / B.N. Tikhmenev, V. D. Radchenko // Electric and diesel traction, 1965, no.8. (In Russian)
4. Experimental multiple unit section of alternating current with a contactless thyristor converter / L.D. Kapustin, M.L. Pertsovsky // Proceedings of the Central Research Institute of the Ministry of Railway Engineering, issue 388. M., Transport, 1968. (In Russian)
5. Automation of AC rolling stock control with thyristor converters / L. D. Kapustin, Karpov, V. G. // Proceedings of the Central Research Institute of the Ministry of Railway Engineering, issue 416. M., Transport, 1970. (In Russian)
6. Electrical equipment of the electric train ER29 / Y.M Galpern, A. P. Dotsenko, Y.N. Dimant etc. // Electric and Diesel Traction, 1988, no. 1. (In Russian)
7. Electric rolling stock with a pulsed converter / A.V. Kamenev, A. L. Lisitsyn // World Railways, 1983, no.11. (In Russian)
8. Pilot electric train ER29. Results of traction-power tests / B.I. Khomyakov, S.. Merkushev, O.N. Nazarov., A.P. Saveliev, A.V. Shilkin, A.K. Galkowski // Electric and Diesel Traction, 1991, no.12. (In Russian)
9. Electrical engineering: learning and teaching support kit / materials developers: E.O. Brandine, O.M. Walz, V.I. Ryabukha, A.A. Tomov. Saint-Petersburg. Publishing house of North-West Technical University, 2008. 193 p. (In Russian)
10. Pilot two-car electric multiple unit with asynchronous traction engines / V.A Rakov, N.A. Sergeev // Locomotive, 1992, no.5 (In Russian)
11. High speed train of a new generation “Sokol” / V.M. Savov // Railway Transport, 2000, no.5.
12. Reversible converter on the basis of IGBT-transistors for multiple unit rolling stock / V.S. Ivanov, O.V. Melnichenko, A.O. Linkov, V. V. Durnyh // Scientific research-2017, 2017.

**Критерии авторства**

Мельниченко О.В., Иванов В.С. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за plagiat.

**Authorship criteria**

Melnichenko O.V., Ivanov V.S. have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interests**

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article

УДК 656.1

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-243-252>

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВТОТРАНСПОРТНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ ГРУЗОВ В МЕЖДУГОРОДНОМ СООБЩЕНИИ ДЛЯ ТЕКУЩЕГО ПЛАНИРОВАНИЯ

© Л.С. Трофимова<sup>1</sup>, Н.Г. Певнев<sup>2</sup>

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),  
644080, Российская Федерация, г. Омск, пр-т Мира, 5.

**РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ.** Сделан акцент на современные экономические условия, требующие от руководителей принятия управленических решений, направленные на выполнение условий договоров при перевозке грузов в международном сообщении. Целью исследования является разработка математической модели функционирования автотранспортного предприятия для выполнения условий договоров и получения прибыли за счет взаимосвязи коммерческой и технической эксплуатации при перевозке грузов в международном сообщении. **МЕТОДЫ.** Математическая модель разработана в рамках новой концепции методологии текущего планирования работы грузового автотранспортного предприятия, она учитывает взаимосвязь коммерческой и технической эксплуатации и позволяет рассматривать функционирование автотранспортного предприятия при перевозке грузов в международном сообщении как вероятностный процесс. В математической модели целевая функция представляет собой эффект от выполнения условий договоров. Экономическая эффективность текущего планирования работы автотранспортного предприятия оценивается величиной прибыли. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Для практической реализации разработанной математической модели использовалось созданное авторами программно-математическое обеспечение. Было установлено, что прибыль при перевозке грузов в международном сообщении, рассчитанная по разработанной математической модели на 10,8% (1281170 руб.) больше прибыли, рассчитанной по применяемой методике трансфинплана. **ВЫВОДЫ.** Разработанная математическая модель позволила представить функционирование автотранспортного предприятия как вероятностный процесс, для которого рассчитываются плановые показатели коммерческой и технической эксплуатации по верхней и нижней границам доверительного интервала математического ожидания длины ездки с грузом в международном сообщении с вероятностью 0,95 и по верхней и нижней границам доверительного интервала математического ожидания массы отправки груза в международном сообщении.

**Ключевые слова:** автотранспортное предприятие, вероятностный процесс, международные перевозки грузов, математическое моделирование.

**Информация о статье.** Дата поступления 12 февраля 2018 г.; дата принятия к печати 26 марта 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2018 г.

**Формат цитирования.** Трофимова Л.С., Певнев Н.Г. Математическая модель функционирования автотранспортного предприятия при перевозке грузов в международном сообщении для текущего планирования // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 4. С. 243–252. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-243-252

## MATHEMATICAL MODEL OF MOTOR TRANSPORT ENTERPRISE OPERATION UNDER LONG DISTANCE CARGO TRANSPORTATION FOR CURRENT PLANNING

L.S. Trofimova, N.G. Pevnev

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),  
5 Mira pr., Omsk, 644080, Russian Federation

<sup>1</sup>Трофимова Людмила Семеновна, кандидат технических наук, доцент кафедры организации перевозок и управления на транспорте, e-mail: trofimova\_ls@mail.ru

Lyudmila S. Trofimova, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Transportation Organization and Transport Management, e-mail: trofimova\_ls@mail.ru

<sup>2</sup>Певнев Николай Гаврилович, доктор технических наук, профессор кафедры эксплуатации и ремонта автомобилей, e-mail: pevnev\_n@mail.ru

Nikolay G. Pevnev, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Vehicle Maintenance and Repair, e-mail: pevnev\_n@mail.ru



**ABSTRACT. PURPOSE.** The article focuses on modern economic conditions that require the managers to make managerial decisions aimed at fulfilling the contract terms when long-distance cargo hauling. The purpose of the study is to develop a mathematical model of motor transport enterprise (MTE) operation for contract term fulfillment and profit making through the interrelation of commercial and technical exploitation in long-distance cargo hauling. **METHODS.** The mathematical model is developed within a new methodological conception of current planning of freight MTE operation considering the interrelation of commercial and technical exploitation and allowing to treat the MTE operation when long distance hauling of freight as a probabilistic process. The objective function of the model is the effect of contract terms fulfillment. The economic efficiency of the current planning of MTE operation is estimated by the amount of profit. **RESULTS.** A mathematical software developed by the authors has been used for practical implementation of the proposed mathematical model. It was found out that the profit under long-distance transportation of goods calculated on the basis of the developed mathematical model is by 10.8% (1281170 rubles) greater than the profit calculated by the applied technique of the technical transportation financial plan. **CONCLUSIONS.** The developed mathematical model allowed to present the MTE operation as a probabilistic process for which the planned indices of commercial and technical exploitation are calculated for the upper and lower confidence limits of the mathematical expectation of the loaded long-distance cargo haulage with the probability of 0.95 and by the upper and lower confidence limits of mathematical expectation of the weight of long distance cargo shipment.

**Keywords:** *motor transport enterprise, probabilistic process, long-distance cargo hauling, mathematical modeling*

**Information about the article.** Received February 12, 2018; accepted for publication March 26, 2018; available online April 30, 2018.

**For citation.** Trofimova L.S., Pevnev N.G. Mathematical model of motor transport enterprise operation under long distance cargo transportation for current planning. Proceeding of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 4, pp. 243–252. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-243-252

## Введение

Результаты ранее выполненных исследований по текущему планированию позволили установить, что план при перевозке грузов в городах и план при перевозке грузов в междугородном сообщении составляются раздельно. Установлено, что в современных условиях показатели коммерческой эксплуатации – выработка, пробег и показатели технической эксплуатации – количество и трудоемкость плановых технических обслуживаний зависят от технико-эксплуатационного показателя – длины «ездки» с грузом.

В условиях неопределенного спроса величина длины ездки с грузом является случайной и распределена по логарифмически-нормальному закону<sup>3</sup> [1]. Экспериментальные исследования позволили доказать, что выработка при перевозке грузов в междугородном сообщении зависит от массы отправки груза для конкретного подвижного состава [2].

Анализ практики работы автотранспортного предприятия (АТП) не выявил математической модели, позволяющей осуществить текущее планирование с учетом взаимосвязи коммерческой и технической эксплуатации, рассматривая функционирование АТП при перевозке грузов в междугородном сообщении как вероятностный процесс.

Современные экономические условия заставляют руководителей принимать управленческие решения, направленные на обеспечение требований к условиям договоров. Поэтому на современном научном уровне решение проблемы текущего планирования работы АТП предполагает разработку нового концептуального подхода, связанного с учетом взаимосвязи коммерческой и технической эксплуатации, рассматривая функционирование АТП при перевозке грузов в междугородном сообщении как вероятностный процесс.

<sup>3</sup>Анохин В.В. Совершенствование методики планирования работы грузового автотранспортного предприятия с учетом взаимосвязи коммерческой и технической эксплуатации: дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2017. 136 с. / Anokhin V.V. Improving the methodology for planning freight transport enterprise operation taking into account the interrelation of commercial and technical operation: Candidate Dissertation in technical science: Omsk, 2017. 136 p.



## Математическая модель функционирования автотранспортного предприятия при перевозке грузов в междугородном сообщении для текущего планирования

В математической модели целевая функция представляет собой эффект от выполнения условий договоров, что представлено формулой (1). Разработанные математические модели призваны дать оценку эффективности функционирования коммерческой и технической эксплуатации грузового АТП при выполнении условий договоров. Согласно результатам исследования, наиболее универсальным среди методов оценки экономической эффективности для текущего планирования работы АТП является метод, основанный на расчете годовой прибыли<sup>3</sup>.

В разработке математической модели применялся подход, изложенный в работах [3, 4], предполагающий использование булевой переменной назначения единицы подвижного состава по ее технической готовности, который подробно описан в работах<sup>3,4</sup> [5].

Выработка и общий пробег рассчитываются по верхней и нижней границам доверительного интервала математического ожидания длины ездки с грузом в междугородном сообщении с вероятностью 0,95 и по верхней и нижней границам доверительного интервала математического ожидания массы отправки на каждом временном шаге и в целом за год с использованием формул (5), (19), (20)–(24).

В математической модели выработка и общий пробег определяются путем расчета целого числа ездок за месяц по формуле (7). Плановое количество ездок рассчитывается с использованием верхней и нижней границ доверительного интервала математического ожидания длины ездки с грузом для конкретного типоразмера подвижного состава с доверительной вероятностью 0,95.

Выработка подвижного состава определяет затраты на оплату труда водителей, формула (27). Общий пробег подвижного состава применяется при расчете затрат на смазочные материалы, топливо, шины, выполнение технического обслуживания и текущего ремонта, формулы (25), (26), (28).

В математической модели функционирования АТП при перевозке грузов в междугородном сообщении формируются комбинации из имеющихся единиц подвижного состава при условии:

- соответствия выработки подвижного состава для найденной комбинации объема, который определяется спросом на перевозку грузов в городе и в междугородном сообщении по кварталам в соответствии с договорами, как представлено в формуле (4);

- выполнения условий договоров технически исправным подвижным составом, что проверяется соответствием трудоемкости плановых работ по ТО-1, ТО-2 и ТР трудоемкости, обеспечивающей безопасность движения согласно Федеральному закону «О безопасности дорожного движения» и «Положению о техническом обслуживании и ремонте подвижного состава автомобильного транспорта», как представлено в формуле (13);

- соответствие времени на перевозку грузов в междугородном сообщении по выбранному режиму рабочего времени и времени отдыха водителей, как представлено в формуле (12). Режимы рабочего времени и времени отдыха водителей определяются согласно приказу Министерства транспорта Российской Федерации от 20 августа 2004 г. № 15 «Об утверждении положения об особенностях режима рабочего времени и времени отдыха водителей автомобилий».

В разработанной математической модели определяются: количество ТО-1, ТО-2 и их периодичность, соответственно, по формулам (15), (16), (17), (18). Трудоемкость ТО-1, ТО-2+ТР рассчитывается по формуле (13).

<sup>4</sup>Иванов В.Н. Концепция эффективного использования парка машин дорожно-строительных организаций: дис. ... д-ра техн. наук. Омск, 2006. 417 с. / Ivanov V. N. The concept of effective use of the machinery fleet of road construction companies. Doctoral Dissertation in technical sciences: Omsk, 2006. 417 p.



В математической модели рассчитываются затраты на смазочные материалы, топливо, шины с учетом накладных расходов, оплату труда водителей с отчислениями, выполнение технического обслуживания и текущего ремонта. Рассчитывается величина амортизационных отчислений на полное восстановление подвижного состава грузового АТП. В накладных расходах предусмотрены затраты на калибровку тахографов, которые необходимы для соблюдения грузовыми АТП «Основных требований по обеспечению безопасности дорожного движения к юридическим лицам и индивидуальным предпринимателям при осуществлении ими деятельности, связанной с эксплуатацией транспортных средств» согласно Федерального закону № 196 «О безопасности дорожного движения», для выполнения приказа Министерства транспорта Российской Федерации № 273 «Об оснащении транспортных средств тахографами». Для соблюдения постановления Правительства Российской Федерации от 14 июня 2013 года № 504 «О взимании платы в счет возмещения вреда, причиняемого автомобильным дорогам общего пользования федерального значения транспортными средствами, имеющими разрешенную максимальную массу свыше 12 тонн» в накладных расходах предусмотрены затраты на систему «Платон». Для расчета используются формулы (25)–(28).

Приведем математическую модель функционирования автотранспортного предприятия при перевозке грузов в междугородном сообщении для текущего планирования:

$$\mathcal{E}_m = \sum_{i=1}^I \Pi_{mi} \rightarrow \max, \quad (1)$$

где  $\mathcal{E}_m$  – эффект за год от работы АТП, полученный от выполнения условий договоров при перевозке грузов в междугородном сообщении, руб.;  $i$  – номер договора на перевозку грузов в междугородном сообщении;  $I$  – количество рассматриваемых договоров на перевозку грузов в междугородном сообщении;  $\Pi_{mi}$  – эффект от выполнения условий  $i$ -го договора на перевозку грузов в междугородном сообщении за год, руб.

$$\Pi_{mi} = \sum_{t=0}^4 (R_{mi,t} - Z_{mi,t}), \quad i = \overline{1, I}, \quad (2)$$

где  $t$  – текущий временной шаг в кварталах для расчета эффекта при перевозке грузов в междугородном сообщении;  $R_{mi,t}$  – результат от выполнения условий  $i$ -го договора на перевозку грузов в междугородном сообщении на  $t$ -м временном шаге расчета, руб.;  $Z_{mi,t}$  – затраты на выполнение условий  $i$ -го договора на перевозку грузов в междугородном сообщении на  $t$ -м временном шаге расчета, руб.

$$R_{mi,t} = [\sum_{x=1}^X \min_{j=1,J} (Q_{mei,x,j} \cdot n_{mi,x,j})] \cdot D_{mi,t} \cdot C_{mi,t}, \quad i = \overline{1, I}; \quad t = \overline{0, 4}, \quad (3)$$

где  $x$  – порядковый номер единицы подвижного состава в АТП, предназначеннной для перевозки грузов в междугородном сообщении;  $X$  – количество единиц подвижного состава в АТП, предназначенных для перевозки грузов в междугородном сообщении;  $j$  – индекс типоразмера подвижного состава, предназначенного для перевозки грузов в междугородном сообщении;  $J$  – количество типоразмеров подвижного состава, предназначенных для перевозки грузов в междугородном сообщении;  $Q_{mei,x,j}$  – выработка за месяц  $x$ -й единицей подвижного состава  $j$ -го типоразмера при выполнении условий  $i$ -го договора на перевозку грузов в междугородном сообщении, т;  $n_{mi,x,j}$  – булева переменная назначения с учетом возможности применения  $x$ -й единицы подвижного состава  $j$ -го типоразмера для выполнения условий  $i$ -го договора на перевозку грузов



в междугородном сообщении,  $n_{Mi,x,j} = \overline{0,1}$ ,  $n_{Mi,x,j} = \text{int}(n_{Mi,x,j})$ ;  $D_{Mi,t}$  – планируемое количество месяцев работы подвижного состава для выполнения условий  $i$ -го договора на перевозку грузов в междугородном сообщении на  $t$ -м временном шаге расчета, учитывая сезонность;  $C_{Mi,t}$  – величина тарифа на перевозку груза в междугородном сообщении по  $i$ -му договору на  $t$ -м временном шаге расчета, руб./т.

$$\sum_{x=1}^X \min_{j=1,J} (Q_{Mei,x,j} \cdot n_{Mi,x,j}) \geq \frac{Q_{mPli,t}}{D_{Mi,t}}, \quad i = \overline{1, I}; \quad t = \overline{0, 4}, \quad (4)$$

где  $Q_{mPli,t}$  – объем перевозок в тоннах по  $i$ -му договору в соответствии со спросом на перевозку грузов в междугородном сообщении на  $t$ -м временном шаге расчета.

$$Q_{Mei,x,j} = Z_{emi,x,j} \cdot (M_{Moj} \pm \delta_{Moj}), \quad i = \overline{1, I}; \quad x = \overline{1, X}; \quad j = \overline{1, J}, \quad (5)$$

где  $Z_{emi,x,j}$  – количество ездок за месяц  $x$ -й единицы подвижного состава  $j$ -го типоразмера при выполнении условий  $i$ -го договора на перевозку грузов в междугородном сообщении, ед.;  $Z_{emi,x,j} = \text{int}(Z_{emi,x,j})$ ;  $M_{Moj}$  – математическое ожидание массы отправки груза, распределенной по нормальному закону для подвижного состава  $j$ -го типоразмера, т;  $\delta_{Moj}$  – полуширина доверительного интервала математического ожидания массы отправки груза для подвижного состава  $j$ -го типоразмера, т.

$$\delta_{Moj} = \sigma_{Moj} \cdot S^{-1}(P_{\Delta}; m_{Moj}), \quad j = \overline{1, J}, \quad (6)$$

где  $\sigma_{Moj}$  – среднее квадратическое отклонение массы отправки груза для подвижного состава  $j$ -го типоразмера, т;  $P_{\Delta}$  – доверительная вероятность,  $P_{\Delta} = 0,95$ ;  $m_{Moj}$  – количество значений массы отправки груза для подвижного состава  $j$ -го типоразмера, ед.;  $S^{-1}$  – обращенное значение функции Стьюдента.

$$Z_{emi,x,j} = \left[ \frac{\Phi PB_{i,x,j} - d_{Mi,x,j}}{t_{\text{земi},x,j} + t_{\text{беземi},x,j}} \right], \quad i = \overline{1, I}; \quad x = \overline{1, X}; \quad j = \overline{1, J}, \quad (7)$$

где  $\Phi PB_{i,x,j}$  – время работы в месяц  $x$ -й единицы подвижного состава  $j$ -го типоразмера для выполнения условий  $i$ -го договора на перевозку грузов в междугородном сообщении в соответствии с режимом работы погрузочно-разгрузочных пунктов, ч;  $d_{Mi,x,j}$  – продолжительность простоя в ТО  $x$ -й единицы подвижного состава  $j$ -го типоразмера при выполнении условий  $i$ -го договора на перевозку грузов в междугородном сообщении в соответствии с графиком выполнения ТО, ч;  $t_{\text{земi},x,j}$  – время на перевозку грузов в соответствии с выбранным режимом труда и отдыха, способом организации работы водителя  $x$ -й единицы подвижного состава  $j$ -го типоразмера при выполнении условий  $i$ -го договора, ч;  $t_{\text{беземi},x,j}$  – время возврата без груза в соответствии с выбранным режимом труда и отдыха, способом организации работы водителя  $x$ -й единицы подвижного состава  $j$ -го типоразмера при выполнении условий  $i$ -го договора, ч.

$$t_{\text{земi},x,j} = \frac{e^{f_{Moj}} \pm e^{h_{Moj}}}{V_{T_M}} + t_{nemix,j} + t_{eci,x,j} + t_{eni,x,j}, \quad i = \overline{1, I}; \quad x = \overline{1, X}; \quad j = \overline{1, J}, \quad (8)$$



где  $e$  – основание натурального логарифма;  $f_{mj}$  – степень числа  $e$  для определения математического ожидания длины ездки с грузом в междугородном сообщении, распределенной по логарифмически-нормальному закону для подвижного состава  $j$ -го типоразмера, км;  $h_{mj}$  – степень числа  $e$  для определения среднего квадратического отклонения длины ездки с грузом в междугородном сообщении, распределенной по логарифмически-нормальному закону для подвижного состава  $j$ -го типоразмера, км;  $V_{Tm}$  – средняя техническая скорость, используемая для текущего планирования в АТП при перевозке грузов в междугородном сообщении, км/ч;  $t_{\text{пем},x,j}$  – время погрузки и выгрузки с учетом норм на выполнение погрузочно-разгрузочных операций для  $x$ -й единицы подвижного состава  $j$ -го типоразмера и соответствующего механизма при выполнении условий  $i$ -го договора на перевозку грузов в междугородном сообщении, ч.;  $t_{\text{епи},x,j}$  – время специальных перерывов для отдыха водителя от управления в пути и на конечных пунктах при перевозке грузов в междугородном сообщении  $x$ -й единицей подвижного состава  $j$ -го типоразмера при выполнении условий  $i$ -го договора, ч;  $t_{\text{епи},x,j}$  – время для отдыха и питания водителя при перевозке грузов в междугородном сообщении  $x$ -й единицей подвижного состава  $j$ -го типоразмера при выполнении условий  $i$ -го договора, ч.

$$f_{mj} = \sum_{k=1}^K l_{mkj} \cdot p_{mkj}, \quad j = \overline{1, J}; \quad (9)$$

$$h_{mj} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K l_{mkj}^2 \cdot p_{mkj} - (\sum_{k=1}^K l_{mkj} \cdot p_{mkj})^2}{m_{mj} - 1}} \cdot S^{-1}(P_{\Delta}; m_{mj}), \quad j = \overline{1, J}, \quad (10)$$

где  $k$  – номер интервала длины ездки с грузом в междугородном сообщении;  $K$  – количество интервалов длин ездок с грузом в междугородном сообщении, ед.;  $m_{mj}$  – количество значений длин ездок с грузом в междугородном сообщении для подвижного состава  $j$ -го типоразмера, ед.;  $l_{mkj}$  – значение длины ездки с грузом в междугородном сообщении подвижного состава  $j$ -го типоразмера для середины  $k$ -го интервала, км;  $p_{mkj}$  – вероятность попадания исследуемых значений длины ездки с грузом в междугородном сообщении подвижного состава  $j$ -го типоразмера в  $k$ -й интервал.

$$t_{\text{бсм},i,x,j} = \frac{e^{f_{mj}} \pm e^{h_{mj}}}{V_{Tm}} + t_{\text{бс},i,x,j} + t_{\text{бн},i,x,j}, \quad i = \overline{1, I}; \quad x = \overline{1, X}; \quad j = \overline{1, J}, \quad (11)$$

где  $t_{\text{бс},i,x,j}$  – время специальных перерывов для отдыха водителя от управления в пути и на конечных пунктах при возврате без груза  $x$ -й единицы подвижного состава  $j$ -го типоразмера для выполнения условий  $i$ -го договора в междугородном сообщении, ч;  $t_{\text{бн},i,x,j}$  – время для отдыха и питания водителя при возврате без груза  $x$ -й единицей подвижного состава  $j$ -го типоразмера для выполнения условий  $i$ -го договора в междугородном сообщении, ч.

$$t_{\text{гем},i,x,j} \leq t_{\text{ycmi},x,j}; \quad i = \overline{1, I}, \quad x = \overline{1, X}; \quad j = \overline{1, J}, \quad (12)$$

где  $t_{\text{ycmi},x,j}$  – требуемое время на перевозку грузов в междугородном сообщении по  $i$ -му договору  $x$ -й единицей подвижного состава  $j$ -го типоразмера, ч.



$$n_{mi,x,j} = \begin{cases} 1, \text{ если} & \begin{cases} (N_{TO-1mi,x,j} \cdot u_{TO-1m,j}) \geq y_{TO-1mi,x,j}; \\ (N_{TO-2mi,x,j} \cdot u_{TO-2,TPm,j}) \geq y_{TO-2,TPm,x,j}; \end{cases} \\ 0 \text{ в противном случае}, & \end{cases}$$

$$i = \overline{1, I}; \quad x = \overline{1, X}; \quad j = \overline{1, J}, \quad (13)$$

где  $N_{TO-1mi,x,j}$ ,  $N_{TO-2mi,x,j}$  – количество воздействий для  $x$ -й единицы подвижного состава  $j$ -го типоразмера при выполнении условий  $i$ -го договора на перевозку грузов в междугородном сообщении, соответственно, по ТО-1, ТО-2, ед.;  $N_{TO-1mi,x,j} = \text{int}(N_{TO-1mi,x,j})$ ,  $N_{TO-2mi,x,j} = \text{int}(N_{TO-2mi,x,j})$ ;  $u_{TO-1m,j}$ ,  $u_{TO-2,TPm,j}$  – трудоемкость одного воздействия с учетом коэффициентов корректирования нормативов трудоемкости для  $j$ -го типоразмера при перевозке грузов в междугородном сообщении, соответственно, по ТО-1, ТО-2 и ТР, чел.·ч;  $y_{TO-1mi,x,j}$ ,  $y_{TO-2,TPm,x,j}$  – необходимая трудоемкость для  $x$ -го подвижного состава  $j$ -го типоразмера при выполнении условий  $i$ -го договора на перевозку грузов в междугородном сообщении, соответственно, по ТО-1, ТО-2 и ТР, чел.·ч.

$$T_{общm} \geq \sum_{x=1}^X (y_{TO-1mi,x,j} + y_{TO-2,TPm,x,j}), \quad j = \overline{1, J}; \quad i = \overline{1, I}, \quad (14)$$

где  $T_{общm}$  – общая трудоемкость работ, которые планируется выполнить на специализированных ремонтных предприятиях для подвижного состава, осуществляющего перевозку грузов в междугородном сообщении, человеко-час.

$$N_{TO-1mi,x,j} = \frac{L_{годmi,x,j}}{W_{TO-1mi,x,j}}, \quad i = \overline{1, I}; \quad x = \overline{1, X}; \quad j = \overline{1, J}; \quad (15)$$

$$N_{TO-2mi,x,j} = \frac{L_{годmi,x,j}}{W_{TO-2mi,x,j}}, \quad i = \overline{1, I}; \quad x = \overline{1, X}; \quad j = \overline{1, J}, \quad (16)$$

где  $L_{годmi,x,j}$  – годовой пробег  $x$ -й единицы подвижного состава  $j$ -го типоразмера при выполнении условий  $i$ -го договора на перевозку грузов в междугородном сообщении, км;  $W_{TO-1mi,x,j}$ ,  $W_{TO-2mi,x,j}$  – нормативная периодичность для  $x$ -й единицы подвижного состава  $j$ -го типоразмера при выполнении условий  $i$ -го договора на перевозку грузов в междугородном сообщении с учетом условий эксплуатации, соответственно, по ТО-1, ТО-2, км.

$$W_{TO-1mi,x,j} = W_{0_{мTO-1x,j}} \cdot K_1 \cdot K_3, \quad i = \overline{1, I}; \quad x = \overline{1, X}; \quad j = \overline{1, J}, \quad (17)$$

$$W_{TO-2mi,x,j} = W_{0_{мTO-2x,j}} \cdot K_1 \cdot K_3, \quad i = \overline{1, I}; \quad x = \overline{1, X}; \quad j = \overline{1, J}, \quad (18)$$

где  $W_{0_{мTO-1x,j}}$  – нормативный пробег до ТО-1  $x$ -й единицы подвижного состава  $j$ -го типоразмера при перевозке грузов в междугородном сообщении, км;  $W_{0_{мTO-2x,j}}$  – нормативный пробег до ТО-2  $x$ -й единицы подвижного состава  $j$ -го типоразмера при перевозке грузов в междугородном сообщении, км;  $K_1$  – коэффициент корректирования нормативов в зависимости от условий эксплуатации;  $K_3$  – коэффициент корректирования нормативов в зависимости от природно-климатических условий.



$$L_{mei,x,j} = Z_{emi,x,j} \cdot (e^{f_j} \pm e^{h_j}) \cdot 2 + l_{hi,x,j}, \quad i = \overline{1, I}; \quad x = \overline{1, X}; \quad j = \overline{1, J}, \quad (19)$$

где  $L_{mei,x,j}$  – общий пробег за месяц  $x$ -й единицы подвижного состава  $j$ -го типоразмера при выполнении условий  $i$ -го договора на перевозку грузов в междугородном сообщении, км;  $l_{hi,x,j}$  – нулевые пробеги  $x$ -й единицы подвижного состава  $j$ -го типоразмера при выполнении условий  $i$ -го договора на перевозку грузов в междугородном сообщении, км.

$$L_{годm,x,j} = \sum_{t=0}^4 ((Z_{emi,x,j} \cdot (e^{f_j} \pm e^{h_j}) \cdot 2 + l_{hi,x,j}) \cdot D_{mi,t}), \quad i = \overline{1, I}; \quad x = \overline{1, X}; \quad j = \overline{1, J}, \quad (20)$$

где  $L_{годm,x,j}$  – общий пробег за год  $x$ -й единицы подвижного состава  $j$ -го типоразмера при выполнении условий  $i$ -го договора на перевозку грузов в междугородном сообщении, км.

$$L_{годm}^{ATP} = \sum_{i=1}^I \sum_{x=1}^X L_{годm,x,j}, \quad j = \overline{1, J}, \quad (21)$$

где  $L_{годm}^{ATP}$  – годовой пробег для АТП при перевозке грузов в междугородном сообщении, км.

$$Q_{годm}^{ATP} = \sum_{t=0}^4 \sum_{i=1}^I \left( \sum_{x=1}^X \min_{j=1, J} (Q_{mei,x,j} \cdot n_{mi,x,j}) \right) \cdot D_{mi,t}, \quad j = \overline{1, J}, \quad (22)$$

где  $Q_{годm}^{ATP}$  – годовая выработка в тоннах по АТП при перевозке грузов в междугородном сообщении.

$$P_{mei,x,j} = Q_{mei,x,j} \cdot (e^{f_{mj}} \pm e^{h_{mj}}), \quad i = \overline{1, I}, \quad x = \overline{1, X}; \quad j = \overline{1, J}, \quad (23)$$

где  $P_{mei,x,j}$  – выработка за месяц  $x$ -й единицей подвижного состава  $j$ -го типоразмера при выполнении условий  $i$ -го договора на перевозку грузов в междугородном сообщении, т·км.

$$P_{годm}^{ATP} = \sum_{t=0}^4 \sum_{i=1}^I \left( \sum_{x=1}^X (P_{mei,x,j}) \cdot D_{mi,t} \right), \quad j = \overline{1, J}, \quad (24)$$

где  $P_{годm}^{ATP}$  – выработка АТП при перевозке грузов в междугородном сообщении за год, т·км.

$$Z_{mi,t} = U_{mi,t} + F_{mi,t} + G_{mi,t} + A_{mi,t}, \quad i = \overline{1, I}; \quad t = \overline{0, 12}, \quad (25)$$

где  $U_{mi,t}$  – затраты на топливо, шины, систему «Платон» с учетом накладных расходов на  $t$ -м временном шаге расчета при выполнении условий  $i$ -го договора на перевозку грузов в междугородном сообщении, руб.;  $F_{mi,t}$  – затраты на оплату труда водителей с отчислениями при выполнении условий  $i$ -го договора на перевозку грузов в междугородном сообщении на  $t$ -м временном шаге расчета, руб.;  $G_{mi,t}$  – затраты на выполнение технического обслуживания и текущего ремонта при выполнении условий  $i$ -го договора на перевозку грузов в междугородном сообщении на  $t$ -м временном шаге расчета, руб.;  $A_{mi,t}$  – амортизационные отчисления на полное



восстановление подвижного состава при выполнении условий  $i$ -го договора на перевозку грузов в междугородном сообщении на  $t$ -м временном шаге расчета, руб.

$$U_{mi,t} = \sum_{x=1}^X (Z_{em i,x,j} \cdot (e^{f_j} \pm e^{h_j}) \cdot 2 + l_{mi,x,j}) \cdot D_{mi,t} \cdot M_{mi,t}, \quad j = \overline{1, J}; \quad i = \overline{1, I}; \quad t = \overline{0, 4}, \quad (26)$$

где  $M_{mi,t}$  – цена за топливо, шины, систему «Платон» с учетом накладных расходов на  $t$ -м временном шаге расчета при выполнении условий  $i$ -го договора на перевозку грузов в междугородном сообщении руб./км.

$$F_{mi,t} = \sum_{x=1}^X (t_{gem i,x,j} + t_{bemi,x,j}) \cdot f_{mi,t}, \quad j = \overline{1, J}; \quad i = \overline{1, I}; \quad t = \overline{0, 4}, \quad (27)$$

где  $f_{mi,t}$  – часовая тарифная ставка оплаты труда водителей на  $t$ -м временном шаге расчета при выполнении условий  $i$ -го договора на перевозку грузов в междугородном сообщении, руб./ч.

$$G_{mi,t} = \sum_{j=1}^J (N_{TO-1mi,x,j} \cdot u_{TO-1mi,x,j} \cdot a_{TO-1mi,x,j}) + \sum_{j=1}^J (N_{TO-2mi,x,j} \cdot u_{TO-2,TPmi,x,j} \cdot a_{TO-2,TPmi,x,j}),$$

$$j = \overline{1, J}; \quad i = \overline{1, I}; \quad t = \overline{0, 4}, \quad (28)$$

где  $a_{TO-1mi,j,t}$ ,  $a_{TO-2,TPmi,j,t}$  – стоимость 1 человеко-часа выполнения технического воздействия для подвижного состава  $j$ -го типоразмера на  $t$ -м временном шаге расчета при перевозке грузов в междугородном сообщении, соответственно, по ТО-1, ТО-2, ТР руб./чел.·ч.

Для практического применения математической модели разработано программное обеспечение «Текущее планирование работы автотранспортного предприятия при перевозке грузов в междугородном сообщении».

По результатам выполненной экономической оценки было установлено, что прибыль при перевозке грузов в междугородном сообщении с применением разработанной математической модели на 10,8% (1281170 руб.) больше прибыли, полученной с применением методики трансфинплана.

## Заключение

1. Разработана математическая модель функционирования АТП при перевозке грузов в междугородном сообщении, позволяющая осуществить текущее планирование для выполнения условий договоров и получения прибыли АТП за счет взаимосвязи коммерческой и технической эксплуатации.

3. Функционирование АТП в созданной математической модели представлено как вероятностный процесс, для которого рассчитываются плановые показатели коммерческой и технической эксплуатации по верхней и нижней границе доверительного интервала математического ожидания длины ездки с грузом в междугородном сообщении с вероятностью 0,95 и по верхней и нижней границе доверительного интервала математического ожидания массы отправки груза в междугородном сообщении.

3. Математическая модель функционирования АТП при перевозке грузов в междугородном сообщении позволяет формировать комбинации из имеющихся в АТП единиц подвижного



состава для выполнения условий договоров и получения прибыли АТП за счет взаимосвязи коммерческой и технической эксплуатации.

5. Разработанная математическая модель позволяет определить величины затраты на выполнение условий договоров, в том числе затраты на калибровку тахографов и на систему «Платон».

6. Реализация математической модели в практике работы АТП позволит получить большую прибыль, чем прибыль, рассчитанную по применяемой методике тахтрансфинплана.

#### **Библиографический список**

1. Трофимова Л.С. Результаты исследования изменения длины ездки с грузом в междугород-ном сообщении // Проблемы исследования систем и средств автомобильного транспорта: ма-териалы Междунар. очно-заочной науч.-техн. конф. (Тула, 24 ноября 2017). Тула, 2017. Вып. 2. С. 245–251.
2. Трофимова Л.С. Влияние фактической массы отправки груза на результаты планирования работы автотранспортного предприятия // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 3. С. 184–192. <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2017-3-184-192>.
3. Пермяков В.Б., Иванов В.Н. Математическая модель оптимизации структуры парка машин дорожно-строительной организации // Известия вузов. Строительство. 1998. № 7. С. 93–96.
4. Пермяков В.Б., Иванов В.Н. Эффективность использования средств механизации в строительном производстве. Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный институт, 2002. 192 с.
5. Трофимова Л.С. Анохин В.В. Математическая модель функционирования грузовых авто-транспортных предприятий с учетом взаимосвязи коммерческой и технической эксплуатации для практики планирования // Автотранспортное предприятие. 2016. № 10. С. 47–50.

#### **References**

1. Trofimova L.S. *Rezul'taty issledovaniya izmeneniya dliny ezdki s gruzom v mezhdugorod-nom soobshchenii* [Results of studying loaded haul distance variation in long-distance transportation]. *Ma-teriali Mezhdunarodnoj ochno-zaochnoj nauchno-tehnicheskoy kon-ferencii "Problemy issledovaniya sistem i sredstv avtomobil'nogo transporta"* [Proceedings of the International In-Person and Remote Scientific and Technical Conference: "Prob-lems of studying motor transport systems and means", Tula, 24 November, 2017]. Tula, 2017, issue. 2, pp. 245–251. (In Russian).
2. Trofimova L.S. Actual cargo weight effect on the results of motor transport enterprise operation planning. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceeding of Irkutsk State Technical University], 2017, vol. 21, no. 3, pp. 184–192. <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2017-3-184-192>. (In Russian).
3. Permyakov V.B., Ivanov V.N. Mathematical optimization model of the machinery fleet structure of a road-building organization. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of Higher Educational Institutions. Construction], 1998, no. 7, pp. 93–96. (In Russian).
4. Permyakov V.B., Ivanov V.N. *EHffektivnost' ispol'zovaniya sredstv mekhanizacii v stroi-te'l'nom proizvodstve* [Application efficiency of mechanization means in construction industry]. Omsk: Siberian state automobile-road institute Publ., 2002, 192 p. (In Russian).
5. Trofimova L.S. Anohin V.V. Mathematical model of freight motor-transport enterprise operation taking into account commercial and technical operation interrelation for planning practice. *Avtotransportnoe predpriyatiye* [Motor transport enterprise], 2016, no. 10, pp. 47–50. (In Russian).

#### **Критерии авторства**

Трофимова Л.С., Певнев Н.Г. подготовили статью и несут ответственность за plagiat.

#### **Authorship criteria**

Trofimova L.S., Pevnev N.G. have prepared the article for publication and bear the responsibility for plagiarism.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **Conflict of interests**

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article

УДК 656.025.2

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-4-253-261>

## АНАЛИЗ МИРОВОГО ОПЫТА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА РАБОТЫ ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА В ГОРОДАХ

© М.И. Шаров<sup>1</sup>, В.С. Булдакова<sup>2</sup>, А.М. Боброва<sup>3</sup>

Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

**РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ.** Перемещение людей, товаров и распространение информации всегда являлись основополагающими компонентами функционирования человеческого общества. Общество все больше становится зависимым от развития транспортных систем, основной задачей которых является удовлетворение потребности в обеспечении мобильности населения. В статье рассматривается оценка качества работы пассажирского транспорта в зависимости от различных критериев. **МЕТОДЫ.** Проанализированы методики оценки качества работы пассажирского транспорта с точки зрения пользователей данной услуги. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Показано, что в российской практике акцент делается на эффективность работы транспортных предприятий, а не на пассажиров общественного транспорта. **ВЫВОДЫ.** Представленные в статье методики позволяют наглядно оценить участки улично-дорожной сети, требующие реконструкции или других инфраструктурных решений, которые в дальнейшем позволят повысить качество предоставления услуг, в первую очередь, для пассажиров.

**Ключевые слова:** улично-дорожная сеть, общественный транспорт, уровень обслуживания, транспортная система, уровень доступности, транспортный спрос.

**Информация о статье.** Дата поступления 23 марта 2018 г.; дата принятия к печати 20 апреля 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 апреля 2018 г.

**Формат цитирования.** Шаров М.И., Булдакова В.С., Боброва А.М. Анализ мирового опыта оценки качества работы пассажирского транспорта в городах // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 4. С. 253–261. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-253-261

## ANALYSIS OF WORLD EXPERIENCE IN URBAN PUBLIC TRANSPORT QUALITY EVALUATION

**M.I. Sharov, V.S. Buldakova, A.M. Bobrova**

National Research Irkutsk State Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

**ABSTRACT. PURPOSE.** The transportation of people, goods and information dissemination have always been a fundamental component of human society functioning. Society is becoming more and more dependent on the development of transport systems, whose main task is to meet the need for people mobility. The article deals with the various criteria-based assessment of passenger transport operation quality. **METHODS.** The paper provides the analysis of the assessment methods of passenger transport operation quality based on the passenger opinions. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** It is shown that in Russia the emphasis is rather on the efficient operation of transport enterprises than on the passengers of public transport. **CONCLUSIONS.** The methods presented in the article allow a visual assessment of the sections of the street and road network that require reconstruction or other infrastructural solutions that will primarily improve the quality of passenger servicing.

**Keywords:** street road network, public transport, service level, transport system, accessibility level, transport demand

<sup>1</sup>Шаров Максим Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта, e-mail: sharov.maksim@gmail.com

Maksim I. Sharov, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Automobile Transport, e-mail: sharov.maksim@gmail.com

<sup>2</sup>Булдакова Вера Сергеевна, магистрант, e-mail: vera.buldakova@tl-istu.com

Vera S. Buldakova, Master's degree student, e-mail: vera.buldakova@tl-istu.com

<sup>3</sup>Боброва Анастасия Михайловна, студент, e-mail: anastasbobr@yandex.ru

Anastasia M. Bobrova, Student, e-mail: anastasbobr@yandex.ru



**Information about the article.** Received March 23, 2018; accepted for publication April 20, 2018; available online April 30, 2018.

**For citation.** Sharov M.I., Buldakova V.S., Bobrova A.M. Analysis of world experience in urban public transport quality evaluation. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 4, pp. 253–261. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-4-253-261

## Введение

Перемещение людей, товаров и распространение информации всегда являлись основополагающими компонентами функционирования человеческого общества. Современные экономические процессы сопровождаются значительным ростом мобильности и повышением уровня доступности. Эта тенденция наметилась во время первой промышленной революции и значительно ускорилась во второй половине 20 века по мере развития торговых, промышленных, научных связей в общемировом масштабе. Однако эти процессы в значительной степени зависят от развития транспортной инфраструктуры, эффективного управления логистическими процессами перевозки пассажиров и грузов, а также управления информационными потоками. Общество все в большей степени повышает зависимость от развития транспортных систем, начиная от поездок на работу, удовлетворения энергетических потребностей и заканчивая распределением ресурсов между промышленными и торговыми предприятиями и заводами. В связи с этим, постоянное совершенствование транспортных систем является основой развития глобальной экономики.

Основной функцией транспортных систем является преодоление пространства. Данное пространство может быть ограничено человеческими и физическими факторами, такими как: расстояние, время, административными границами, топологией территории и др. Однако эти факторы могут создавать ограничения лишь частично, все зависит от возможной стоимости для преодоления этих ограничений, которая может быть выражена во временном, денежном эквиваленте и т.д.

Таким образом, одной из основных

задач функционирования транспортных систем является удовлетворение потребности, то есть спроса в обеспечении мобильности пассажиров, грузов и информации.

В производственном процессе можно выделить два типа возникающего транспортного спроса: прямой и косвенный [1, 2]. Прямой спрос формируется при реализации непосредственной экономической деятельности, например, в пассажирских перевозках – это потребность передвижения из дома на работу, в грузовых перевозках – обеспечение всей цепочки поставок предприятий и т.д.

Косвенный же спрос возникает в результате необходимости обслуживания возникающих поездок, например, транспортировки топлива (бензина, дизеля) или необходимости временного складирования товаров (рис. 1).

Таким образом, транспорт играет важнейшую роль в освоении и организации пространств и территорий, которые могут варьироваться в зависимости от уровня их развития. Если до середины 20-го века транспорт в глобальном масштабе играл важнейшую роль в освоении территории и консолидации мировых рынков, то в наше время главной задачей является выбор оптимального маршрута перевозок, увеличение пропускной способности, повышение скорости перемещения, качества обслуживания, доступности и т.д.

В связи с этим необходимо иметь инструменты для оценки эффективности решения этих задач. Например, необходимо оценивать качество работы и доступность пассажирского транспорта для повышения удобства при передвижении людей из дома на работу и по другим целям.

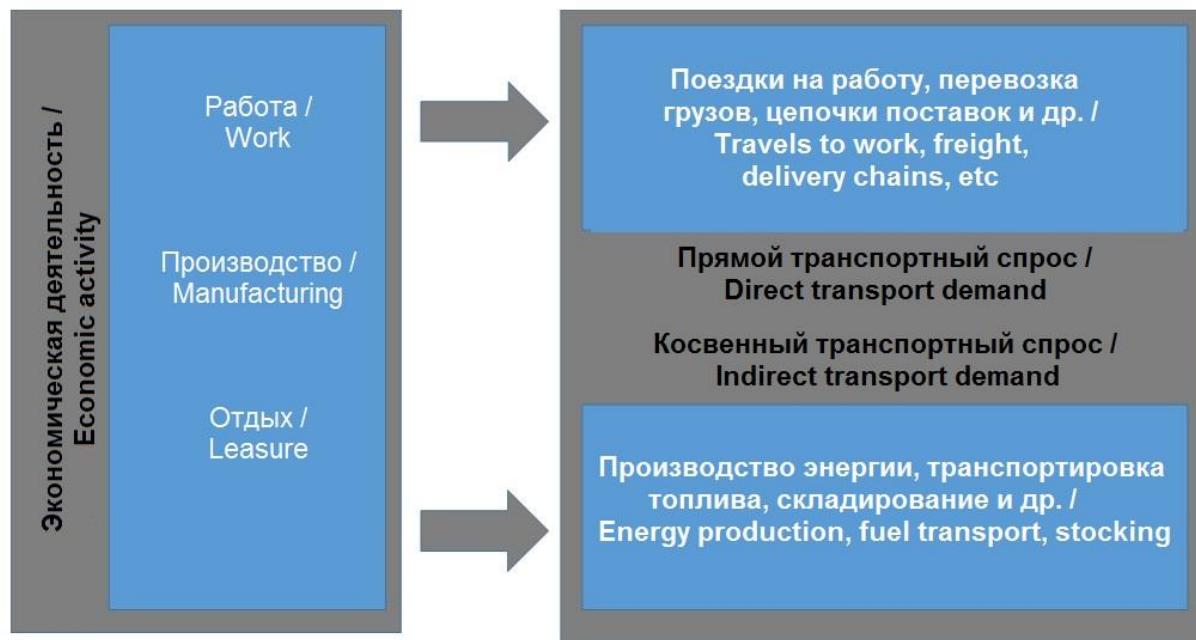


Рис. 1. Возникновение транспортного спроса  
Fig. 1. Origin of transport demand

### Мировой опыт оценки качества работы пассажирского транспорта

В зарубежной практике широко распространена оценка качества работы пассажирского транспорта в городах. Проводимая оценка в дальнейшем позволяет обеспечивать его привлекательность и конкурентоспособность относительно индивидуального транспорта. Привлекательный общественный транспорт является важным условием с точки зрения его выбора потребителями услуг (пассажирами). Привлекательность для пассажиров может характеризоваться такими параметрами, как скорость, регулярность (наличие расписания), комфорт и цена, доступность. Также немаловажными условиями являются безопасность поездок, полнота информации о маршрутах движения и способы ее получения.

Штутгартским государственным университетом [3, 4] совместно с ассоциацией автомобилистов Германии (ADAC) был сделан анализ качества предоставляемых транспортных услуг в крупных городах Европейского союза: Амстердам, Афины, Барселона, Берн, Брюссель, Будапешт, Франкфурт, Гамбург, Хельсинки, Кельн, Копенгаген,

Лейпциг, Лиссабон, Любляна, Лондон, Мадрид, Мюнхен, Осло, Париж, Прага, Рим, Варшава, Вена и Загреб.

Цель анализа – получение количественной оценки качества обслуживания общественным транспортом с позиции потребителей (обычных пассажиров, туристов, инвалидов).

Анализ проводился по следующим четырем критериям:

- качество предложения (время ожидания, регулярность и т.д.) и время передвижения (35%), наличие маршрутов движения (рис. 2);

- пересадочность (количество, возможность, затрачиваемое время) (15%) (рис. 3);

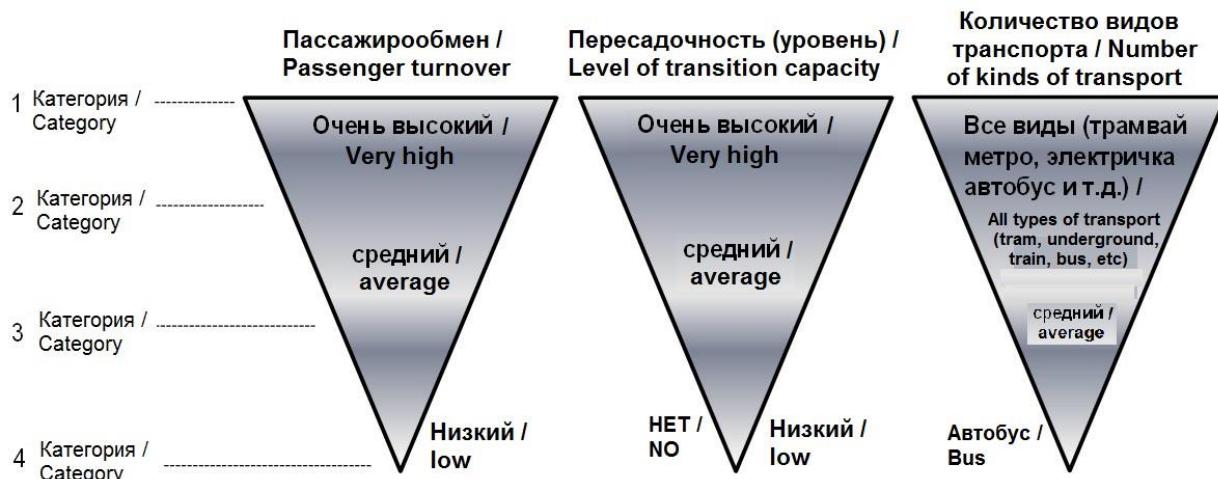
- качество информации о маршрутах движения (25%);

- билеты и цены (25%).

Полученная информация распространялась в том числе среди туристов для того, чтобы они могли принять решение о необходимости отказаться от личного транспорта при посещении различных городов.

Übersicht		Продолжительность						
Details	Bahnhof/Haltestelle	WegKarte	Datum	Zeit	Dauer	Umst.	mit	Tags
Детали	Вокзал / Остановка	Карта	Дата	Время	Пересадки	С		
<input type="checkbox"/>	Frankfurt (Main) Frauenfriedenskirche	Umgebungskarte	10.12.09	Н 06:42	0:42	1		2,30 €
	Frankfurt (Main) Rothschildallee	Umgebungskarte		К 07:24				1,40 €
<input type="checkbox"/>	Frankfurt (Main) Frauenfriedenskirche	Umgebungskarte	10.12.09	Н 06:52	0:29	2		2,30 €
	Frankfurt (Main) Rothschildallee	Umgebungskarte		К 07:21				1,40 €
<input type="checkbox"/>	Frankfurt (Main) Frauenfriedenskirche	Umgebungskarte	10.12.09	Н 06:52	0:42	1		2,30 €
	Frankfurt (Main) Rothschildallee	Umgebungskarte		К 07:34				1,40 €
<input checked="" type="checkbox"/>	Frankfurt (Main) Frauenfriedenskirche	UmgebungsKarte	10.12.09	ab 07:02	0:29	2		2,30 €
	Frankfurt (Main) Rothschildallee	UmgebungsKarte		an 07:31				1,40 €
<input checked="" type="checkbox"/>	Frankfurt (Main) Frauenfriedenskirche	UmgebungsKarte	10.12.09	ab 07:02	0:42	1		2,30 €
	Frankfurt (Main) Rothschildallee	UmgebungsKarte		an 07:44				1,40 €
<input type="checkbox"/>	Frankfurt (Main) Frauenfriedenskirche	Umgebungskarte	10.12.09	ab 07:12	0:32	2		2,30 €
	Frankfurt (Main) Rothschildallee	Umgebungskarte		an 07:44				1,40 €
	Frankfurt (Main) Frauenfriedenskirche	Umgebungskarte		ab 07:12	0:42	1		2,30 €
	Frankfurt (Main) Rothschildallee	Umgebungskarte		an 07:44				1,40 €
	Frankfurt (Main) Frauenfriedenskirche	Umgebungskarte		ab 07:32	0:29	2		2,30 €
	Frankfurt (Main) Rothschildallee	Umgebungskarte		an 08:14				1,40 €
<input type="checkbox"/>	Frankfurt (Main) Frauenfriedenskirche	Umgebungskarte	10.12.09	ab 07:42	0:29	2		2,30 €
	Frankfurt (Main) Rothschildallee	Umgebungskarte		an 08:11				1,40 €
<input type="checkbox"/>	Frankfurt (Main) Frauenfriedenskirche	Umgebungskarte	10.12.09	ab 07:42	0:42	1		2,30 €
	Frankfurt (Main) Rothschildallee	Umgebungskarte		an 08:24				1,40 €
<input type="checkbox"/>	Frankfurt (Main) Frauenfriedenskirche	Umgebungskarte	10.12.09	ab 07:52	0:29	2		2,30 €
	Frankfurt (Main) Rothschildallee	Umgebungskarte		an 08:21				1,40 €
<input type="checkbox"/>	Frankfurt (Main) Frauenfriedenskirche	Umgebungskarte	10.12.09	ab 07:52	0:42	1		2,30 €
	Frankfurt (Main) Rothschildallee	Umgebungskarte		an 08:34				1,40 €
<input type="checkbox"/>	Frankfurt (Main) Frauenfriedenskirche	Umgebungskarte	10.12.09	ab 08:02	0:28	2		2,30 €
	Frankfurt (Main) Rothschildallee	Umgebungskarte		an 08:31				1,40 €
<input type="checkbox"/>	Frankfurt (Main) Frauenfriedenskirche	Umgebungskarte	10.12.09	ab 08:02	0:42	1		2,30 €
	Frankfurt (Main) Rothschildallee	Umgebungskarte		an 08:44				1,40 €

Рис. 2. Пример анализа поездок в г. Франкфурт  
Fig. 2. Example of trips to Frankfurt assessment analysis



**Рис. 3. Пример деления на типы остановочных пунктов в рамках проводимой оценки**  
**Fig. 3. Example of stopping points classification within the carried out assessment**

В североамериканской практике транспортного планирования очень большое внимание уделяется оценке качества работы пассажирского транспорта. Так, последний документ по оценке качества работы пассажирского транспорта (TCQSM; Kittelson&Associates 2003) является важным дополнением к руководству по оценке пропускной способности дорог (HCM; TransportationResearchBoard 2010). В нем структурно

представлены все показатели и методология оценки качества работы пассажирского транспорта и сопутствующей инфраструктуры. Важным аспектом данного документа является то, что оценка проводится в терминах пользователей услуг общественного транспорта [5, 6].

Как признается в ТСКСМ, оценка качества работы пассажирского транспорта является сложной задачей, так в процесс



его работы вовлечены несколько участников, таких как перевозчики, пассажиры, подвижной состав и т.д., а также широкий круг показателей, которые необходимо оценивать, например, уровень комфорта, надежность, доступность и т.д. В старой версии руководства НСМ (НСМ 2000) применялось 6 отдельных направлений оценки уровня обслуживания, таких как: интервал движения, загруженность салона и др. В новой версии руководства НСМ 2010 эти показатели уже сведены в общий интегральный показатель, однако более детальный расчет представляется ТСQСМ [7]. В частности, там представлена методология оценки эффективности функционирования городской уличной инфраструктуры с точки зрения перевозки пассажиров городским общественным транспортом. Данная методология применима к общественному транспорту, работающему как в смешанных условиях движения, так и по выделенным полосам и остановкам на улицах. Она состоит из трех последовательных шагов, последним из которых является оценка уровня обслуживания (рис. 4). Если на данном участке улично-дорожной сети работают несколько разных маршрутов общественного транспорта, то оценка проводится для каждого маршрута в отдельности.

Шаг 1. Определение скорости передвижения общественного транспорта (ОТ). Скорость передвижения определяется отношением длины оцениваемого участка ко времени проезда по этому участку. Данная скорость учитывает, как время прохождения данного участка, так и другие задержки движения общественного транспорта, которые могут возникать во время его работы. Скорость передвижения рассчитывается отдельно для каждого сегмента оцениваемого участка улично-дорожной сети (УДС).

Скорость передвижения оценивается по формуле:

$$S_{Tt,F} = \frac{\sum_{i=1}^m L_i}{\sum_{i=1}^m \frac{L_i}{S_{Tt,seg,i}}}, \quad (1)$$

где  $S_{Tt,F}$  – скорость передвижения по оцениваемому участку (км/ч);  $L_i$  – длина сегмента оцениваемого участка УДС (км);  $m$  – количество сегментов на оцениваемом участке;  $S_{Tt,seg,i}$  – скорость передвижения на отдельном сегменте (км/ч).

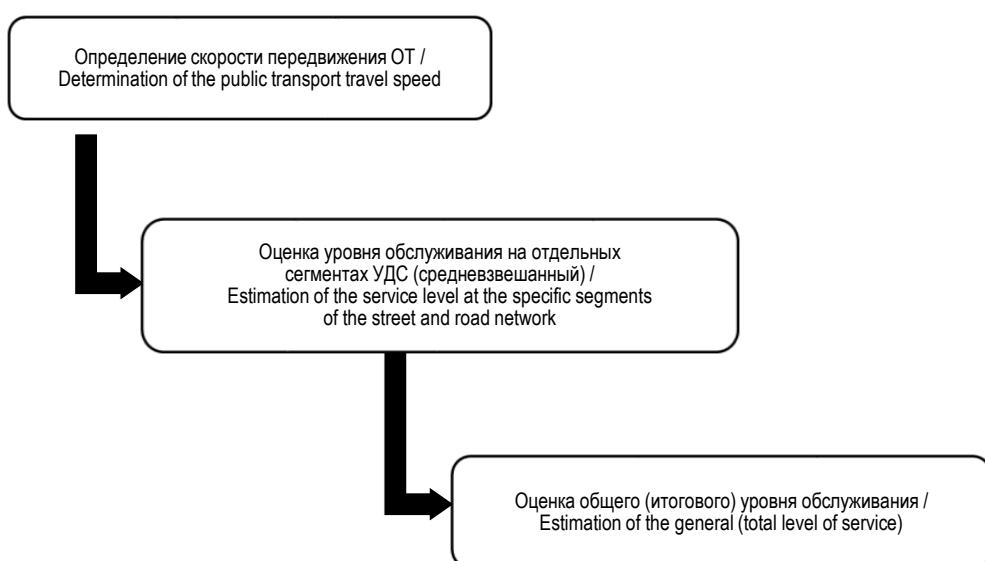


Рис. 4. Общий вид методологии  
Fig. 4. General view of the methodology



Шаг 2. Оценка уровня обслуживания на отдельных сегментах УДС. На данном шаге вычисляется уровень обслуживания на отдельных сегментах оцениваемого участка УДС. Данный уровень обслуживания рассчитывается по формуле:

$$I_{t,F} = \frac{\sum_{i=1}^m I_{t,seg,i} L_i}{\sum_{i=1}^m L_i}, \quad (2)$$

где  $I_{t,F}$  – средневзвешенный уровень обслуживания отдельных сегментов;  $I_{t,seg,i}$  – уровень обслуживания отдельного сегмента.

Шаг 3. Итоговый уровень обслужи-

вания. В табл. 1 приведены значения средневзвешенного уровня обслуживания, соответствующие итоговому значению для общественного транспорта (данные значения могут применяться в том числе и для велосипедного транспорта).

При анализе итогового уровня обслуживания нужно учитывать, что его значение не всегда может отражать реальную ситуацию, так как на отдельных участках УДС он может находиться в приемлемых значениях, а на других нет. В связи с этим уделяется большее внимание тем сегментам УДС, где уровень обслуживания выходит за рамки нормативных значений.

Оценка же качества обслуживания на сегментах в отдельности включает в себя 7 последовательных шагов (рис. 5).

### Значения уровня обслуживания для общественного транспорта Values of the service level for public transport

№	Итоговый уровень обслуживания (LOS) / Final level of service	Средневзвешенный уровень обслуживания (LOSScore) / Weighted average level of service
1	<i>A</i>	$\leq 2.00$
2	<i>B</i>	$> 2.00-2.75$
3	<i>C</i>	$> 2.75-3.50$
4	<i>D</i>	$> 3.50-4.25$
5	<i>E</i>	$> 4.25-5.00$
6	<i>D</i>	$> 5.00$

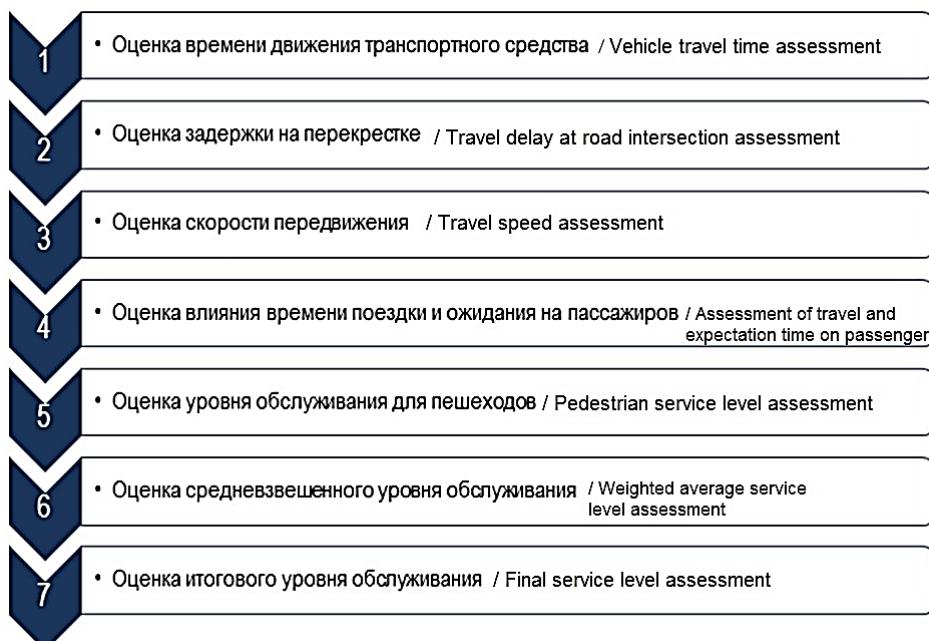


Рис. 5. Методика расчета итогового и средневзвешенного уровня обслуживания на сегменте  
Fig. 5. Calculation methods of the final and weighted average service levels on the segment

В российской практике также проводится оценка качества работы пассажирского транспорта в городах [8, 9, 10], но основным отличием является то, что оценка делается с точки зрения эффективности работы транспортных предприятий, а не с

точки зрения пользователя данных услуг, то есть пассажиров.

Данное обстоятельство, на наш взгляд, не всегда позволяет обеспечить объективную оценку работы пассажирского транспорта.



*Рис. 6. Уровни обслуживания ул. Ленина в прямом и обратном направлении  
(Итоговый уровень обслуживания для ул. Ленина – D)*

*Fig. 6. Lenin street service levels in forward and reverse directions (Final service level for Lenin street - D)*



**Рис. 7. Уровни обслуживания ул. Розы-Люксембург в прямом и обратном направлении**  
**(Итоговый уровень обслуживания для ул. Розы-Люксембург – В)**  
**Fig. 7. Service levels street Rosa Luxemburg in forward and reverse direction**  
**(Outcome level of service for street Rosa-Luxembourg – B)**



## Заключение

В этой связи «Транспортной лабораторией» ИРНИТУ ведутся исследования по разработке методики оценки качества работы именно с позиции пользователя данных услуг<sup>4</sup> [11–18].

В частности, анализируется возможность адаптации зарубежных методик, таких как представлены выше. На рис. 6 и 7 приведены результаты оценки уровня обслуживания на сегментах улично-дорожной сети

г. Иркутска, полученные при использовании методики, представленной в НСМ 2010. Как видно из представленных рисунков, результаты, полученные по данной методике, позволяют наглядно оценить участки, требующие реконструкции или других решений. Это в дальнейшем позволит повысить качество предоставления услуг, как в целом, так и на отдельных участках УДС.

## Библиографический список

1. Rodrigue, J-P (2006) “Challenging the Derived-Transport Demand Thesis: Issues in Freight Distribution”, Environment & Planning A. Vol 38. No. 8. P. 1449–1462.
2. The Geography of Transport Systems / Jean-Paul Rodrigue, Claude Comtois, Brian Slack / Simultaneously published in the USA and Canada, by Routledge 270 Madison Ave, New York, NY 10016.
3. Bewertung des ÖPNV aus Kundensicht, Methodik des ADAC-ÖPNV-Tests in europäischen Großstädten / Friedrich, Marku / Schlaich, Johanne / Schleupen, Gerd / in Internationales Verkehrswesen; 62, 12; 11–16; Internationales Verkehrswesen / DVV Media Group GmbH / Eurailpre, Hamburg, 2010.
4. WirbietenInformationenrund um die Themen Verkehr, Automobil, Reise sowie ADAC-Versicherungen und neutrale Testberichte [Электронный ресурс]. URL: <https://www.adac.de>
5. Highway Capacity Manual 2000. / Transportation Research Board, National Research Council / Washington, D.C., USA, 2000.
6. Highway Capacity Manual 2010 / Transportation Research Board, National Research Council / Washington, D.C., USA, 2010.
7. Transit Capacity and Quality of Service Manual, 3rd ed. / Ryus, Paul & Danaher, Alan & Walker, Mark & Nichols, Foster & Carter, Bill & Ellis, Elizabeth & Cherrington, Linda & Bruzzone, Anthony (2013) / The National Academies of Sciences, Engineering and.
8. Попова И.М., Шустов Р.А., Попова Е.А. Критерии оценки качества обслуживания городским пассажирским транспортом // Научно-методический электронный журнал Концепт. 2015. Т. 35. С. 126–130.
9. Красникова Д.А., Феклин Е.В., Шабаева А.Н. К вопросу о повышении эффективности эксплуатации городского пассажирского транспорта // Научная мысль. 2017. № 2. С. 51–55.
10. Ефимова О.Ю. Адаптивная модель управления качеством городского пассажирского транспорта // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия: Социальные науки. 2016. № 1 (41). С. 48–54.
11. Шаров М.И. Перспективы управления транспортным спросом // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2011. № 1 (48). С. 119–123.
12. Яценко С.А., Колганов С.В., Тарханова Н.В. Имитационное моделирование оценки качества обслуживания пассажиров на городских автобусных маршрутах с применением микроавтобусов // Вестник ИрГТУ. 2013. № 8 (79). С. 133–137.
13. Лыткина А.А., Михайлов А.Ю. Эффективность применения приоритета городского пассажирского транспорта на регулируемых перекрестках // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2011. № 7 (54). С. 60–65.
14. Левашев А.Г., Михайлов А.Ю., Шаров М.И. К вопросу об оценке качества транспортного обслуживания в городах // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2013. № 3. С. 16–23.
15. Mlynarski, Stanislaw; Pilch, Robert; Smolnik, Maksymilian; Methodology of network systems reliability assessment on the example of urban transport. Eksploatacja i zawodnosc-maintenance and reliability. 2018. Vol. 20. No. 2. P. 278–283.
16. Van L.D., Badami M.G., Geneidy E.I., Ahmed M. What influences satisfaction and loyalty in public transport? A review of the literature. TRANSPORTREVIEWS. 2018. T. 38. No. 1. P. 52–72.
17. Яценко С.А., Колганов С.В., Маркетинговые исследования спроса на рынке пассажирских транспортных услуг в г. Иркутске. Вестник Иркутского государственного технического университета. 2012. № 5 (64). С. 122–128.

<sup>4</sup>Яценко С.А. Повышение качества обслуживания пассажиров на городских автобусных маршрутах в условиях применения подвижного состава разной вместимости: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10. Иркутск, 2012. 213 с. / Yatsenko S.A. Improving the passenger servicing quality on urban public bus routes when using the rolling stock of different capacity: Candidate's dissertation in Technical Sciences: 05.22.10. Irkutsk, 2012. 213 p.



18. Яценко С.А., Колганов С.В., Тарханова Н.В. Исследования дальности поездки пассажиров на городском маршруте с одновременным использованием

автобусов разной вместимости // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 11 (82). С. 230–235.

### References

1. Rodrigue, J-P (2006) "Challenging the Derived Transport Demand Thesis: Issues in Freight Distribution", *Environment & Planning A*, vol 38, no. 8, pp. 1449–1462.
2. The Geography of Transport Systems / Jean-Paul Rodrigue, Claude Comtois, Brian Slack / Simultaneously published in the USA and Canada, by Routledge 270 Madison Ave, New York, NY 10016.
3. Bewertung des ÖPNV ausKundensicht, Methodik des ADAC-ÖPNV-Tests in europäischenGroßstädten / Friedrich, Marku / Schlaich, Johanne / Schleupen, Gerd / in InternationalesVerkehrswesen; 62, 12; 11-16; InternationalesVerkehrswesen / DVV Media Group GmbH / Eurailpre, Hamburg, 2010.
4. WirbietenInformationenrund um die ThemenVerkehr, Automobil, Reisesowie ADAC-Versicherungen und neutraleTestberichte. URL: <https://www.adac.de>
5. Highway Capacity Manual 2000 / Transportation Research Board, National Research Council / Washington, D.C., USA, 2000.
6. Highway Capacity Manual 2010 / Transportation Research Board, National Research Council / Washington, D.C., USA, 2010.
7. Transit Capacity and Quality of Service Manual, 3rd ed. / Ryus, Paul & Danaher, Alan & Walker, Mark & Nichols, Foster & Carter, Bill & Ellis, Elizabeth &Cherrington, Linda&Bruzzone, Anthony (2013) / The National Academies of Sciences, Engineeringnd.
8. Popova I.M., SHustov R.A., Popova E.A. Criteria for assessing the quality of service by urban passenger transport\_Criteria for assessing the quality of service by urban passenger transport Criteria for assessing the quality of service by urban passenger transport. *Nauchno-metodicheskij elektronnyj zhurnal Koncept* [Scientific and methodical electronic magazine Concept], 2015, vol. 35, pp. 126–130. (In Russian).
9. Krasnikova D.A., Feklin E.V., Shabaeva A.N On the issue of increasing the efficiency of urban passenger transport operation. *Nauchnaya mysl'* [Scientific idea]. 2017, no. 2, pp. 51–55. (In Russian).
10. Efimova O.Yu. Adaptive model of quality management of urban passenger transport. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*. [Vestnik of Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod], 2016, no. 1 (41), pp. 48–54. (In Russian).
11. Sharov M.I. Prospects to manage transport demand. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University.], 2011, no. 1 (48), pp. 119–123. (In Russian).
12. Yacenko S.A., Kolganov S.V., Tarhanova N.V. Simulation modeling of passenger service quality assessment on urban bus routes with minibuses involvement. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2013, no. 8 (79), pp. 133–137. (In Russian).
13. Lytkina A.A., Mihajlov A.Yu. Efficient use of urban passenger transport priority at controlled junctions. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2011, no. 7 (54), pp. 60–65. (In Russian).
14. Levashev A.G., Mihajlov A.Yu., Sharov M.I. To the problem of the estimation of the transportation level of service. *Sovremennye problemy transportnogo kompleksa Rossii* [Modern problems of Russian transport complex], 2013, no. 3, pp. 16–23. (In Russian).
15. Mlynarski, Stanislaw; Pilch, Robert; Smolnik, Maksymilian; Methodology of network systems reliability assessment on the example of urban transport. *Eksplotacyjna i niezawodnosci-maintenance and reliability*, 2018, vol. 20, no. 2, pp. 278–283.
16. Van L.D., Badami M.G., Geneidy E.I., Ahmed M. What influences satisfaction and loyalty in public transport? A review of the literature. *TRANSPORT REVIEWS*, 2018, vol. 38, no. 1, pp. 52–72.
17. Yacenko S.A., Kolganov S.V. Market researches of demand at passenger transport service market in Irkutsk. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2012, no. 5 (64), pp. 122–128. (In Russian).
18. Yacenko S.A., Kolganov S.V., Tarhanova N.V. Studies of passenger trip distance on city route simultaneously using buses of different carrying capacity. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2013, no. 11 (82), pp. 230–235. (In Russian).

### Критерии авторства

Шаров М.И., Булдакова В.С., Боброва А.М. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за plagiat.

### Authorship criteria

Sharov M.I., Buldakova V.S., Bobrova A.M. have equal authors' rights and bear equal responsibility for plagiarism.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Уважаемые коллеги!

**Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей и читателей и сообщаем требования к статьям, принимаемым к публикации**

**I. Статья представляется в электронном и распечатанном видах.** Рекомендуемый объем статьи не менее 10 000 знаков.

К статье прилагаются:

1. Экспертное заключение.
2. Название рубрики, в которой должна быть размещена Ваша статья; УДК; название статьи; реферат (аннотация), количество слов в реферате – не менее 200; ключевые слова (4-5); сведения об авторах: название учреждения, его адрес; фамилия, имя, отчество (полностью); ученая степень; звание и должность; контактный телефон и e-mail (**вся информация предоставается одним файлом**).
3. Статья должна иметь личную подпись автора; на статьях адъюнктов и аспирантов должна стоять также подпись научного руководителя.

**II. Текст статьи, сведения об авторах, реферат, ключевые слова, адрес учреждения, контактный телефон и E-mail** должны быть также представлены по электронной почте: [vestnik@istu.edu](mailto:vestnik@istu.edu) в виде файла с расширением \*.DOC – документа, построенного средствами Microsoft Word 97 или последующих версий.

При наборе статьи в Microsoft Word рекомендуются следующие установки:

- 1) параметры страницы и абзаца: отступы сверху и снизу – **2 см**; слева и справа – **2 см**; табуляция – **2 см**; ориентация – книжная;
- 2) шрифт – **Times New Roman**, размер – **12**, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
- 3) при вставке формул использовать **Microsoft Equation 3** при установках: элементы формулы выполняются **курсивом**; для греческих букв и символов назначать шрифт **Symbol**, для остальных элементов – **Times New Roman**. Размер символов: обычный – 12 pt, крупный индекс – 7 pt, мелкий индекс – 5 pt, крупный символ – 18 pt, мелкий символ – 12 pt. Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в виде формул;
- 4) **рисунки**, вставленные в текст, должны быть выполнены с разрешением 300 dpi, B&W – для черно-белых иллюстраций, Grayscale – для полутона, максимальный размер рисунка с надписью: ширина 150 мм, высота 245 мм и представлены в виде файла с расширением \*.BMP, \*.TIFF, \*.JPG, должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. **Схемы, графики** выполняются во встроенной программе **MS Word** или в **MS Excel**, с приложением файлов (**представляемые иллюстрации должны быть четкими и ясными во всех элементах**);
- 5) библиографические ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ Р7.05 2008.

**Внимание! Публикация статьи является бесплатной.**

Стоимость журнала – 500 руб. (без стоимости почтовых расходов).

«Вестник ИрГТУ» включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, в международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», EBSCO, в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлены в Научной электронной библиотеке «КиберЛенинка» (CYBERLENINKA), рассыпается в Российскую книжную палату, ВИНИТИ РАН.

**Статьи, опубликованные в журнале «Вестник ИрГТУ», реферируются и рецензируются.**

**Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям.**

По вопросам публикации статей обращаться: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Д-119.

Телефон: (3952) 40-59-27 – Сокольникова Татьяна Васильевна, ответственный за выпуск,  
(3952) 40-58-57.

Факс: (3952) 405-100, e-mail: [vestnik@istu.edu](mailto:vestnik@istu.edu)

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

# ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Научный журнал  
№ 4 (135) 2018

Редактор Я.В. Макшанцева  
Художественный редактор Е.В. Хохрин  
Ответственный за выпуск Т.В. Сокольникова  
Перевод на английский язык В.В. Батицкой  
Верстка Н.П. Дзюндзя

Выход в свет 30.04.2018 г. Формат 60x90/8.  
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 33,5.  
Тираж 500 экз. Заказ 145. Поз. плана 3н.

Издание распространяется **бесплатно**

Иркутский национальный исследовательский технический университет  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Отпечатано в типографии Издательства  
ФГБОУ ВО "Иркутский национальный  
исследовательский технический университет"

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

ИЗДАТЕЛЬСТВО



Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2018