

Том 22, № 11

2018

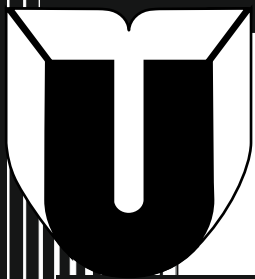
ISSN 1814-3520 (print)
ISSN 2500-1590 (online)

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2018



Том 22, № 11

2018

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Том 22, № 11

2018

Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета

Редакционная коллегия

КОРНЯКОВ М.В., доктор технических наук, ректор Иркутского национального исследовательского технического университета, главный редактор (г. Иркутск, Россия)

НЕМЧИНОВА Н.В., доктор технических наук, профессор, заведующая 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)

СУСЛОВ К.В., кандидат технических наук, профессор Иркутского национального исследовательского технического университета (г. Иркутск, Россия)

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 Бертольд, 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
русской прессы – 38237

Адрес редакции, учредителя и издателя:
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.
e-mail: pgr@istu.edu

PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Vol. 22, No. 11

2018

Publishers of Irkutsk National Research Technical University

Editorial board

KORNIakov M.V., Dr. Sc. in Engineering, Rector
Rector 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
Wrocław University of Science and Technology
(Poland)

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

SUSLOV K.V., Candidate of technical sciences,
Professor of Irkutsk National Research Technical
University (Irkutsk, Russia)

TIKHOMIROV 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: pqp@istu.edu

СОДЕРЖАНИЕ



Машиностроение и машиноведение

- | | |
|--|----|
| ❁ Балла О.М. Особенности проектирования и изготовления концевых фрез с напайными пластинками твердых сплавов винтовой формы для обработки деталей из авиационных материалов..... | 10 |
| ❁ Бойко А.Ф., Воронкова М.Н. Анализ методов получения микроотверстий. Часть 2..... | 34 |
| ❁ Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Износ полимерно-абразивных щеток при обработке кромок..... | 43 |
| ❁ Леонович Д.С., Журавлёв Д.А., Карлина Ю.И. Современные тенденции развития инженерного анализа изделий с деталями из композиционных материалов на примере принципов работы Anatoleflex..... | 56 |
| ❁ Тегжанов А.С., Щерба В.Е., Носов Е.Ю. Разработка опытного образца бескрейцкопфной поршневой гибридной энергетической машины..... | 63 |
| ❁ Хвощевская Л.Ф., Журавлёв Д.А. Моделирование пространственных допустимых отклонений сборочных единиц с помощью бикватернионов..... | 71 |



Информатика, вычислительная техника и управление

- | | |
|---|-----|
| ❁ Бестужева О.В. Математическая модель оптимизации режимов резания при восстановлении цапф мельниц с применением приставного станка..... | 89 |
| ❁ Глазырин Г.В., Митрофанов Н.А. Моделирование переходных процессов генератора с несимметрией фазных обмоток статора и насыщением магнитной системы..... | 97 |
| ❁ Марков А.В. Математическая модель автоматизированной грузопоршневой системы контроля качества датчиков абсолютного давления..... | 112 |
| ❁ Новицкий Н.Н., Токарев В.В., Шалагинова З.И., Алексеев А.В., Гребнева О.А., Баринаева С.Ю. Информационно-вычислительный комплекс «АНГАРА-ТС» для автоматизации расчета и анализа эксплуатационных режимов при управлении крупными многоконтурными системами теплоснабжения..... | 126 |
| ❁ Сологубова Л.А., Кулаков А.А., Байбекова Ф.Н., Трунькина О.В., Беспалова Н.М. Программная реализация принятия решений с помощью метода анализа иерархий..... | 145 |



ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

СОДЕРЖАНИЕ



Энергетика



- **Буякова Н.В., Крюков А.В., Лэ Ван Тхао.** Моделирование компактных линий электропередачи с вертикальным расположением проводов..... 159
- **Носырева Е.В.** Сравнительный анализ топологических свойств сетей электроснабжения Италии и Восточной Сибири..... 170
- **Подковальников С.И., Поломошина М.А.** Интеграция возобновляемых источников энергии в систему электроснабжения промышленного предприятия..... 182



Металлургия и материаловедение



- **Аганаев С.И., Астраханцев Н.В., Зайдес С.А.** Повышение качества уплотнительных элементов ионно-плазменным напылением..... 199
- **Никаноров А.В.** Сравнительный анализ компьютерных программ для моделирования литейных процессов..... 209



Транспорт



- **Макаров И.Н.** Формирование оптимальной топологии инфраструктурной сети агломерации на основе взаимодействия рельсового и колесного транспорта с использованием инструментария дискретной математики и теории графов..... 219
- **Никитин Н.А.** Анализ эффективности кольцевого пересечения с пешеходными переходами..... 231
- **Сосюк Д.И., Скutelьник В.В.** К вопросу об искусственных дорожных неровностях..... 241



PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Vol. 22, No. 11

2018

CONTENTS



Mechanical Engineering and Machine Science

- | | |
|---|---|
| <p>⊗ Balla O.M. Features of projection and manufacture of end mills with plates fixed by a method of soldering hard alloy of the screw shape for handling details from aviation materials.....</p> <p>⊗ Boyko A.F., Voronkova M.N. Analysis of micro hole drilling methods. Part 2.....</p> <p>⊗ Dimov Yu.V., Podashev D.B. Wear of polymeric abrasive brushes when processing edges.....</p> <p>⊗ Leonovich D.S., Zhuravlev D.A., Karlina Yu.I. Modern development tendencies in engineering analysis of products with composite material parts on example of ANATOLEFLEX operating principles.....</p> <p>⊗ Tegzhanov A.-Kh.S., Shcherba V.E., Nosov E.Yu. Development of the pilot crosshead-free piston hybrid energy machine.....</p> <p>⊗ Khvashchevskaya L.F., Zhuravlev D.A. Biquaternion-based modeling of assembly unit permissible spatial tolerances.....</p> | <p>10</p> <p>34</p> <p>43</p> <p>56</p> <p>63</p> <p>71</p> |
|---|---|



Information Science, Computer Engineering and Management

- | | |
|--|--|
| <p>■ Bestuzheva O.V. Mathematical model of optimization of cutting parameters when restoring axles of mills with application of auxiliary machine.....</p> <p>■ Glazyrin G.V., Mitrofanov N.A. Simulation of generator transients with stator phase winding asymmetry and magnetic system saturation.....</p> <p>■ Markov A.V. A mathematical model of automated deadweight pressure system for quality control of absolute pressure sensors.....</p> <p>■ Novitsky N.N., Tokarev V.V., Shalaginova Z.I., Alekseev A.V., Grebneva O.A., Barinova S.Yu. Information computing complex "ANGARA-HS" for calculation and analysis of operating conditions of large multiloop heat supply systems under control.....</p> <p>■ Sologubova L.A., Kulakov A.A., Baibekova F.N., Trunkina O.V., Beshpalova N.M. Decision-making software implementation using hierarchy analysis method.....</p> | <p>89</p> <p>97</p> <p>112</p> <p>126</p> <p>145</p> |
|--|--|

PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

CONTENTS



Power Engineering



- **Buyakova N.V., Kryukov A.V., Le Van Thao.** Modelling of compact power lines with vertical wire arrangement..... 159
- **Nosyreva E.V.** Comparative analysis of topological properties of electrical supply networks in Italy and Eastern Siberia..... 170
- **Podkovalnikov S.V., Polomoshina M.A.** Integration of renewable energy sources into the industrial enterprise electric power supply system..... 182



Metallurgy and Materials Science



- **Aganaev S.I., Astrakhsantsev N.I., Zaides S.A.** Improving sealing element quality by ion-plasma sputtering..... 199
- **Nikanorov A.V.** Comparative analysis of computer programs for foundry process simulation..... 209

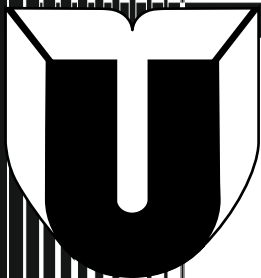


Transport



- **Makarov I.N.** Formation of agglomeration infrastructure network optimal topology based on rail and wheeled transport interaction using discrete mathematics and graph theory tools..... 219
- **Nikitin N.A.** Efficiency analysis of a roundabout with pedestrian crossings..... 231
- **Sosyuk D.I., Skutelnik V.V.** On the issue of artificial road irregularities..... 241





ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

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 Минобрнауки России.

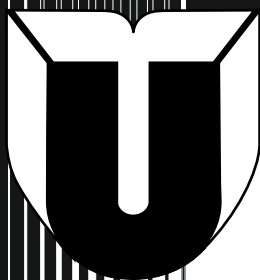
«Вестник ИрГТУ» включен в международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», в базу данных EBSCO, в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлен в электронной библиотеке «Cyberleninka», библиотеке Oxford, Directory of Open Access Journals (DOAJ) рассылается в Российскую книжную палату, ВИНТИ 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
- Metallургия и материаловедение
- Транспорт

Редколлегия



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", University OXFORD, Scientific Indexing Services (SIS), Directory of Open Access Journals (DOAJ). 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: 621.9.02

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-11-10-33>

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОНЦЕВЫХ ФРЕЗ С НАПАЙНЫМИ ПЛАСТИНКАМИ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ ВИНТОВОЙ ФОРМЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

© О.М. Балла¹

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

РЕЗЮМЕ: Цель – повышение эффективности механической обработки деталей из авиационных материалов путем применения специализированных и специальных конструкций концевых фрез с напайными пластинками твердых сплавов винтовой формы. В ходе работы применялись экспериментальные и теоретические методы исследования повышения работоспособности специализированных и специальных конструкций фрез с напайными пластинками твердых сплавов для обработки авиационных материалов на стадиях их проектирования и изготовления. Разработана методика проектирования специализированных и специальных конструкций концевых фрез с напайными пластинками винтовой формы для фрезерования авиационных материалов как для черновой, так и чистовой обработки. Приведены рекомендации по их изготовлению. Применение расчетных методов позволяет исключить влияние субъективных факторов на качество проектирования и снижает его трудоемкость. Применение специализированных и специальных фрез с напайными винтовыми пластинками твердых сплавов винтовой формы в диапазоне их диаметров от 20 до 60 мм обеспечивает эффективность как черновой, так и чистовой механической обработки деталей из авиационных материалов. Особенно они эффективны при чистовой обработке, так как формируют обработанную поверхность без искажения формы по сравнению с фрезами, оснащенными неперетачиваемыми пластинками, расположенными в несколько рядов по высоте. Для черновой обработки наиболее пригодны фрезы с переменными схемами резания, они создают меньший уровень динамических нагрузок на технологическую систему, что особенно важно при обработке нежестких деталей из материалов с низкими значениями модулей упругости.

Ключевые слова: авиационные материалы, твердые сплавы, специальные и специализированные концевые фрезы, пластинки твердого сплава винтовой формы

Информация о статье: Дата поступления 10 сентября 2018 г.; дата принятия к печати 30 октября 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 ноября 2018 г.

Для цитирования: Балла О.М. Особенности проектирования и изготовления концевых фрез с напайными пластинками твердых сплавов для обработки деталей авиационных материалов. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(11):10–33. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-10-33.

FEATURES OF DESIGN AND MANUFACTURE OF END MILLS WITH SOLDERED-ON HARD ALLOY HELICAL PLATES FOR MACHINING PARTS MADE OF AVIATION MATERIALS

Oleg M. Balla

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

ABSTRACT: The purpose of the article is to improve the machining efficiency of parts made of aviation materials through the application of specialized and special designs of end mills with soldered-on hard alloy helical plates. The study employs the experimental and theoretical research methods of improving the performance of specialized and special designs of mills with soldered-on hard alloy plates for aviation material machining at the stages of their design and produc-

¹Балла Олег Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств Института авиационного машиностроения и транспорта, e-mail: ballaom@mail.ru
Oleg M. Balla, Cand. Sci. (Eng.), the senior lecturer of faculty of a know-how and a furniture of machine-building manufactures of the Institute of aviamechanical engineering and a carrier, e-mail: ballaom@mail.ru



tion. The methods of designing specialized and special designs of end mills with soldered-on helical plates for milling aviation materials both for rough work and finishing treatment are developed. Recommendations are given on their manufacture. Application of calculation methods allows to eliminate the influence of subjective factors on the quality of designing and reduces its labour intensity. Application of specialized and special mills with soldered-on hard alloy helical plates in the range of their diameters from 20 up to 60 mm ensures the efficiency of both rough work and finishing treatment of parts made of aviation materials. They are especially effective at finishing treatment as they shape the machined surface without the distortion of shape unlike the mills equipped with disposal inserts located in several rows on height. Mills with variable cutting patterns are most effective for rough work. They create a smaller level of dynamic loads on the technological system that is especially important when machining not rigid parts made of the materials with low values of elasticity coefficients.

Keywords: aviation materials, hard alloys, special and specialized end mills, hard alloy helical plates

Information about the article: Received September 10, 2018; accepted for publication 30 October, 2018; available online 30 November, 2018.

For citation: Balla O.M. Features of design and manufacture of end mills with soldered-on hard alloy helical plates for machining parts made of aviation materials. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(11):pp. 10–33. (In Russian) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-10-33.

Введение

Монолитные концевые фрезы из твердого сплава нашли широкое применение для обработки заготовок деталей из материалов, применяемых в самолетостроении. Они обеспечивают интенсификацию режимов резания практически всех групп применяемых обрабатываемых материалов, но диапазоны их применения ограничены из-за значительного расхода вольфрама на единицу инструмента [1]. С учетом этого ограничен диапазон диаметров фрез. В зависимости от изготовителя наибольшие диаметры фрез находятся в диапазоне 20–32 мм. Хотя известны факты применения монолитных твердосплавных фрез значительно больших размеров, так на фирме «Martin-Lockheed» применялись монолитные фрезы диаметром 47 мм, а на Ташкентском авиационном производственном объединении им. В.П. Чкалова (ТАПО-иЧ) даже 60 мм. Применение фрез с многогранными неперетачиваемыми пластинками (МНП) в диапазоне диаметров от 20 до 60 мм менее эффективно [2, 3]. Это объясняется следующим:

- фрезы с МНП в указанном диапазоне диаметров имеют меньшие числа зубьев по сравнению с инструментом с напайными пластинками винтовой формы, что приводит к снижению минутной подачи;
- для фрез с МНП характерен огра-

ниченный объем стружечных канавок, что затрудняет их применение для работы с большой глубиной фрезерования;

- для фрез, с расположением пластин в несколько рядов по высоте, характерно формирование обработанной поверхности с явно выраженными следами обработки в виде строчек;

- значительно меньшие значения углов наклона режущих кромок МНП по сравнению с фрезами с винтовыми пластинками создают большие динамические нагрузки на технологическую систему.

Все это усложняет обработку деталей пониженной жесткости, что характерно для конструкций авиационных деталей. С учетом этого, не смотря на ряд эксплуатационных недостатков (необходимость переточки и относительно небольшой по сравнению с фрезами с МНП суммарный срок службы до утилизации), не снижается интерес к применению фрез с винтовыми пластинками твердых сплавов. Так в настоящее время фрезы с напайными пластинками твердых сплавов винтовой формы выпускаются следующими изготовителями инструмента: Marwin cutting tool, Pramet [4]. Данные конструкции фрез оснащены пластинками большой высоты, что позволяет выполнять как черновую, так и чистовую обработку за один проход по высоте дета-



лей из труднообрабатываемых материалов. Высота пластин достигает 1,5–2 диаметров фрез и в ряде случаев больше, что в целом соответствует размерам рабочей части монолитных твердосплавных фрез. По отечественным стандартам на фрезы с напайными винтовыми пластинками твердого сплава ГОСТ24637-81 предназначенным для обработки титановых сплавов и других труднообрабатываемых материалов, тем более по стандартам ГОСТ20536-75...ГОСТ20538-75 не отвечают требова-

ниям фрезерования заготовок деталей из авиационных материалов из-за несоответствия геометрических параметров и ограниченного объема стружечных канавок. С учетом этого возникла необходимость разработки методик проектирования специализированных и специальных фрез для обработки основных групп материалов применяемых при производстве деталей летательных аппаратов на современном оборудовании.

Теоретическое и экспериментальное исследования

Форма поперечного сечения пластин по ГОСТ25414-90 не отвечает требованиям получения рациональных геометрических параметров, необходимых для обработки основных групп материалов применяемых в конструкциях летательных аппаратов (рис. 1).

При установке пластин в корпус

фрезы в соответствии с ее теоретическими размерами формируется отрицательное значение переднего угла (γ_y), что приводит при формировании передних углов необходимых для обработки высокопрочных нержавеющей сталей, титановых и алюминиевых сплавов к значительному уменьшению толщины пластин (рис. 2).

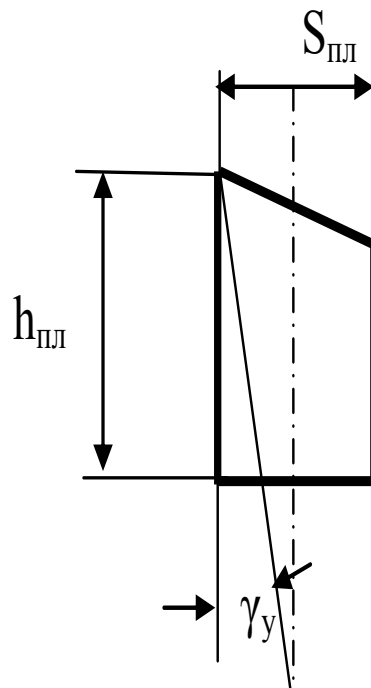


Рис. 1. Форма поперечного сечения винтовых пластин твердого сплава по ГОСТ 25414-90:

$h_{пл}$ – высота пластинки; $S_{пл}$ – толщина пластинки;

γ_y – передний угол при установке пластины в корпус

Fig. 1. The shape of the cross-section of helical plates made of a hard alloy on GOST 25414-90:

$h_{пл}$ – plate height; $S_{пл}$ – plate thickness;

γ_y – rake angle when installing the insert into the case

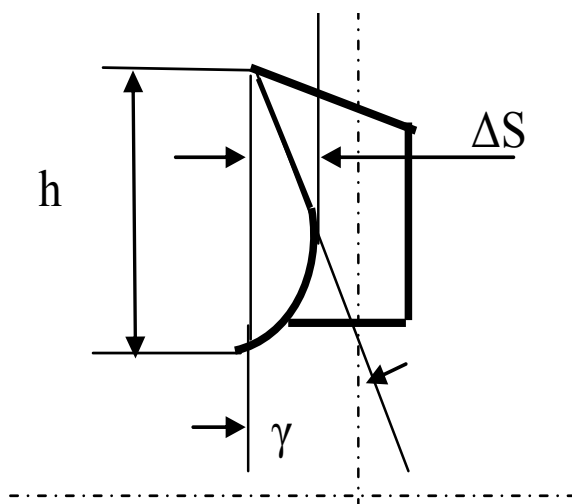


Рис. 2. Схема для расчета уменьшения толщины пластин после заточки передних углов:

γ – передний угол необходимый для обработки;

ΔS – уменьшение толщины пластины после заточки

Fig. 2. Diagram for calculation of plate thickness reduction after front rakes sharpening:

γ – rake angle required for machining;

ΔS – plate thickness reduction after sharpening

Это приводит не только к снижению прочности пластин, но и к росту трудоемкости изготовления фрез. Дополнительно необходимо учесть, что в цехах подготовки производства заточка, как правило, выпол-

няется без применения СОЖ, что способствует появлению шлифовочных прижогов. Утонение пластин при заточке передних углов приведено в табл. 1.

Таблица 1

Уменьшение толщины пластин при заточке передних углов для обработки титановых и алюминиевых сплавов

Table 1

Reduction of plate thickness at sharpening front rakes for machining titanium and aluminium alloys

Типоразмер пластины	Расчетный диаметр фрезы, мм	Высота пластины $h_{пл}$, мм	Толщина пластины S , мм	Установочный передний угол γ_y , град.	Утонение пластины при заточке переднего угла $\gamma = 5^\circ$, мм	Утонение пластины при заточке переднего угла $\gamma = 15^\circ$, мм
36350, 36370	16	4	2	-7,2	0,86	1,51
36390, 36410	20	6	3	-8,6	1,46	2,40
36010, 36110	32	8	3,5	-6,3	1,6	2,91
36030, 36130	50	8,5	4,3	-4,9	1,48	2,89
36040, 36140*	50	8,5	4,3	-4,9	1,48	2,89
36430, 36450	80	10	5	-3,6	1,52	3,19
36460, 36460*	80	10	5	-3,6	1,52	3,19
36470, 36490	100	10	5	-2,9	1,38	3,07
36480, 36500*	100	10	5	-2,9	1,38	3,07

Примечание: пластинки со знаком* предназначены для леворежущих фрез или праворежущих с левым направлением угла наклона винтовой линии зуба.



С учетом значительных значений допуска на толщину пластин (S) по ГОСТ 25414-90 равному $\pm 0,5$ мм формируется крайне неблагоприятная ситуация с точки зрения прочности пластин для фрез небольших диаметров с положительными передними углами особенно для обработки алюминиевых сплавов. С учетом этого по ГОСТ 20536-75–ГОСТ 20538-75 изменена схема установки пластин в корпусах фрез. Пластины врезаются в корпуса из условия обеспечения нулевого значения переднего угла при теоретической толщине пластины (рис. 3).

Такая установка пластин в корпус снижает трудоемкость заточки пластин для нулевых значений передних углов, что и предусмотрено сборником стандартов, но не обеспечивает получение рациональных геометрических параметров фрез без утонения пластин особенно для обработки алюминиевых сплавов.

Для уточнения геометрических параметров фрез были выполнены экспериментальные работы. Они показали, что наиболее высокую работоспособность имеют фрезы с формой заточки, приведенной в работе [5] с упрочняющей фаской по передней поверхности и ленточкой по задней.

мендована только для фрезерования легированных сталей она (форма заточки) показала хорошие результаты при фрезеровании титановых и алюминиевых сплавов и высокопрочных нержавеющей сталей. Наличие ленточки по цилиндру, не смотря на малые допустимые критерии износа по задней поверхности, не снижает стойкость фрез (рис. 4).

Экспериментальные работы были выполнены при следующих условиях: обрабатываемый материал – титановый сплав ВТ22; диаметр фрезы $D = 50$ мм; материал режущей части твердый сплав ВК8; число зубьев $z = 4$; подача на зуб $S_z = 0,1$ мм/зуб; глубина фрезерования $t = 4$ мм, ширина фрезерования $B = 30$ мм. Кроме увеличения стойкости упрочняющая фаска и ленточка полностью исключают микроскопы режущих кромок при выходе зуба из работы при попутном фрезеровании и соответственно при встречном при врезании. Это объясняется созданием сжимающих напряжений в режущем клине при положительных передних углах с упрочняющей фаской и ленточкой с нулевым задним углом по цилиндру (рис. 5, а) и изгиба для режущего клина без упрочняющей фаски (рис. 5, б) при выходе зуба из работы с нулевой толщиной среза.

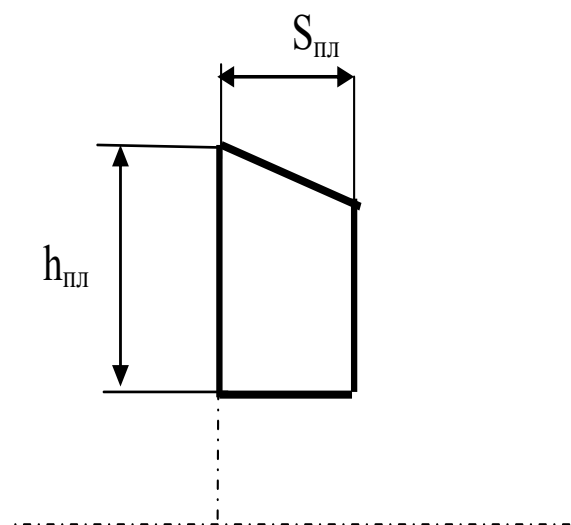


Рис. 3. Схема установки пластин в корпуса концевых фрез по ГОСТ 20536-75–ГОСТ20538-75

Fig. 3. Diagram of plate installation in end mill cases on GOST 20536-75–GOST20538-75

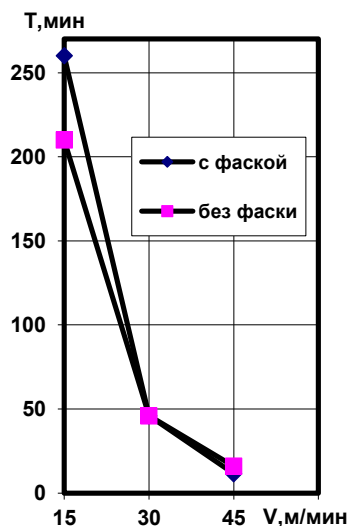


Рис. 4. Зависимость стойкости T от скорости резания V для различных форм заточки концевых фрез
Fig. 4. Dependence of T durability on cutting speed V for various shapes end mill sharpening

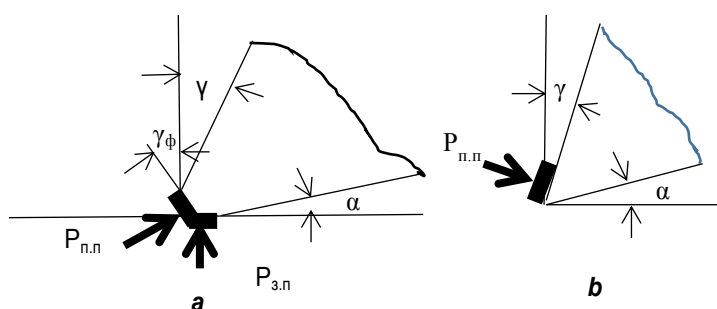


Рис. 5. Схема приложения нагрузок к рабочим поверхностям режущего клина при выходе из работы при попутном фрезеровании: γ – передний угол; γ_ϕ – передний угол фаски; $P_{n.l}$ – сосредоточенная сила резания, действующая на переднюю поверхность зуба фрезы при выходе инструмента из работы; $P_{z.l}$ – сосредоточенная сила, действующая на зуб фрезы при выходе инструмента из работы; α – задний угол; толстыми линиями показана распределенная нагрузка
Fig. 5. Diagram of load application to working surfaces of a cutting wedge at the exit from operation at climb milling: γ – rake angle; γ_ϕ – rake angle of the edge; $P_{n.l}$ – concentrated cutting force acting on the front surface of the cutting mill tooth when the tool leaves the workpiece; $P_{z.l}$ – concentrated force acting on the cutting mill tooth when the tool leaves the workpiece; α – clearance angle; thick lines show the distributed load

Таким образом, фаска с отрицательным передним углом и ленточка по цилиндру при выходе зуба из работы при попутном фрезеровании или при входе в работу при встречном создают напряжения сжатия при выходе зуба из работы при попутном фрезеровании и врезании при встречном. Это предотвращает выкрашивание режущих кромок. Экспериментально определенная форма режущего клина фрез

приведена на рис. 6, а рекомендуемые геометрические параметры – в табл. 2.

Заслуживает внимания тот факт, что наличие упрочняющей фаски, кроме исключения микросколов и некоторого повышения стойкости, стабилизирует износ пластин, следствием чего является уменьшение рассеивания. Так, коэффициент вариации, характеризующий разброс стойкости, уменьшается с 0,28–0,3 до 0,19–0,22.

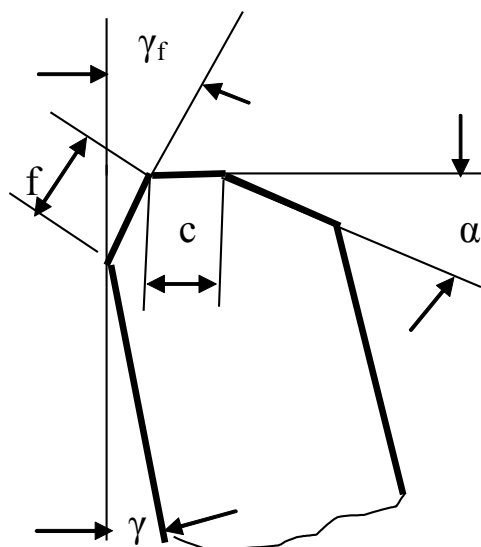


Рис. 6. Рекомендуемая форма режущего клина концевых фрез:
 f – размер фаски; c – величина нулевой ленточки по цилиндру
Fig. 6. Recommended shape of the end mill cutting wedge:
 f – face size; c – value of the zero strip by the cylinder

Таблица 2

Геометрические параметры концевых фрез, оснащенных винтовыми
пластинками твердого сплава

Table 2

Geometrical parameters of the end mills equipped with hard alloy helical plates

Обрабатываемый материал	Передний угол, γ°		Задний угол, α°		Упрочняющая фаска
	По цилиндру	На торце	По цилиндру	На торце	Угол, γ_ϕ°
Высокопрочные нержавеющие стали (ВНС)	5	5	18	15...18	-5
Титановые сплавы	5	5	18...20	15...18	-5
Алюминиевые сплавы, упрочняемые термообработкой	15	15	20	15...20	0

Величина упрочняющей фаски может быть определена по формуле

$$f = K_c \frac{S_z^{0,35}}{V^{0,3}}, \quad (1)$$

где K_c – коэффициент усадки стружки; S_z – подача на зуб; V – скорость резания.

От зависимости, приведенной в работе [5], данная формула отличается, тем, что вместо постоянного коэффициента необходимо подставлять значение коэффициента усадки стружки. Это позволило распространить область применения дан-

ной зависимости для различных видов, обрабатываемых материалов. Усредненные значения коэффициентов усадки стружки по данным [6–9] приведены в табл. 3.

С учетом того, что заготовки крупногабаритных деталей авиационных конструкций имеют низкие коэффициенты использования материалов [10–12], особое внимание при проектировании необходимо уделять условиям размещения стружки в стружечных канавках фрез. В зависимости от условий фрезерования можно выделить следующие формы стружки (рис. 7) [13].



Таблица 3

Средние значения коэффициентов усадки стружки для расчета величины упрочняющей фаски в зависимости от обрабатываемого материала

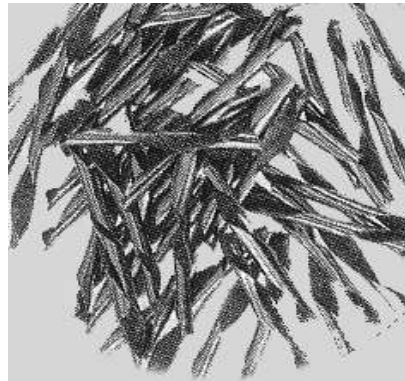
Table 3

Average values of chip shrinkage ratio for calculation the value of strengthening face depending on the machined material

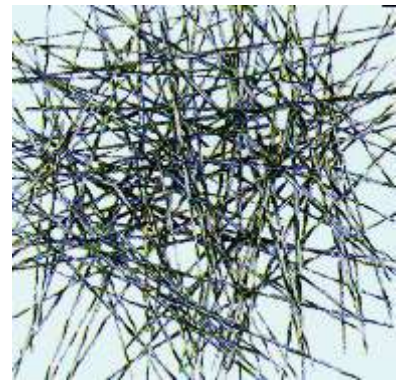
Обрабатываемый материал	Коэффициент усадки стружки, K_c
Титановые сплавы	1–2
Высокопрочные нержавеющие стали типа (ВНС)	1,5–2,5
Алюминиевые сплавы, упрочняемые термообработкой	2–3



a



b



c

Рис. 7. Форма стружки при концевом фрезеровании

Fig. 9. Shape of chips at end milling

Стружка, имеющая форму в соответствии:

– с рис. 1, а формируется при черновой обработке, когда угол наклона винтовой линии зуба меньше условного;

– с рис. 1, b формируется при полустачковом фрезеровании, условием ее получения является превышение углом наклона режущих кромок условного наклона;

– с рис. 1, c – при значительном превышении условного угла наклона, т.е. в данном случае имеет место псевдоротационное фрезерование, когда срезание одного элемента стружки происходит при постоянных ширине и толщине среза.

Условный угол наклона винтовой линии зуба приведен на рис. 8 [13].

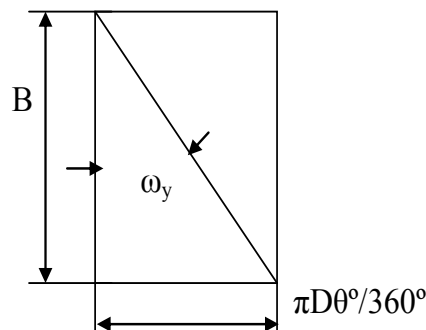


Рис. 8. Условный угол наклона винтовой линии зуба: D – диаметр фрезы;

B – ширина фрезерования; θ – угол контакта фрезы с заготовкой;

ω_y – условный угол наклона винтовой линии зуба

Fig. 8. Conditional angle of inclination of the tooth helix:

D – milling cutter diameter; B – milling width; θ – angle of contact of the milling cutter and a workpiece;

ω_y – conditional angle of inclination of the tooth helix



Схемы, поясняющие условия формирования стружки, приведены на рис. 9–11.

Форма зуба фрез в соответствии со стандартами приведена на рис. 12.

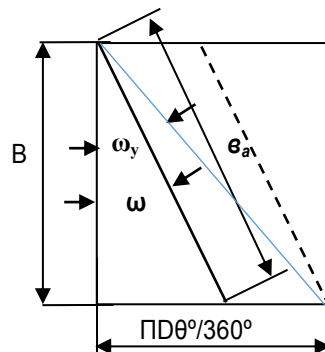


Рис. 9. Формирование стружки при черновом фрезеровании:
 ω – угол наклона режущих кромок; e_a – активная длина режущих кромок
(пунктирная линия показывает начало выхода зуба из работы)
Fig. 9. Chip shaping under rough milling:
 ω – angle of inclination of cutting edges; e_a – active length of the cutting edges
(the dotted line shows the beginning of the tooth exit from the work)

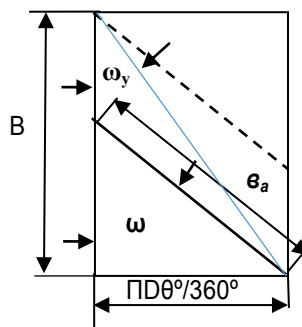


Рис. 10. Формирование стружки при получистовом фрезеровании
Fig. 12. Shaping of chips at semi-finishing milling

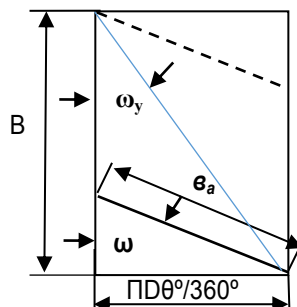


Рис. 11. Формирование стружки при чистовом фрезеровании
Fig. 13. Shaping of chips at finishing milling

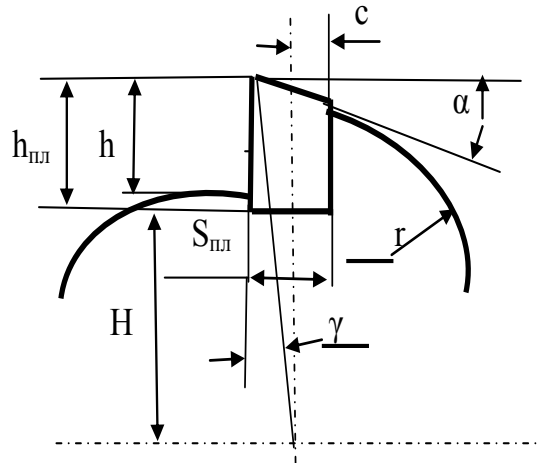


Рис. 12. Профиль торцового сечения фрез с напайными пластинками по стандартам:
 h – высота зуба; $h_{пл}$ – высота пластинки; r – радиус спинки зуба; $S_{пл}$ – толщина пластинки;
 H и C – координаты опорных поверхностей винтовой пластинки относительно
оси фрезы; α – задний угол

Fig. 12. Profile of face section of mills with soldered-on plates under the standards:
 h – tooth height; h_{pl} – plate height; r – tooth back radius; S_{pl} – thickness of the plate;
 H and C – coordinates of the bearing surfaces of helical plate relative to the cutting mill axis; α – rear angle

Профиль торцового сечения фрез по ГОСТ 20536–ГОСТ 20538 не пригоден для фрез не только для обработки крупногабаритных деталей из титановых сплавов и высокопрочных нержавеющей сталей, но и особенно для алюминиевых сплавов в следствие:

- ограниченного объема стружечных канавок, при черновом фрезеровании стружка в виде жесткого лепестка упирается в дно стружечной канавки вызывая при этом увеличение составляющих сил фрезерования на 3–5% и вибраций, а для алюминиевых сплавов дополнительно провоцирует пакетирование стружки в стружечных канавках;

- малой длины режущей части, что вызывает необходимость формирования длины рабочей части из нескольких пластин. Следствием этого является возможность появления рисок в местах стыка пластин при достаточно большой подаче на зуб или при повышенном биении режущих кромок;

- установке пластин в корпус под отрицательным передним углом, что приводит к снижению прочности пластин при заточке положительных передних углов,

это в большей степени сказывается на фрезях небольших диаметров (см. рис. 2) особенно для обработки деталей из алюминиевых сплавов;

- не возможности изготовления замка на пластинах, для фрез, предназначенных для высокоскоростной обработки деталей из алюминиевых сплавов вследствие снижения прочности пластин.

С учетом того возникла необходимость разработки методик проектирования специальных и специализированных концевых фрез, обеспечивающих интенсификацию режимов фрезерования. Необходимость данных методик дополнительно диктуется тем, что даже в настоящее время вопросы формализации проектирования фрез носят рекомендательный характер. Конструктивные параметры торцовых сечений фрез задаются на основании опыта применения существующих конструкций инструмента. Профиль поперечного сечения определяется графически или по ранее разработанным стандартам, не учитывающих особенности обработки авиационных материалов [14, 15]. Следовательно, качество проектирования определяется квалификацией инженера-конструктора.



Разработка методик проектирования специальных и специализированных концевых фрез для обработки авиационных материалов

С учетом этого для фрез с напайными пластинками твердых сплавов была взята на основу следующие формы зубьев (рис. 13 и 14).

Для высокоскоростной обработки деталей из алюминиевых сплавов пластинки формы 36 дорабатываются по спинке. Доработка обеспечивает повышение прочности паяного шва под действием центробежных сил. Наличие радиусного дна стружечной канавки как показали экспериментальные работы, значительно облегчает размещение стружки при черновой обработке и исключает пакетирование стружки при фрезеровании алюминиевых сплавов. Смещение опорной поверхности винтовой пластины сопровождается уменьшением площадки контакта опорной поверхности

пластины с корпусом по координате «Н». Площадь контакта пластины по координате «С» при этом не нарушается. Уменьшение числа плоскостей пайки способствует снижению технологических напряжений в твердосплавной пластине [16] и более того позволяет отказаться от жесткой привязки типоразмеров пластин к рекомендованным диаметрам. Длительный опыт проектирования и внедрения специальных фрез для обработки титановых и алюминиевых сплавов и высокопрочных нержавеющей сталей позволил формализовать расчет параметров рабочей части фрез [17]. Его необходимо выполнять в следующей последовательности, по известным зависимостям для типовых участков деталей определяют допустимые значения:

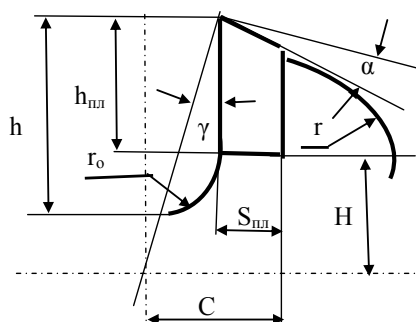


Рис. 13. Профиль торцового сечения фрез с напайными пластинками винтовой формы: r_0 – радиус дна стружечной канавки; r – радиус спинки зуба
Fig. 13. Profile of face section of mills with soldered-on helical plates:
 r_0 – radius of the chip groove bottom; r – tooth back radius

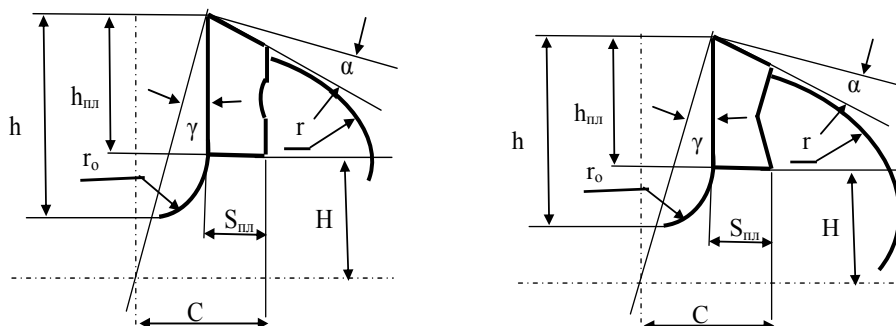


Рис. 14. Профиль торцового сечения фрез с напайными пластинками для высокоскоростной обработки алюминиевых сплавов:
 r_0 – радиус дна стружечной канавки; r – радиус спинки зуба
Fig. 14. Profile of the face section of mills with soldered-on plates for high-speed machining of aluminium alloys: r_0 – radius of the chip groove bottom; r – tooth back radius



– подачи на зуб

$$s_z = c_s \frac{D^{0,76}}{t^{0,5} s_z^{0,5}} \prod K_i, \quad (2)$$

где t – глубина фрезерования; s_z – подача на зуб; K_i – поправочные коэффициенты на измененные условия работы; c_s – постоянный коэффициент, зависящий от обрабатываемого материала и его термического состояния.

– количество режущих кромок (зубьев)

$$z = c_z \frac{D}{t^{0,5} s_z^{0,5}} K_{ув}, \quad (3)$$

где c_z – постоянный коэффициент, зависящий от обрабатываемого материала и его термического состояния; $K_{ув}$ – коэффициент увеличения заполнения стружечных канавок концевых фрез.

– угол контакта фрезы с заготовкой

$$\theta = \arccos \frac{D - 2t}{D}, \quad (4)$$

– условный угол наклона режущих кромок

$$\omega_y = \arctg \frac{\pi D \theta^\circ}{B}. \quad (5)$$

Формула (2) отличается от приведенной в работе [18] коэффициентами.

Значения экспериментально определенные для данных формул коэффициентов C_s и C_z для различных обрабатываемых материалов приведены в табл. 4 и 5.

Значения коэффициента $K_{ув}$ коэффициента заполнения стружечных канавок для концевых и цилиндрических фрез приведено в табл. 6.

В результате графоаналитической обработки, выбранных профилей торцовых сечений были получены следующие формулы для расчета конструктивных параметров фрез:

– глубина стружечных канавок для фрез, оснащенных винтовыми пластинками

Таблица 4

Постоянный коэффициент для расчета подачи на зуб

Table 4

Constant factor for calculating advance per tooth

Обрабатываемый материал	Значение коэффициента C_s
Титановые сплавы	0,017
Высокопрочные нержавеющие стали типа ВНС	0,021
Алюминиевые сплавы	0,052

Таблица 5

Постоянный коэффициент для расчета числа зубьев

Table 5

Constant factor for calculating the number to teeth

Обрабатываемый материал	Значение коэффициента C_z
Титановые сплавы	0,18
Высокопрочные нержавеющие стали типа ВНС	0,18
Алюминиевые сплавы, упрочняемые термообработкой	0,1–0,15



Таблица 6
Коэффициент увеличения заполнения стружечных канавок концевых фрез
Table 6

Ratio of the increase in filling of end mill chip grooves

Коэффициент увеличения заполнения стружечных канавок, $K_{ув}$			
$\omega < \omega_y$		$\omega > \omega_y$	$\omega \gg \omega_y$
Типовая схема резания	Переменная схема резания		
1	1,5	2	3...4

$$h = \frac{\pi D}{2,5z + 6}, \quad (6)$$

– радиус дна стружечной канавки

$$r_0 = 0,45 \cdot h, \quad (7)$$

– радиус спинки зуба

$$r_1 = 0,88hz^{0,28}, \quad (8)$$

– вспомогательный задний угол

$$\alpha_1 = \arctg 1,5 \operatorname{tg} \alpha, \quad (9)$$

где α_1 – вспомогательный задний угол.

Формула (8) получена из условия обеспечения возможно большего сечения зуба, т.е. жесткости фрезы при достаточном объеме стружечных канавок, а – (9) из

условия удаления минимального объема твердого сплава при выполнении отделочных операций. Графическая иллюстрация к выводу формулы (9) приведена на рис. 15.

Ширина технологической ленточки для предварительной заточки задних углов для фрез с напайными пластинками твердого сплава может быть определена по формуле

$$f = S - \frac{S}{2} (\operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{ctg} \alpha_1 + 1), \quad (11)$$

Для фрез, оснащенных винтовыми пластинками твердого сплава, пайка по минимальному числу поверхностей может быть обеспечена выполнением условия

$$h \geq h_{пл} - (\Delta h + 0,5) \text{ мм}, \quad (12)$$

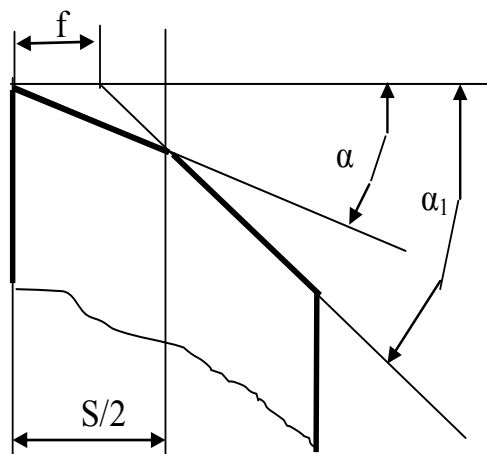


Рис. 15. Схема для вывода формулы 9
Fig. 15. Diagram for formula 9 derivation



где $h_{пл}$ – высота пластинки; Δh – допуск на высоту пластины по ГОСТ25414-90. Если это условие не выполняется, то необходимо уменьшить число зубьев и вновь выполнить расчет h или применить пластинки с меньшей высотой. Несоблюдение этого условия возможно только при проектировании фрез для чистовой обработки или в случаях применения низкотемпературных припоев (серебряных).

Диаметр корпуса для фрез, оснащенных пластинками, с достаточной для практики степенью точности может быть определен по формуле

$$D_k = D - Stg\alpha_1, \quad (13)$$

При выборе угла наклона режущих кромок следует учитывать:

- угол наклона режущих кромок должен быть больше условного угла наклона режущих кромок (ω_y) для фрез предназначенных для получистовой и чистовой обработки;

- для фрез с рабочим торцом его величина не должна превышать 43° – 45° при обязательном выполнении подрезки

торца.

Эти условия выполняются за счет изменения в общем случае диаметра, угла наклона винтовой линии зубьев и их числа. Конструктивное оформление торцевой части фрез для черновой обработки приведено на рис. 16.

Фрезы для чистового и тонкого фрезерования при удалении припуска не более 0,5мм могут не иметь подрезки торцевых зубьев, но при этом необходимо при заточке обеспечить отрицательное значение угла наклона вспомогательных режущих кромок на торце фрезы или плавное сопряжение по спирали режущих кромок на цилиндрической и торцевой частях фрезы.

Для фрез, оснащенных винтовыми пластинками, определяют координаты опорных поверхностей по формулам:

$$H = \frac{D}{2} - \frac{h_{пл} - \Delta h}{\cos\gamma} + 0,3, \quad (14)$$

$$C = \frac{D}{2} \sin\gamma + s_{пл} - 0,3. \quad (15)$$

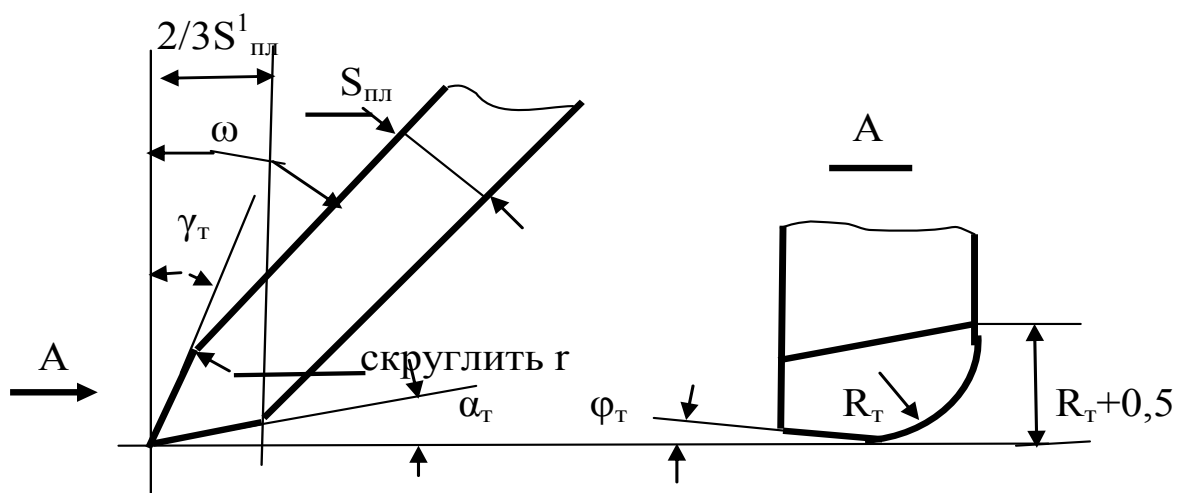


Рис. 16. Конструктивное оформление торцевой рабочей части фрез для черновой обработки: R_m – радиус заточки торцевой рабочей части фрезы; $\gamma_m, \alpha_m, \phi_m$ – геометрические параметры заточки торцевой рабочей части

Fig. 16. Constructive design of a face working part of mills for rough treatment:

R_m – sharpening radius of the face part of the milling cutter; $\gamma_m, \alpha_m, \phi_m$ – geometrical parameters of end working part sharpening



Для фрез с длиной режущей части более $1,5 D$ для черновой обработки рекомендуется применять утолщение сердцевины, определенное по формуле

$$\Delta d = \frac{1,2 D^{0,7} l}{100 z^{1,07}}, \quad (16)$$

где Δd – утолщение сердцевины зуба; l – длина рабочей части фрезы.

При увеличении жесткости фрез посредством утолщения сердцевины следует иметь в виду, что уменьшение глубины зуба более чем на $1/3$ не допускается из-за опасности защемления стружки в стружечной канавке при черновой обработке. Это условие можно записать как

$$\Delta d \leq \frac{2h}{3}, \quad (17)$$

Дополнительно необходимо учитывать, что утолщение сердцевины усложняет изготовление инструмента. Для фрез имеющих угол наклона режущих кромок больше условного ($\omega > \omega_y$) необходимость применения утолщения сердцевины зуба отсутствует.

Дальнейшее повышение работоспособности концевых фрез, особенно при черновой обработке, может быть обеспечено уменьшением активной длины режущих кромок, одновременно участвующих в резании. Это может быть обеспечено применением переменных схем резания. Использование переменных схем резания обязательно для условий концевой фрезерования, когда $\omega < \omega_y$.

Периодический профиль режущих кромок может быть образован вспомогательными винтовыми поверхностями правого и левого направлений, пересекающимися винтовую режущую кромку в одной точке. При этом, образуются широкие стружкоразделительные канавки, боковые стороны которой являются вспомогательными режущими кромками, с задними углами, образованными углами подъема винтовых поверхностей [20]. Значения задних углов

при этом не ограничиваются кинематикой затылования, т.е. на фрезах можно создать геометрические параметры для материалов с высоким упругим последствием.

Схема образования периодического профиля режущих кромок приведена на рис. 17.

Периодический профиль с большим смещением режущих кромок образуется за счет пересечения последних вспомогательными винтовыми поверхностями правого и левого направлений. Это выполняется при условии, что сумма чисел заходов вспомогательных винтовых поверхностей правого и левого направлений будет равна числу зубьев фрезы [20], что можно записать:

$$i_{np} + i_{лев} = z, \quad (18)$$

где $i_{np(лев)}$ – числа заходов правых и левых вспомогательных винтовых поверхностей.

Профиль режущих кромок, образованный пересечением вспомогательных винтовых поверхностей, приведен на рис. 18.

В отличие от фрез с затылованным зубом данная схема позволяет получать большие значения задних углов на боковых режущих кромках. При углах в плане 90° вспомогательные задние углы будут равны углам подъема винтовых поверхностей. За счет изменения чисел заходов и значений углов в плане появляется возможность управления значениями задних углов на вспомогательных режущих кромках. Дополнительно следует отметить, что большое смещение режущих кромок обеспечивает формирование обработанной поверхности с низкой шероховатостью, работа с большей толщиной среза и меньшей шириной способствует снижению уровня динамических нагрузок на технологическую систему [21, 22] и улучшает коэффициент заполнения стружечных канавок. Дополнительно необходимо отметить, что при этом формируется легко транспортируемая стружка (рис. 19).

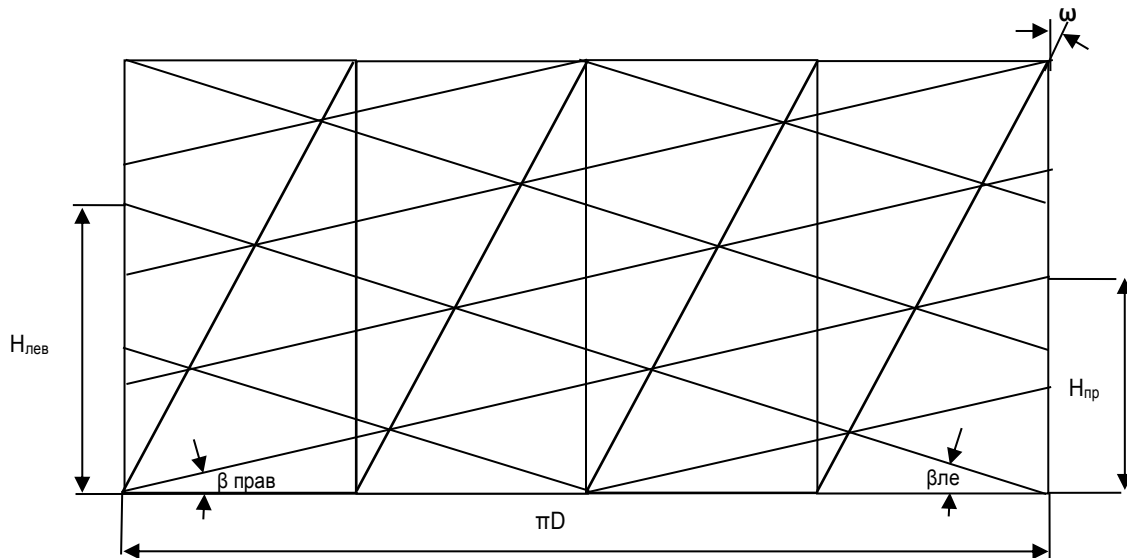


Рис. 17. Схема образования периодического острозаточенного профиля вспомогательными винтовыми поверхностями на примере фрезы с числом зубьев $z = 4$: $\beta_{\text{прав}}$ (лев) – соответственно углы подъема вспомогательных винтовых поверхностей правого и левого направлений; ω – угол наклона винтовой линии зуба фрезы; $H_{\text{пр}}$ (лев) – соответственно шаги вспомогательных винтовых поверхностей правого и левого направлений

Fig. 17. Formation diagram of a periodic sharp-cut profile by auxiliary helical surfaces on example of a mill with the number of teeth $z = 4$:

$\beta_{\text{прав}}$ (лев) – climbing angles of auxiliary helical surfaces of the right and left directions respectively; ω – the angle of inclination of the helical line of the milling cutter tooth; $H_{\text{пр}}$ (лев) – steps of auxiliary helical surfaces of the right and left directions respectively

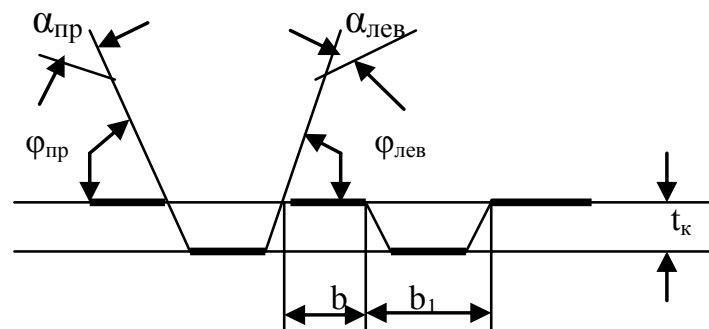


Рис. 18. Профиль режущих кромок:

$\varphi_{\text{пр(лев)}}$ – вспомогательные углы в плане соответственно на правой и левой сторонах стружкоразделительной канавки; $\alpha_{\text{пр(лев)}}$ – задние углы на вспомогательных режущих кромках; t_k – глубина стружкоразделительной канавки; b – активная длина режущей кромки; b_1 – ширина стружкоразделительной канавки

Fig. 18. Cutting edge profile:

$\varphi_{\text{right (left)}}$ – auxiliary angles in the plan on the right and left sides of the chip breaking groove respectively; $\alpha_{\text{right (left)}}$ – rear angles on auxiliary cutting edges; t_k – depth of the chip breaking groove; b – active length of the cutting edge; b_1 – width of the chip breaking groove

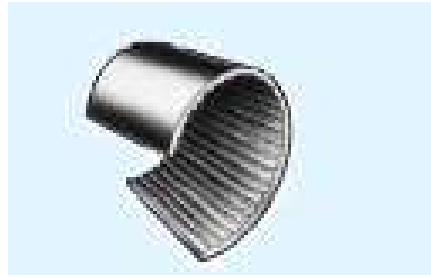


Рис. 19. Стружка, формируемая режущими кромками фрезы с переменной схемой резания
Fig. 19. Chip formed by cutting edges of a mill with a variable cutting pattern

Углы подъема вспомогательных винтовых поверхностей определяются через зависимости

$$\operatorname{ctg} \beta_{np(лев)} = \frac{\pi D}{i_{np(лев)} (b + b_1) \cos \omega} \pm \operatorname{tg} \omega, \quad (19)$$

знаки « + » для вспомогательных винтовых поверхностей, направление которых совпадает с направлением винтовой линии зубьев, « - » для вспомогательных винтовых поверхностей, направление которых противоположно винтовой линии зубьев.

Соответственно, шаги вспомогательных винтовых поверхностей будут равны

$$H_{np(лев)} = \pi \operatorname{tg} \beta_{np(лев)}. \quad (20)$$

Углы в плане $\varphi_{np(лев)}$ для вспомогательных режущих кромок определяются по формуле

$$\varphi_{np(лев)} = \arcsin \operatorname{tg} \alpha_{np(лев)} \operatorname{ctg} \beta_{np(лев)}. \quad (21)$$

Глубина стружкоразделительных канавок определяется из следующих соотношений

$$t_{к.мин} < t_k < t_{к.мах} \quad (22)$$

$$t_{к.мах} \leq b_1 \frac{\operatorname{tg} \varphi_{np} \operatorname{tg} \varphi_{лев}}{\operatorname{tg} \varphi_{np} + \operatorname{tg} \varphi_{лев}} \quad (23)$$

$$t_{к.мах} \geq \Delta h n \quad (24)$$

где Δh – припуск на переточку; n – число

переточек; $t_{к.мин}$ – минимальная глубина стружкоразделительной канавки; $t_{к.мах}$ – максимальная глубина стружкоразделительной канавки.

Для твердосплавных фрез с напайными пластинками расчет параметров периодического профиля выполняется с учетом того, чтобы вспомогательные винтовые поверхности проходили через стыки пластин. Это обеспечивается согласованием ширины режущих кромок и стружкоразделительных канавок с длиной пластин

$$K(b + b_1) \cos \omega = h_{пл} \quad (25)$$

где K – коэффициент кратности; $h_{пл}$ – высота пластинки по ГОСТ 25414-90.

Считая $b_1 = b - 1,5$, длина режущей кромки определится по формуле

$$b = \frac{h_{пл}}{2K \cos \omega} + 0,75, \quad (26)$$

и ширина стружкоразделительных канавок

$$b_1 = \frac{h_{пл}}{2K \cos \omega} - 0,75. \quad (27)$$

На торцовой части фрезы пластинки должны быть расположены с учетом шага вспомогательных винтовых поверхностей, при этом стыки пластин должны быть расположены в стружкоразделительных канавках. Для этого может потребоваться доработка пластин по высоте. Если применять специальные винтовые пластины твердого сплава с высотой равной длине рабочей



части фрезы, то расчет параметров периодического профиля без учета высоты пластин. Специальная пластина твердого сплава с увеличенной высотой по оси фрезы приведена на рис. 20.

Применение подобных пластин позволяет исключить появление рисков на обработанной поверхности при чистовом фрезеровании при больших значениях подачи на зуб. Риски являются следствием стыковки стандартных пластин по длине режущей части фрезы. При малых значениях подачи на зуб риски при расположении стыков пластин в шахматном порядке могут появляться при повышенном биении

режущих кромок.

Для оснащения фрез с винтовыми пластинками рекомендуются следующие марки твердых сплавов (см. табл. 6).

В табл. 6 приведены марки твердых сплавов, из которых выпускаются пластинки формы 36. Эффективность данных марок твердых сплавов при фрезеровании основных групп авиационных материалов приведена в работах [21, 23].

Рекомендуемые марки сталей для изготовления корпусов фрез с напайными пластинками твердого сплава приведены в табл. 7.



Рис. 20. Винтовая пластинка твердого сплава с увеличенной высотой
Fig. 20. Spiral hard alloy blade with increased height

Таблица 7

Марки твердых сплавов рекомендуемых для оснащения концевых фрез
с винтовыми пластинками

Table 7

Grades of hard alloys recommended for tooling end mills with helical plates

Марка сплава	Предел прочности при изгибе не менее МПа	Твердость, HRA	Группы применения	
			Основная	Дополнительная
BK8	1600	87,5	M20	K30, S20...S30
BK10-M	1500	88	M30	K30, S20...S30
BK10-OM***	1400	88,5	M20	K30, S20...S30
BK10-XOM****	1500...1700	89	M30	K20...K30, S20...S40
BK15-XOM****	1600...1800	88	M40	K40, S30...S40
ВП322	1700...1800	91	M30	K10...K40, M10... M20, S10...S40



Таблица 8

Материалы, рекомендуемые для изготовления корпусов концевых фрез
с напайными пластинками твердого сплава

Table 8

Materials recommended for manufacture of end mill cases
with soldered-on hard alloy plates

Назначение	Марка материала для изготовления корпуса фрезы			
	Диаметр фрезы, мм		Длина режущей части	
	До 25мм	Св. 25мм	До 2D	Св. 2D
Черновое фрезерование	P6M5, P12,	9XC, XBG	9XC, XBG	P6M5, P12, 9XC, XBG
Чистовое фрезерование	9XC, XBG, P6M5, P9, P12			

Данные материалы обеспечивают минимальный уровень растягивающих напряжений при пайке твердых сплавов [23] по сравнению марками сталей, применяемыми для изготовления корпусов фрез по стандартам. Дополнительно необходимо заметить, что высокая твердость корпусов после пайки обеспечивается хорошую работоспособность рабочих частей зубьев на

торцевых частях фрез.

Для современного оборудования при проектировании фрез необходимо применять следующие конструкции хвостовиков:

Конструкция хвостовика приведена на рис. 23, размеры – в табл. 9, а минимальная длина закрепления хвостовика – в табл. 10.

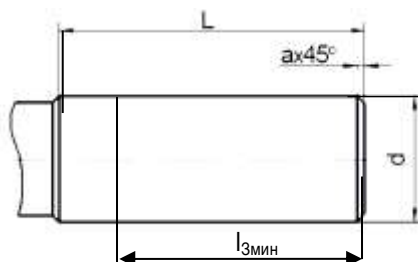


Рис. 21. Цилиндрический хвостовик по DIN1835A
Fig. 21. Cylindrical shank by DIN1835A

Таблица 9

Исполнительные размеры цилиндрического хвостовика фрез

Table 9

Operation dimensions of a milling cutter cylindrical shank

Обозначение	Размеры хвостовика, мм						
dh5, мм	16	20	25	32	40	50	63
L ⁺² , мм	48	50	56	60	70	80	90
c, мм	1,6	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0

Таблица 10

Минимальная длина участка закрепления цилиндрических хвостовиков

Table 10

Minimum length of cylindrical shank lockup section

Параметры хвостовика	Минимальная длина закрепления, мм						
Диаметр хвостовика фрезы dh5, мм	16	20	25	32	40	50	63
Длина хвостовика L ⁺² , мм	48	50	56	60	70	80	90
Длина участка закрепления, l _{3.мин}	45	46	52	55	60	70	80



Цилиндрические хвостовики «Weldon» предназначены для черновых и получистовых фрез, основным недостатком является увеличение биения режущих кромок. При закреплении винтами зазоры в соединении выбираются в одном направлении. Конструкции хвостовиков приведены

на рис. 24, а размеры – в табл. 9.

Так наибольшее значение биения режущих кромок будет наблюдаться в случае сочетания предельных значений размеров. Теоретическое максимальное биение режущих кромок для хвостовиков типа Weldon приведено в табл. 10.

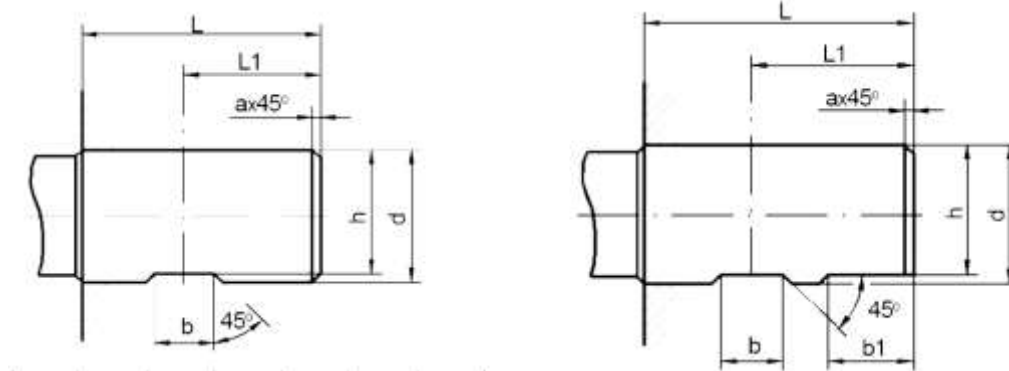


Рис. 22. Цилиндрический хвостовик по DIN1835B
Fig. 22. Cylindrical shank by DIN1835B

Таблица 11

Исполнительные размеры цилиндрического хвостовика типа «Weldon»

Table 11

Operation dimensions of a cylindrical shank of Weldon type

Обозначение	Размеры хвостовика, мм						
dh5, мм	16	20	25	32	40	50	63
L ⁺² , мм	48	50	56	60	70	80	90
L1 ₋₁	24	25	32	36	40	45	50
h, мм	14,2	18,2	23	30	38	47,8	60,8
b ^{+0,05} , мм	10	11	12	14	14	18	18
b1 ⁺¹ , мм	-	-	17	19	19	23	23
a, мм	1,6	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0

Таблица 12

Максимальное биение режущих кромок фрез с хвостовиком «Weldon»

Table 12

Maximal beating of mill cutting edges with a Weldon shank

Параметры хвостовика	Максимальное биение режущих кромок для заданных параметров						
Сопрягаемые диаметры	16	20	25	32	40	50	63
Хвостовик допуск, dh5, мкм	-8	-9	-9	-11	-11	-13	-13
Втулка допуск, dH4	5	6	6	7	7	8	8
Максимальное биение цилиндрической части фрезы, мкм	13	15	15	18	18	21	21
Среднеквадратичное биение цилиндрической части, мкм	9,4	10,8	10,8	13	13	15,3	15,3
Суммарное биение зубьев фрез при закреплении*	23	25	25	28	28	31	31

*для расчета принято максимальное биение режущих кромок относительно хвостовика 10 мкм.



Для сравнения биение режущих фрез с неперетачиваемыми пластинками будет значительно выше даже для цилиндрических хвостовиков, так допуск на пластины особо высокой точности для высокоскоростной обработки равен 19 мкм, а для пластин без силового замыкания – ± 13 мкм. Это предопределяет более высокое биение режущих кромок для сборных конструкций фрез.

Для снижения биения фрез при закреплении при черновой обработке по сравнению с хвостовиками Weldon целесообразно применение хвостовиков с замковой частью по типу Haimer (рис. 23).

Низкое биение режущих кромок повышает стойкость фрез, уменьшает интенсивность вибраций, а так же обеспечивает высокое качество обработанной поверхности [21, 24, 25].

С учетом того, что в настоящее время отсутствует серийное производство пластин формы 36 увеличенной длины, при жестких требованиях к качеству обработанной поверхности, рекомендуется проектировать фрезы для обработки высоких ребер (стенок) по методу деления ширины фрезерования. По сравнению с фрезами с неперетачиваемыми пластинками, расположенными в один ряд по высоте, они обеспечивают:

- меньшее число проходов за счет большей высоты пластин;
- низкий уровень динамических нагрузок на технологическую систему;
- в диапазоне диаметров от 20 до 60 мм, где сборные фрезы уступают по производительности, из-за меньшего числа зубьев обеспечивают увеличение минутно-

го съема металла.

В технологических процессах изготовления фрез необходимо учитывать следующие факторы, влияющие, как на работоспособность, так и трудоемкость их изготовления:

- выполнять входной контроль материалов;
- производить селективный подпор винтовых пластин твердого сплава по размерам (высоте и толщине) для изготовления фрез одной партии. Сортировке подлежат пластины одной марки твердого сплава, одной партии изготовления, одного изготовителя, с одинаковым коэффициентом резания. Необходимость подбора пластин связана с очень широкими полями допусков на размеры пластин: по ГОСТ 25414-90. допуск на толщину пластины – $\pm 0,5$ мм, высоту – $\pm 0,5$ мм, длину – до $\pm 1,5$ мм;
- фрезерование пазов или уступов под пластинки выполнять только концевой фрезой, это обеспечивает хорошее прилегание спинки пластин к боковой опорной поверхности паза или уступа. Применение дисковых фрез формирует саблевидную форму поверхности;
- пайка целесообразно выполнять по одному зубу без предварительного крепления пластин на установках ТВЧ с ЧПУ с контролем температуры оптическим пирометром, автоматической подачей припоя и защитной атмосферы или с применением активных флюсов типа Ф100;
- после пайки необходимо выполнять термостатирование фрез с выдержкой при температуре 200–250°C в течение 6–8 ч.



Рис. 23. Цилиндрический хвостовик с замковой частью
Fig. 23. Cylindrical shank with the lock



- перед шлифованием необходимо выполнять восстановление центровых гнезд на центрошлифовальном станке;
- шлифование необходимо выполнять алмазным кругом на керамической

связке, это обеспечивает возможность шлифования рабочей части и хвостовика с одного установка или применять оборудование с ЧПУ с автоматической сменой абразивных инструментов.

Обобщенные результаты и их обсуждение

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования позволили формализовать проектирование специальных и специализированных концевых фрез с напайными пластинками твердых сплавов для обработки заготовок деталей из основных групп авиационных материалов. Так же отработаны технологические процессы их изготовления, обеспечивающие минималь-

ное биение режущих кромок. Все это обеспечивает интенсификацию режимов механической обработки в диапазоне диаметров фрез от 20 до 60 мм, где монолитные твердосплавные фрезы практически не применяются из-за большого расхода вольфрамосодержащих материалов, а сборные менее эффективны вследствие технологического ограничения числа зубьев [2].

Выводы

Применение специализированных и специальных конструкций концевых фрез с напайными винтовыми пластинками твердых сплавов винтовой формы в диапазоне их диаметров от 20 до 60 мм обеспечивает эффективности как черновой, так и чистовой механической обработки деталей из авиационных материалов. Особенно они эффективны при чистовой обработке, так как формируют обработанную поверхность без искажения формы по сравнению с фре-

зами, оснащенными неперетачиваемыми пластинками, расположенными в несколько рядов по высоте. Для черновой обработки наиболее пригодны фрезы с переменными схемами резания, они создают меньший уровень динамических нагрузок на технологическую систему [20], что особенно важно при обработке не жестких деталей из материалов с низкими значениями модулей упругости.

Библиографический список

1. Балла О.М. Влияние эксплуатационных и конструктивных параметров инструмента на расход вольфрамосодержащих материалов // Вестник Иркутского государственного технического университета. Серия: Машиноведение. 2006. № 4 (28). С. 57–62.
2. Балла О.М. Особенности выбора и применение концевых фрез для обработки авиационных материалов на многоцелевых станках с ЧПУ // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2011. № 2. С. 21–34.
3. Балла О.М. О выборе концевых фрез для обработки авиационных материалов на многоцелевых станках с ЧПУ // Авиационная промышленность. 2011. № 1. С. 25–31.
4. Cutters equipment by Marwin. Marwin cutting tools LTD. Rothlay, 1978. 18 p.
5. Подпоркин В.Г., Бердников Л.Н. Фрезерование труднообрабатываемых материалов. Л.: Машиностроение, 1983. 136 с.
6. Кривоухов В.А., Егоров С.В., Брунштейн Б.Е. Об-

- рабатываемость резанием жаропрочных и титановых сплавов. М.: Машгиз, 1961. 279 с.
7. Кривоухов В.А., Чубаров А.Д. Обработка резанием титановых сплавов. М.: Машиностроение, 1970. 184 с.
8. Петруха П.Г. Резание труднообрабатываемых материалов. М.: Машиностроение, 1972. 175 с.
9. Резников Н.И., Бурмистров Е.В., Жарков И.Г., Зыкин А.С. Обработка резанием жаропрочных, высокопрочных и титановых сплавов. М.: Машиностроение, 1972. 200 с.
10. Белянин П.Н. Производство широкофюзеляжных самолетов. М.: Машиностроение, 1979. 360 с.
11. Белянин П.Н. Технология и оборудование для производства широкофюзеляжных самолетов в США. М.: Машиностроение, 1979. 255 с.
12. Братухин А.Г., Фаткуллин О.Х. Новые материалы и технологии получения изделий для авиационной техники. М., 1996. 166 с.
13. Балла О.М. О выборе углов подъема винтовой линии зубьев концевых фрез // Авиационная про-



мышленность. 2009. № 1. С. 27–30.

14. Кожевников Д.В., Гречишников В.А., Кирсанов С.В. Режущий инструмент. М.: Машиностроение, 2005. 528 с.

15. Баранчиков В.И., Тарапанов А.С., Харламов Г.А. Обработка специальных материалов в машиностроении: Справочник. Библиотека технолога. М.: Машиностроение, 2002. 264 с.

16. Самойлов В.С., Эйхманс Э.Ф., Фальковский В.А. Металлорежущий твердосплавный инструмент. Справочник. М.: Машиностроение, 1988. 368 с.

17. Балла О.М. Проектирование концевых фрез // Вопросы авиационной науки и техники. Серия: Авиационная технология. 1989. Вып. 1 (10). С. 65–75.

18. Ларин М.Н. Высокопроизводительные конструкции фрез и их рациональная эксплуатация. М.: Mashgiz, 1957. 272 с.

19. А. с. № 1050176 МКИ В23с 5/06. Фреза / О.М. Балла. 1983.

20. Балла О.М. Повышение эффективности механической обработки деталей из высокопрочных материалов путем применения фрез с переменными схемами резания // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. № 5. С. 10–27.

21. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. Л.: Машиностроение, 1986. 200 с.

22. Балла О.М. Повышение эффективности фрезерования крупногабаритных деталей силового набора // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. № 3. С. 10–23.

23. Имшенник К.П., Черкасов В.М. Технология пайки фрез // Сборник докладов всесоюзного совещания по фрезам. М.: НИИМАШ, 1968. С. 183–196.

24. Кондратов А.С. Вопросы технологических режимов резания // Труды Национального института авиационных технологий (НИАТ). 1968. № 256. 64 с.

25. Маталин А.А. Технология машиностроения. Санкт-Петербург: Лань, 2016. 512 с.

References

1. Balla O.M. Influence of operational and design parameters of the tool on tungsten-containing material consumption. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2006, no. 4. pp. 57–62. (In Russian)

2. Balla O.M. Selection features and application of end milling cutters for aircraft materials machining by multi-purpose numerical control machines. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2011, no. 2. pp. 21–34. (In Russian)

3. Balla O.M. On selection of end-mills for cutting aircraft materials on NC machining centers. Aviacionnaja promyshlennost' [Aviation Industry]. 2011, no. 1, pp. 25–31. (In Russian)

4. Cutters equipment by Marwin. Marwin cutting tools LTD. Rothlay, 1978. 18 p.

5. Podporkin V.G., Berdnikov L.N. Frezerovanie trudnoobrabatyvaemykh materialov [Milling of hard-to-machine materials]. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1983. 136 p. (In Russian)

6. Krivouhov V.A., Egorov S.V., Brunshtejn B.E. Obrabatyvaemost' rezaniem zharoprochnykh i titanovykh splavov [Machining property of heat-resistant and titanium alloys]. Moscow: Mashgiz Publ., 1961. 279 p. (In Russian)

7. Krivouhov V.A., Chubarov A.D. Obrabotka rezaniem titanovykh splavov [Machining of titanium alloys]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1970. 184 p. (In Russian)

8. Petruha P.G. Rezanie trudnoobrabatyvaemykh materialov [Cutting of hard-to-machine materials]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1972. 175 p. (In Russian)

9. Reznikov N.I., Burmistrov E.V., Zharkov I.G., Zykin A.S. Obrabotka rezaniem zharoprochnykh, vysokoprochnykh i titanovykh splavov [Machining of heat-resistant, high-strength and titanium alloys]. Moscow:

Mashinostroenie Publ., 1972. 200 p. (In Russian)

10. Beljanin P.N. Proizvodstvo shirokofuzel'nykh samoletov [Production of wide-body aircrafts]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1979. 360 p. (In Russian)

11. Beljanin P.N. Tehnologija i oborudovanie dlja proizvodstva shirokofuzel'nykh samoletov v SSHA [Technology and equipment for the production of wide-body aircrafts in the United States]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1979. 255 p. (In Russian)

12. Bratuhin A.G., Fatkullin O.H. Novye materialy i tehnologii poluchenija izdelij dlja aviacionnoj tehniki [New materials and production technologies of items for aircrafts]. Moscow, 1996. 166 p. (In Russian)

13. Balla O.M. On elevation angle selection for the end mill teeth helix line Aviacionnaja promyshlennost' [Aviation Industry]. 2009, no. 1, pp. 27–0. (In Russian)

14. Kozhevnikov D.V., Grechishnikov V.A., Kirсанov S.V. Rezhushhij instrument [Cutting tool]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2005. 528 p. (In Russian)

15. Baranchikov V.I., Tarapanov A.S., Harlamov G.A. Obrabotka special'nykh materialov v mashinostroenii [Processing of special materials in mechanical engineering]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2002. 264 p. (In Russian)

16. Samojlov V.S., Jehmans Je.F., Fal'kovskij V.A. Metallorezhushhij tverdosplavnyj instrument [Metal cutting carbide tools]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1988. 368 p. (In Russian)

17. Balla O.M. End mill design. Voprosy aviacionnoj nauki i tehniki. Serija: Aviacionnaja tehnologija [Issues of aviation science and technology. Series: Aviation technology]. 1989, no. 1 (10), pp. 65–75. (In Russian)

18. Larin M.N. Vysokoproizvoditel'nye konstrukcii frez i ih racional'naja jekspluatacija [High-performance milling cutter designs and their rational operation]. Moscow: Mashgiz Publ., 1957. 272 p. (In Russian)

19. А.с. № 1050176 МКИ В23с 5/06. Freza [Milling cut-



ter] / O.M. Balla. 1983.

20. Balla O.M. Improving machining efficiency of parts from high-strength materials through application of mills with alternative cutting patterns. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2018, no. 5, pp. 10–27. <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-5-10-27> (In Russian)

21. Zharkov I.G. Vibratsii pri obrabotke lezviinym instrumentom [Vibration when processing by the blade tool]. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1986. 200 p. (In Russian)

22. Balla O.M. Improving milling efficiency of large-size parts of aircraft structural frame [Proceedings of Irkutsk State Technical University] 2018, no. 3, pp. 10–23. <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-3-10-23>

Критерии авторства

Балла О.М. имеет на статью авторские права и несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

(In Russian)

23. Imshennik K.P., Cherkasov V.M. Tehnologija pajki frez [Technology of milling cutter brazing]. Sbornik dokladov vsesojuznogo soveshhanija po frezam [Collection of reports of the all-Union meeting on milling cutters]. Moscow: Research Institute of mechanical engineering Publ., 1968, pp. 183–196. (In Russian)

24. Kondratov A.S. Voprosy tekhnologicheskikh rezhimov rezanija [Questions of technological modes of cutting]. Trudy Nacional'nogo instituta aviacionnyh tekhnologij (NIAT) [Proceedings of the National Institute of aviation technology (NIAT)]. 1968, no. 256, 64 p. (In Russian)

25. Matalin A.A. Tehnologija mashinostroenija [Engineering technology]. Saint-Petersburg: Lan' Publ., 2016, 512 p. (In Russian)

Authorship criteria

Balla O.M. has all author's rights and bears the responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

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



Оригинальная статья / Original article

УДК: 621.9.048

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-11-34-42>

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ МИКРООТВЕРСТИЙ. ЧАСТЬ 2

© А.Ф. Бойко¹, М.Н. Воронкова²

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

РЕЗЮМЕ: Показано, что для получения прецизионных микроотверстий в наилучшей степени разработан и нашел применение электроэрозионный способ. Для высокопроизводительной прошивки микроотверстий с нежесткими требованиями к точности и качеству поверхности отверстий нецелесообразным является применение лазерного и электронно-лучевого методов. Для получения сверхглубоких микроотверстий глубиной 100 и более диаметров применяют методы литья и сборки. Методической основой исследований является сравнительный научно-технический анализ мировых промышленных технологий получения микроотверстий в историческом развитии. Описаны физико-техническая сущность десяти методов получения микроотверстий, применяемое оборудование и технологические возможности методов, дана количественная и качественная оценка технологических процессов. Определены рациональные области использования десяти методов получения микроотверстий. Разработаны перспективные направления совершенствования технологии прецизионных микроотверстий.

Ключевые слова: микроотверстия, прокольный пуансон, лазерная прошивка, электронно-лучевая обработка, ионный пучок

Информация о статье: Дата поступления 23 июля 2018 г.; дата принятия к печати 30 октября 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 ноября 2018 г.

Для цитирования: Бойко А.Ф., Воронкова М.Н. Анализ методов получения микроотверстий. Часть 2. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(11):34–42. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-34-42.

ANALYSIS OF MICRO HOLE DRILLING METHODS. PART 2

Anatoly F. Boyko, Marina N. Voronkova

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,
46 Kostyukov St., Belgorod 308012, Russian Federation

ABSTRACT: Electric discharge machining is shown to be the best method developed and used for drilling precision micro-holes. High-performance piercing of micro holes with non-rigid requirements to hole surface accuracy and quality requires to use laser and electron-beam methods. The methods of casting and assembly are used to obtain super deep micro holes with the depth of 100 or more diameters. A comparative scientific and technical analysis of the world industrial technologies of obtaining micro holes in the historical development forms the methodological basis of the research. The article gives a physico-technical characteristic of ten methods of micro hole drilling, describes the equipment used and process capabilities the methods under discussion. The quantitative and qualitative assessment of technological processes is given as well. The rational application fields of ten methods of micro hole drilling are determined. The promising directions of improving the precision micro hole technology are developed.

¹Бойко Анатолий Федорович, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения, e-mail: boyko_1947@bk.ru

Anatoly F. Boyko, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, e-mail: boyko_1947@bk.ru

²Воронкова Марина Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения, e-mail: mkuzko@mail.ru

Marina N. Voronkova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, e-mail: mkuzko@mail.ru



Keywords: micro holes, pin-hole punch, laser drilling, electron beam treatment, ion beam

Information about the article: Received 23 July, 2018; accepted for publication 30 October, 2018; available online 30 November, 2018.

For citation: Boyko A.F., Voronkova M.N. Analysis of micro hole drilling methods. Part 2. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(11):pp. 34–42. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-34-42.

Введение

В первой части статьи были проанализированы механический, ионно-оптический, электронно-лучевой, лазерный и электрический методы получения микроотверстий. Изложена физико-техническая сущность методов, их технологические воз-

можности. Во второй части дается анализ пяти методов: струйного электрохимического, метода литья, метода сборки, группового способа вакуумного напыления, электроэрозионного. Сделаны обобщающие выводы по результатам работы.

Цель исследования

Целью настоящих исследований является определение рациональных областей использования мировых технологий получения микроотверстий, разработка

перспективных направлений совершенствования технологии прецизионных микроотверстий.

Материалы и методы исследования

Струйная электрохимическая прошивка малых отверстий была разработана в середине 70-х годов прошлого столетия на одном из предприятий г. Москвы [1]. Этим способом прошивали отверстия диаметром 0,2–0,5 мм в различных труднообрабатываемых сплавах. Принцип способа заключается в следующем (рис. 1).

В кварцевой или стеклянной трубке 1, являющейся инструментом, установлена токопроводящая металлическая втулка 2 – катод. Через суживающееся сопло 3 в направлении к заготовке-аноду 4 прокачивается под давлением до 0,5 МПа раствор электролита 5. Инструмент-катод подается в направлении прошивки со скоростью u_k .

В качестве электролита целесообразно использовать 10–15%-й водный раствор соляной кислоты, обладающий высокой электропроводностью и образующий хорошо растворимые соединения с металлами, входящими в состав практически любого сплава.

Общий характер процесса анодного

растворения в струйной электрохимической прошивке аналогичен процессам размерной электрохимической обработки, но гидродинамический режим процесса специфичен, что объясняется значительным разнесением в пространстве анода и катода своеобразной схемой движения раствора и, главное, нестационарной геометрией гидравлического тракта.

Капиллярность инструмента и значительное межэлектродное расстояние, являясь причинами большого омического сопротивления между анодом и катодом (несколько тысяч Ом), делают необходимым применение высоких рабочих напряжений (до 1 кВ), что, в свою очередь, вызывает интенсивное нагревание раствора.

Достоинствами струйного электрохимического способа прошивки малых отверстий являются:

- простота технологии и оборудования;
- достаточно высокая скорость прошивки (0,5–4 мм/мин);

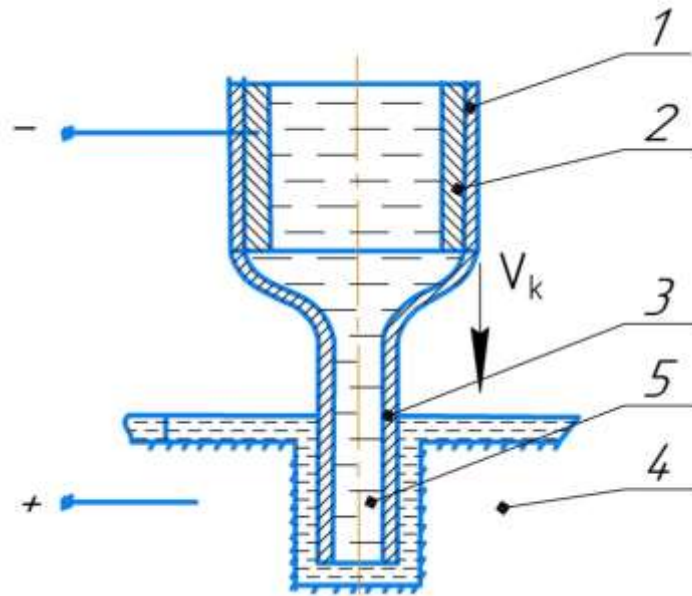


Рис. 1. Инструмент и схема струйной электрохимической прошивки малых отверстий:
1 – кварцевая или стеклянная трубка; 2 – втулка-катод; 3 – сопло; 4 – заготовка-анод;
5 – раствор электролита

Fig. 1. Tool and a diagram of jet electrochemical piercing of small holes:
1 – quartz or glass tube; 2 – cathode-bushing; 3 – nozzle; 4 – anode billet;
5 – electrolyte solution

– хорошее качество обработанной поверхности ($Ra = 0,4\text{--}1\text{ мкм}$).

Недостатки метода:

- невысокая точность обработки (конусность, овальность отверстий);
- экологическая опасность, связанная с применением химически опасных электролитов;
- повышенная электроопасность, связанная с применением высоких рабочих напряжений.

Изготовление микроотверстий методом литья. Наиболее массовым инструментом для микросварки полупроводниковых приборов является твердосплавной микроинструмент. Первая опытно-промышленная технология его производства, разработанная в конце 60-х годов прошлого столетия, базировалась на методе литья. По этому методу твердосплавные заготовки микроинструмента получали литьем твердого сплава в металлическую форму [2].

Сущность способа заключается в следующем. Металлическая форма с за-

крепленной в ней проволокой или стержнем нужного диаметра (30–100 мкм) заполняется под давлением нагретой до пластического либо жидкого состояния смесью порошка твердого сплава с пластификатором, например парафином. После заполнения форма разбирается, стержень удаляется и заготовка спекается. Полученные таким образом заготовки имеют отверстия, равные диаметру стержня или проволоки с учетом коэффициента усадки при спекании.

Достоинствами этого метода получения микроотверстий являются:

- простота процесса, не требующего больших затрат;
- возможность получать микроотверстия глубиной до 100 и более диаметров.

Недостатки метода:

- нестабильность диаметров получаемых отверстий из-за разброса коэффициента усадки;
- значительная трудоемкость последующей обработки отлитой заготовки, связанная с необходимостью точной при-



вязки обрабатываемых поверхностей к уже имеющемуся микроотверстию;

– значительный брак по причине забивки микроотверстий при спекании заготовки в процессе последующей ее шлифовки.

Получение микроотверстий методом сборки. Организация массового производства интегральных микросхем потребовала разработки новых различных способов серийного изготовления инструмента для микросварки. В 60-х годах прошлого столетия в США и Европе широко использовался метод изготовления капиллярных микроинструментов путем сборки.

Фирма Diatron Pacific (США) разработала метод изготовления капилляров из карбида вольфрама, позволяющий с большой точностью получать отверстия диаметром от 20 мкм и выше значительной глубины [3]. Технологический процесс изготовления капиллярных инструментов фирмы Diatron Pacific состоит в следующем. Из карбида вольфрама изготавливается заготовка с рабочим клинообразным торцом.

Заготовка вставляется в прецизион-

ную оправку и при помощи тонкого алмазного отрезного круга требуемой толщины вдоль нижней и конусной поверхности клина прорезается радиусная канавка (рис. 2).

Диаметр канавки зависит от диаметра сварочной проволоки, направляемой по канавке при микросварке, и находится в пределах 20–100 мкм.

В канавку вводят кусочек твердой алюминиевой проволоки. Проволока прижимается пластинкой из нержавеющей стали толщиной 125 мкм. На пластинку и вокруг кончика клина накладывают серебряный припой и флюс. Затем все устройство помещают в сварочную печь и нагревают до температуры 540°C. При этом пластинка припаивается к корпусу клина. Алюминиевая проволока расплавляется не должна. Наконечник, пластинка из нержавеющей стали и припой шлифуют до определенных размеров. Весь клин погружают в 20 %-й раствор щелочи и очищают при одновременном воздействии ультразвука в течение 5 мин, во время чего алюминиевая проволока растворяется, оставляя отверстие чистым.

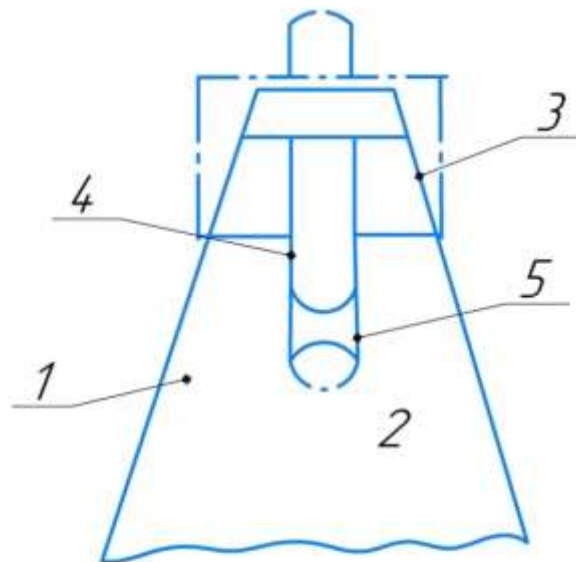


Рис. 2. Схема операции прорезания радиусной канавки в заготовке из карбида вольфрама:

1 – заготовка из карбида вольфрама; 2 – верхняя конусная секция заготовки; 3 – нижняя конусная секция заготовки; 4 – прорезанная радиусная канавка; 5 – алюминиевая проволока

Fig. 2. Diagram of radius grooving operation in a tungsten carbide workpiece: 1 –tungsten carbide workpiece; 2 – upper conical section of the workpiece; 3 – lower conical section of the workpiece;

4 – cut radius groove; 5 – aluminum wire



Фирма Diatron Pacific изготавливала также инструмент для микросварки с центральным капиллярным отверстием. Требуемый профиль получали путем соединения двух половин. Обе половины шлифуют и очищают. Затем в них прорезают аксиальные канавки. После этого обе половины снова очищают и в одну из канавок помещают алюминиевую проволоку. Обе половины соединяют вместе и скрепляют при помощи серебряного припоя или спекания. Затем алюминиевая проволока растворяется и весь монтаж очищается. При этом образовавшееся микроотверстие остается открытым.

Достоинствами методов сборки для получения микроотверстий являются:

- относительная простота технологии и оборудования;
- возможность получать микроотверстия глубиной до 100 и более диаметров.

Недостатки методов:

- низкая производительность технологии;
- значительная трудоемкость шлифования поверхности рабочего профиля микроинструмента, связанная с необходимостью точной привязки обрабатываемых

поверхностей к уже имеющемуся микроотверстию с размещенной в нем алюминиевой проволочкой.

Групповой способ изготовления сварочных капилляров с помощью вакуумного напыления. Американская фирма Fan steel Inc (США) разработала [3] простой способ механизированного изготовления сварочных капилляров из вольфрама. Вольфрамовые покрытия осаждают в вакууме на специальные шаблоны продолговатой формы из нержавеющей стали (рис. 3).

После нанесения твердое покрытие отделяют от шаблона, а кончик обрезают. При этом вскрывается микроотверстие, которое и служит для направления проволоки при микросварке. Качество поверхности микроотверстия достаточно хорошее $R_a = 0,3-0,6$ мкм. Диаметр получаемых микроотверстий от 20 мкм и выше.

Напыление покрытия осуществляют в вакуумной камере, в которую подают дозированно в строгой пропорции шестифтористый вольфрам (WF_6) и водород (H_2), восстанавливающий газ. В камере расположен держатель с множеством точных отверстий, в которые вставляют шаблоны из нержавеющей стали (рис. 3).

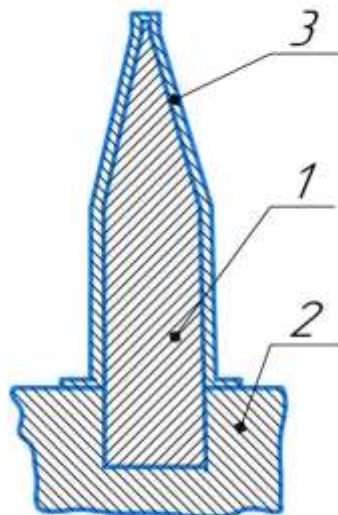


Рис. 3. Вертикальный разрез в увеличенном масштабе шаблона после нанесения на него покрытия из твердого материала:

1 – шаблон; 2 – рабочий стол; 3 – твердое покрытие

Fig. 2. Vertical section on the enlarged scale template after coating with hard material:
1 – template; 2 – working table; 3 – hard coating



Достоинства группового способа получения сварочных капилляров с помощью вакуумного напыления:

- достаточно высокая производительность вследствие группового характера технологии;
- высокая стабильность получаемых размеров микроотверстия;
- хорошее качество поверхности микроотверстий.

Недостатки способа:

- способ пригоден только для капилляров с центральным отверстием и непригоден для микросварочного инструмента с боковым отверстием;
- в ряде случаев получаемая нежесткая оболочковая конструкция ограничивает область применения микроинструмента;
- после операции вскрытия микроотверстия и шлифования рабочего профиля довольно часто происходит засорение микроотверстия, что требует проведения дополнительной операции по его очистке, которая не всегда бывает успешной;
- необходимость применения дорогостоящего вакуумного оборудования.

Электроэрозионная прошивка микроотверстий. Электроэрозионный способ обработки токопроводящих материалов, впервые предложенный в 1943 г. советскими учеными Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко, значительно расширил возможности современной машиностроительной технологии, позволив успешно обрабатывать любые токопроводящие материалы вне зависимости от их механических свойств: твердости, вязкости и пр.

Именно при электроэрозионной прошивке микроотверстий в полной мере выявляются такие преимущества этого способа, как незначительные механические усилия при обработке, отсутствие необходимости в обрабатывающих электродах-инструментах более твердых, чем обрабатываемый материал, высокая повторяемость размеров обрабатываемых отверстий, использование простого недорогого инструмента в виде электрода-проволоки, который имеет высокую точность и ста-

бильность размера по диаметру, так как изготавливается методом волочения через прецизионную фильеру [4].

Следует отметить, что промышленное применение метода электроэрозионной прошивки микроотверстий началось в 60-х годах прошлого столетия благодаря исследованиям и разработкам, проведенным Е.М. Левинсоном, В.С. Львом, В.А. Петровым (автомобилестроение), Б.И. Ставицким, Е.В. Холодновым (электронная промышленность). Развитие этих отраслей промышленности, а также оборонной, приборостроительной, авиационной, аэрокосмической, электротехнической, текстильной, часовой и др., сделало необходимым дальнейшее совершенствование этого эффективного способа получения микроотверстий.

Достоинствами электроэрозионного метода, реализованного в этом оборудовании и положительно отличающего его от других методов получения микроотверстий, являются:

- высокая точность обработки, в том числе: по диаметру и форме сквозных отверстий – 1–3 мкм, глухих – 5–10 мкм; по расположению отверстий относительно базовых поверхностей изделия – до нескольких микрон;
- достаточно высокое качество обработанной поверхности: $R_{a \text{ min}}$ до 0,2–0,3 мкм;
- высокая повторяемость размеров получаемых отверстий и, как следствие, высокий процент выхода годных изделий;
- относительная простота процесса и оборудования по сравнению с лучевыми методами (лазерным, электронно-лучевым, ионно-оптическим), вакуумным напылением и др.;
- относительная простота и дешевизна применяемого электрода-инструмента: для получения цилиндрических отверстий это проволока, в отличие от инструментов для механического, электро-механического методов, а также методов литья, сборки и др.;
- в отличие от механических методов, электроэрозионным методом можно



прошивать микроотверстия в любых токопроводящих материалах независимо от их физико-механических свойств: твердости, прочности, вязкости и др.

Дальнейшее развитие технологии и оборудования для электроэрозионной прошивки микроотверстий получили в разработках ОКБТИ при заводе «Ритм» и БГТУ им. В.Г.Шухова (г. Белгород). Это станки моделей 04ЭП-10М, 04ЭП-10МФ2, СЭП-85-001, СЭП.МЭП-1-005 [5]. Наибольшее применение нашел станок мод.04ЭП-10М, которых было изготовлено свыше 500 единиц. Станок оснащен транзисторным генератором сверхкоротких биполярных импульсов наносекундного диапазона [6], быстродействующим двухканальным регулятором подачи [7, 8], высокочастотным

адаптивно управляемым вибратором электрода-инструмента [9–20], двумя оптическими головками.

К числу последних удачных отечественных разработок следует отнести электроэрозионные станки с ЧПУ для прошивки малых отверстий моделей ЭП-310П (НПО «Техномаш»), ДГП-ЭП-03 (ООО «Элгес»). Из зарубежных фирм, выпускающих современные прецизионные станки для высокопроизводительной электроэрозионной прошивки малых отверстий, следует отметить: Sarix SA и GF Agie Charmilles (Швейцария); Neuen, Zimmer+Kreim, MB Maschinen (Германия); Makino, Mitsubishi, Sodick (Япония); Current EDM, Beaumont Machine (США).

Выводы

Обобщая обзор и сравнительный анализ десяти методов получения микроотверстий, можно сделать следующие выводы:

1. Для обработки прецизионных микроотверстий в высокоточных изделиях (инструмент для микросварки, изделия электронной техники и приборостроения, медтехника и др.) целесообразным является применение электроэрозионного метода, который обеспечивает выполнение требований, предъявляемых к качеству микроотверстий, в том числе:

- по точности диаметра получаемых отверстий;
- по точности формы отверстий (конусности, скруглению кромок);
- по точности положения оси микроотверстия относительно базовых поверхностей изделия;
- по шероховатости обработанной

поверхности;

– по отсутствию дефектного поверхностного слоя в отверстии.

2. Для высокопроизводительной прошивки микроотверстий, в том числе для перфорации тонколистовых материалов, с жесткими требованиями к точности и качеству поверхности отверстий, целесообразным является применение лазерного и электронно-лучевого методов.

3. Для получения сверхглубоких микроотверстий с соотношением глубины к диаметру 100 и более и жесткими требованиями к точности отверстий целесообразным является применение методов литья и сборки.

4. Для получения неглубоких микроотверстий (до пяти диаметров) в незакаленных сталях и при отсутствии соответствующего оборудования может применен метод давления.

Библиографический список

1. Волков Ю.С., Щедрин О.П., Межеричкий А.В. Особенности гидродинамического режима при струйном электрохимическом формообразовании // Электронная обработка материалов. 1976. № 1. С. 14–18.
2. Воинова К.Н., Проскуряков Г.А., Хватов В.М. Особенности изготовления капилляров в рубиновых

и твердосплавных инструментах для микросварки // Электронная техника. Серия 6 «Микроэлектроника». 1971. № 5. С. 23–25.
3. Бойко А.Ф. Эффективная технология и оборудование для электроэрозионной прошивки прецизионных микроотверстий. Белгород: Изд-во БГТУ, 2010. 314 с.



4. Бойко А.Ф., Лойко А.М. Особенности процесса естественной эвакуации продуктов обработки при электроэрозионной прошивке микроотверстий // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 11. С. 128–131.
5. Бойко А.Ф. Станок для электроэрозионной обработки отверстий малого диаметра // Станки и инструмент. 1987. № 12. С. 24–25.
6. А.с. 884923, СССР. М. Кл³. В 23 Р 1/02. Транзисторный генератор импульсов для электроэрозионной обработки / А.Ф. Бойко, С.А. Шаповалов. № 2876113/25-08; заявл. 30.01.80, опубл. 30.11.81. Бюл. № 44.
7. А. с. 952503, СССР. М. Кл³. В 23 Р/14. Регулятор подачи электроэрозионного станка / А.Ф. Бойко, С.А. Шаповалов, В.М. Коробцов; заявитель и патентообладатель «Особое конструкторское бюро технологии инструмента». № 3228978/25-08; заявл. 31.12.80, опубл. 23.08.81. Бюл. № 31.
8. Пат. № 63274, Российская Федерация, МПК В23Н1/00. Адаптивный электромеханический регулятор подачи электрода-инструмента электроэрозионного станка / А.А. Погонин, А.Ф. Бойко, Б.В. Домашенко; заявитель и патентообладатель Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова № 2006146420/22; заявл. 25.12.2006, опубл. 27.05.2007. Бюл. № 15.
9. Кудеников Е.Ю., Бойко А.Ф. Исследование профиля прецизионных отверстий, получаемых методом электроэрозионной обработки // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 3. С. 103–106.
10. Биленко С.В., Сариллов М.Ю., Бурдасов Е.Н., Маслацова А.Э. Исследование процесса электроэрозионного прошивания отверстий // Фундаментальные исследования. 2012. № 9 (ч. 4). С. 882–888.

11. Оглезнев Н.Д., Абляз Т.Р. Влияние режимов электроэрозионной обработки на точность получения отверстий // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 4 (2). С. 393–398.
12. Оглезнев Н.Д. Современное состояние и перспективы развития электроэрозионной обработки // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16. № 1 (2). С. 490–493.
13. Елисеев Ю.С., Саушкин Б.П. Электроэрозионная обработка авиационно-космической техники. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 437 с.
14. Ставицкий И.Б., Битюцкая Ю.Л. Назначение рациональных режимов электро-эрозионной обработки платины с использованием решений тепловой задачи Стефана // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 11. С. 60–71. DOI: 10.7463/1115.0826317
15. Саушкин Б.П. Электроэрозионная обработка: состояние и перспективы развития. Часть 2. Прошивка отверстий // РИТМ: ремонт, инновации, технологии, модернизации. 2012. № 9 (77). С. 20–24.
16. Красников В.Ф. Микротехнология // Машиностроитель. 1972. № 11. С. 41–43.
17. Левинсон Е.М. Отверстия малых размеров (методы получения). Л.: Машиностроение. 1977. 152 с.
18. Крылов К.И., Прокопенко В.Т., Митрофанов А.С. Применение лазеров в машиностроении и приборостроении. Л.: Машиностроение. 1998. 276 с.
19. Reiner S. Laserais herkzeug in der Fertigung // Phys und Didakt. 1976. 4. No. 3. P. 205–223.
20. Зенин В.В., Кондратьев В.П., Водянов Ю.М., Рыжков Ф.Н. Электрохимическая прошивка отверстий малых диаметров в твердосплавном инструменте для микросварки // Электронная обработка материалов. 1975. № 5. С. 85–87.

References

1. Volkov YU.S., Shchedrin O.P., Mezheritskiy A.V. Features of hydrodynamic mode in jet electrochemical shaping. *Elektronnaya obrabotka materialov* [Surface Engineering and Applied Electrochemistry], 1976, no. 1, pp. 14–18. (In Russian)
2. Voinova K.N., Proskuryakov G.A., Khvatov V.M. Features of capillary making in ruby and hard-alloy tools for micro-welding. *Elektronnaya tekhnika* [Electronic Equipment]. Seria 6 «Mikroelektronika» [Series 6 "Microelectronics"], 1971, no. 5, pp. 23–25. (In Russian)
3. Bojko A.F. *Effektivnaya tekhnologiya i oborudovanie dlya elektroerozionnoi proshivki pretsizionnykh mikrootverstii* [Effective technology and equipment for electroerosive piercing of precision micro-holes]. Belgorod, BSTU Publ., 2010, 314 p. (In Russian)
4. Bojko A.F., Loyko A.M. Features of process of natural evacuation of products of erosion in case of electrical discharge machining microopenings. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova* [Bulletin of BSTU named

- after V.G. Shukhov], 2016, no. 11, pp. 128–131. (In Russian)
5. Bojko A.F. Machine-tool for electroerosive machining of small diameter holes. *Stanki i instrument* [Machines and Tools], 1987, no. 12, pp. 24–25. (In Russian)
6. Bojko A.F. *Tranzistornyy generator impul'sov dlya elektroerozionnoy obrabotki* [Transistor pulse generator for EDM processing]. Patent USSR, no. 884923, 1981.
7. Bojko A.F. *Regulyator podachi elektro erozionnogo stanka* [Erosion machine feed regulator]. Patent USSR, no. 952503, 1981.
8. Pogonin A.A. *Adaptivnyy elektromekhanicheskiy regulyator podachi elektroda-instrumenta elektroerozionnogo stanka* [Adaptive electromechanical regulator of EDM machine-tool electrode feed]. Patent RF, no. 63274, 2007.
9. Kudenikov E.Yu., Boiko A.F. Research profile precision holes obtained by electrical discharge machining. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova* [Bulletin of



BSTU named after V.G. Shukhov], 2017, no. 3, pp. 103–106. (In Russian)

10. Bilenko S.V., Sarilov M.Yu., Burdasov E.N., Maslatsova A.E. Study of the process of hole-making by electrical discharge machining. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental Research] 2012, no. 9 (part 4), pp. 882–888. (In Russian)

11. Ogleznev N.D., Ablyaz T.R. Study of the process of hole-making by electrical discharge machining. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental Research], 2013, vol. 15, no. 4 (2), pp. 393–398.

12. Ogleznev N.D. Study of the process of hole-making by electrical discharge machining. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental Research]. 2014, vol. 16, no. 1 (2), pp. 490–493. (In Russian)

13. Eliseev Yu.S., Saushkin B.P. Elektroerozionnaya obrabotka aviatsionno-kosmicheskoi tekhniki [Electro-erosive processing of aerospace equipment]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publ., 2010, 437 p. (In Russian)

14. Stavitskii I.B., Bityutskaya Yu.L. Electrical discharge platinum machining optimization using Stefan problem solutions. // *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGU im. N.E. Baumana* [Science and Education. Bauman Moscow State Technical University], 2015,

no. 11, pp. 60–71. DOI: 10.7463/1115.0826317. (In Russian)

15. Saushkin B.P. *Electrical discharge machining: condition and development prospects. Part 2. Hole Punching. RITM: remont, innovatsii, tekhnologii, modernizatsii* [RHYTHM: Repair, Innovation, Technology, Modernization], 2012, no. 9 (77), pp. 20–24. (In Russian)

16. Krasnikov V.F. *Microtechnology. Mashinostroitel'* [Machine Builder], 1972, no. 11, pp. 41–43. (In Russian)

17. Levinson E.M. *Otverstiya mal'kh razmerov (metody polucheniya)* [Small size holes (production methods)]. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1977, 152 p. (In Russian)

18. Krylov K.I., Prokopenko V.T., Mitrofanov A.S. *Primenenie lazerov v mashinostroenii i priborostroenii* [Application of lasers in mechanical engineering and instrument making]. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1998, 276 p. (In Russian)

19. Reiner S. Laserais herkzeug in der Fertigung. *Phys und Didakt.* 1976, 4, no. 3, pp. 205–223.

20. Zenin V.V., Kondrat'ev V.P., Vodyanov Yu.M., Ryzhkov F.N. Electrochemical piercing of small diameter holes in a carbide tool for microwelding. *Elektronnaya obrabotka materialov* [Electronic Processing of Materials], 1975, no. 5, pp. 85–87. (In Russian)

Критерии авторства

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

Authorship criteria

Boyko A.F., Voronkova 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 621. 923: 621.922

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-11-43-55>

ИЗНОС ПОЛИМЕРНО-АБРАЗИВНЫХ ЩЕТОК ПРИ ОБРАБОТКЕ КРОМОК

© Ю.В. Димов¹, Д.Б. Подашев²

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

РЕЗЮМЕ: Цель – установить закономерности влияния параметров обработки радиальными и торцевыми полимерно-абразивными щетками на интенсивность износа их ворсин при скруглении кромок деталей. Исследования проводились экспериментально на радиальных BB-ZB Type C и Type A, а также торцевых щетках BD-ZB компании 3M различной зернистости, путем взвешивания щеток до обработки и после обработки. В статье рассмотрено влияние скорости резания и деформации щетки на интенсивность их износа. Установлено, что с увеличением этих параметров растет и износ щеток. Это коррелирует с такими же закономерностями изменения сил резания от скорости и деформации щетки. Получены уравнения регрессии в виде полиномов второй степени зависимости износа от скорости резания и деформации инструмента для радиальных и торцевых щеток. Предложены таблицы и графики для определения изношенной длины ворсины с учетом фактического состояния изношенности щетки, удобной для использования в практических целях. Полимерно-абразивные щетки очень эффективны при скруглении острых кромок на деталях из различных материалов. Особенно при обработке длинномерных деталей, как, например, в самолето- и вертолетостроении. При оптимизации процесса обработки кромок по критерию «минимум себестоимости» одним из факторов, влияющим на выбор оптимальных параметров обработки, является стоимость изношенного инструмента на выполнение данной операции. Знание закономерностей интенсивности износа инструмента позволяет успешно решить задачу по оптимизации процесса.

Ключевые слова: радиальная и торцевая полимерно-абразивные щетки, обрабатываемая кромка, износ щеток, длина изношенной ворсины

Информация о статье: Дата поступления 25 сентября 2018 г.; дата принятия к печати 30 октября 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 ноября 2018 г.

Для цитирования: Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Износ полимерно-абразивных щеток при обработке кромок. Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018;22(11):43–55. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-43-55.

WEAR OF POLYMERIC ABRASIVE BRUSHES WHEN PROCESSING EDGES

Yuriy V. Dimov, Dmitriy B. Podashev

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

ABSTRACT: Purpose – to determine consistent patterns of parameters influence to processing by radial and face polymeric abrasive brushes on intensity of their pile's wear at details rounding edges. Researches were conducted experimentally on various granularity radial BB-ZB Type C and Type A, and face brushes BD-ZB of the company 3M, by weighing brushes before processing and after processing. In article is considered influence of cutting speed and brush deformation on their wear intensity. It is established that with increase in these parameters also the wear of brushes grows. It

¹Димов Юрий Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры конструирования и стандартизации в машиностроении, e-mail: Dimov-Ura@yandex.ru

Yuriy V. Dimov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Designing and standardization in mechanical engineering, e-mail: Dimov-Ura@yandex.ru

²Подашев Дмитрий Борисович, кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и стандартизации в машиностроении, e-mail: dbp90@mail.ru

Dmitriy B. Podashev, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Designing and standardization in mechanical engineering, e-mail: dbp90@mail.ru



correlates with the same regularities of cutting forces change from speed and brush deformation. The regression equations are received in the second degree polynoms form of the wear dependence of the cutting speed and tool deformation for radial and face brushes. Tables and schedules are offered for determination of worn-out pile length taking into account actual state of brush wear convenient for use in the practical purposes. Polymeric abrasive brushes are very effective at sharp edges rounding of details from various materials. Especially when processing lengthy details, for example, in aircraft construction and helicopter engineering. By optimization of edges processing by criterion "the prime cost minimum" one of factors influencing the choice of optimum processing parameters is the cost of the worn-out tool on performance of this operation. Knowledge of wear intensity regularities of the tool allows to successfully solve the problem of process optimization.

Keywords: radial and face polymeric abrasive brushes, the processed edge, wear of brushes, length of a worn-out pile

Information about the article: Received September 25, 2018; accepted for publication October 30, 2018; available online November 30, 2018.

For citation: Dimov Yu.V., Podashev D.B. *Wear of polymeric abrasive brushes when processing edges. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University.* 2018;22(11):pp. 43–55. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-43-55.

Введение

Механизация и автоматизация операций финишной обработки деталей являются актуальными для современного машиностроения.

Полимерно-абразивные щётки являются весьма эффективными инструментами для скругления острых кромок на деталях в самолетостроении, ракетостроении и других отраслях машиностроения. Такой инструмент постепенно начинает приме-

няться на промышленных предприятиях для финишной обработки деталей. Это подтверждается публикациями [1–21].

Информация об интенсивности износа щеток необходима при оптимизации процесса обработки кромок по критерию «минимум себестоимости операции». Стоимость израсходованного инструмента учитывается при реализации программы оптимизации.

Обсуждение результатов

Износ радиальных и торцовых щеток исследовался при обработке кромок на современном вертикальном обрабатывающем центре Deckel Maho DMC 635V (Германия). Величина износа определялась взвешиванием щеток до и после обработки. Поскольку исследуемые инструменты достаточно износостойкие, поэтому, чтобы зафиксировать износ, необходимо вести обработку не менее 5 мин. Взвешивание производилось на электронных аналитических весах ONAUS DV 214C. При этом после каждой обработки инструменты подвергались мойке при помощи высокоэффективных моющих средств и сушке при

температуре 20°C в течение 12 ч. Эти меры необходимы с целью механического удаления стружки и пыли, неизбежно остающихся на инструментах после обработки.

Исследование износа инструмента выполнено с использованием планирования эксперимента с помощью латинского квадрата. План строился с применением программного продукта Statistica 10.

Для получения частных формул (поиска коэффициентов регрессии), применялся пакет Microsoft Excel, в котором существует возможность поиска уравнений регрессии при помощи метода наименьших квадратов (НК-метод).



Исследование износа радиальных щеток

Взаимодействие ворсин щетки с обрабатываемой кромкой, показанное на рис. 1, приводит к съему материала и износу инструмента.

В результате экспериментальных исследований получены зависимости интенсивности износа ворсин радиальных щеток BB-ZB Type C P120, BB-ZB Type C P220, BB-ZB Type C P400 (рис. 2, а) и щеток

BB-ZB Type A P36, BB-ZB Type A P50 (рис. 2, б) от скорости резания V .

Зависимости износа от деформации щетки ΔY приведены на рис. 3, а – для щеток BB-ZB Type C P120, BB-ZB Type C P220, BB-ZB Type C P400 и на рис. 3, б – для щеток BB-ZB Type A P36, BB-ZB Type A P50.

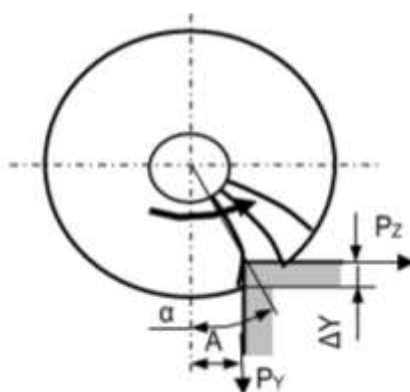


Рис. 1. Расположение обрабатываемой кромки относительно щетки
Fig. 1. An arrangement of the processed edge concerning a brush

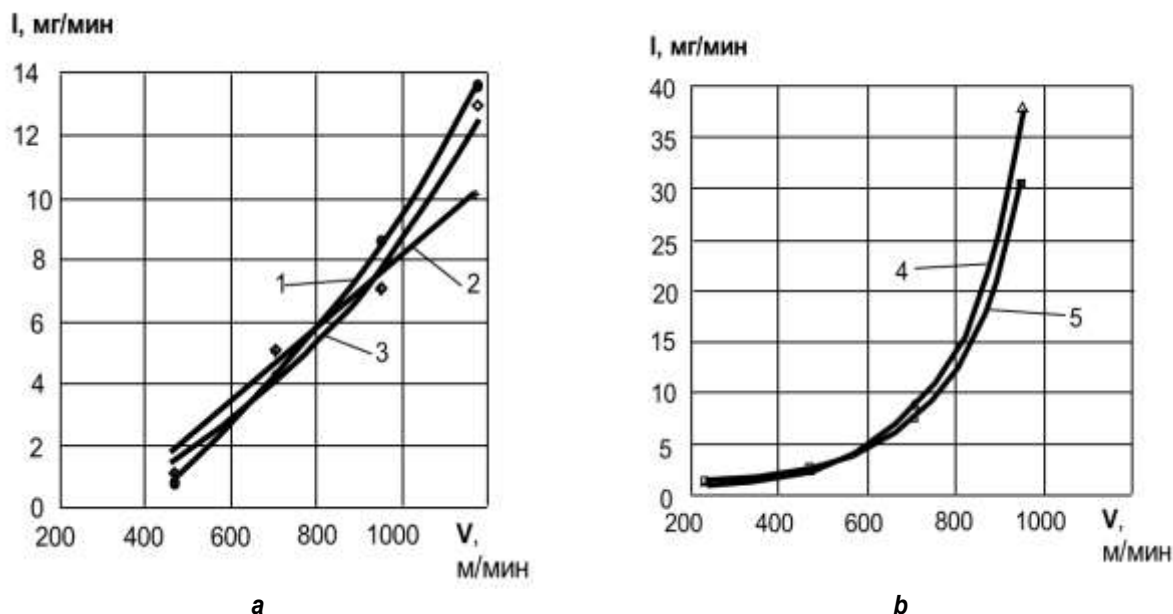
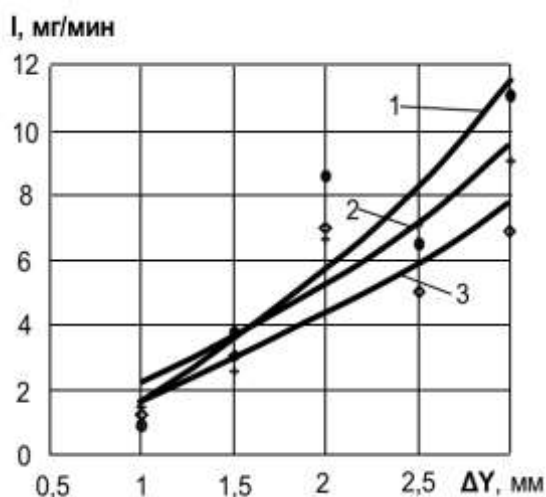


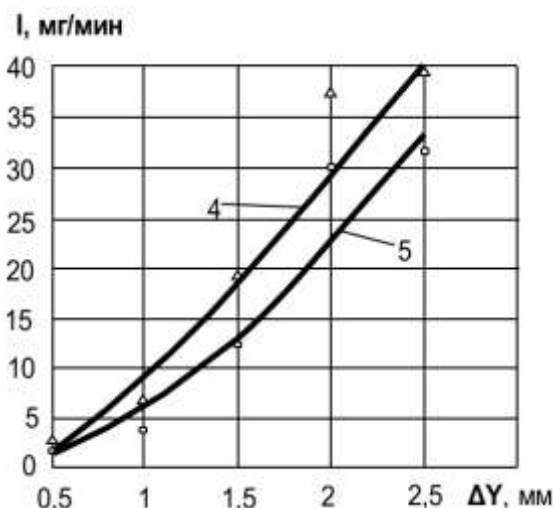
Рис. 2. Зависимость износа инструмента за 1 мин работы от скорости резания V для щеток: а – 1 – BB-ZB Type C P120; 2 – BB-ZB Type C P220; 3 – BB-ZB Type C P400 при деформации $\Delta Y = 2$ мм, $A = 10$ мм ($\alpha = 7,662^\circ$);

б – 4 – BB-ZB Type A P36; 5 – BB-ZB Type A P50 при деформации $\Delta Y = 2$ мм, $A = 0$ мм ($\alpha = 0^\circ$)

Fig. 2. Dependence of the tool wear in 1 min work from the cutting speed V for brushes: а – 1 – BB-ZB Type C P120; 2 – BB-ZB Type C P220; 3 – BB-ZB Type C P400 at deformation $\Delta Y = 2$ mm, $A = 10$ mm ($\alpha = 7,662^\circ$); б) 4 – BB-ZB Type A P36; 5 – BB-ZB Type A P50 at deformation $\Delta Y = 2$ mm, $A = 0$ mm ($\alpha = 0^\circ$)



a



b

Рис. 3. Зависимость износа инструмента за 1 мин работы от деформации инструмента

ΔY для щеток: а – 1 – BB-ZB Type C P120; 2 – BB-ZB Type C P220; 3 – BB-ZB Type C P400

при скорости резания $V = 942,48$ м/мин, $A = 10$ мм ($\alpha = 7,662^\circ$); б – 4 – BB-ZB Type A P36;

5 – BB-ZB Type A P50 при скорости резания $V = 942,48$ м/мин, $A = 0$ мм ($\alpha = 0^\circ$)

Fig. 3. Dependence of the tool wear in 1 min. work from the tool deformation ΔY for brushes:

a – 1 – BB-ZB Type C P120; 2 – BB-ZB Type C P220; 3 – BB-ZB Type C P400 at cutting speed $V = 942,48$ m/min,

$A = 10$ mm ($\alpha = 7,662^\circ$); b – 4 – BB-ZB Type A P36; 5 – BB-ZB Type A P50 at cutting speed $V = 942,48$ m/min,

$A = 0$ mm ($\alpha = 0^\circ$)

Рост интенсивности износа объясняется увеличением сил резания, как при изменении скорости резания, так и деформации щетки, поскольку аналогичные зависимости сил резания от параметров обработки установлены в работе [22].

Для получения многофакторной регрессионной модели, которую будет удобно использовать в практических целях, проведена аппроксимация полученных данных в виде уравнения

$$I = a_1 \cdot V^2 + a_2 \cdot \Delta Y^2 + a_3 \cdot V + a_4 \cdot \Delta Y + a_5 \cdot V \cdot \Delta Y + a_6, \quad (1)$$

где V – скорость резания, м/мин;
 ΔY – деформация круга, мм.

Значения коэффициентов a_{1-5} и свободных членов a_6 данных уравнений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициентов и свободных членов в уравнении (1)

Table 1

Values of coefficients and free members in the equation (1)

Коэффициент	Щетка BB-ZB Type C P120	Щетка BB-ZB Type C P220	Щетка BB-ZB Type C P400	Щетка BB-ZB Type A P36	Щетка BB-ZB Type A P50
a_1	$7,2 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$6,667 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$
a_2	-0,99	-0,55	0,2439	4,1803	2,2171
a_3	$5 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$-5 \cdot 10^{-3}$	-0,0391	-0,0203
a_4	7,8674	5,2	1,2	2,0833	8,365
a_5	$8 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$8,333 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$
a_6	-16,24	-10,04	-2,94	-14,5	-22,5



При эксплуатации радиальных щеток для оценки изношенности ее ворсин необходимо знать длину изношенной ее части. Поэтому приведенный по результатам экспериментального исследования износ в единицах массы необходимо перевести в длину изношенной части ворсины $l_{\text{изн}}$.

При заданных размерах (рис. 4) толщины ворсины b_1-b_4 и высчитанных площадей поперечных сечений на вершине ворсины $F_{\text{ВВ}}$ и в основании $F_{\text{АА}}$ длина изношенной части ворсины определится по формуле (Значения b_1-b_4 , $F_{\text{ВВ}}$ и $F_{\text{АА}}$ приведены в табл. 2).

$$l_{\text{изн}} = \frac{m_{\text{изн}}}{\rho \left(\frac{F_2 + F_1}{2} \right)}, \quad (2)$$

где $m_{\text{изн}}$ – масса изношенной ворсины, мг;

$$m_{\text{изн}} = \frac{I_{\text{изн}} \cdot T}{N}, \quad (3)$$

$I_{\text{изн}}$ – износ по формуле (2), мкм/мин;
Т – продолжительность работы щетки, мин;
N – количество ворсин, участвующих в работе; ρ – плотность материала ворсины, мг/мм³; F_1 , F_2 – площадь поперечного сечения

ворсины в начале и в конце процесса обработки, мм²;

$$F_1 = \frac{F_{\text{АА}} - F_{\text{ВВ}}}{l} \cdot l_1; \quad (4)$$

$$F_2 = \frac{F_{\text{АА}} - F_{\text{ВВ}}}{l} \cdot l_2; \quad (5)$$

l_1 , l_2 – длина изношенной части ворсины в начале и в конце процесса обработки, мм;

$$l_2 = l_1 + l_{\text{изн}}. \quad (6)$$

Решая совместно уравнения (2), (4), (5) и (6), получим

$$l_{\text{изн}} = \frac{-K \cdot l_1 \pm \sqrt{(K \cdot l_1)^2 + 2K \cdot \frac{m_{\text{изн}}}{\rho}}}{K}, \quad (7)$$

где K – параметр удельного изменения длины ворсины, мм

$$K = \frac{F_{\text{АА}} - F_{\text{ВВ}}}{l}. \quad (8)$$

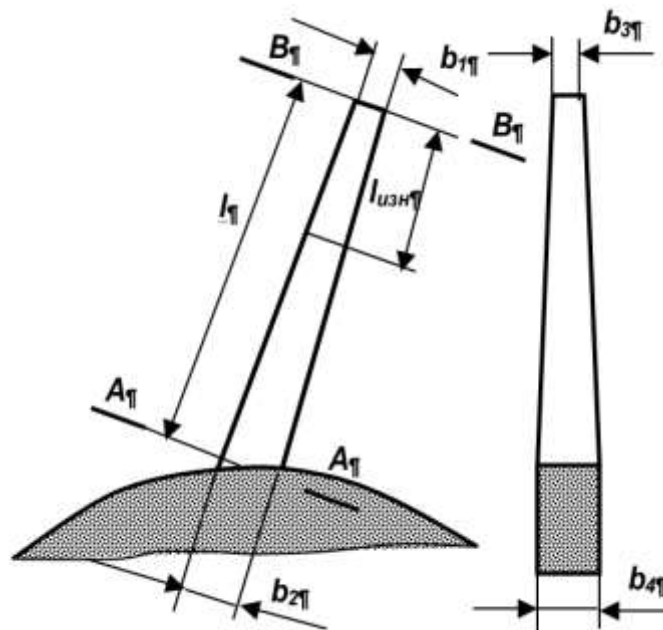


Рис. 4. Схема к расчету длины изношенной ворсины радиальной щетки
Fig. 4. The scheme to calculation of worn-out pile length of a radial brush



Таблица 2

Размеры ворсин радиальных щеток

Table 2

Size of radial brushes piles

Щетки	l , мм	b_1 , мм	b_2 , мм	b_3 , мм	b_4 , мм	F_{BB} , мм ²	S_{AA} , мм ²
BB-ZB Type C	32	0,9	1,8	1,0	1,5	0,9	2,7
BB-ZB Type A	33	1,8	2,5	1,5	1,5	2,7	3,75

Для удобства практического применения уравнения (7) предложены табл. 2 и 3 с рассчитанными по (7) значениями $l_{изн}$ в зависимости от состояния ворсин

щетки по l_1 .

Кроме того, приведены графики, построенные по этим таблицам (рис. 5 и 6).

Таблица 3

Износ ворсины $l_{изн}$ для щетки радиальной BB-ZB Type C
при $\rho = 1,6 \text{ мг/мм}^3$, $K = 0,05625 \text{ мм}$

Table 3

Pile's wear $l_{изн}$ for the radial brush BB-ZB Type C
at $\rho = 1,6 \text{ mg/mm}^3$, $K = 0,05625 \text{ mm}$

l_1 , мм	$m_{изн}$, мг									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
	$l_{изн}$, мм									
2	0,4944	0,9059	1,266	1,5901	1,8873	2,1633	2,4222	2,6667	2,899	3,1208
4	0,2687	0,5216	0,761	0,9889	1,2068	1,416	1,6174	1,8119	2	2,1824
6	0,1824	0,3596	0,532	0,6999	0,8638	1,0238	1,1802	1,3333	1,4833	1,6303
8	0,1377	0,2731	0,4063	0,5375	0,6667	0,7939	0,9194	1,0431	1,1652	1,2856
10	0,1105	0,2198	0,328	0,435	0,5409	0,6458	0,7497	0,8525	0,9545	1,0554
12	0,0922	0,1838	0,2746	0,3648	0,4544	0,5433	0,6315	0,7192	0,8062	0,8927
14	0,0791	0,1578	0,2361	0,3139	0,3914	0,4684	0,5449	0,6211	0,6969	0,7723
16	0,0693	0,1383	0,207	0,2754	0,3435	0,4114	0,4789	0,5462	0,6132	0,68
18	0,0616	0,123	0,1842	0,2452	0,306	0,3666	0,427	0,4872	0,5472	0,607
20	0,0555	0,1108	0,166	0,221	0,2759	0,3306	0,3852	0,4396	0,4939	0,548

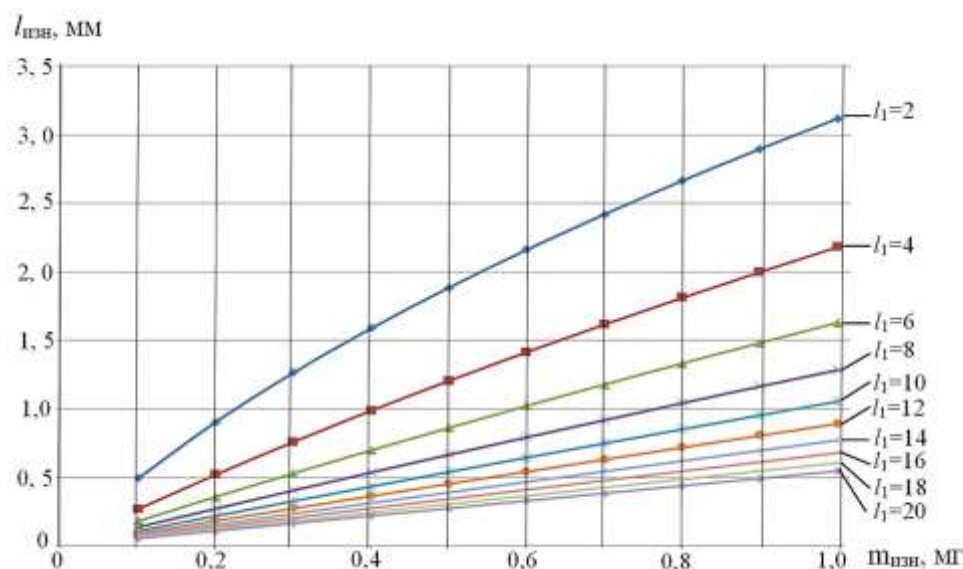


Рис. 5. Графики для определения $l_{изн}$ по заданным $m_{изн}$ и l_1 для радиальных щеток BB-ZB Type C
Fig. 5. Schedules for definition $l_{изн}$ on the set $m_{изн}$ and l_1 for radial brushes BB-ZB Type C



Таблица 4

Износ ворсины $l_{изн}$ для щетки радиальной BB-ZB Type A
при $\rho = 1,6 \text{ мг/мм}^3$, $K = 0,031818 \text{ мм}$

Table 4

Pile's wear $l_{изн}$ for radial brush BB-ZB Type A at $\rho = 1,6 \text{ mg/mm}^3$, $K = 0,031818 \text{ mm}$

$l_1, \text{ мм}$	$m_{изн}, \text{ МГ}$									
	0,45	0,90	1,35	1,80	2,25	2,70	3,15	3,60	4,05	4,5
	$l_{изн}, \text{ мм}$									
2	2,656	4,2735	5,5522	6,6438	7,6121	8,4915	9,3027	10,059	10,771	11,446
4	1,8033	3,1664	4,3088	5,3121	6,2173	7,0486	7,8216	8,5471	9,2328	9,8848
6	1,3266	2,4473	3,4359	4,3303	5,1532	5,9194	6,6393	7,3203	7,9681	8,5872
8	1,0376	1,9678	2,8183	3,6067	4,3448	5,0412	5,7022	6,3328	6,9368	7,5173
10	0,848	1,6343	2,3708	3,0658	3,7256	4,3552	4,9583	5,538	6,0968	6,6369
12	0,7153	1,3924	2,037	2,6531	3,2445	3,8137	4,3631	4,8947	5,41	5,9105
14	0,6178	1,2104	1,7809	2,3314	2,864	3,3802	3,8816	4,3693	4,8443	5,3077
16	0,5432	1,0692	1,5794	2,0753	2,5578	3,0282	3,4872	3,9356	4,3742	4,8035
18	0,4846	0,9567	1,4174	1,8674	2,3075	2,7382	3,1601	3,5738	3,9797	4,3783
20	0,4372	0,8652	1,2846	1,696	2,0996	2,496	2,8856	3,2686	3,6455	4,0164

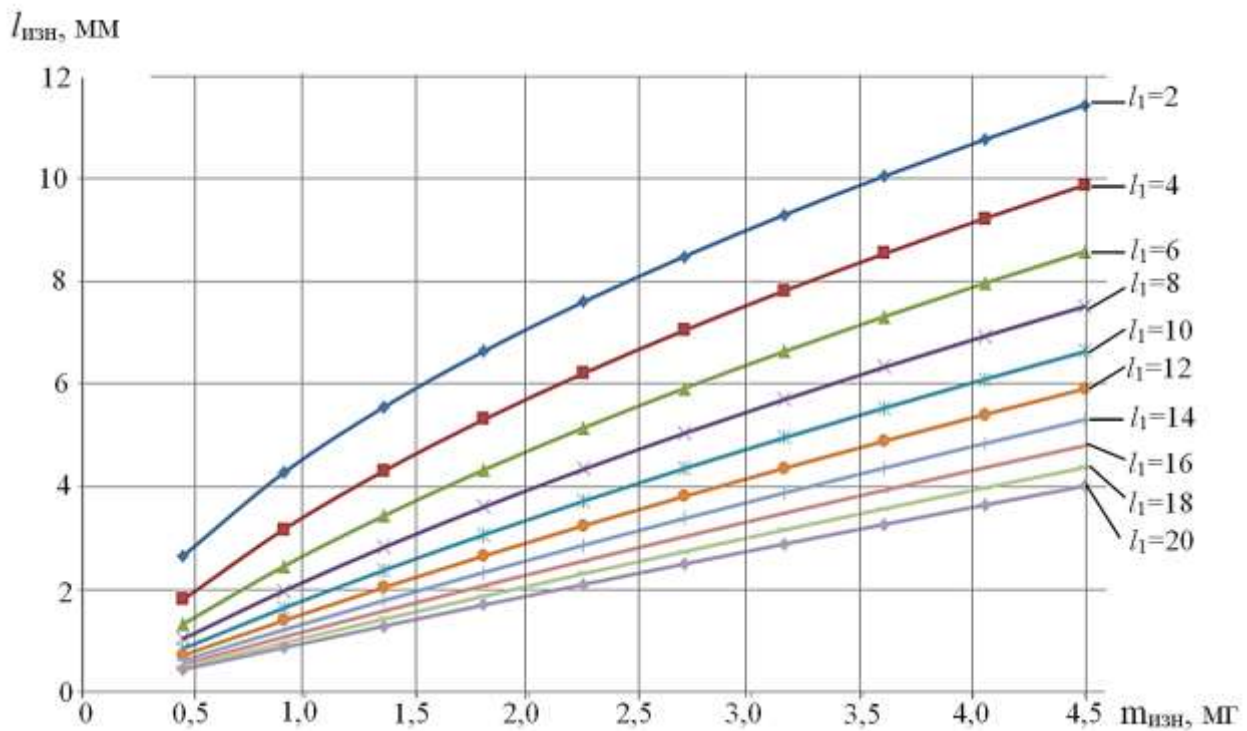


Рис. 6. Графики для определения $l_{изн}$ по заданным $m_{изн}$ и l_1
для радиальных щеток BB-ZB Type A

Fig. 6. Schedules for definition $l_{изн}$ on the set $m_{изн}$ and l_1 for radial brushes BB-ZB Type A

Для того, чтобы использовать данные табл. 3 и 4, а также графиками на рис. 5 и 6, необходимо по уравнению (1) определить износ l , а также определить продолжительность работы щетки по разрабо-

танному технологическому процессу T и по формуле (3) рассчитать массу изношенной ворсины. При этом l_1 фиксируется по фактическому состоянию изношенности щетки.



Исследование износа торцевых щеток

Обработка кромок торцевыми щетками производится чаще всего в тех случаях, когда обрабатываемая кромка не доступна для использования радиальной щетки. При обработке кромки (рис. 7) размер A может варьироваться от 0 до R .

Износ торцевых щеток исследовался по методике, изложенной выше.

В результате экспериментальных исследований получены зависимости интенсивности износа ворсин торцевых щеток BD-ZB Bristle P50, BD-ZB Bristle P80, BD-ZB Bristle P120 (рис. 8) от частоты вращения щетки n .

Зависимости износа от деформации ΔY для тех же щеток приведены на рис. 9.

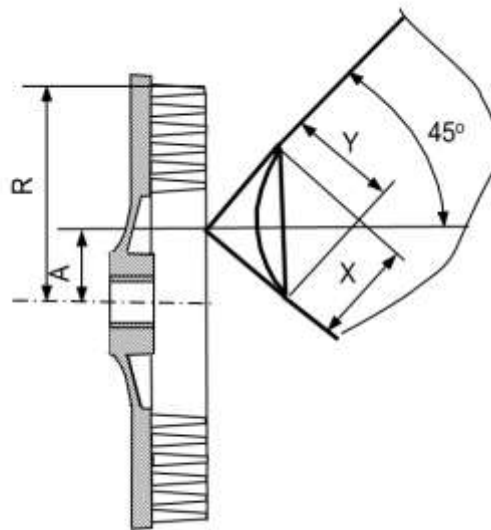


Рис. 7. Схема обработки кромки торцевой щеткой
Fig. 7. Scheme of edge processing by face brush

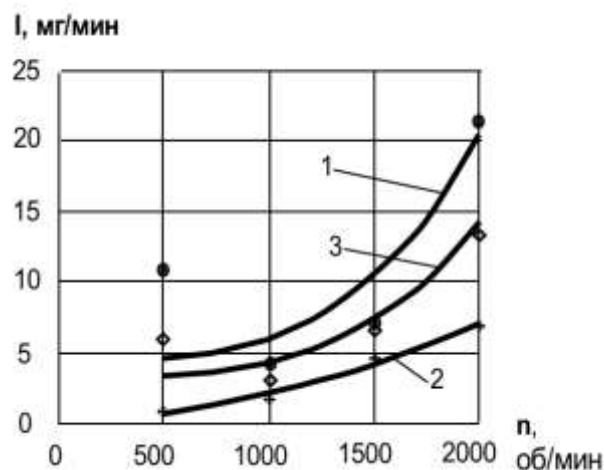


Рис. 8. Зависимость износа торцевых щеток за 1 мин работы от частоты вращения n для: 1 – BD-ZB Bristle P50; 2 – BD-ZB Bristle P80; 3 – BD-ZB Bristle P120 при деформации $\Delta Y = 1,5$ мм, $A=0$ мм
Fig. 8. Dependence of face brushes wear in 1 min. work from the frequency rotation n for: 1 – BD-ZB Bristle P50; 2 – BD-ZB Bristle P80; 3 – BD-ZB Bristle P120 at deformation $\Delta Y = 1,5$ mm, $A=0$ mm

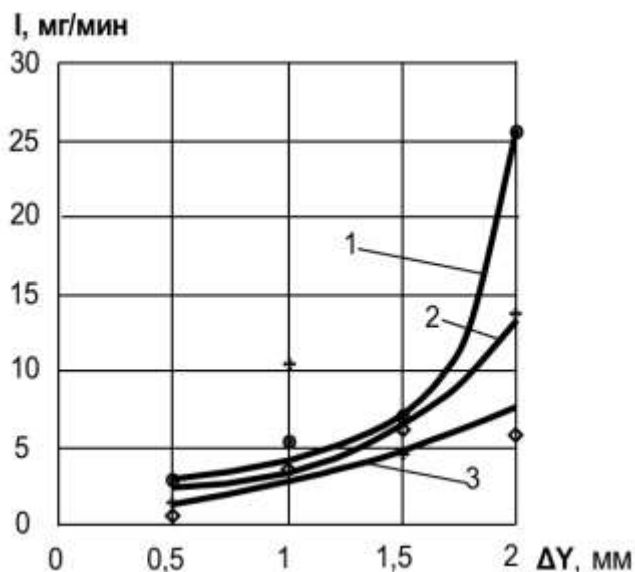


Рис. 9. Зависимость износа торцевых щеток за 1 мин работы от деформации инструмента ΔY для: 1 – BD-ZB Bristle P50; 2 – BD-ZB Bristle P80; 3 – BD-ZB Bristle P120 при частоте вращения $n = 1500$ об/мин, $A=0$ мм
Fig. 9. Dependence of face brushes wear in 1 min. work from the tool deformation ΔY for: 1 – BD-ZB Bristle P50; 2 – BD-ZB Bristle P80; 3 – BD-ZB Bristle P120 with rotation frequency $n = 1500$ rpm, $A=0$ mm

Рост интенсивности износа объясняется увеличением сил резания, как при изменении скорости резания, так и деформации щетки, поскольку аналогичные зависимости сил резания от параметров обработки установлены в работе [23].

Для получения многофакторной регрессионной модели, которую будет удобно использовать в практических целях, проведена аппроксимация полученных данных в виде уравнения

$$I = a_1 \cdot n^2 + a_2 \cdot \Delta Y^2 + a_3 \cdot n + a_4 \cdot \Delta Y + a_5 \cdot n \cdot \Delta Y + a_6, \quad (9)$$

где n – частота вращения, об/мин; ΔY – деформация щетки, мм.

Значения коэффициентов a_{1-5} и свободных членов a_6 данных уравнений приведены в табл. 5.

Таблица 5
Значения коэффициентов и свободных членов в уравнении (9)

Table 5

Values of coefficients and free members in the equation (9)

Коэффициент	Щетка торцевая BD-ZB Bristle P50	Щетка торцевая BD-ZB Bristle P80	Щетка торцевая BD-ZB Bristle P120
a_1	$2 \cdot 10^{-6}$	$4,5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-6}$
a_2	9,7333	5,5	0,7
a_3	$6,5 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$-5 \cdot 10^{-3}$
a_4	-9,5	-6,49	4,39
a_5	$8 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$
a_6	-7,74	-0,8	-5,7



При эксплуатации торцевых щеток для оценки изношенности ее ворсин необходимо знать длину изношенной ее части. Поэтому приведенный по результатам экспериментального исследования износ в единицах массы необходимо перевести в длину изношенной части ворсины $l_{изн}$.

При заданных размерах ворсины (рис. 10) площади поперечного сечения AA и BB равны:

$$F_{AA} = F_1 + F_2 + F_3 =$$

$$= \frac{\pi \cdot r_1^2}{2} + b \cdot (r_1 + r_2) + \frac{\pi \cdot r_2^2}{2} = 5,8371 \text{ мм}^2$$

и

$$F_{BB} = \pi \cdot r_2^2 = 1,7671 \text{ мм}^2.$$

Длина изношенной части ворсины определится по формулам (7) и (8).

Для удобства практического применения уравнения (7) предложена табл. 6 с рассчитанными по (7) значениями $l_{изн}$ в зависимости от состояния ворсин щетки по l_1 .

Кроме того, приведены графики, построенные по этим таблицам (рис. 11).

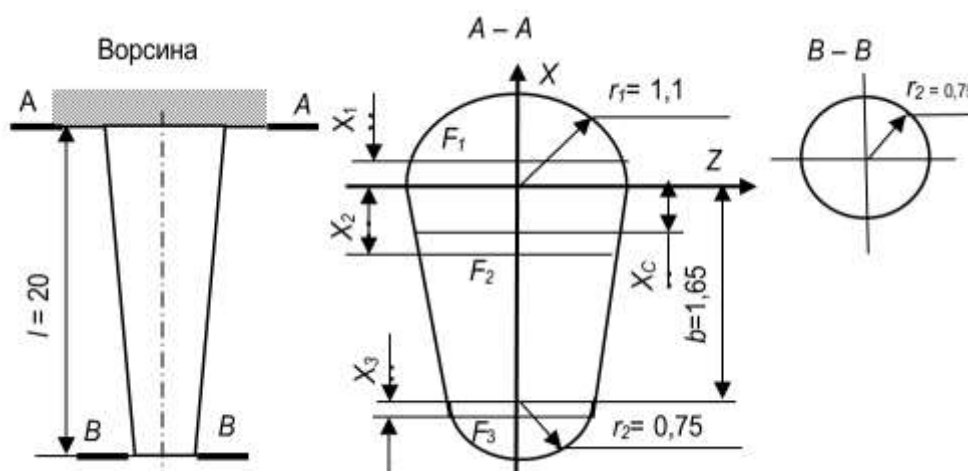


Рис. 10. Схема к расчету длины изношенной ворсины торцевой щетки
Fig. 10. The scheme to calculation of face brush worn-out pile length

Таблица 6

Износ ворсины $l_{изн}$ для щетки торцевой BD-ZB Bristle
при $\rho = 1,6 \text{ мг/мм}^3$, $K = 0,2035 \text{ мм}$

Table 6

Pile's wear $l_{изн}$ for face brush BD-ZB Bristle at $\rho = 1,6 \text{ мг/мм}^3$, $K = 0,2035 \text{ мм}$

$l_1, \text{ мм}$	$m_{изн}, \text{ мг}$									
	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
	$l_{изн}, \text{ мм}$									
1	0,1433	0,2705	0,3861	0,4928	0,5924	0,686	0,7748	0,8593	0,9401	1,0177
2	0,0754	0,1481	0,2184	0,2866	0,3528	0,4172	0,4799	0,5411	0,6008	0,6592
3	0,0508	0,1007	0,1498	0,1982	0,2459	0,2928	0,3391	0,3848	0,4299	0,4744
4	0,0382	0,0761	0,1136	0,1507	0,1876	0,2241	0,2603	0,2962	0,3318	0,3671
5	0,0306	0,0611	0,0913	0,1214	0,1513	0,181	0,2106	0,2399	0,2692	0,2982
6	0,0255	0,051	0,0763	0,1015	0,1266	0,1516	0,1766	0,2014	0,2261	0,2507
7	0,0219	0,0437	0,0655	0,0872	0,1088	0,1304	0,1519	0,1734	0,1947	0,216
8	0,0192	0,0383	0,0574	0,0764	0,0954	0,1144	0,1333	0,1521	0,1709	0,1897
9	0,017	0,0341	0,051	0,068	0,0849	0,1018	0,1187	0,1355	0,1523	0,169
10	0,0153	0,0307	0,046	0,0612	0,0765	0,0917	0,1069	0,1221	0,1373	0,1524

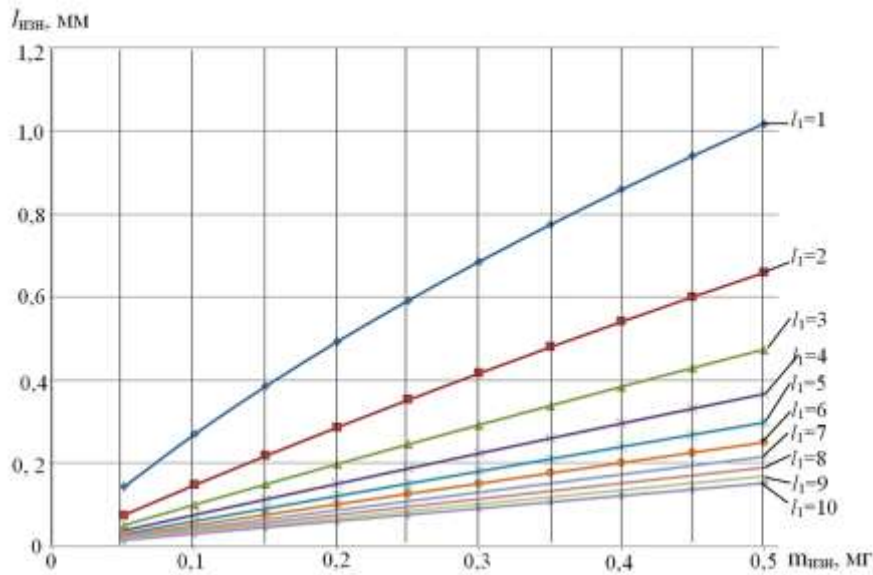


Рис. 11. Графики для определения $I_{изн}$ по заданным $m_{изн}$ и l_1 для торцевой щетки BD-ZB Bristle
Fig. 11. Schedules for definition $I_{изн}$ on the set $m_{изн}$ and l_1 for the face brush BD-ZB Bristle

Для того, чтобы воспользоваться табл. 6, а также графиками на рис. 11, необходимо по уравнению (9) определить износ I , определить продолжительность работы щетки по разработанному техноло-

гическому процессу T и по формуле (8) рассчитать массу изношенной ворсины. При этом l_1 фиксируется по фактическому состоянию изношенности щетки.

Заключение

Полимерно-абразивные щетки очень эффективны при скруглении острых кромок на деталях из различных материалов. Особенно при обработке длинномерных деталей, как, например, в самолето- и вертолетостроении. При оптимизации процесса обработки кромок по критерию «минимум себестоимости» одним из факторов,

влияющим на выбор оптимальных параметров обработки, является стоимость изношенного инструмента на выполнение данной операции. Знание закономерностей интенсивности износа инструмента позволяет успешно решить задачу по оптимизации процесса.

Библиографический список

1. Абрашкевич Ю.Д., Мачишин Г.М. Эффективная эксплуатация полимерно-абразивной щетки // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2016. Вып. 73. С. 59–62.
2. Мачишин Г.М. Определение рациональной области применения полимерно-абразивного инструмента // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2014. Вып. 65–66. С. 117–122.
3. Пини Б.Е., Яковлев Д.Р. О некоторых технологических возможностях щеток с абразивно-полимерным волокном // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2009. № 1 (7). С. 148–151.
4. Яковлев Д.Р., Пини Б.Е. О взаимодействии волокон абразивно-полимерных щеток с обрабатываемой

- поверхностью // Известия Московского государственного технического университета «МАМИ». 2009. № 2 (8). С. 184–187.
5. Абрашкевич Ю.Д., Пелевин Л.С., Мачишин Г.М. Механізм взаємодії полімерного волокна, наповненого абразивом, з оброблюваною поверхнею. // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2011): матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції. Херсон: Видавництво Херсонського державного морського інституту. 2011. Т. 1. С. 104–108.
6. Кургузов Ю.И. Анализ контактного взаимодействия вращающейся щетки с обрабатываемой поверхностью // Известия самарского научного центра РАН. 2011. Т. 13. № 4 (3). С. 794–798.
7. Абрашкевич Ю.Д., Оглоблинский В.А., Оглоблин-



ский А.В. Щеточные инструменты на основе полимерно-абразивных волокон // Мир техники и технологий. 2006. № 5. С. 50–52.

8. Абрашкевич Ю.Д., Пелевин Л.Е., Мачишин Г.М. Влияние тепловых процессов на работоспособность полимерно-абразивной щетки // Промышленное строительство и инженерные сооружения: научно-производственный журнал. 2011. № 3. С. 44–47.

9. Абрашкевич Ю.Д., Пелевин Л.Е., Мачишин Г.М. Моделирование процесса теплообмена полимерно-абразивной щетки и поверхности // Транспортные и транспортно-технологические системы: материалы Междунар. научн.-техн. конф. 2014. С. 3–7.

10. Лепеш А.Г., Лепеш Г.В., Воронцов И.И. Методика экспериментального определения износостойкости щеточного ворса коммунальной уборочной техники // Технич.-технологические проблемы сервиса: научн.-техн. журнал. 2011. № 2 (16). С. 7–19.

11. Проволоцкий А.Е., Негруб С.Л. Использование полимераабразивного эластичного инструмента на операциях чистовой обработки // Вестник харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2006. № 33. С. 106–108.

12. Чапышев А.П., Стародубцева Д.А. Программный модуль назначения режимов финишной обработки с применением автоматических щеточных стационарных установок // Вестник пермского нац. исследовательского политехн. ун-та. Машиностроение, материаловедение. Пермь. 2016. Т. 18. № 2. С. 21–37.

13. Пини Б.Е., Крылов О.В., Хачикян Е.А. Абразивно-полимерные инструменты для механической обработки деталей // Машиностроение и инженерное образование. г. Москва. 2016. № 2 (47). С. 18–23.

14. Проволоцкий А.Е., Негруб С.Л., Старостин Д.А. Повышение производительности процесса обработки полимер-абразивными инструментами // Прогрессивные технологии и системы машиностроения (г. Донецк). 2006. №1(32). С. 193–199.

15. Устинович Д.Ф. Экспериментальное исследование качества плоских поверхностей при обработке

дисковыми абразивными щетками // Вестник полоцкого государственного университета. Серия В: Промышленность. Прикладные науки. 2009. № 8. С. 130–134.

16. Устинович Д.Ф., Голуб В.М. Управление тепловыми режимами при обработке плоских поверхностей дисковыми полимерно-абразивными щетками // Вестник полоцкого государственного университета. Серия В: Промышленность. Прикладные науки. 2012. № 3. С. 90–94.

17. Устинович Д.Ф., Голуб В.М. Моделирование тепловых процессов при обработке тел вращения полимерно-абразивными щетками // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя Фізіка-тэхнічных навук. 2011. № 2. С. 62–68.

18. Устинович Д.Ф., Голуб В.М. Моделирование тепловых процессов при обработке плоских поверхностей полимерно-абразивными щетками // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя Фізіка-тэхнічных навук. 2012. № 4. С. 63–68.

19. Устинович Д.Ф., Голуб В.М. Управление тепловыми режимами при шлифовании валов дисковыми щетками // Механика машин, механизмов и материалов. г. Минск. 2012. № 3 (16). 2011. С.38–42.

20. Устинович Д.Ф., Прибыльский В.И. Зависимости мощности от режимов шлифования полимерно-абразивными дисковыми щетками // Механика машин, механизмов и материалов. 2012. № 1(18). С. 75–79.

21. Трошин Ф.В. Некоторые особенности применения щеток из полимерно-абразивного ворса // Автомобильная промышленность. 2008. № 8. С. 35.

22. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Силы, действующие на кромку детали, при обработке полимерно-абразивными щётками // Вестник машиностроения. 2016. № 11. С. 59–63.

23. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Силы резания при обработке кромок торцовыми щётками // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. № 12. С. 22–42.

References

1. Abrashkevich Yu.D., Machishin G.M. Effective operation of polymeric abrasive brush. *Vestnik Khar'kovskogo natsional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta* [Bulletin of the Kharkiv national automobile and road university]. 2016, Iss. 73, pp. 59–62. (In Russian)

2. Machishin G.M. Definition of the polymeric and abrasive tool rational scope. *Vestnik Khar'kovskogo natsional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta* [Messenger of the Kharkiv national automobile and road university]. 2014, Iss. 65–66, pp. 117–122. (In Russian)

3. Pini B.E., Yakovlev D.R. About some technological capabilities of brushes with abrasive polymeric fiber. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta MAMI*. 2009, no. 1 (7), pp. 148–151.

4. Yakovlev D.R., Pini B.E. About interaction of abrasive and polymeric brushes fiber with the processed surface *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnich-*

eskogo universiteta «MAMI» [News of the Moscow state technical university MAMI]. 2009, no. 2 (8), pp. 184–187. (In Russian)

5. Abrashkevich Yu.D. Pelevin L.E., Machishin G.M. Mechanism of polymeric abrasive fiber interaction with the processed surface. Modern information and innovative technologies on transport (MINTT – 2011): materials III of the International scientific and practical conference: in 2-t. T. 1. Kherson: Publishing house of the Kherson state sea institute, 2011, pp. 104–108.

6. Kurguzov Yu.I. The analysis of the rotating brush contact interaction with the processed surface. *Izvestiya samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [News of the Samara scientific center of RAS]. 2011, vol. 13, no. 4 (3), pp. 794–798. (In Russian)

7. Abrashkevich Yu.D., Ogloblinsky V.A., Ogloblinsky A.V. Brush tools on the basis of polymeric and abrasive fibers. *Mir tekhniki i tekhnologii* [The World of the



equipment and technologies]. 2006. no. 5. pp. 50–52. (In Russian)

8. Abrashkevich Yu.D., Pelevin L.E., Machishin G.M. Influence of thermal processes on operability of polymeric abrasive brush. *Promyshlennoe stroitel'stvo i inzhenernye sooruzheniya* [Industrial construction and engineering constructions]. 2011, no. 3, pp. 44–47. (In Russian)

9. Abrashkevich Yu.D., Pelevin L.E., Machishin G.M. Modeling of heat exchange process of polymeric abrasive brush and surface. *Transportnye i transportno-tekhnologicheskie sistemy: materialy Mezhdunar. nauchn.-tekhn. konf.* [Transport and transport technological systems: materials international scientific and technical conf.]. 2014. pp. 3–7. (In Russian)

10. Lepesh A.G., Lepesh G.V., Vorontsov I.I. Method of brush pile wear resistance experimental determination of the municipal harvest equipment. [Technical and technological problems of service: scientific and technical magazine]. 2011. no. 2 (16). pp. 7–19. (In Russian)

11. Provolotsky A.E., Negrub S.L. Use of the polymer and abrasive elastic tool on operations of fair processing. *Vestnik khar'kovskogo natsional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta* [Messenger of the Kharkiv national automobile and road university]. 2006. no. 33. pp. 106–108.

12. Chapyshev A.P., Starodubtseva D.A. The program module of the modes finishing processing purpose with application of automatic brush stationary installations. *Vestnik permskogo nats. issledovatel'skogo politekhn. un-ta. Mashinostroenie, materialovedenie* [The Messenger the Perm national research technical university. Mechanical engineering, materials science]. Perm, 2016. T. 18. no. 2. pp. 21–37. (In Russian)

13. Pini B.E., Krylov O.V., Hachikyan E.A. Abrasive and polymeric tools for machining of details. [Mechanical engineering and engineering education]. Moscow, 2016. no. 2 (47). pp. 18–23. (In Russian)

14. Provolotsky A.E., Negrub S.L., Starostin D.A. Increase in productivity of processing polymer abrasive tools. [Progressive technologies and systems of mechanical engineering]. 2006, no. 1 (32), pp. 193–199.

15. Ustinovich D.F. Pilot study of flat surfaces quality when processing by disk abrasive brushes. *Vestnik*

polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V: Promyshlennost'. Prikladnye nauki. [Bulletin of the Polotsk state university. Series B: industry. Applied sciences]. 2009, no. 8, pp. 130–134.

16. Ustinovich D.F., Golub V.M. Management of the thermal modes when processing flat surfaces disk polymeric and abrasive brushes *Vestnik polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V: Promyshlennost'. Prikladnye nauki* [Bulletin of the Polotsk state university. Series B: industry. Applied sciences]. 2012, no. 3, pp. 90–94.

17. Ustinovich D.F., Golub V.M. Modeling of thermal processes when processing bodies of rotation by polymeric abrasive brushes *Vestnik Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya Fizika-tekhnichnykh navuk* [Bulletin of National Belarus Academy of Sciences. Series: physics and technology sciences]. 2011, no. 2, pp. 62–68.

18. Ustinovich D.F., Golub V.M. Modeling of thermal processes when processing flat surfaces polymeric abrasive brushes *Vestnik Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya Fizika-tekhnichnykh navuk* [Bulletin of National Belarus Academy of Sciences. Series: physics and technology sciences]. 2012, no. 4, pp. 63–68.

19. Ustinovich D. F. Golub V.M. Management of the thermal modes when grinding shaft disk brushes. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of cars, mechanisms and materials]. 2011, no. 3 (16), pp. 38–42. (In Russian)

20. Ustinovich D.F. Pribylsky V.I. Dependences of power on the grinding modes polymeric abrasive disk brushes. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of cars, mechanisms and materials]. 2012, no. 1 (18), pp. 75–79.

21. Troshin F.V. Some features of brushes application from polymeric abrasive pile. *Avtomobil'naya promyshlennost'* [Automotive industry]. 2008, no. 8, pp. 35.

22. Dimov Yu.V., Podashev D.B. Forces operating on a detail edge when processing on polymeric abrasive brushes. *Vestnik mashinostroeniya* (In Russian)

23. Dimov Yu.V., Podashev D. B. Cutting forces when processing edges face brushes *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Messenger of Irkutsk state technical university]. 2017, no. 12, pp. 22–42. (In Russian)

Критерии авторства

Димов Ю.В., Подашев Д.Б. провели экспериментальные исследования износа радиальных и торцевых щеток компании 3М при обработке кромок, установили зависимости износа от скорости резания и деформации инструмента, провели обобщение и написали рукопись. Димов Ю.В. несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authorship criteria

Dimov Yu.V., Podashev D.B. have conducted pilot studies of 3M radial and face brushes wear when processing edges, have established dependences of wear on the cutting speed and tool deformation, have carried out generalization and have written the manuscript. Dimov Yu.V. bears responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declares no conflict of interest.



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.757

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-11-56-62>

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ИНЖЕНЕРНОГО АНАЛИЗА ИЗДЕЛИЙ С ДЕТАЛЯМИ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПРИМЕРЕ ПРИНЦИПОВ РАБОТЫ ANATOLEFLEX

© Д.С. Леонович¹, Д.А. Журавлёв², Ю.И. Карлина³

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

РЕЗЮМЕ: Цель – рассмотреть современные тенденции развития инженерного анализа нежестких элементов на примере принципов работы ANATOLEFLEX со сборками, в состав которых входят компоненты из композиционных материалов. Собираемость сборок из нежестких компонентов требует моделирование комплексных статистических задач на разных уровнях сборки для автоматизации контроля и регулирования зазоров. В ходе обзора выявлены преимущества применения платформы ANATOLEFLEX, которая способствует принятию во внимание последовательности сборки типовых соединений, свойств композиционных или иных типов материалов, тип производственного процесса и контактного моделирования, используемого для построения полной и реалистичной модели сборки. На практике результаты применения данного решения можно наблюдать в авиационных сборках Airbus с использованием анализа результатов симуляции. Установлено, что применение реалистичной симуляции моделей сборок, таких как анализ симуляции допусков или расчет карты зазоров для процесса регулировки прокладками, в значительной мере делает возможной автоматизацию проектирования сборки с компонентами из композиционных материалов.

Ключевые слова: машиностроение, самолетостроение, композиционный материал, собираемость, инженерный анализ, анализ допусков

Информация о статье: Дата поступления 15 мая 2018 г.; дата принятия к печати 30 октября 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 ноября 2018 г.

Для цитирования: Леонович Д.С., Журавлёв Д.А., Карлина Ю.И. Современные тенденции развития инженерного анализа изделий с деталями из композиционных материалов на примере принципов работы ANATOLEFLEX. Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018;22(11):56–62. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-56-62.

MODERN DEVELOPMENT TENDENCIES IN ENGINEERING ANALYSIS OF PRODUCTS WITH COMPOSITE MATERIAL PARTS ON EXAMPLE OF ANATOLEFLEX OPERATING PRINCIPLES

Dmitriy S. Leonovich, Diomid A. Zhuravlev, Yulia I. Karlina

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

ABSTRACT: The purpose of the article is to consider the current development trends in the engineering analysis of non-rigid elements on the example of the operating principles of ANATOLEFLEX with assemblies containing the components made of composite materials. The assemblage of assemblies from non-rigid components requires the simulation of complex statistical tasks at different levels of assembly to automate the control and monitoring of gaps. The performed review

¹Леонович Дмитрий Сергеевич, аспирант, e-mail: dmitriy.leonovich@mail.ru

Dmitriy S. Leonovich, Postgraduate student, e-mail: dmitriy.leonovich@mail.ru

²Журавлёв Диомид Алексеевич, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой технологии машиностроения, e-mail: dio@istu.irk.ru

Diomid A. Zhuravlev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Technology of Mechanical Engineering, e-mail: dio@istu.irk.ru

³Карлина Юлия Игоревна, аспирант, e-mail: asup@irzirk.ru

Yulia I. Karlina, Postgraduate student, e-mail: asup@irzirk.ru



has allowed to reveal the advantages of the ANATOLEFLEX platform, which allows to take into account the assemblage sequence of typical assemblies, the properties of composite or other types of materials, the type of production process and contact modeling used to build a complete and realistic assembly model. The application results of this solution are represented by the Airbus aircraft assemblies, which employ the analysis of simulation results. It has been found out that the use of the realistic simulation of assembly models such as the analysis of tolerance simulation or calculation of the gap map for shimming up gap process adjustment to a large extent enables automation of the design of the assembly with composite material components.

Keywords: *mechanical engineering, aircraft engineering, composite material, assemblage, engineering analysis, tolerance analysis*

Information about the article: Received May 15, 2018; accepted for publication October 30, 2018; available online November 30, 2018.

For citation: Leonovich D.S., Zhuravlev D.A., Karlina Yu.I. Modern development tendencies in engineering analysis of products with composite material parts on example of ANATOLEFLEX operating principles. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(11):pp. 56–62. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-56-62.

Введение

В современной авиационной промышленности большое внимание уделяется производственным процессам с целью повышения объемов производства. Это приводит к повышению эффективности менеджмента нелинейности в производственной цепочке и робастности сборочных процессов. Новые композиционные авиационные структуры с использованием материалов из волокон, применяемые на последних Airbus A350 XWB, отечественных MC-21 и Сухой SSJ 100 [1-4], требуют дополнительных технических решений по встроенному уровню контроля в процессе сборки.

Композитные компоненты или сборки с деталями из композиционных материалов можно рассматривать как гибкие и маложесткие ввиду больших габаритных размеров и небольшой толщины. Поэтому в большинстве случаев сборочные процессы осуществляются с применением больших и жестких приспособлений, в которые закрепляют каждый компонент в заданном месте и положении в определенных точках, что подразумевает геометрическое ограничение и фиксацию необходимых плоскостей для позиционирования гибкого компонента [5].

Проблема заключается не только в том, что структуры из полимер-углеродного волокна требуют возврата к парадигме ручной сборки множества мелких компо-

нентов, но и в том, что использование композитов привносит уникальные проблемы, связанные с их геометрическими отклонениями, переходящими от одного уровня сборки к другому, и требующие введения множества дополнительных шагов в сборочный цикл для их компенсации.

Помимо проблемы вариации диаметров самих волокон, в полимерных композитах от одного компонента к другому так же может варьироваться и объем смолы. Это приводит к накоплению погрешностей при сборке. Сборочные единицы должны быть собраны и разобраны несколько раз для измерения и регулировки зазоров, что так же увеличивает потери времени – это особенно критично при увеличении темпов производства.

В целом применение композиционных материалов в авиационной промышленности обусловлено рядом преимуществ: они увеличивают прочность деталей, снижают вес, а также позволяют уменьшить количество компонентов: в самолетных двигателях композиты уменьшают вес, что, как следствие, ведет к экономии топлива. Так, например, вес композитов составляет менее 20% аналогичных деталей из алюминиевых сплавов, при превосходящей прочности, гибкости и устойчивости к давлению, не говоря уже о том, что как металлы, они, естественно, не подвержены



коррозии.

За последнее десятилетие композиционные материалы совершили значительный прорыв в эффективности их применения в коммерческом машиностроении, но отошли на шаг назад в области производственных затрат. Успех обусловлен тенденцией перехода от клепки листового металла к механической обработке пакетов из разнородных материалов, а недостаток – увеличением количества неучтенных операций, вроде дополнительного контроля и регулирования зазоров подкладками в сборках.

Одним из ведущих проектов в области развития статистического моделирования композитных структур на данный день является европейский проект LOCOMACHS (аббревиатура от англ. Low Cost Manufacturing of Composite Parts and Hybrid Structures), основные результаты которого отражены в [6]. Данный проект функционирует при поддержке таких гигантов промышленности, как Airbus Group, SAAB, Dassault Aviation, IAI и др [7].

Для выполнения сборочных работ с маложесткими композиционными деталями существенным является наличие модели, учитывающей реальное поведение сборки. Для осуществления симуляции выбирается моделирование конечных элементов. Очевидно, что пользователи систем назначения допусков не всегда обладают достаточными навыками для осуществления механической симуляции, поэтому аранжировка проблем сборочного процесса в механическую модель достаточно проблематична.

Учитывая вышесказанное, был основан ряд новых платформ программного обеспечения, специализирующихся на реалистичной симуляции сборок, которая смогла бы учитывать воздействие геометрических вариаций и механических свойств каждого из компонентов для достижения заданного качества конкретной сборки. К

таким программам можно отнести: Anatole и Anatoleflex от Airbus Group, основанное на CATIA 5 [8], RD&T от RD&T Technology AB [9], 3DCS FEA Compliant modeller от DCS и TAA от Dassault Systems [10], развивающаяся отечественная платформа GePARD [11].

Для предотвращения влияния геометрических особенностей композитного компонента на геометрическое качество сборки, Airbus Group проводятся исследовательские работы в сотрудничестве ENS Cachan в течение уже более 20 лет [12]. В течение первого десятилетия исследования были сфокусированы на сборке маложестких компонентов [13]. За предшествующее десятилетие были собраны данные по введению учета гибкости компонентов и дефектов их форм. Деятельность способствовала определению методов и средств для решения различных классов промышленных проблем, таких как наилучшая гибкость для обеспечения посадки, анализ допусков, синтез допусков, шаблон гибкого компонента, выбор оптимальной последовательности сборки или предварительный расчет для регулирования прокладками [14–16].

Цель данной работы – представить современные тенденции развития инженерного анализа с целью автоматизации производства на примере принципов работы платформы Anatoleflex со сборками, в состав которых входят компоненты из композиционных материалов. Применения платформы ANATOLEFLEX от гиганта авиационной промышленности Airbus способствует принятию во внимание всех последовательностей сборки типовых соединений компонентов, свойств композиционных или иных типов материалов, различных типов производственного процесса и контактного моделирования, используемого для построения полной и реалистичной модели сборки.

Программное обеспечение ANATOLE и его принцип работы



Упомянутое выше программное обеспечение ANATOLE является модулем CATIA V5, предназначенное для компьютерно-ориентированного назначения допусков, для анализа технических условий и технических требований сборки для карты изделия. В данной программе рассматривается худший из возможных случаев и статистическое решение, основанное на симуляции жесткого тела. На его основе был разработан отдельный модуль для гибкой сборки – ANATOLEFLEX, для преобразования FEM симуляций без использования требуемых CAE-экспертиз и для возможности получения реалистичных отклонений на моделях компонентов.

Оба модуля для анализа вариаций жесткого тела используют описание модели сборки на основе геометрического макета компонентов, в котором выделяются следующие уровни: перечень рассматриваемых компонентов, перечень точек соединения поверхностей, перечень технических условий (требований) на геометрическое или физическое состояние, процесс сборки, определяющий необходимую последовательность шагов для выполнения полной сборки, задаются все компоненты и зажимные приспособления, которые повлияют на геометрический размер окончательного изделия [17].

При работе с модулем необходимо выполнять наложение общих связей между зависимыми компонентами:

- 1) точки соединения сопрягаемых деталей, которые непосредственно позиционируют компонент. Каждая точка крепления должна иметь свои кинематические особенности с зависимыми степенями свободы;

- 2) контактирующие точки закрепления, которые могут рассматривать как заклепочные соединения, описываются приложением силы;

- 3) контакт поверхностей. Выбранные поверхности определяют полость с условиями одностороннего контакта в точке сопряжения.

Так как для выполнения анализа от-

клонений маложесткости необходимо перейти от вышеупомянутой модели, основанной на геометрических данных, к модели FEA (конечно-элементного анализа), построенной в зависимости от разбитой сетки для анализа, то именно модуль ANATOLEFLEX предлагает исходя из существующего проекта в ANATOLE автоматическое создание структуры гибкой модели нежесткой для анализа отклонений маложестких деталей с помощью FEA.

Специализированный модуль ANATOLEFLEX имеет целью создание модели геометрических отклонений, взяв за основу заданные допуски и заданный технологический процесс. Целью данного модуля является рассмотреть совокупную модель как случайную геометрию каждой деталисборочной единицы для создания репрезентативной геометрической вариации (отклонений). Предлагаемая методология основывается на вероятностном методе: применимо к заданной геометрии выполняется разбивка сетки со случайными отклонениями в пределах назначенных допусков.

Конкретизируя вышесказанное, в платформе ANATOLEFLEX можно идентифицировать ряд функций: прогнозирование зазоров и их регулирования прокладками в цехе по результатам замеров деталей; комбинирование допусков с вероятностным распределением в сборке (в зависимости от исполнения); рассмотрение допусков с целью определения характеристик зависимых от распределения сил тяжести; анализ процесса сборки с целью поиска наиболее робастной последовательности; процесс выполнения измерений в сборке с использованием наиболее подходящей гибкой оснастки; анализ допусков для оценки пределов технических условий и исследование поверхностей стыка.

Главной инновацией этого симулятора отклонений является количественное обеспечение геометрической дисперсии, используя непараметричный стохастический (вероятностный) метод. Дисперсия не описывается через вероятностное распределение некоторых макроскопических



уравнений деталей, а рассматривается через полное поле 3Д (трехмерных) отклонений, генерируемых случайным полем. С математической точки зрения предлагается смоделировать это случайное поле используя корреляционные функции Бокса и Дженкинса [18]. Эту методологию можно разделить на 3 шага:

1. Преобразование данных с использованием нелинейных преобразований, известных как преобразования Бокс-Кокса, для получения квази-Гауссового предельного распределения с постоянным расхождением случайного поля.

2. Функция тренда (систематическая деформация) задается по методу наименьших квадратов и убирается из переработанных данных.

3. Отцентрованные данные исполь-

зуются для установления разложения Карунена-Лоова результирующего постоянно-го случайного поля Гаусса [19]. Это разложение близко к основному функциональному компонентному анализу, но отличается по факту нестандартного геометрического распределения точек на графике, принимаемых во внимание при разложении с целью получить вероятностную модель с независимой разбивкой сетки.

Результирующая вероятностная модель для описания вышеупомянутого случая на языке математики, выступающая в виде связанного математического алгоритма, внедренного в Open-turn library [20] и используемого в симуляторе отклонений ANATOLEFLEX, приведена в источнике [21].

Заключение

Целями подобных ANATOLEFLEX проектов является стремление разработать наиболее точные методы проектирования и производства для комплексных композиционных структур и полностью интегрировать геометрические отклонения и управление допусками в системы автоматизированного проектирования.

Описанные выше результаты разработки платформы специализированного программного обеспечения реалистичной симуляции нежестких сборок ANATOLE-

FLEX являются важным шагом к решению многих проблем автоматизации производства, так как возможность выстраивать симуляцию допусков в проектировочном программном обеспечении и прогнозировать допуски имеет огромное значение: силовое замыкание компонентов для исключения зазоров при сборке непременно ведет к увеличению внутренних напряжений. Данная платформа уже имеет случаи практического внедрения в производство [1, 8].

Библиографический список

1. Results [Электронный ресурс] // LOCOMACHS. URL: <http://www.locomachs.eu/page/results.php> (17.10.2018)
2. A350 XWB Family [Электронный ресурс]. URL: <http://www.airbus.com/aircraft/passenger-aircraft/a350xwb-family.html> (17.10.2018)
3. MC-21 [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%A1-21> (17.10.2018)
4. Сухой Суперджет 100 [Электронный ресурс]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Sukhoi_Superjet_100 (17.10.2018)
5. Royer M, Anselmetti B. 3D Manufacturing tolerancing with analysis line method taking into account joining operations during manufacturing process. Annals of the CIRP 43. 2016. p. 88–93.
6. Results catalogue: LOCOMACHS [Электронный ресурс]. URL: <http://www.locomachs.eu/page/results-catalogue.php> (17.10.2018)
7. Partners [Электронный ресурс] // LOCOMACHS: URL: <http://www.locomachs.eu/page/partners.php> (17.10.2018)
8. European Project Tackles Composites Assembly Hurdle To Production Ramp-up [Электронный ресурс]. URL: <http://aviationweek.com/technology/european-project-tackles-composites-assembly-hurdle-production-ramp> (17.10.2018)
9. RD&T technology [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rdnt.se/tool.html> (17.10.2018)
10. Dimensional Control System [Электронный



ресурс]. URL: <https://www.3dcs.com> (17.10.2018)

11. Журавлев Д.А., Шабалин А.В. Методика пространственного размерного анализа в системе ГеПАРД // Вестник ИрГТУ. 2015. № 8. С. 58–65.

12. SIEMENS. Aerospace and defense. Airbus Group Innovations [Электронный ресурс]. URL:

<https://www.plm.automation.siemens.com/pub/case-studies/40538?resourceId=40538> (17.10.2018)

13. Mathieu L, Marguet B. Integrated Design Method to Improve Producibility based on Product Key Characteristics and Assembly Sequences // Annals of the CIRP. 2001. 50 (1). P. 85–88.

14. Lacroix C., Mathieu L., Thiebaut F., Douilly M., Falgarone H. Numerical process based on measuring data for gap prediction of an assembly. 13th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing, Hangzhou, China. 2014. Procedia CIRP 2015. P. 97–102.

15. Mounaud M, Thiebaut F, Bourdet P, Falgarone H, Chevassus N. Assembly sequence influence on geometric deviations propagation of compliant parts // International Journal of Production Research. 2011.

Vol. 14. P. 1021–1043

16. Lartigue C, Thiebaut F, Bourdet P, Anwer N. Dimensional metrology of flexible parts: Identification of geometrical deviations from optical measurements // World scientific publishing. 2006. P. 196–203.

17. Cozzens R. Catia V5 Workbook. Releases 8&9 – Utah University: 2016. 476 p.

18. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов: прогноз и управление / Под ред. В.Ф. Писаренко. М.: Мир, 1974. 406 с.

19. Le Maitre OP, Knio OM. Spectral Methods for Uncertainty Quantification. Springer Science+Business Media B.V., 2010. 536 p.

20. OpenTURNS consortium [Электронный ресурс]. URL: <http://www.openturns.org> (17.10.2018)

21. Falgaronea H., Thiébaut F., Coloos J., Mathieu L. Variation simulation during assembly of non-rigid components. Realistic assembly simulation with AN-ATOLEFLEX software. 14th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing. Procedia CIRP 43. 2016. P. 202–207.

References

1. Results: LOCOMACHS. Available at: <http://www.locomachs.eu/page/results.php> (accessed 17 October 2018)

2 A350 XWB Family. Available at: <http://www.airbus.com/aircraft/passenger-aircraft/a350xwb-family.html> (accessed 17 October 2018)

3. MC-21 Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%A1-21> (accessed 17 October 2018)

4. *Sukhoi Superdzhets 100* [Sukhoi Superjet 100]. Available at:

https://ru.wikipedia.org/wiki/Sukhoi_Superjet_100 (accessed 17 October 2018)

5. Royer M, Anselmetti B. 3D Manufacturing tolerancing with analysis line method taking into account joining operations during manufacturing process. Annals of the CIRP 43. 2016. pp. 88–93.

6. Results catalogue: LOCOMACHS. Available at: <http://www.locomachs.eu/page/results-catalogue.php> (accessed 17 October 2018)

7. Partners: LOCOMACHS. Available at: <http://www.locomachs.eu/page/partners.php> (accessed 17 October 2018)

8. European Project Tackles Composites Assembly Hurdle To Production Ramp-up. Available at: <http://aviationweek.com/technology/european-project-tackles-composites-assembly-hurdle-production-ramp> (accessed 17 October 2018)

9. RD&T technology. Available at: <http://www.rdnt.se/tool.html> (accessed 17 October 2018)

10. Dimensional Control System. Available at: <https://www.3dcs.com/> (accessed 17 October 2018)

11. Zhuravlev D.A., Shabalin A.V. *Metodika pros-*

transtvennogo razmernogo analiza v sisteme GePARD [Methods of spatial dimensional analysis in GePARD system]. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2015. no. 8. p. 58–65. (In Russian)

12. SIEMENS. Aerospace and defense. Airbus Group Innovations. Available at:

<https://www.plm.automation.siemens.com/pub/case-studies/40538?resourceId=40538> (accessed 17 October 2018)

13. Mathieu L, Marguet B. Integrated Design Method to Improve Producibility based on Product Key Characteristics and Assembly Sequences. Annals of the CIRP. 2001. 50 (1). p. 85–88

14. Lacroix C, Mathieu L, Thiebaut F, Douilly M, Falgarone H. Numerical process based on measuring data for gap prediction of an assembly. 13th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing, Hangzhou, China. 2014. Procedia CIRP 2015. p. 97–102.

15. Mounaud M, Thiebaut F, Bourdet P, Falgarone H, Chevassus N. Assembly sequence influence on geometric deviations propagation of compliant parts. International Journal of Production Research. vol. 14. 2011. p. 1021–1043

16. Lartigue C, Thiebaut F, Bourdet P, Anwer N. Dimensional metrology of flexible parts: Identification of geometrical deviations from optical measurements. World scientific publishing. 2006. p. 196–203.

17. Cozzens R. Catia V5 Workbook. Releases 8&9 – Utah University: 2016. 476 p.

18. Box G, Jenkins G. *Analiz vremennih ryadov: prognoz i upravlenie* [Time series analysis: Forecasting and control] under edition of V.F. Pisarenko. Moscow: Mir, 1974, 406 p. (In Russian)

19. Le Maitre OP, Knio OM. Spectral Methods for Uncertainty Quantification. ISBN 978-90-481-3519-6.



Springer Science+Business Media B.V., 2010. 536 p.
20. OpenTURNS consortium. Available at: <http://www.openturns.org> (accessed 17 October 2018)
21. Falgaronea H., Thiébaut F., Coloos J., Mathieu L. Variation simulation during assembly of non-rigid com-

ponents. Realistic assembly simulation with AN-ATOLEFLEX software. 14th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing. Procedia CIRP 43. 2016. p. 202–207.

Критерии авторства

Леонович Д.С., Журавлёв Д.А., Карлина Ю.И. провели обзор современных тенденций развития инженерного анализа изделий с деталями из композиционных материалов на примере принципов работы ANATOLEFLEX и заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Leonovich D.S., Zhuravlev D.A., Karlina Yu.I. reviewed the modern development trends of engineering analysis of products with parts made of composite materials on the example of the operation principles of AN-ATOLEFLEX workbench and claim equal participation in obtaining and formalization of scientific results 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 621.22

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-11-63-70>

РАЗРАБОТКА ОПЫТНОГО ОБРАЗЦА БЕСКРЕЙЦКОПНОЙ ПОРШНЕВОЙ ГИБРИДНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ МАШИНЫ

© А.С. Тегжанов¹, В.Е. Щерба², Е.Ю. Носов³

Омский государственный технический университет,
644050, Российская Федерация, г. Омск, пр-т Мира, 11.

РЕЗЮМЕ: Цель - разработка опытного образца бескрейцкопной поршневой энергетической машины, обладающей улучшенным охлаждением компримируемого газа и улучшенными значениями массогабаритных показателей. Используются современные методы проектирования конструирования поршневых компрессоров и насосов. На основе анализа существующих конструкций поршневых гибридных энергетических машин, предназначенных для одновременного сжатия и перемещения газа и капельных жидкостей, разработана новая перспективная конструкция бескрейцкопной поршневой энергетической машины, обладающей улучшенным охлаждением компримируемого газа и улучшенными значениями массогабаритных показателей. При использовании основных подходов к проектированию поршневых компрессоров и насосов определены конструктивные размеры деталей и узлов бескрейцкопной гибридной энергетической машины. Предложена новая конструкция поршневой бескрейцкопной энергетической машины, обладающей улучшенным охлаждением компримируемого газа и массогабаритными показателями. Используя основные положения методик проектирования поршневых компрессоров и насосов, определены основные конструктивные размеры машины. Для разработки сборочных чертежей использовался пакет прикладных программ «Solid Works». Проведенные динамический и прочностной расчеты основных деталей и узлов подтвердили правильность выбранных материалов и размеров.

Ключевые слова: поршень, цилиндр, поршневой компрессор, поршневой насос, гибридная энергетическая машина, крейцкопф, опытный образец, проектирование, конструирование

Информация о статье: Дата поступления 12 мая 2018 г.; дата принятия к печати 30 октября 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 ноября 2018 г.

Для цитирования: Тегжанов А.С., Щерба В.Е., Носов Е.Ю. Разработка опытного образца бескрейцкопной поршневой гибридной энергетической машины. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(11):63–70. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-63-70.

DEVELOPMENT OF THE PILOT CROSSHEAD-FREE PISTON HYBRID ENERGY MACHINE

Ablay-Khan S. Tegzhanov, Viktor E. Shcherba, Evgeniy Yu. Nosov

Omsk State Technical University,
11 Mira pr., Omsk 644050, Russian Federation

¹Тегжанов Аблай-Хан Савитович, ассистент кафедры «Гидромеханика и транспортные машины», e-mail: ablai1991@mail.ru

Ablay-Khan S. Tegzhanov, Assistant Professor of the Department of Hydromechanics and Transport Machines, e-mail: ablai1991@mail.ru

²Щерба Виктор Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Гидромеханика и транспортные машины», e-mail: scherba_v_e@list.ru

Viktor E. Shcherba, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Hydromechanics and Transport Machines, e-mail: scherba_v_e@list.ru

³Носов Евгений Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Гидромеханика и транспортные машины», e-mail: nosovjon@mail.ru

Evgeniy Yu. Nosov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Hydromechanics and Transport Machines, e-mail: nosovjon@mail.ru



ABSTRACT: The purpose of the paper is to develop a pilot crosshead-free piston power machine with improved cooling of compressed gas and better mass-dimensions. The work uses the modern methods of designing reciprocating compressors and pumps. A new promising design of a crosshead-free piston power machine with improved cooling of the compressed gas and better mass-dimensional parameters has been developed on the basis of the analysis of the existing designs of reciprocating hybrid power machines intended for simultaneous compression and movement of gas and fluids. Using the basic approaches to the design of reciprocating compressors and pumps, the main design dimensions of the parts and assemblies of the crosshead-free hybrid power machine have been determined. A new design of a crosshead-free piston power machine is proposed. It has improved cooling of the compressed gas and better mass dimensions. Using the basic principles of design techniques for reciprocating compressors and pumps, the main design dimensions of the machine have been determined. The *Solid Works* software package was used to develop the assembly drawings. Conducted dynamic and strength calculations of the main parts and assemblies have confirmed the correctness of the selected materials and dimensions.

Keywords: piston, cylinder, reciprocating compressor, reciprocating pump, hybrid power machine, crosshead, pilot sample, designing, design engineering

Information about the article: Received 12 May, 2018; accepted for publication 30 October, 2018; available online 30 November, 2018.

For citation: Tegzhanov A.-Kh.S., Shcherba V.E., Nosov E.Yu. Development of the pilot crosshead-free piston hybrid energy machine. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(11):pp. 63–70. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-63-70.

Введение

Поршневые машины объемного действия продолжают оставаться наиболее предпочтительным типом машин для сжатия и перемещения газов и жидкостей, в связи с чем, несмотря на кажущуюся простоту их конструкций, продолжают интенсивные исследования различных аспектов их функционирования с целью повышения экономичности и различных эксплуатационных свойств [1–6 и др.]

Как указывают авторы [7], одним из наиболее эффективных путей повышения экономичности и производительности поршневого компрессора и поршневого насоса является их объединение в единый агрегат. Проведенный анализ такого агрегатирования [8] показал, что основные преимущества гибрида проявляются за счет интенсификации процесса охлаждения компримируемого газа и улучшения массогабаритных показателей машины.

Результаты и обсуждения

Учитывая вышесказанное, необходимо взять эти преимущества за целевую функцию, и при создании новой высокоэффективной гибридной энергетической машины попытаться улучшить именно эти преимущества. Первоначально разработанные поршневые гибридные энергетические машины имели крейцкопфную схему [9, 10 и др.]. Поршневая крейцкопфная гибридная энергетическая машина работает следующим образом (рис. 1).

При ходе поршня вверх происходит сжатие и нагнетание газа в надпоршневой компрессорной секции, а в подпоршневой

насосной секции – процессы обратного расширения и всасывания жидкости. При ходе поршня вниз, от ВМТ к НМТ, в компрессорной секции происходит обратное расширение и всасывание, в насосной секции – сжатие и нагнетание.

Необходимо отметить, что в данной схеме осуществляется охлаждение деталей цилиндро-поршневой группы компрессорной секции за счет теплопроводности материалов цилиндра и поршня, ликвидация утечек сжимаемого газа в цилиндро-поршневой группе, уменьшение работы сил трения.



К недостаткам данной машины следует отнести все же достаточно большие габариты, массу и недостаточно интенсивное охлаждение стенок рабочей полости компрессорной секции.

Эти недостатки частично устраняются в бескрейцкопфной поршневой гибридной энергетической машине, предложенной

в [11]. Принципиальная схема машины представлена на рис. 2.

Машина содержит цилиндр с газовой 11 и жидкостной 8 полостями, соединенными через клапаны 12, 13, 14, 9 с источниками и потребителями газа и жидкости.

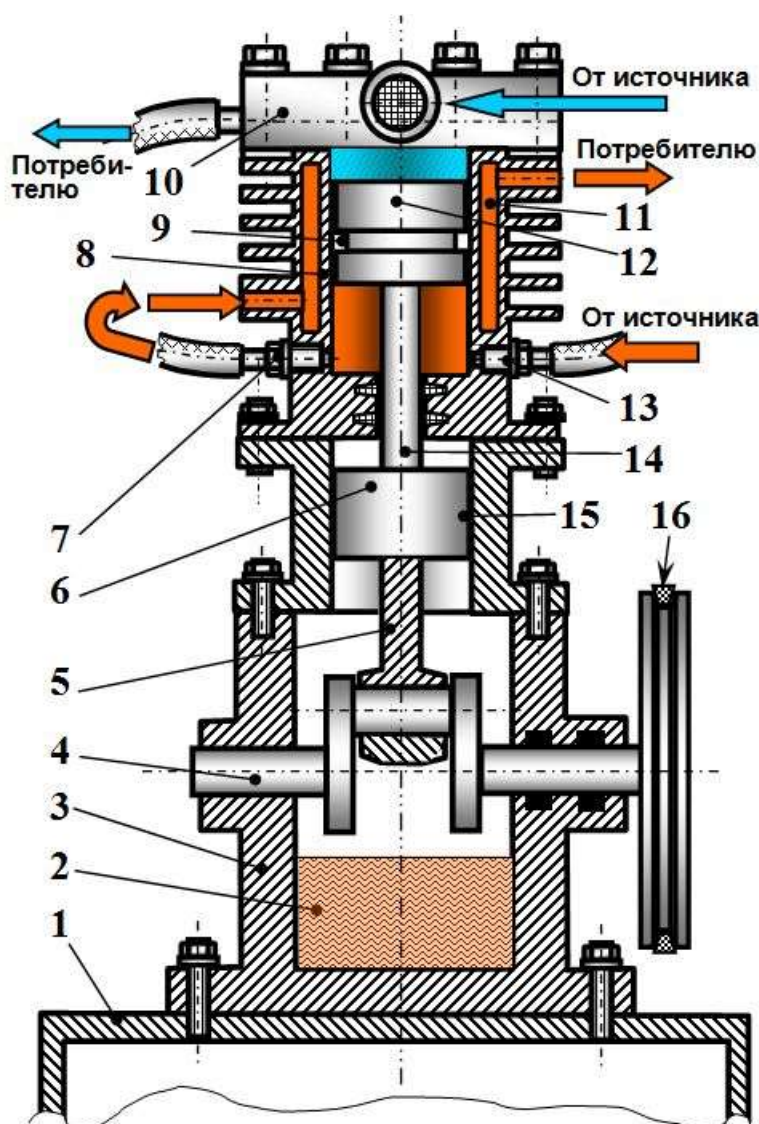


Рис. 1. Схема поршневой крейцкопфной гибридной энергетической машины:

1 – рама, установленная на ресивере; 2 – смазочное масло; 3 – картер; 4 – коленчатый вал; 5 – шатун; 6 – крейцкопф; 7 – нагнетательный клапан; 8 – цилиндр; 9 – буферная канавка; 10 – клапанная головка; 11 – рубашка охлаждения; 12 – поршень; 13 – всасывающий клапан; 14 – шток; 15 – направляющая крейцкопфа; 16 – шкив

Fig. 1. Diagram of piston crosshead hybrid power machine: 1 – frame mounted on the receiver;

2 – lubricating oil; 3 – crankcase; 4 – crankshaft; 5 – connecting rod; 6 – crosshead; 7 – delivery valve; 8 – cylinder; 9 – cushion groove; 10 – valve head; 11 – cooling jacket; 12 – piston; 13 – suction valve; 14 – thrust rod; 15 – crosshead slide; 16 – pulley wheel

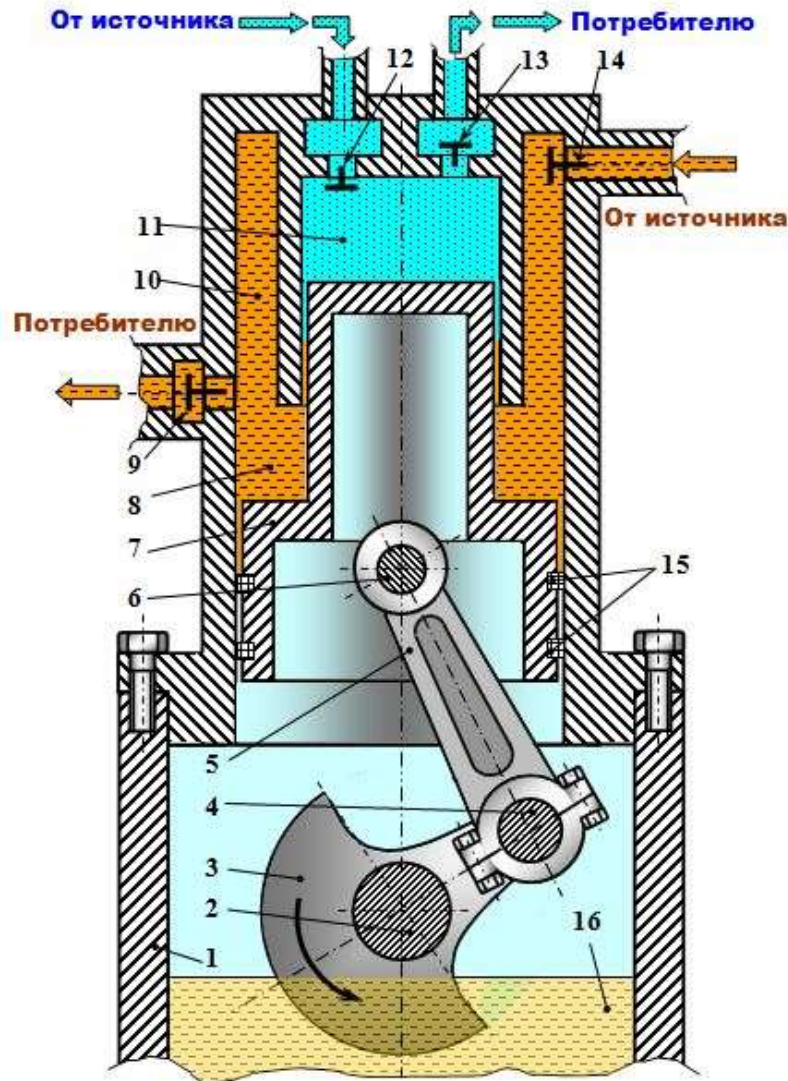


Рис. 2. Схема поршневой бескрейцкопфной гибридной энергетической машины: 1 – картер; 2 – коленчатый вал; 3 – противовес; 4 – кривошип; 5 – шатун; 6 – шатунный палец; 7 – дифференциальный поршень; 8 – насосная полость; 9 – нагнетательный клапан; 10 – рубашка охлаждения; 11 – компрессорная полость; 12 – всасывающий клапан; 13 – нагнетающий клапан; 14 – всасывающий клапан; 15 – уплотнение; 16 – масло
Fig. 2. Diagram of a crosshead-free piston hybrid power machine: 1 – crankcase; 2 – crankshaft; 3 – counterweight; 4 – crank; 5 – connecting rod; 6 – connecting rod pin; 7 – double-diameter piston; 8 – pump cavity; 9 – delivery valve; 10 – cooling jacket; 11 – compressor cavity; 12 – suction valve; 13 – delivery valve; 14 – suction valve; 15 – compaction; 16 – oil

Поршень имеет дифференциальный вид. Внутренняя часть поршня 7 предназначена для сжатия и перемещения газа, а внешняя предназначена для сжатия и перемещения жидкости. В машине отсутствует крейцкопф, что уменьшает массу и габариты. Кроме того, приближение жидкостной полости к газовой позволяет интенсифицировать охлаждение последней, что приводит к улучшению охлаждения сжимаемого

газа. К недостаткам следует отнести все еще достаточно значительные габариты и массу, а также охлаждение цилиндро-поршневой группы.

Учитывая вышеизложенное, разработана новая конструкция бескрейцкопфной поршневой гибридной энергетической машины, принципиальная схема которой представлена на рис. 3.

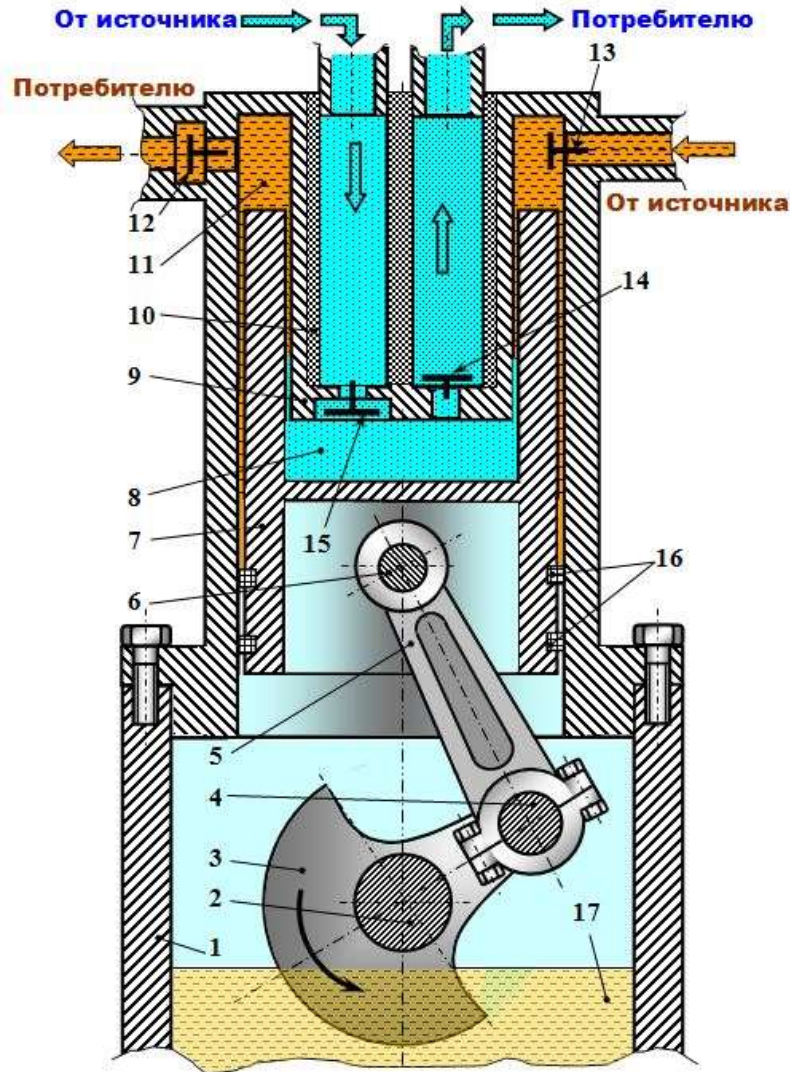


Рис. 3. Схема бескрейцкопфной поршневой гибридной энергетической машины улучшенной конструкции: 1 – картер; 2 – коленчатый вал; 3 – противовес; 4 – кривошип; 5 – шатун; 6 – палец шатуна; 7 – тронковый поршень; 8 – компрессорная полость; 9 – выступ; 10 – теплоизоляция; 11 – насосная полость; 12 – нагнетательный клапан; 13 – всасывающий клапан; 14 – нагнетательный клапан; 15 – всасывающий клапан; 16 – уплотнение; 17 – масло

Fig. 3. Diagram of a crosshead-free piston hybrid power machine of improved design: 1 – crankcase; 2 – crankshaft; 3 – counterweight; 4 – crank; 5 – connecting rod; 6 – connecting rod pin; 7 – trunk piston; 8 – compressor cavity; 9 – protrusion; 10 – thermal insulation; 11 – pump cavity; 12 – delivery valve; 13 – suction valve; 14 – delivery valve; 15 – suction valve; 16 – compaction; 17 – oil

Для уменьшения габаритов поршень 7 выполнен П-образный, открытый в сторону газовой полости. Таким образом, газовая полость размещена в нижней части цилиндра, а жидкостная в верхней части цилиндра. В клапанной плите выполнены каналы для подвода и отвода жидкости. Жидкость, окружающая клапанную плиту, интенсивно охлаждает последнюю и соответственно газ, поступающий по каналу к потребителю. Таким образом, клапанная плита

используется как концевой (либо промежуточный) теплообменник. В том случае, если температура всасываемого газа ниже температуры жидкости в насосной секции, необходимо осуществлять теплоизоляцию 10 всасывающего канала.

Особенностью бескрейцкопфной схемы поршневой гибридной энергетической машины по сравнению с крейцкопфной является одновременное протекание аналогичных процессов в компрессорной и



насосной секциях.

С целью экспериментального исследования бескрейцкопфной поршневой энергетической машины была разработана конструкторская документация на опытный образец бескрейцкопфной поршневой гибридной машины. Опытный образец будет иметь следующие размеры:

Внутренний диаметр поршня – 55 мм.

Внешний диаметр поршня – 65 мм.

Ход поршня – 47 мм.

Значение радиального зазора между внутренней поверхностью поршня и блоком клапанной плиты – 30 мкм.

Значение радиального зазора между внешней поверхностью поршня и внутренней поверхностью цилиндра – 30 мкм.

Площадь прохода в щели всасывающего клапана компрессорной секции – 11,05 мм².

Площадь прохода в щели нагнетательного клапана компрессорной секции – 11,05 мм².

Максимальная высота подъема запорного органа нагнетательного клапана компрессорной секции – 1,5 мм.

Максимальная высота подъема запорного органа всасывающего клапана компрессорной секции – 1,5 мм.

Жесткость пружины всасывающего клапана компрессорной секции – 4,2 Н/мм.

Жесткость пружины нагнетательного клапана компрессорной секции – 4,2 Н/мм.

Площадь прохода в щели всасывающего клапана насосной секции – 11,3 мм².

Площадь прохода в щели нагнетательного клапана насосной секции – 9,42 мм².

Максимальная высота подъема запорного органа всасывающего клапана насосной секции – 1,2 мм.

Максимальная высота подъема запорного органа нагнетательного клапана насосной секции – 1 мм.

Жесткость пружины нагнетательного клапана насосной секции – 0,34 Н/мм.

Жесткость пружины всасывающего клапана насосной секции – 0,28 Н/мм.

Диаметр всасывающего канала в

компрессорной секции – 10 мм.

Диаметр нагнетательного канала в компрессорной секции – 6 мм.

Общая длина поршня – 119 мм.

Эти размеры были получены при проектировании данной гибридной энергетической машины, в основу которого были положены методики проектирования поршневых компрессоров и поршневых насосов, описанные в [7, 10, 12–16].

При проектировании данной машины были выдержаны основные требования:

1. Отношение хода поршня к диаметру.

2. Значение средних скоростей газа и жидкости в трубопроводах и клапанах.

3. Ограничения по средней скорости поршня.

При конструировании бескрейцкопфной поршневой энергетической машины был использован пакет прикладных программ «Solid Works». Основные рабочие тела, предполагаемые для сжатия и перемещения в бескрейцкопфной поршневой гибридной энергетической машине: воздух и минеральные масла.

Основными эксплуатационными параметрами проектируемой машины являются:

– давление нагнетания в компрессорной секции – до 10 бар;

– давление нагнетания в насосной секции – до 20 бар;

– угловая скорость вращения коленчатого вала – 250÷750 мин⁻¹;

– давление всасывания в насосной секции – 1 бар;

– давление всасывания в компрессорной секции – 1 бар;

Для спроектированной гибридной энергетической машины был проведен динамический расчет и прочностной расчет основных деталей и узлов, который подтвердил правильность выбранных материалов и размеров, основных деталей и узлов машины.

В настоящее время осуществляется подготовка к производству образца бескрейцкопфной поршневой гибридной энергетической машины.



Выводы

Предложена новая конструкция поршневой бескрейцкопфной энергетической машины, обладающая улучшенным охлаждением компримируемого газа и массогабаритными показателями. Используя основные положения методик проектирования поршневых компрессоров и насосов, определены основные конструктивные

размеры машины. Для разработки сборочных чертежей использовался пакет прикладных программ «Solid Works». Проведенный динамический и прочностной расчеты основных деталей и узлов, подтвердили правильность выбранных материалов и размеров.

Библиографический список

1. Dagilis V., Vaitkus L. Experimental investigations and analysis of compressor's friction losses // MECHANIKS. 2009. Vol. 79. no. 5. pp. 28–35.
2. Pares Girdhar. Performance Evaluation of Pumps and Compressors. Luli.com, 2008. 220 p.
3. Myer Kutz. Pumps, Fans, Blowers, and Compressors. John Wiley & Sons, Inc, 2006. 1040 p.
4. Maurice Stewart. Surface Production Operations: Volume IV: Pump and Compressor Systems: Mechanical Design and Specification. - Gulf Professional Publishing, 2018. – 970 p.
5. Bergada J.M., Kumar S., Davies D.L., Watton J. A complete analysis of axial piston pump leakage and output flow ripples/Applied Mathematical Modeling, Volume 36, Issue 4, April 2012, Pages 1731-1751.
6. Bergada J.M., Watton J., Kumar S. Pressure, flow, force and torque between the barrel and port plate in an axial piston pump, ASME J. Dyn. Syst. Measure. Control. 130 (2008) 011011-1–011011-16.
7. Щерба В.Е., Болштянский А.П., Шалай В.В. Ходырева Е.В. Насос-компрессоры. Рабочие процессы и основы проектирования. М.: Машиностроение. 2013. 388 с.
8. Щерба В.Е., Болштянский А.П., Кайгородов С.Ю., Кузеева Д.А. Анализ основных преимуществ объединения компрессоров и насосов объемного действия в единый агрегат // Вестник машиностроения. 2015. № 12. С. 15–19.
9. Щерба В.Е., Лысенко Е.А., Нестеренко Г.А. и др. Разработка и исследование поршневого уплотнения, выполненного в виде гладкой щели ступенчатого вида, для поршневой гибридной энергетической машины объемного действия // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2016. № 4. С. 45–48.
10. Кондюрин А.Ю., Щерба В.Е., Шалай В.В. и др. Расчет течения жидкости в щелевом уплотнении насос-компрессора, выполненном в идее гидродиода // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2016. № 4. С. 30–35.
11. Пат. № 2644424, Российская Федерация, МПК F04B19/06. Гибридная машина с тронковым поршнем / В.Е. Щерба, А.П. Болштянский, А.Ю. Кондюрин и др.; заявитель и патентообладатель «Омский государственный технический университет». № 20161145987; заявл. 23.11.2016, опубл. 12.02.2018, Бюл. № 5.
12. Bannwarth H. Liquid Ring Vacuum Pumps, Compressors and Systems. John Wiley & Sons, 2006. 512 p.
13. Bergada J., Watton J. Optimization of the lift characteristics of an axial piston pump grooved slipper // Proceedings of the JFPS International Symposium on Fluid Power. 2005. P. 700–704.
14. Mohitpour M., Botros K.K., Hardeveld V. Pipeline Pumping and Compression Systems: A Practical Approach. ASMEPRESS, 2008. 400 p.
15. Dagilis V., Vaitkus L., Kirejchick D. Slider-link Driven compressor (I). Mathematical model. Mechanika. Kaunas: Technologija, 2006, № 6(62). p. 25–31.
16. Dagilis V., Vaitkus L., Kirejchick D. Mathematical model of slider-link driven compressor (I). 6th Int. Conf. on Compressors and Coolants - Compressors' 2006. The almanac of Proceedings. Slovakia, 2006. p. 110–118.

References

1. Dagilis V., Vaitkus L. Experimental investigations and analysis of compressor's friction losses. MECHANIKS. 2009. Vol. 79, no. 5. pp. 28–35.
2. Pares Girdhar. Performance Evaluation of Pumps and Compressors. Luli.com Publ., 2008. 220 p.
3. Myer Kutz. Pumps, Fans, Blowers, and Compressors. John Wiley & Sons, Inc, Publ, 2006. 1040 p.
4. Stewart M. Surface Production Operations. Pump and Compressor Systems: Mechanical Design and Specification. Gulf Professional Publ., 2018. Vol. IV. 970 p.
5. Bergada J.M., Kumar S., Davies D.L., Watton J. A complete analysis of axial piston pump leakage and output flow ripples. Applied Mathematical Modeling. 2012. Vol. 36, Iss. 4. pp. 1731–1751.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.09.016>
6. Bergada J.M., Watton J., Kumar S. Pressure, flow, force and torque between the barrel and port plate in an



axial piston pump, ASME J. Dyn. Syst. Measure. Control. 2008. Vol. 130 no. 1 011011-1–011011-16.

7. Shcherba V.E., Bolshtyanskii A.P., Shalai V.V. *Khodyreva E.V. Nasos-kompressory. Rabochie protsessy i osnovy proektirovaniya* [Pump compressors. Workflows and design basics]. M.: Mashinostroenie. 2013. 388 p. (In Russian)

8. Shcherba V.E., Bolshtyanskii A.P., Kaigorodov S.Yu., Kuzeeva D.A. Analysis of advantages of integration of displacement compressors and pumps into single unit. *Vestnik mashinostroeniya* [Machine Building Bulletin]. 2015, no. 12, pp. 15–19. (In Russian)

9. Shcherba V.E., Lysenko E.A., Nesterenko G.A. et al. Development and investigation of piston seal constructed in form of smooth stepped slit for piston hybrid energy machine. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie* [Chemical and Petroleum Engineering]. 2016, no. 4, pp. 45–48. (In Russian)

10. Kondyurin A.Yu., Shcherba V.E., Shalai V.V. et al. Calculation of a current of liquid in the slot-hole sealing the pump compressor executed in the form of the hydrodiode. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie* [Chemical and Petroleum Engineering].

2016, no. 4, pp. 30–35. (In Russian)

11. Shcherba V.E., Bolshtyanskii A.P., Kondyurin A.Yu. *Gibridnaya mashina s tronkovym porshnem* [Hybrid machine with trunk piston]. Pat. RF no. 2644424, 2016.

12. Bannwarth H. *Liquid Ring Vacuum Pumps, Compressors and Systems*. John Wiley & Sons, 2006. 512 p.

13. Bergada J., Watton J. Optimization of the lift characteristics of an axial piston pump grooved slipper. *Proceedings of the JFPS International Symposium on Fluid Power*. 2005. pp. 700–704.

14. Mohitpour M., Botros K.K., Hardeveld V. *Pipeline Pumping and Compression Systems: A Practical Approach*. ASMEPRESS, 2008. 400 p.

15. Dagilis V., Vaitkus L., Kirejchick D. Slider-link Driven compressor (I). Mathematical model. *Mechanics*. 2006, no. 6(62), pp. 25–31.

16. Dagilis V., Vaitkus L., Kirejchick D. Mathematical model of slider-link driven compressor (I). 6th Int. Conf. on Compressors and Coolants - Compressors' 2006. The almanac of Proceedings. Slovakia, 2006. p. 110–118.

Критерии авторства

Тегжанов А.С., Щерба В.Е., Носов А.Ю. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Tegzhanov A.S., Shcherba V.E., Nosov E.Yu. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results 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 621.757

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-11-71-88>

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДОПУСТИМЫХ ОТКЛОНЕНИЙ СБОРОЧНЫХ ЕДИНИЦ С ПОМОЩЬЮ БИКВАТЕРНИОНОВ

© Л.Ф. Хвощевская¹, Д.А. Журавлёв²

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

РЕЗЮМЕ: Пространственные отклонения, возникающие в механических узлах, являются результатом изменения формы, ориентации или месторасположения геометрических элементов сборочных единиц. Если такие отклонения возникают между сопрягаемыми поверхностями компонентов сборки, то они влияют на конечный результат сборки. Учет этих отклонений уже на стадии проектирования сборочных единиц является одним из условий успешной сборки и обеспечения собираемости. Цель настоящей статьи – представление общего подхода к формализованному описанию допустимых пространственных отклонений геометрических элементов сборочных единиц. При исследовании использовалось математическое моделирование с применением теории бикватернионов. Разработан новый подход к формализованному представлению полей геометрических допусков сборочных единиц с использованием математического аппарата бикватернионов. Построены конфигурационные многообразия допусков ориентации и месторасположения, и дана их классификация. Использование бикватернионов для описания пространственных допустимых отклонений геометрических элементов сборочных единиц позволяет комплексно описывать эти отклонения и учитывать взаимосвязи между ними. Построенные конфигурационные многообразия позволяют учитывать пространственные допустимые отклонения сборочных единиц уже на стадии геометрического проектирования.

Ключевые слова: пространственные допустимые отклонения, сборка, математическое моделирование, собираемость, бикватернионы

Информация о статье: Дата поступления 05 октября 2018 г.; дата принятия к печати 30 октября 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 ноября 2018 г.

Для цитирования: Хвощевская Л.Ф., Журавлёв Д.А. Моделирование пространственных допустимых отклонений сборочных единиц с помощью бикватернионов. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(11):71–88. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-71-88.

BIQUATERNION-BASED MODELING OF ASSEMBLY UNIT PERMISSIBLE SPATIAL TOLERANCES

Lyubov F. Khvashchevskaya¹, Diomid A. Zhuravlev²

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

ABSTRACT: Dimensional deviations arising in mechanical assemblies result from the change in the shape, orientation or position of assembly geometrical elements. If these deviations occur between the mating surfaces of assembly components they affect the final result of the assembly. One of the main conditions of successful assembly and assemblability is accounting for these deviations as early as the design stage of assembly units. The purpose of the article is representation of the general approach for the formalized description of permissible spatial tolerances of assembly unit geo-

¹Хвощевская Любовь Федоровна, программист кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, e-mail: xvlf@mail.ru

Lyubov F. Khvashchevskaya, Programmer of the Department of Technology and Equipment of Machine-Building Production, e-mail: xvlf@mail.ru

²Журавлёв Диомид Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, e-mail: dio@istu.irk.ru

Diomid A. Zhuravlev, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Technology and Equipment of Machine-Building Production, e-mail: dio@istu.irk.ru



metrical elements. The study employs mathematical modeling using the biquaternion theory. A new approach has been developed for formalized imaging of the fields of assembly unit geometrical tolerances using the mathematical apparatus of biquaternions. Configuration manifolds of orientation and position tolerances are built and classified. Biquaternions used to describe permissible spatial deviations of assembly unit geometric elements enable comprehensive description of these deviations and consideration of their correlation. The constructed configuration manifolds allow to take into account the permissible spatial tolerances of assembly units at the stage of geometric design.

Keywords: *permissible spatial tolerances, assembly, mathematical modeling, assemblability, biquaternions*

Information about the article: Received October 5, 2018; accepted for publication October 30, 2018; available online November 30, 2018.

For citation: Khvashchevskaya L.F., Zhuravlev D.A. Biquaternion-based modeling of assembly unit permissible spatial tolerances. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(11):pp. 71–88. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-71-88.

Введение

Для проведения пространственного анализа собираемости механических узлов на стадии проектирования необходимо решить множество сложных задач. Одной из таких задач является задача включения размерных и геометрических пространственных допустимых отклонений компонентов узла в модель для 3D анализа. Решение этой задачи предполагает построение математических моделей пространственных допустимых отклонений. Ю.Н. Ляндон в конце 50-х годов 20-го века сделал попытку комплексно описать отклонения, а с появлением компьютеров, позволивших проводить автоматизированные расчеты, исследования в этом направлении получили новый импульс. За это время было предложено много математических методов и моделей для представления пространственных допустимых отклонений. В работах [5,10–16] допустимые отклонения рассматриваются уже как часть процесса проектирования сборок. Дифференциально-геометрический подход к моделированию пространственных допустимых отклонений сборочных единиц был предложен в [1]. Там же было предложено допуски сборки разделить на 3 основные группы:

- 1) допуски взаимного расположения;
- 2) допуски изгиба;
- 3) допуски искажения метрики.

В работах [2] и [4] для математического описания полей геометрических допусков ориентации и формы (плоскостность, прямолинейность), определенных в стандарте ГОСТ 24642–81*, использовались кватернионы с действительными компонентами. Введено понятие конфигурационного пространства поверхности как пространства возможных изменений параметров поверхности, полностью характеризующих ее отклонение от номинальных размеров и формы при заданных значениях допусков [4]. Каждому допуску ориентации поверхности поставлено в соответствие определенное конфигурационное пространство. Однако следует отметить, что при построении конфигурационных пространств не учитывались взаимосвязи параметров, характеризующих пространственные отклонения. Наличие таких взаимосвязей существенно влияет на результат сборки.

В работах [3] и [6] допуски произвольной формы поверхности рассматриваются с точки зрения первой и второй квадратичных форм поверхности. Варьируя коэффициентами квадратичных форм и отмеченными реперами, можно получать реальную форму поверхности детали

*ГОСТ 24642–81 Основные нормы взаимозаменяемости. Допуски формы и расположения поверхностей. Введ. 18.03.81. М.: ИПК Издательство стандартов, 2002.

GOST 24642-81 basic rules of interchangeability. Tolerances of shape and location of surfaces. Enter. 18.03.81. M.: IPK Publishing house of standards, 2002.



при каждом значении заданных на нее допусков формы.

Появление стандартов ГОСТ Р 53089-2008 и ГОСТ Р 53442-2015, которые устанавливают нормирование геометрических характеристик изделий, требует новых подходов к математическому описанию полей геометрических допусков для проведения полноценного 3D-анализа собираемости.

Целью статьи является разработка общего подхода к формализованному описанию пространственных допустимых отклонений сборочных единиц с использованием математического аппарата бикватернионов.

Методы исследования

Бикватернионы будем использовать для описания пространственного положения геометрического элемента.

Бикватернионы были введены У. Клиффордом [9] как обобщение кватернионов Гамильтона. Идеи Клиффорда развил А.П. Котельников в своей работе по винтовому исчислению [7].

Приведем кратко теоретические сведения о бикватернионах, которые будем использовать в дальнейших рассуждениях.

Бикватернион – это кватернион, элементами которого являются дуальные числа [8]:

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} q_0 + \varepsilon \cdot q_0^0 \\ q_1 + \varepsilon \cdot q_1^0 \\ q_2 + \varepsilon \cdot q_2^0 \\ q_3 + \varepsilon \cdot q_3^0 \end{pmatrix},$$

где ε – единица Клиффорда и $\varepsilon^2 = 0$.

Бикватернион можно еще записать в виде:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{q} + \varepsilon \cdot \mathbf{q}^0.$$

$$\text{Здесь } \mathbf{q} = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \text{ – главный кватернион; } \mathbf{q}^0 = \begin{bmatrix} q_0^0 \\ q_1^0 \\ q_2^0 \\ q_3^0 \end{bmatrix} \text{ – моментный кватернион.}$$

Бикватернион состоит из дуальной и винтовой частей. Дуальной частью бикватерниона является дуальное число

$$\text{dual}\mathbf{Q} = q_0 + \varepsilon \cdot q_0^0,$$

а винтовой частью является трехмерный дуальный вектор (винт):

$$\text{screw}\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} q_1 + \varepsilon \cdot q_1^0 \\ q_2 + \varepsilon \cdot q_2^0 \\ q_3 + \varepsilon \cdot q_3^0 \end{bmatrix}.$$



Бикватернион, у которого дуальная часть равна нулю, называется чисто винтовым [8].
Бикватернион, у которого винтовая часть равна нулю, называется чисто дуальным [8].
Модулем бикватерниона $\mathbf{Q}$ является дуальное число вида:

$$|\mathbf{Q}| = |\mathbf{q}| \cdot (1 + \varepsilon \cdot [\mathbf{Q}]).$$

Здесь $|\mathbf{q}| = \sqrt{q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2}$ – модуль главного кватерниона $\mathbf{q}$;
 $[\mathbf{Q}] = \frac{q_0 \cdot q_0^0 + q_1 \cdot q_1^0 + q_2 \cdot q_2^0 + q_3 \cdot q_3^0}{|\mathbf{q}|}$ – параметр бикватерниона $\mathbf{Q}$.

Перечислим основные операции над бикватернионами.

$$1. \text{ Бикватернионное сопряжение: } \bar{\mathbf{Q}} = \begin{bmatrix} q_0 + \varepsilon \cdot q_0^0 \\ -(q_1 + \varepsilon \cdot q_1^0) \\ -(q_2 + \varepsilon \cdot q_2^0) \\ -(q_3 + \varepsilon \cdot q_3^0) \end{bmatrix}.$$

2. Сложение и вычитание бикватернионов выполняется почленно:

$$\mathbf{P} \pm \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} (p_0 \pm q_0) + \varepsilon \cdot (p_0^0 \pm q_0^0) \\ (p_1 \pm q_1) + \varepsilon \cdot (p_1^0 \pm q_1^0) \\ (p_2 \pm q_2) + \varepsilon \cdot (p_2^0 \pm q_2^0) \\ (p_3 \pm q_3) + \varepsilon \cdot (p_3^0 \pm q_3^0) \end{bmatrix}.$$

3. Умножение бикватерниона на бикватернион обозначается знаком $\otimes$ и выполняется по формуле:

$$\mathbf{R} = \mathbf{P} \otimes \mathbf{Q} = \mathbf{p} \otimes \mathbf{q} + \varepsilon \cdot (\mathbf{p} \otimes \mathbf{q}^0 + \mathbf{p}^0 \otimes \mathbf{q}),$$

где $\mathbf{Q} = \mathbf{q} + \varepsilon \cdot \mathbf{q}^0$, $\mathbf{P} = \mathbf{p} + \varepsilon \cdot \mathbf{p}^0$.

Бикватернионное умножение некоммукативно.

4. Вынесение за скобки главного кватерниона.

Если главный кватернион $\mathbf{q}$ не является нулевым, то бикватернион $\mathbf{Q} = \mathbf{q} + \varepsilon \cdot \mathbf{q}^0$ может быть представлен в виде:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{q} \otimes (\mathbf{I} + \varepsilon \cdot \mathbf{q}^{-1} \otimes \mathbf{q}^0) = (\mathbf{I} + \varepsilon \cdot \mathbf{q}^0 \otimes \mathbf{q}^{-1}) \otimes \mathbf{q},$$

$$\text{где } \mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 + \varepsilon \cdot 0 \\ 0 + \varepsilon \cdot 0 \\ 0 + \varepsilon \cdot 0 \\ 0 + \varepsilon \cdot 0 \end{bmatrix} \text{ – тождественный бикватернион.}$$



5. Бикватернион Q^{-1} , обратный к бикватерниону Q , определяется следующим образом:

$$Q^{-1} = \frac{\bar{Q}}{\|Q\|},$$

где $\|Q\| = q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 + \varepsilon \cdot 2 \cdot (q_0 \cdot q_0^0 + q_1 \cdot q_1^0 + q_2 \cdot q_2^0 + q_3 \cdot q_3^0)$ – норма бикватерниона Q .

Бикватернион Q^{-1} не определен, если $\|Q\| = 0$. Если $\|Q\| \neq 0$, то $Q \otimes Q^{-1} = Q^{-1} \otimes Q = I$.

Предположим, что текущее положение геометрического элемента получено из исходного положения путем конечного перемещения, и геометрический элемент представлен в подвижной системе координат Y в бикватернионном виде, то есть ${}_Y p = [0, {}_Y p_1, {}_Y p_2, {}_Y p_3]^T$, тогда его компоненты в неподвижной системе координат X будут найдены по формуле:

$${}_X p = \Lambda \otimes {}_Y p \otimes \Lambda^{-1}, \quad (1)$$

где ${}_X p ({}_Y p)$ – бикватернион p в системе координат X (Y) соответственно; ${}_X p_i$ ($i = \overline{0,3}$) – компоненты бикватерниона в неподвижной системе координат; Λ – собственный бикватернион конечного перемещения геометрического элемента.

Справедлива и обратная формула:

$${}_Y p = \Lambda^{-1} \otimes {}_X p \otimes \Lambda.$$

Собственный нормированный бикватернион Λ имеет следующий вид [8]:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \cos \frac{\Phi}{2} \\ E_1 \cdot \sin \frac{\Phi}{2} \\ E_2 \cdot \sin \frac{\Phi}{2} \\ E_3 \cdot \sin \frac{\Phi}{2} \end{bmatrix},$$

где E_i ($i = 1, 2, 3$) – компоненты чисто векторного бикватерниона оси $E = e + \varepsilon \cdot e^0$ конечного перемещения геометрического элемента; e – единичный векторный кватернион, определяющий направление оси перемещения, e^0 – моментный векторный кватернион оси относительно начала координат; $\Phi = \varphi + \varepsilon \cdot \varphi^0$ – дуальный угол поворота геометрического элемента, причем φ – обычный угол поворота геометрического элемента вокруг оси E , φ^0 – поступательное перемещение геометрического элемента вдоль этой оси.

Для бикватерниона Λ справедливы равенства: $|\Lambda| = 1$ и $[\Lambda] = 0$.

Предположим, что ось $E = e + \varepsilon \cdot e^0$ задана дуальными углами, которые она образует с осями неподвижной системы координат:



$$\Gamma_i = \gamma_i + \varepsilon \cdot \gamma_i^0 \quad (i=1,2,3),$$

где γ_i – угол между осью E и i -ой осью координатной системы ($i=1, 2, 3$); γ_i^0 – расстояние между осью E и i -ой осью координатной системы. Тогда собственный бикватернион Λ записывается следующим образом:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \cos \frac{\varphi}{2} - \varepsilon \cdot \frac{\varphi^0}{2} \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \\ \cos \gamma_1 \cdot \sin \frac{\varphi}{2} + \varepsilon \cdot \left(\frac{\varphi^0}{2} \cdot \cos \frac{\varphi}{2} \cdot \cos \gamma_1 - \gamma_1^0 \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \cdot \sin \gamma_1 \right) \\ \cos \gamma_2 \cdot \sin \frac{\varphi}{2} + \varepsilon \cdot \left(\frac{\varphi^0}{2} \cdot \cos \frac{\varphi}{2} \cdot \cos \gamma_2 - \gamma_2^0 \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \cdot \sin \gamma_2 \right) \\ \cos \gamma_3 \cdot \sin \frac{\varphi}{2} + \varepsilon \cdot \left(\frac{\varphi^0}{2} \cdot \cos \frac{\varphi}{2} \cdot \cos \gamma_3 - \gamma_3^0 \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \cdot \sin \gamma_3 \right) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Пространственные отклонения геометрического элемента, нормируемого допуском расположения, будем характеризовать с помощью собственного нормированного кватерниона (2). При этом, если на геометрический элемент назначен допуск ориентации, то $\varphi^0 = 0$, $\gamma_i^0 = 0$ ($i=\overline{1,3}$) и из формулы (2) получаем собственный нормированный кватернион λ поворота геометрического элемента в виде:

$$\lambda = \begin{bmatrix} \cos \frac{\varphi}{2} \\ \cos \gamma_1 \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \\ \cos \gamma_2 \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \\ \cos \gamma_3 \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

где φ – угол поворота рассматриваемого элемента вокруг оси $\bar{e} = (\cos \gamma_1, \cos \gamma_2, \cos \gamma_3)$.

Конфигурационные многообразия пространственных допустимых отклонений расположения и их классификация

Конфигурационным многообразием допуска расположения, установленного на геометрический элемент сборочной единицы, назовем геометрическое место точек на плоскости или в пространстве, характеризующих его допустимые конфигурации (допустимые положения).

Под допустимым положением (допустимой конфигурацией) геометрического элемента будем понимать такое положение, когда ни одна его точка в пределах нормируемого участка не нарушает поле допуска.

Допустимые конфигурации геометрического элемента зависят от нормируемой геометрической характеристики элемента.

Так, например, если на геометрический элемент (линию, поверхность) назначен допуск параллельности, то его допустимые конфигурации обусловлены поворотами.



Каждому допустимому положению рассматриваемого элемента будет однозначно соответствовать определенная точка на конфигурационном многообразии, которую будем называть K -точкой.

Геометрия конфигурационного многообразия допуска расположения рассматриваемого элемента будет определяться совокупностью K -точек. Границу конфигурационного многообразия образуют K -точки, соответствующие наибольшим допустимым пространственным отклонениям элемента от теоретически точного расположения.

В качестве примера сборочной единицы возьмем блок размера $a \times b \times h$, и для определенности будем считать, что $a > b$ (рис. 1).

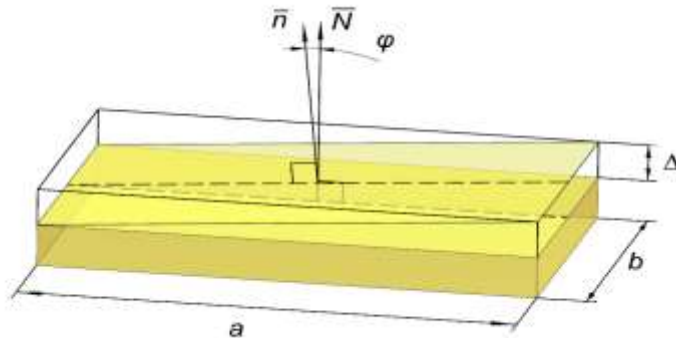


Рис. 1. Отклоненное положение верхней поверхности блока
Fig. 1. Deflected position of the upper surface of the block

Рассмотрим построение конфигурационного многообразия допуска параллельности верхней плоской поверхности блока относительно базовой плоскости (нижней поверхности блока). Из ГОСТ Р 53442-2015 известно, что нормируемая верхняя плоская поверхность блока должна быть расположена между двумя параллельными плоскостями, которые расположены друг от друга на расстоянии, равном значению допуска Δ и параллельными базовой плоскости (рис. 2).

Отклоненное положение верхней плоскости блока относительно базовой плоскости будем описывать по отклоненному положению нормали к верхней поверхности блока относительно нормали к базовой плоскости (рис. 1).

Неподвижную систему координат X поместим в центре поля допуска параллельности.

Единичный вектор $\bar{i}_3$ оси Ox_3 направим по нормали $\bar{n}$ к базовой плоскости блока, единичные векторы $\bar{i}_1$ и $\bar{i}_2$ осей Ox_1 и Ox_2 соответственно расположим вдоль ширины и длины нормируемого участка так, чтобы получилась правая тройка. Координатный орт $\bar{i}_3$ системы координат Y направим по нормали к верхней поверхности блока в номинальном положении, и будем считать, что в номинальном положении верхней поверхности блока ориентации координатных систем X и Y совпадают.

Обозначим: φ – угол поворота верхней поверхности блока, то есть угол между вектором нормали $\bar{n}$ к верхней плоской поверхности блока в номинальном положении и вектором нормали $\bar{N}$ к этой поверхности в отклоненном (фактическом) положении. В теоретически точном положении верхней плоскости блока этот угол равен нулю. Ось поворота располагается в координатной плоскости Ox_1x_2 , поэтому $\gamma_3 = \frac{\pi}{2}$. Единичный вектор, характеризующий направление оси поворота верхней плоскости блока, определится следующим образом:



$$\bar{e} = \frac{\bar{N} \times \bar{N}'}{|\bar{N} \times \bar{N}'|}.$$

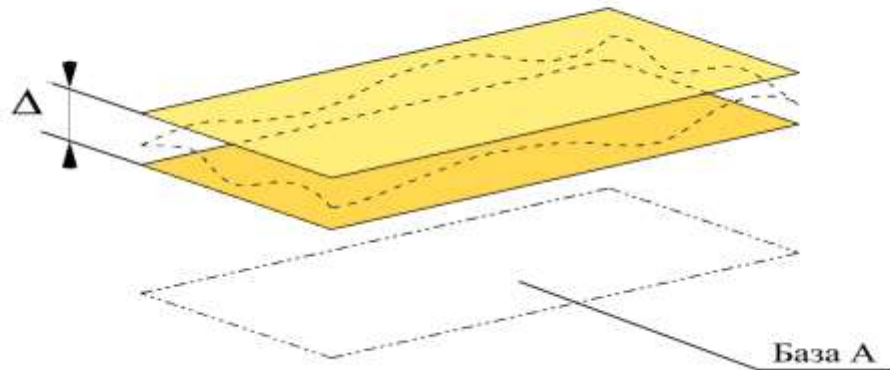


Рис. 2. Поле допуска параллельности поверхности относительно базовой плоскости
Fig. 2. Tolerance field of the surface parallelism relative to the reference plane

Здесь знаком « $\times$ » обозначено векторное умножение векторов.

Из выражения (3) получаем собственный нормированный кватернион поворота верхней плоской поверхности блока в виде:

$$\lambda = \begin{bmatrix} \cos \frac{\varphi}{2} \\ \cos \gamma_1 \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \\ \cos \gamma_2 \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Таким образом, для описания пространственных допустимых конфигураций верхней плоскости в поле допуска параллельности относительно базовой плоскости необходимо задать ось поворота $\bar{e} = (\cos \gamma_1, \cos \gamma_2, 0)$ и угол поворота φ . При этом справедливо равенство $\cos^2 \gamma_1 + \cos^2 \gamma_2 = 1$.

Поскольку нормируемый участок верхней плоскости блока представляет собой прямоугольник размера $a \times b$, то угол $\gamma_1 \in [0; \pi)$, а угол поворота φ зависит от угла γ_1 , и справедливы следующие соотношения:

$$\sin \varphi_{\gamma_1}^{\max} = \begin{cases} \frac{\Delta}{b}, & \text{если } \gamma_1 = 0, \\ \frac{\Delta}{a}, & \text{если } \gamma_1 = \frac{\pi}{2}, \\ \frac{\Delta}{\sqrt{a^2 + b^2}}, & \text{если } \gamma_1 = \arctg \frac{b}{a}; \pi - \arctg \frac{b}{a} \end{cases}.$$



Границу конфигурационного многообразия образуют K -точки $K(\varphi; \gamma_1)$, для которых $\varphi = \pm \varphi_{\gamma_1}^{\max}$ (знак определяется по правилу буравчика) при значениях угла $\gamma_1 \in [0; \pi)$, то есть $K^{\varepsilon p}(\pm \varphi_{\gamma_1}^{\max}; \gamma_1)$. Так как считаем, что $a > b$, то $\frac{\Delta}{a} < \frac{\Delta}{b}$ и $\varphi_{\gamma_1=0}^{\max} < \varphi_{\gamma_1=\frac{\pi}{2}}^{\max}$.

Каждой K -точке рассматриваемого конфигурационного многообразия поставим в соответствие кватернион $\Phi = (0, \varphi_1, \varphi_2, 0)^T$ истинного эйлера поворота верхней плоскости, который записывается следующим образом:

$$\Phi = (0, \varphi_{\gamma_1} \cdot \cos \gamma_1, \varphi_{\gamma_1} \cdot \sin \gamma_1, 0)^T.$$

Модуль кватерниона Φ равен углу поворота верхней плоскости блока, то есть $|\Phi| = \varphi_{\gamma_1}$ и, следовательно, зависит от угла, который составляет ось поворота верхней плоскости блока с положительным направлением координатной оси Ox_1 . В граничных K -точках угол поворота верхней плоскости блока принимает свое максимальное значение, поэтому $|\Phi_{\gamma_1}|^{\max} = \varphi_{\gamma_1}^{\max}$, а для всех K -точек конфигурационного пространства рассматриваемого допуска параллельности справедливо неравенство $a \cdot \left| \Phi_{\gamma_1=\frac{\pi}{2}} \right| + b \cdot \left| \Phi_{\gamma_1=0} \right| \leq \Delta$.

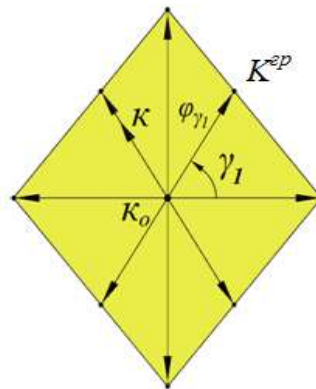


Рис. 3. Конфигурационное многообразие допуска параллельности плоскости относительно базовой плоскости

Fig. 3. Configuration manifold of the plane parallelism tolerance relative to the reference plane

Таким образом, конфигурационное многообразие допуска параллельности верхней плоской поверхности блока относительно базовой плоскости является двумерным, и представляет собой ромб (рис. 3). Точка K_0 представляет номинальное положение верхней поверхности блока, то есть параллельность базовой плоскости.

Рассмотрим далее построение конфигурационного многообразия позиционного допуска линии на примере оси отверстия в плите (рис. 4).

Пусть Δ – позиционный допуск оси отверстия. Согласно стандарту ГОСТ Р 53442-2015 ось нормируемого отверстия должна располагаться в пределах цилиндра (рис. 5), ось которого совпадает с теоретически точным положением оси отверстия относительно базовых плоскостей A, B, C , а диаметр равен значению допуска, то есть Δ . Теоретически точное положение оси цилиндра относительно баз определяют теоретически точные размеры d_1, d_2 и d_3 .



Единичный вектор $\bar{i}_3$ оси Ox_3 неподвижной системы координат направим вдоль оси отверстия в номинальном положении, единичные векторы $\bar{i}_1$ и $\bar{i}_2$ осей Ox_1 и Ox_2 соответственно расположим так, чтобы получилась правая тройка. Координатный орт $\bar{i}_3$ подвижной системы координат Y направим вдоль реальной оси отверстия, и будем считать, что в номинальном положении оси нормируемого отверстия, координатные системы X и Y совпадают.

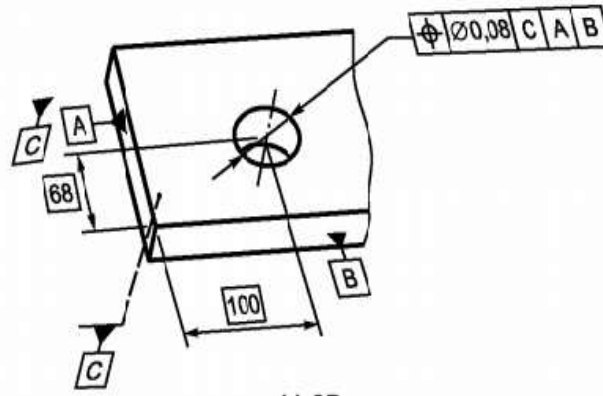


Рис. 4. Ось отверстия, нормируемая позиционным допуском
Fig. 4. Hole axis normalized by the positional tolerance

Бикватернион T , характеризующий пространственные отклонения оси отверстия относительно номинального положения, имеет вид:

$$T = \begin{bmatrix} 1 \\ \varepsilon \cdot \frac{\varphi^0}{2} \cdot \cos \gamma_1 \\ \varepsilon \cdot \frac{\varphi^0}{2} \cdot \cos \gamma_2 \\ \varepsilon \cdot \frac{\varphi^0}{2} \cdot \cos \gamma_3 \end{bmatrix} = 1 + \varepsilon \cdot \frac{t}{2}.$$

Здесь $\varphi^0 = |t|$ – модуль чисто векторного кватерниона $t = [0, t_1, t_2, t_3]^T$, $t_i = \varphi^0 \cdot \cos \gamma_i$ ($i = \overline{1, 3}$) – компоненты кватерниона.

Поскольку для направляющих косинусов оси $\bar{e} = (\cos \gamma_1; \cos \gamma_2; 0)$ справедливо равенство $\cos^2 \gamma_1 + \cos^2 \gamma_2 = 1$, то конфигурационное многообразие позиционного допуска оси отверстия двумерное, его образуют K -точки $K(\varphi^0; \gamma_1)$, для которых $\varphi^0 \in [-\varphi_{\max}^0; \varphi_{\max}^0]$, $\gamma_1 \in [0; \pi)$.

Так как при всех значениях угла $\gamma_1 \in [0; \pi)$ максимальная величина поступательного смещения оси отверстия, нормируемой позиционным допуском, равна $\varphi_{\max}^0 = \frac{\Delta}{2}$, то, следовательно, границу конфигурационного многообразия позиционного допуска оси отверстия образуют K -точки $K^{zp} = K(\pm \varphi_{\max}^0; \gamma_1)$.

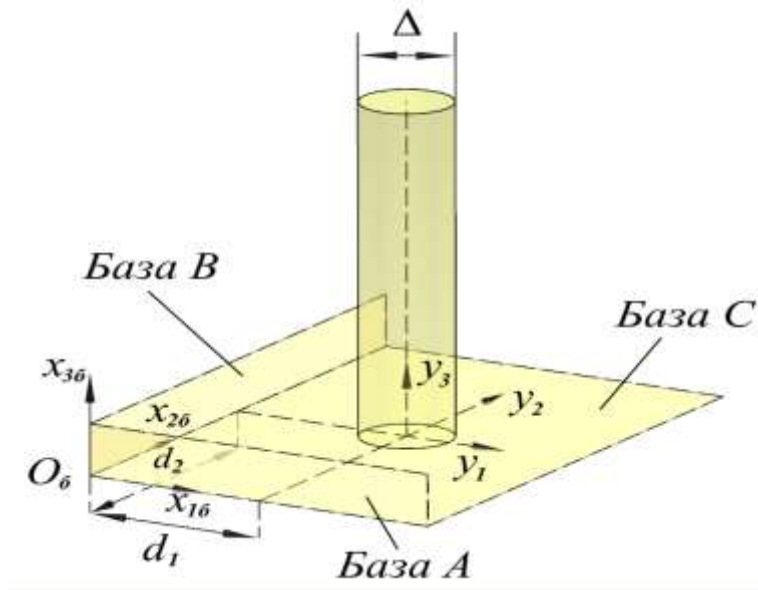


Рис. 5. Цилиндрическое поле позиционного допуска оси отверстия
Fig. 5. Cylindrical field of the hole axis positional tolerance

Чисто векторный кватернион $\mathbf{t} = [0; \varphi^0 \cdot \cos \gamma_1; \varphi^0 \cdot \cos \gamma_2; 0]^T$ поступательного перемещения рассматриваемой оси соответствует K -точке $K = K(\varphi^0; \gamma_1)$ и $|\mathbf{t}|^{\max} = \varphi_{\max}^0$. Для всех K -точек справедливо неравенство: $|\varphi^0| \leq \varphi_{\max}^0$ при $\gamma_1 \in [0; \pi)$.

Таким образом, конфигурационное многообразие позиционного допуска оси отверстия представляет собой круг радиуса $\varphi_{\max}^0$, показанный на рис. 6.

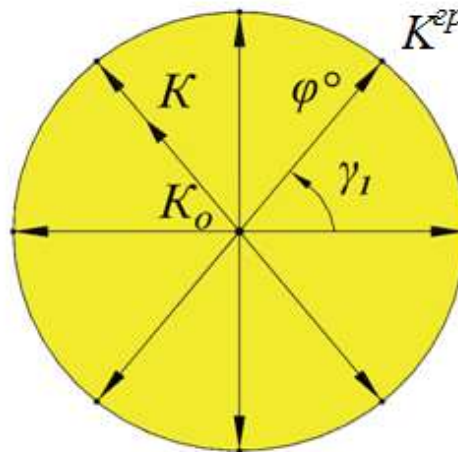


Рис. 6. Конфигурационное многообразие позиционного допуска оси отверстия
Fig. 6. Configuration manifold of the hole axis positional tolerance

Рассмотрим построение конфигурационного многообразия допуска соосности для примера, показанного на рис. 7. Предположим, что нормируемый участок рассматриваемой оси имеет длину L .

Поле допуска ограничено цилиндром, диаметр которого равен числовому значению допуска, то есть Δ (рис. 8). Ось цилиндра совпадает с базовой осью A .

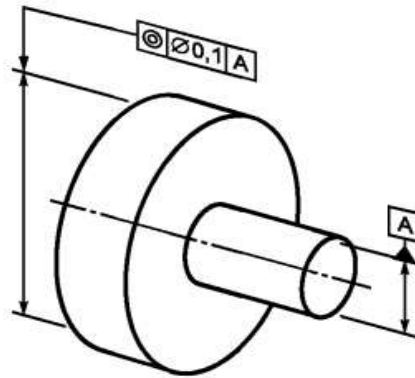


Рис. 7. Допуск соосности оси относительно базовой оси
Fig. 7. Axis coaxiality tolerance relative to the reference axis

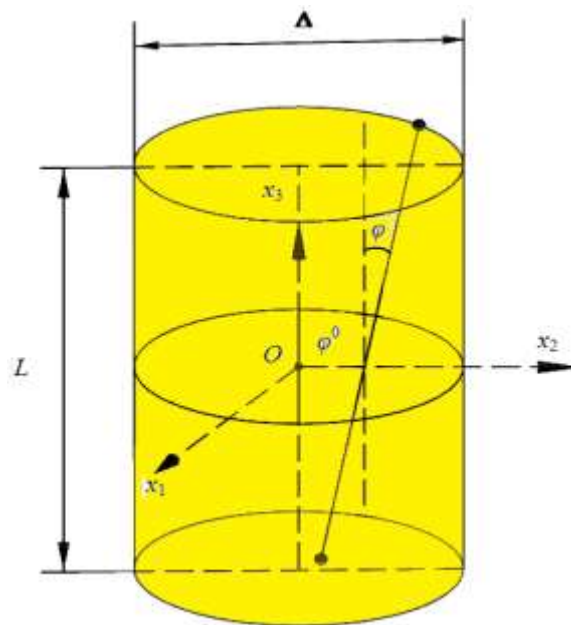


Рис. 8. Цилиндрическое поле допуска соосности оси
Fig. 8. Cylindrical field of axis coaxiality tolerance

Неподвижную систему координат X поместим середине базовой оси. Единичный вектор $\bar{i}_3$ оси Ox_3 направим вдоль оси, а единичные векторы $\bar{i}_1$ и $\bar{i}_2$ осей Ox_1 и Ox_2 соответственно расположим так, чтобы получилась правая тройка. Подвижная система координат Y жестко связана с нормируемым участком оси: единичный вектор $\bar{I}_3$ направлен вдоль нормируемой оси и векторы $\bar{I}_1$, $\bar{I}_2$, $\bar{I}_3$ образуют правую тройку, полюс находится в середине нормируемого участка оси. Считаем, что в номинальном положении рассматриваемой оси неподвижная и подвижная системы координат совпадают.

Ось, нормируемая допуском соосности, может совершать поступательное движение вдоль оси с единичным вектором $\bar{e} = \cos \gamma_1 \cdot \bar{i}_1 + \cos \gamma_2 \cdot \bar{i}_2$ на расстояние φ^0 , поворачиваться вокруг оси с единичным вектором $\bar{e}$ на угол φ и вокруг оси $\bar{s}$, перпендикулярной оси $\bar{e}$. Угол $\gamma_1 \in [0; 2\pi)$ и $\cos^2 \gamma_1 + \cos^2 \gamma_2 = 1$, а $\varphi^0 \in [0; \varphi_{\max}^0]$.

Тогда положение рассматриваемой оси характеризует бикватернион $\mathbf{M}$ вида:



$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\varphi}{2} \cdot \cos \frac{\theta}{2} - \varepsilon \cdot \frac{\varphi^0}{2} \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \\ \cos \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \cdot \cos \gamma_1 - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{\varphi}{2} \cdot \cos \gamma_2 + \varepsilon \cdot \frac{\varphi^0}{2} \cdot (\cos \frac{\varphi}{2} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cos \gamma_1 + \sin \frac{\varphi}{2} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \gamma_2) \\ \cos \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{\varphi}{2} \cdot \cos \gamma_2 + \sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{\varphi}{2} \cdot \cos \gamma_1 + \varepsilon \cdot \frac{\varphi^0}{2} \cdot (\cos \frac{\varphi}{2} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cos \gamma_2 - \sin \frac{\varphi}{2} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \gamma_1) \\ \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{\varphi}{2} - \varepsilon \cdot \frac{\varphi^0}{2} \cdot \cos \frac{\varphi}{2} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \end{bmatrix}.$$

Отсюда видим, что положение рассматриваемой оси характеризуется углами φ , θ , γ_1 , γ_2 и величиной ее линейного смещения φ^0 . Рассмотрим взаимосвязь этих параметров.

Для простоты рассуждений предположим, что $\gamma_1 = 0$, то есть рассматриваемая ось смещается вдоль координатной оси Ox_1 . Тогда угол φ – угол поворота рассматриваемой оси вокруг координатной оси Ox_1 , а угол θ – угол поворота рассматриваемой оси вокруг координатной оси Ox_2 .

На оси возьмем, например, точку $A\left(0, 0, \frac{L}{2}\right)$. Поскольку линейное смещение Δ_{x_2} точки

А при повороте вокруг координатной оси Ox_1 с одной стороны равно $\Delta_{x_2} = \sqrt{(\varphi_{\max}^0)^2 - (\varphi^0)^2}$, а с

другой стороны $\Delta_{x_2} = \frac{L}{2} \cdot \sin|\varphi|$, то, следовательно, получаем $\varphi = \pm \arcsin \frac{2\sqrt{(\varphi_{\max}^0)^2 - (\varphi^0)^2}}{L}$, то

есть $\varphi = f(\varphi^0)$. Отсюда видим, что при $\varphi^0 = 0$ угол φ принимает максимальное значение

$\varphi^{\max} = \arcsin \frac{2 \cdot \varphi_{\max}^0}{L}$ и минимальное значение $\varphi^{\min} = -\arcsin \frac{2 \cdot \varphi_{\max}^0}{L}$, а при $\varphi^0 = \varphi_{\max}^0$ этот угол равен нулю.

Пусть $\varphi > 0$. Поскольку $\varphi'_{\varphi^0} = \frac{-2\varphi^0}{\sqrt{((\varphi_{\max}^0)^2 - (\varphi^0)^2) \cdot (L^2 - 4(\varphi_{\max}^0)^2 + 4(\varphi^0)^2)}} < 0$, то функция

$\varphi = f(\varphi^0)$ убывает при всех значениях $\varphi^0 \in (0; \varphi_{\max}^0)$. Аналогично рассуждая можно показать,

что при угле поворота рассматриваемой оси $\varphi < 0$ функция $\varphi = f(\varphi^0)$ возрастает при всех

значениях $\varphi^0 \in (0; \varphi_{\max}^0)$. На рис. 9 приведен график зависимости $\varphi = \arcsin \frac{2\sqrt{(\varphi_{\max}^0)^2 - (\varphi^0)^2}}{L}$

для положительных значений угла φ поворота рассматриваемой оси при фиксированном значении $\gamma = \gamma_1 \in [0; 2\pi)$ и $\varphi_{\max}^0 = 0,5 \text{ мкм}$.

Угол поворота θ при $\varphi^0 = \varphi_{\max}^0$ угол θ равен нулю (также как и угол поворота φ), а при $\varphi^0 = 0$ этот угол принимает свое максимальное значение, равное максимальному значению угла φ , то есть $\theta^{\max} = \varphi^{\max}$. Приведенные рассуждения справедливы для любых значений $\gamma_1 \in [0; 2\pi)$.

Отметим также, что для нормируемого участка оси длиной L максимальное значение угла поворота равно $\varphi^{\max} = \arcsin \frac{\Delta}{L}$, а $\varphi_{\max}^0 = \frac{\Delta}{2}$.

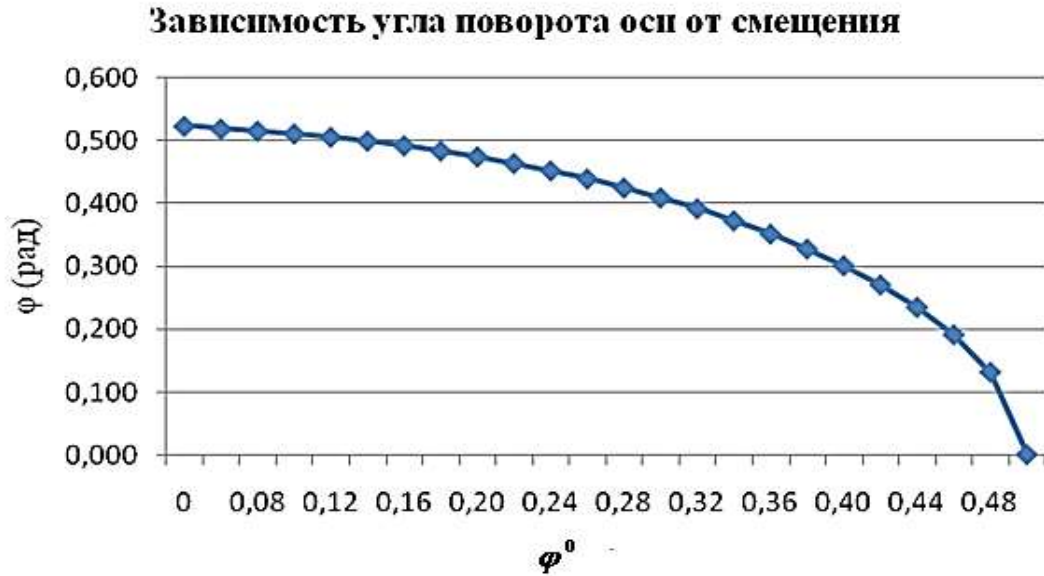


Рис. 9. График зависимости $\varphi = f(\varphi^0)$ при $\varphi_{\max}^0 = 0,5 \text{ мм}$ и $\varphi > 0$

Fig. 9. Dependency graph of $\varphi = f(\varphi^0)$ at $\varphi_{\max}^0 = 0,5 \text{ мм}$ and $\varphi > 0$

Конфигурационное многообразие оси, нормируемой допуском соосности, представляет собой эллипсоид (рис. 10) с полуосями $\varphi^{\max}$ и $\varphi_{\max}^0$.

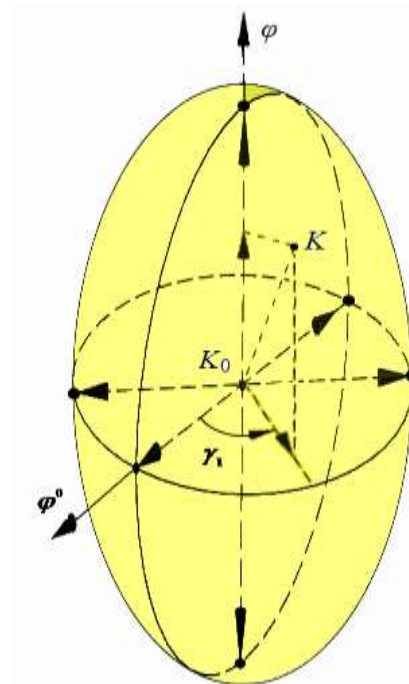


Рис. 10. Конфигурационное многообразие допуска соосности

Fig. 10. Configuration manifold of coaxiality tolerance

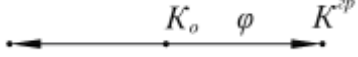
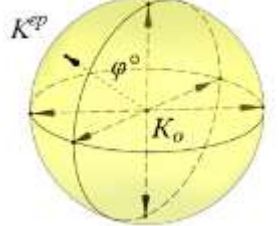
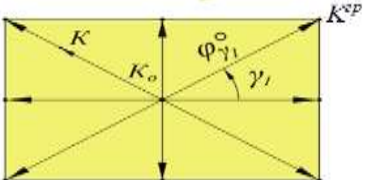
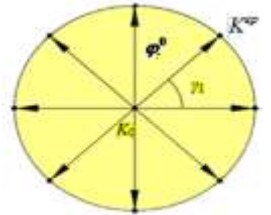
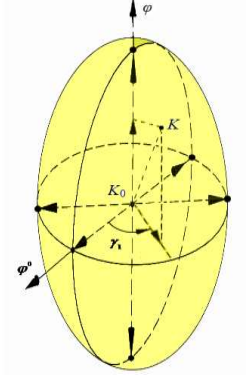
В таблице представлена классификация конфигурационных многообразий пространственных допустимых отклонений расположения.



Конфигурационные многообразия 3D-допусков расположения
Configuration manifolds of 3D location tolerances

Группы	Виды	Геометрическая интерпретация
Конфигурационные многообразия допусков ориентации	– конфигурационное многообразие допуска перпендикулярности линии относительно комплекта баз (база A – плоскость; база B – плоскость); – конфигурационное многообразие допуска параллельности линии относительно базовой плоскости; – конфигурационное многообразие допуска перпендикулярности линии относительно базовой линии; – конфигурационное многообразие допуска наклона линии относительно базовой линии	
	– конфигурационное многообразие допуска параллельности линии относительно базовой линии; – конфигурационное многообразие допуска перпендикулярности линии относительно базовой поверхности; – конфигурационное многообразие допуска наклона линии относительно базовой поверхности	
	– конфигурационное многообразие допуска параллельности поверхности относительно базовой поверхности; – конфигурационное многообразие допуска параллельности поверхности относительно базовой линии; – конфигурационное многообразие допуска перпендикулярности поверхности относительно базовой поверхности; – конфигурационное многообразие допуска перпендикулярности поверхности относительно базовой линии; – конфигурационное многообразие допуска наклона по-	



Конфигурационные многообразия допусков месторасположения	верхности относительно базовой плоскости. конфигурационное многообразие допуска параллельности поверхности относительно комплекта баз (база A – плоскость; база B – плоскость; рассматриваемый элемент поверхности – линия)	
	конфигурационное многообразие позиционного допуска точки	
	конфигурационное многообразие позиционного допуска линии	
	– конфигурационное многообразие позиционного допуска плоскости; – конфигурационное многообразие позиционного допуска линии (линия расположена на плоскости)	
	– конфигурационное многообразие допуска соосности оси относительно базовой оси; – конфигурационное многообразие допуска концентричности точки	



Заключение

Таким образом, использование бикватернионов дает общий подход для формализованного описания пространственных допустимых отклонений геометрических элементов сборочных единиц и позволяет комплексно описывать эти отклонения. Построенные конфигурационные многообразия допусков расположения позволяют учитывать взаимосвязи между параметрами, характеризующими пространственные допустимые отклонения рассматриваемых элементов, и включать геометрические допуски в пространственный размерный анализ.

Библиографический список

1. Журавлев Д.А., Грушко П.Я., Яценко О.В. О новых дифференциально-геометрических подходах к автоматизированному проектированию сборок с учетом допусков // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2002. № 12. С. 82–92.
2. Журавлев Д.А., Гаер М.А. Пространственная геометрическая характеристика допусков // Вестник ИрГТУ. 2005. № 1. С. 116–125.
3. Журавлев Д.А., Гаер М.А. Допуски, связанные с изгибанием поверхности // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2006. № 4 (28). С. 12–15.
4. Гаер М.А., Журавлев Д.А., Яценко О.В. Конфигурационные пространства поверхностей деталей и сборок // Вестник ИрГТУ. 2011. № 10 (57). С. 32–36.
5. Гаер М.А. Технология конфигурационного прямого моделирования // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2012. № 11 (70). С. 44–47.
6. Гаер М.А., Шабалин А.В., Валов А.А. Дифференциально-геометрический подход к описанию допусков искажения метрики // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 9 (104). С. 34–39.
7. Котельников А. П. Винтовое счисление и некоторые приложения его к геометрии и механике. М.: КомКнига, 2006. 224 с.
8. Челноков Ю. Н. Кватернионные и бикватернионные модели и методы механики твердого тела и их приложения. Геометрия и кинематика движения. М.: Физматлит, 2006. 512 с.
9. Clifford W. Preliminary Scetch of Biquaternions // Proc. of London Math. Soc. 1873. Vol. IV. pp. 381–393.
10. Davidson J.K., Shah J.J., Mujezinovic A. A new mathematical model for geometric tolerances as applied to round faces. Baltimore: Maryland, 2000.
11. Davidson J.K., Shah J.J. Mathematical model to formalize tolerance specifications and enable full 3D tolerance analysis. In Service and Manufacturing Grantees and Research conference. Dallas: Texas, 2004.
12. Ghie W., Laperriere L., Desrochers A. Re-design of mechanical assemblies using the Jacobian-Torsor model // Models for Computer aided tolerance in design and manufacturing. London: Springer, 2006. P. 95–104.
13. Pasupathy T.M.K., Morse E.P., Wilhelm R.G. A Survey of Mathematical Methods for the Construction of Geometric Tolerance Zones // Journal of Computing and Information Science and Engineering. 2003. № 3(1). P. 64–75.
14. Polini W. Geometric Tolerance Analysis. Geometric Tolerances. Impact on Product Design. Quality Inspection and Statistical Process Monitoring. 2011. XVIII. P. 39–68.
15. Roy U., Li B. Representation and interpretation of geometric tolerances for polyhedral objects. II Size. Orientation and Positional tolerances // Computer Aided Design. 1999. № 31(4). P. 273–285.
16. Turner J.U., Wozny M.J. The M-space theory of tolerances in geometric modeling for CAD Applications / Eds. Wozny M.J., McLaughlin J.L. Elsevier Science Publishers. IFIP. 1988. P.163–187.

References

1. Zhuravlev D.A., Grushko P.Ya., Yatsenko O.V. On new differential geometric approaches to computer-aided design of assemblies with allowance for tolerances. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2002, no.12, pp. 82-92 (In Russian).
2. Zhuravlev D.A., Gaer M.A. Spatial geometrical tolerance characteristic. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2005, no. 1, pp. 116-125 (In Russian).
3. Zhuravlev D.A., Gaer M.A. Tolerances associated with surface bending. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2006, no. 4(28), pp. 12-15 (In Russian).
4. Gaer M.A., Zhuravlev D.A., Jacenko O.V. Configuration spaces of parts and assembly surfaces. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2011, no. 10(57), pp. 32-36 (In Russian).
5. Gaer M.A. Technology of configurational direct modeling. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2012, no.11(70), pp. 44-47 (In Russ.)
6. Gaer MA, Shabalin A.V., Valov A.A. Differential geometric approach to metric distortion tolerance description. *Vestnik*



- Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2015, no. 9 (104), pp. 34–39. (In Russ.)
7. Kotelnikov A.P. *Vintovoye schisleniye i nekotoryye prilozheniya yego k geometrii i mekhanike* [Screw counting and some of its applications to geometry and mechanics]. Moscow: KomKniga Publ, 2006, 224 p. (In Russ.).
8. Chelnokov Yu.N. *Kvaternionnyye i bikvaternionnyye modeli i metody mekhaniki tverdogo tela i ikh prilozheniya. Geometriya i kinematika dvizheniya* [Quaternion and bi-quaternion models and methods of solid mechanics and their applications. Geometry and kinematics of motion]. Moscow: Fizmatlit. Publ., 2006. 512 p. (In Russ.).
9. Clifford W. Preliminary Scetch of Biquaternions. Proc. of London Math. Soc. 1873, Vol. IV, pp. 381–393.
10. Davidson J.K., Shah J.J., Mujezinovic A. A new mathematical model for geometric tolerances as applied to round faces. Baltimore. Maryland Publ., 2000.
11. Davidson J.K., Shah J.J. Mathematical model to formalize tolerance specifications and enable full 3D tolerance analysis. In Service and Manufacturing Grantees and Research conference. Dallas: Texas Publ., 2004.
12. Ghie W., Laperriere L., Desrochers A. Re-design of mechanical assemblies using the Jacobian-Torsor model. Models for Computer aided tolerance in design and manufacturing. London: Springer Publ., 2006. P. 95–104.
13. Pasupathy T.M.K., Morse E.P., Wilhelm R.G. A Survey of Mathematical Methods for the Construction of Geometric Tolerance Zones. Journal of Computing and Information Science and Engineering, no. 3(1), (2003), pp. 64-75.
14. Polini W. Geometric Tolerance Analysis. Geometric Tolerances. Impact on Product Design. Quality Inspection and Statistical Process Monitoring. (2011), XVIII, pp. 39-68.
15. Roy U., Li B. Representation and interpretation of geometric tolerances for polyhedral objects. II Size. Orientation and Positional tolerances. Computer Aided Design, no. 31(4), (1999), pp. 273-285.
16. Turner J.U., Wozny M.J. The M-space theory of tolerances in geometric modeling for CAD Applications, eds. Wozny M.J., McLaughlin J.L., Elsevier Science Publishers, IFIP, 1988, pp. 163-187.

Критерии авторства

Хвощевская Л.Ф., Журавлёв Д.А. имеют равные авторские права и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Criteria for authorship

Khvashchevskaya L.F., Zhuravlev D.A. 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 004.942:001.57

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-11-89-96>

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ЦАПФ МЕЛЬНИЦ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРИСТАВНОГО СТАНКА

© О.В. Бестужева¹

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
308015, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Победы, 85.

РЕЗЮМЕ: При производстве строительных материалов применяют шаровые мельницы. В процессе эксплуатации оборудование приходит в негодность, основные узлы мельниц – цапфы – изнашиваются, теряя цилиндричность рабочей поверхности. Для восстановления цапф применяют приставной станок с ротационным резцом, позволяющий производить обработку на месте эксплуатации. Разработана математическая модель, представляющая собой совокупность технических ограничений. Описаны входные параметры и целевая функция. Найдены оптимальные значения режимов резания на основе метода линейного программирования. Найдены рациональные значения режимов резания при обработке цапфы в период ее ремонта для оптимизации процесса восстановления. Используется метод линейного программирования. Получена область оптимальных значений технологических параметров ротационной обработки цилиндрических поверхностей цапфы с применением приставного станка при восстановлении мельницы.

Ключевые слова: математическое моделирование, оптимизация режимов резания, метод линейного программирования, ротационная обработка, восстановление цапфы, ремонт мельницы

Информация о статье: Дата поступления 17 октября 2018 г.; дата принятия к печати 30 октября 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 ноября 2018 г.

Для цитирования: Бестужева О.В. Математическая модель оптимизации режимов резания при восстановлении цапф мельниц с применением приставного станка. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(11):89–96. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-89-96.

MATHEMATICAL MODEL FOR CUTTING MODE OPTIMIZATION WHEN RESTORING MILL PIVOT PINS WITH ADD-ON MACHINE-TOOL APPLICATION

Olga .V. Bestuzheva

Belgorod National Research University,
85 Pobeda St., Belgorod 308015, Russian Federation

ABSTRACT: Ball mills are used in the production of building materials. In the process of operation the equipment degrades, pivot pins as the main components of mills wear out losing the cylindrical shape of their working surface. To restore pivot pins an add-on machine-tool with a rotary cutter is used. It allows to perform on-site machining. A mathematical model including a set of technical limitations is developed. The input parameters and the target function are described. Using a linear programming method, the optimal values of the cutting modes are found. The rational values of the cutting modes when pivot pin machining in the period of its repair are found to optimize the restoration process. The method of linear programming is used. The area of optimal region of technological parameters of pivot pin cylindrical surface rotary machining with the use of the add-on machine-tool in mill restoration is obtained.

Keywords: mathematical modeling, optimization of cutting conditions, the method of linear programming, rotary machining, rebuilding axles, repair of the mill

¹Бестужева Ольга Васильевна, старший преподаватель кафедры прикладной информатики и информационных технологий, e-mail: bestuzheva@bsu.edu.ru
Bestuzheva Olga Vasilievna, Senior Lecturer of the Department of Applied Informatics and Information Technologies, e-mail: bestuzheva.o@yandex.ru



Information about the article: Received 17 October, 2018; accepted for publication 30 October, 2018; available online 30 November, 2018.

For citation: Bestuzheva O.V. Mathematical model for cutting mode optimization when restoring mill pivot pins with add-on machine-tool application. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(11):pp. 89–96. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-89-96.

Введение

Производство строительных материалов предполагает применение различного крупногабаритного оборудования, главным фактором повышения эффективности которого является надежность [1, 2]. Качество монтажных работ, своевременный ремонт и техническое обслуживание оказывает существенное влияние на повышение надежности оборудования при эксплуатации [3].

Для тонкого помола сырья в индустрии стройматериалов используют шаровые мельницы. Основным элементом такого оборудования является барабан, установленный на подшипниках и приводимый во вращение через редуктор. Загрузка и выгрузка материала производится через полые цапфы, также выполняющую роль несущих узлов. При исследовании наружной поверхности цапфы определена их неуравновешенность и несоосность [4]. В следствие постоянных динамических нагрузок появляется повышенный износ поверхности скольжения, теряется цилиндрическая форма цапфы, приобретая форму, близкую к усеченному конусу.

Разработан способ восстановления цапфы на месте эксплуатации, снижающий временные затраты на капитальный ремонт мельницы [5, 6]. Данный способ обработки поверхности вращения цапфы подразумевает применение приставного станка [7] с механической обработкой ротационным резцом [8]. При обработке цилиндрических поверхностей цапфы приставным станком расчет сил резания, действующих на ротационный резец, отличается от обработки традиционным резцом ввиду существенных кинематических параметров инструментов и их установки относительно обрабатываемой поверхности [9]. При ротационной обработке цапфы составляющие силы резания P_x , P_y , P_z имеют отличные значения – величины углов режущей кромки ротационного резца характеризуют зависимость от режимов резания, при этом нагрузка при работе ротационного резца влияет на расчет прочности и жесткости ротационного резца [10].

Определение оптимальных значений режима резания при восстановлении цапфы

Оптимальные режимы резания определяются на основе метода линейного программирования [11, 12], заключающегося в описании целевой функции и входных параметров линейными уравнениями и нахождении экстремума. Для упрощения целевой функции при оптимизации режимов резания построена математическая модель, которая включает в себя совокупность технических ограничений линейного вида. В данном случае, решение задачи оптимальности при ротационной обработке представляется графическим способом [13].

Достоверность математической модели процесса ротационного резания обуславливается выбранными технологическими ограничениями, которыми определяют описываемый процесс обработки. Учитывая особенность ротационной обработки на приставном станке, ограничения введены не только технологические, но и геометрические параметры технологической системы.

Технология восстановления цапфы мельницы с применением приставного станка характеризуется наибольшей зависимостью возникающих сил резания, глубины резания, частоты вращения, шероховатости [14]. Таким образом, для моделирования процесса обработки



введены следующие ограничения:

- составляющая силы резания P_x , характеризующая смещением оси восстанавливаемой цапфы на базирующую поверхность роlikоопор;
- составляющая силы резания P_y , характеризующая силой отжима ротационного резца от обрабатываемой поверхности цапфы;
- составляющая силы резания P_z , характеризующая обеспечением мощности привода приставного станка;
- величина шероховатости цилиндрической поверхности восстанавливаемой цапфы;
- максимальная и минимальная величина частоты вращения цапфы, характеризующая параметрами вспомогательного привода мельницы;
- максимальная и минимальная величина глубины резания, характеризующая обеспечением цилиндрической формы поверхности цапфы при обработке.

Установлена зависимость вводимых ограничений от варьируемых параметров процесса ротационной обработки при построении математической модели [15]:

1. Допустимое значение составляющей силы резания P_x , характеризующей смещением оси восстанавливаемой цапфы на базирующую поверхность роlikоопор.

Данное ограничение характеризуется зависимостью силы резания и препятствующей смещению оси цапфы сил трения:

$$P_x < F_f. \quad (1)$$

F_f – это возникающая между цапфой и роlikоопорами сила трения, рассчитываемая как:

$$F_f = 4 \cdot M \cdot f \cdot \cos 30^\circ, \quad (2)$$

где M – масса цапфы, $f=0,15$ – коэффициент трения скольжения.

Формула силы резания [16]:

$$P_y = 10 \cdot C_{p_y} \cdot t^{x_y} \cdot S^{y_y} \cdot V^{n_y} \cdot K_p, \quad (3)$$

где $V = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000}$ – скорость резания; C_{p_y} , x_y ; y_y ; n_y – справочные коэффициенты и показатели, зависящие от условий обработки; K – коэффициент запаса.

Техническое ограничение преобразовано в линейный вид:

$$x_x \cdot \ln(t) + n_x \cdot \ln(n) < \ln \left(\frac{1000^{n_x} \cdot F_f}{10 \cdot C_{p_x} \cdot S^{y_x} \cdot (\pi D)^{n_x} \cdot K_{p_x}} \right). \quad (4)$$

Введены обозначения: $x_1 = \ln(t)$; $x_2 = \ln(n)$; $a_3 = \ln \left(\frac{1000^{n_x} \cdot F_f}{10 \cdot C_{p_x} \cdot S^{y_x} \cdot (\pi D)^{n_x} \cdot K_{p_x}} \right)$, тогда

выражение (4) примет вид:

$$x_x \cdot x_1 + n_x \cdot x_2 < a_3. \quad (5)$$

2. Допустимая составляющая силы резания P_y , характеризующая силой отжима ротационного резца от обрабатываемой поверхности цапфы.



Ограничение характеризует влияние жесткости восстанавливаемой цапфы и радиальной составляющей силы резания [16]:

$$P_y < \frac{I \cdot E}{l_d^3} \quad (6)$$

где $I=0,05 \cdot D^4$ – осевой момент инерции сечения восстанавливаемой цапфы с диаметром D , мм⁴; $E=2,1 \cdot 10^5$ МПа – модуль продольной упругости; l_d – длина цапфы, мм.

Подстановка в неравенство приводит к следующему результату:

$$x_y \cdot \ln(t) + n_y \cdot \ln(n) < \ln \left(\frac{1000^{n_y} \cdot I \cdot E}{10 \cdot C_{P_y} \cdot S^{y_y} \cdot (\pi \cdot D)^{n_y} \cdot K_{P_y} \cdot l_d^3} \right). \quad (7)$$

Техническое ограничение примет вид

$$x_y \cdot x_1 + n_y \cdot x_2 < a_2. \quad (8)$$

3. Допустимая составляющая силы резания P_z , характеризующая обеспечением мощности привода приставного станка.

Ограничение характеризует зависимость затраченной мощности процесса резания и мощности привода станка. Данное ограничение определяет возможность осуществления процесса обработки

$$N_{\text{резания}} < N_{\text{привода станка}}. \quad (9)$$

Техническое ограничение приведено в линейный вид:

$$x_z \cdot \ln(t) + (n_z + 1) \cdot \ln(n) < \ln \left(\frac{N_{\text{привода}} \cdot 1000^{n_z+1} \cdot 1020 \cdot 60}{10 \cdot C_{P_z} \cdot S^{y_z} \cdot (\pi D)^{n_z+1} \cdot K_{P_z}} \right). \quad (10)$$

Тогда

$$x_z \cdot x_1 + (n_z + 1) \cdot x_2 < a_1. \quad (11)$$

4. Допустимая величина шероховатости цилиндрической поверхности восстанавливаемой цапфы.

Ограничение характеризует зависимость между качеством поверхности цапфы и геометрическими параметрами ротационного резца. Техническое требование, предъявляемое к поверхности цапфы – шероховатость $Ra \leq 2,5$ мкм.

Определена величина шероховатости для ротационной обработки:

$$Ra = k_0 \cdot \frac{s^{k_1} \cdot (90 + \gamma)^{k_4}}{r^{k_2} \cdot V^{k_3}}, \quad (12)$$

где S – подача; V – скорость резания; γ – передний угол ротационного резца; r – радиус ре-



жущей чаши резца; $k_0 = 41,8$; $k_1 = 0,75$; $k_2 = 0,55$; $k_3 = 1,38$; $k_4 = 0,25$ – показатели степеней, определяющих условия обработки.

Преобразование выражения (11) приводит к следующему результату:

$$n^{k_3} \leq \frac{k_0 \cdot s^{k_1} \cdot (90 + \gamma)^{k_4} \cdot 1000^{k_3}}{Ra \cdot r^{k_2} \cdot (\pi D)^{k_3}}. \quad (13)$$

Производится замена:

$$k_3 \cdot x_2 \leq a_4. \quad (14)$$

5. Допустимая максимальная и минимальная величина частоты вращения цапфы, характеризующая параметрами вспомогательного привода мельницы.

Ограничение характеризуется зависимостью частоты вращения от технологических параметров и представляет собой систему из двух неравенств:

$$x_2 \geq a_7; \quad (15)$$

$$x_2 \leq a_8, \quad (16)$$

где

$$x_2 = \ln(n), \quad (17)$$

$$a_7 = \ln(n_{max}), \quad (18)$$

$$a_8 = \ln(n_{min}). \quad (19)$$

6. Допустимая максимальная и минимальная величина глубины резания, характеризующаяся обеспечением цилиндрической формы поверхности цапфы при обработке.

Ограничение характеризуется технологическими параметрами ротационного резца и представляет собой систему из двух неравенств:

$$x_1 \geq a_5; \quad (20)$$

$$x_1 \leq a_6, \quad (21)$$

где

$$x_1 = \ln(t), \quad (22)$$

$$a_5 = \ln(t_{max}), \quad (23)$$

$$a_6 = \ln(t_{min}). \quad (24)$$



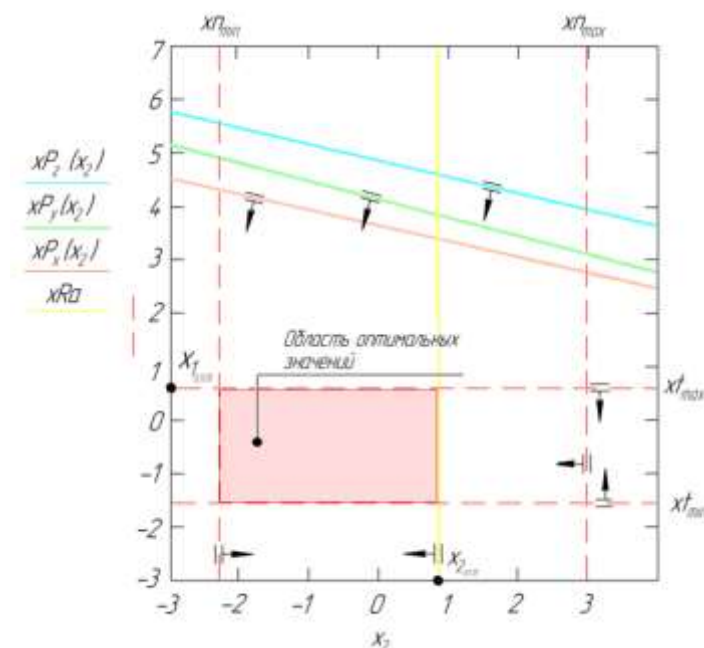
Математическая модель оптимизации режимов резания при обработке цапф мельниц с применением приставного станка представляет совокупность неравенств, показывающая зависимость соответствующих вводимых ограничений и варьируемых параметров и имеет следующий вид [17, 18]:

$$\begin{aligned}
 x_z \cdot x_1 + (n_z + 1) \cdot x_2 &< a \\
 x_y \cdot x_1 + n_y \cdot x_2 &< a_2 \\
 x_x \cdot x_1 + n_x \cdot x_2 &< a_3 \\
 k_3 \cdot x_2 &\leq a_4 \\
 x_1 &\geq a_5 \\
 x_1 &\leq a_6 \\
 x_2 &\geq a_7 \\
 x_2 &\leq a_8 \\
 \hline
 f_0 &= (x_1 + x_2)_{\max}
 \end{aligned}
 \tag{25}$$

Оптимальные параметры процесса обработки цапфы ротационным резцом найдены при $x_1, x_2 \geq 0$, возможные значения $x_{1\text{опт}}$ и $x_{2\text{опт}}$, соответствующие максимальному значению линейной функции – $f_{0\text{max}}$:

$$t_{\text{опт}} = e^{x_{1\text{опт}}}, n_{\text{опт}} = e^{x_{2\text{опт}}}.$$
(26)

Нахождение оптимальных значений производится по средствам MathCAD графическим методом. Все ограничения задаются прямыми, которые определяет существование решения. Область оптимальных значений параметров получается из пересечения ограничительных прямых и осей координат. Полученная область допустимых решений представлена на рисунке.



Модель для оптимизации режимов ротационной обработки цапфы
с применением приставного станка в графическом виде
Optimization model of pivot pin rotatory machining modes
with the application of an add-on machine-tool in a graphic form



Представленная математическая модель графическим способом для нахождения оптимальных параметров при ротационной обработке цапфы с применением приставного станка имеет следующие исходные данные [19]:

$$\begin{aligned} -t_{max} &= 2 \text{ мм}; t_{min} = 0,2 \text{ мм}; \\ -n_{max} &= 0,1 \text{ об / мин}; n_{min} = 20 \text{ об / мин}; \\ -Ra &= 2,5 \text{ мкм}. \end{aligned}$$

Обработка результатов моделирования при ротационной обработке цапфы приводит к нахождению оптимальных значений параметров [20]:

$$\begin{aligned} x_{1_{\text{опт}}} &= \ln(t) = 0,693 \rightarrow t_{\text{опт}} = 2 \text{ мм}; \\ x_{2_{\text{опт}}} &= \ln(n) = 0,916 \rightarrow n_{\text{опт}} = 2,5 \text{ об / мин}. \end{aligned}$$

Выводы

Получена область оптимальных значений технологических параметров ротационной обработки цилиндрических поверхностей цапфы с применением приставного станка при восстановлении мельницы. С учетом введенных ограничений – составляющих сил резания, шероховатости, глубины резания и частоты вращения, найдены оптимальные значения: $t_{\text{опт}} = 2 \text{ мм}; n_{\text{опт}} = 2,5 \text{ об / мин}.$

Библиографический список

1. Рудик Ф.Я. Юдаев Н.В., Буйлов В.Н.. Монтаж, эксплуатация и ремонт оборудования перерабатывающих предприятий. М.: ГИОРД, 2008. 352 с.
2. Зорин В.А. Технология машиностроения, производство и ремонт подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин. М.: Академия, 2010. 576 с.
3. Ревенко Н.Ф., Семенов В.В., Схиртладзе А.Г. Экономика ремонта и обслуживания оборудования предприятий. М.: ООО "ТНТ", 2012. 456 с.
4. Uncertainty in Industrial Practice: A Guide to Quantitative Uncertainty Management. М., 2008. 364 с.
5. Бестужева О.В., Федоренко М.А., Бондаренко Ю.А. Определение рациональных параметров ротационной обработки поверхностей вращения при восстановлении крупногабаритных деталей // Вестник Белгородского государственного технического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 12. С. 121–125. DOI: 10.12737/22647
6. Бестужева О.В., Федоренко М.А., Бондаренко Ю.А. Экспериментальное исследование восстановления поверхности вращения крупногабаритных деталей промышленного оборудования // Вестник Белгородского государственного технического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 11. С. 122–127. DOI: 10.12737/22353
7. Пат. № 166615, Российская Федерация, МПК В23В 5/00. Станок для обработки цапф помольных мельниц / О.В. Бестужева, Ю.А. Бондаренко, М.А. Федоренко, Ю.Г. Липчанская; заявитель и патентообладатель: О.В. Бестужева № 2016104065/02, 09.02.2016; заявл. 09.02.2016; опубл. 10.12.2016, Бюл. № 30.
8. Ящерицын П.И., Борисенко А.В., Дривотин И.Г., Лебедев В.Я. Ротационное резание материалов. Минск: Наука и техника, 1987. 229 с.
9. Conejo A.J., Castillo E., Minguez R., Garcia-Bertrand R. Decomposition Techniques in Mathematical Programming: Engineering and Science Applications. 2006. 541 p.
10. Кане М.М. Управление качеством продукции машиностроения. М.: Машиностроение, 2010. 416 с.
11. Акулович Л.М., Шелег В.К. Основы автоматизированного проектирования технологических процессов в машиностроении. М.: Инфра-М-Новое знание, 2016. 488 с.
12. Федоткин И.М. Математическое моделирование технологических процессов. М.: Либроком, 2011. 416 с.
13. Ермаков С.М., Жиглявский А.А. Математическая теория оптимального эксперимента: учебное пособие. М.: Наука, 1987. 320 с.
14. Маркова О.В. Математическая модель оптимизации обработки цилиндрических поверхностей крупногабаритного вращающегося оборудования // Труды ГОСНИТИ. 2015. Т. 119. № 5. С. 219–224.
15. Нинул. А.С. Оптимизация целевых функций. Аналитика. Численные методы. Планирование эксперимента. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 336 с.
16. Косилова А.Г. Справочник технолога-машиностроителя. Т. 2. М.: Машиностроение, 1986. 493 с.
17. Волосухин В.А., Тищенко А.И. Планирование научного эксперимента. М.: РИОР, Инфра-М, 2014. 176 с.
18. Сидняев Н.И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных. М.: Юрайт, 2015. 496 с.
19. Верещака А.С., Кушнер В.С. Резание материалов. М.: Высш. школа, 2009. 536 с.
20. Troltzsch F. Optimal Control of Partial Differential Equations: Theory, Methods and Applications (Graduate Studies in Mathematics). AMS, 2010. 408 p.



References

1. Rudik F.Ya. Yudaev N.V., Builov V.N.. Montazh, ekspluatatsiya i remont oborudovaniya pererabaty-vayushchikh predpriyatii [Installation, operation and repair of processing enterprise equipment]. Moscow: GEORGE Publ., 2008. 352 p. (In Russian)
2. Zorin V.A. Tekhnologiya mashinostroeniya, proizvodstvo i remont pod"emno-transportnykh, stroitel'nykh i dorozhnykh mashin [Engineering technology, production and repair of hoisting-and-transport, construction and road machines]. Moscow: Academy Publ., 2010. 576 p. (In Russian)
3. Revenko N.F., Semenov V.V., Skhirtladze A.G. Ekonomika remonta i obsluzhivaniya oborudovaniya predpriyatii [Economy of repair and maintenance of enterprise equipment]. Moscow: LLC "TNT" Publ., 2012. 456 p. (In Russian)
4. Uncertainty in Industrial Practice: A Guide to Quantitative Uncertainty Management. Moscow, 2008. 364 p. (In Russian)
5. Bestuzheva O.V., Fedorenko M.A., Bondarenko Yu.A. Determination of rational parameters of rotary surface treatment rotation when restoring large parts] Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova [Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov]. 2016, no. 12, pp. 121–125. (In Russian)
6. Bestuzheva O.V., Fedorenko M.A., Bondarenko Yu.A. Experimental study of the recovery of a surface of revolution of large parts of industrial equipment. Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova [Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov]. 2016, no. 11, pp. 122–127. (In Russian)
7. Pat. 166615 Grew. Federation: IPC V23V 5/00. O. V. Bestuzhev, A. Bondarenko, M. A. Fedorenko, Y. G. Lipchanskaya; applicant and patentee: Bestuzheva V. O. Machine-tool for grinding mill trunnion processing. No. 2016104065/02, 9 February 2016; Appl. 9 February 2016; publ. 10 December 2016, bull. no. 30.
8. Yashcheritsyn P.I., Borisenko A.V., Drivotin I.G., Lebedev V.Ya. Rotatsionnoe rezanie materialov [Rotary cutting of materials]. Minsk: Nauka i tekhnika Publ., 1987. 229 p. (In Russian)
9. Conejo A.J., Castillo E., Minguez R., Garcia-Bertrand R. Decomposition Techniques in Mathematical Programming: Engineering and Science Applications. 2006. 541 p.
10. Кане М.М. Управление качеством продукции машиностроения [Quality management of engineering products]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 2010. 416 p. (In Russian)
11. Akulovich L.M., Sheleg V.K. Osnovy avtomatizirovannogo proektirovaniya tekhnologicheskikh protsessov v mashinostroyenii [Fundamentals of computer-aided design of technological processes in mechanical engineering]. Moscow: Infra-M, Novoe znanie Publ., 2016. 488 p. (In Russian)
12. Fedotkin I.M. Matematicheskoe modelirovaniye tekhnologicheskikh protsessov. [Mathematical modeling of technological processes]. Moscow: Librokom Publ., 2011. 416 p. (In Russian)
13. Ermakov S.M., Zhiglyavskii A.A. Matematicheskaya teoriya optimal'nogo eksperimenta: uchebnoe po-sobie [Mathematical theory of the optimal experiment: learning aids]. Moscow: Nauka Publ., 1987, 320 p. (In Russian)
14. Markova O.V. Matematicheskaya model' optimizatsii obrabotki tsilindricheskikh poverkhnostei krupnogabaritnogo vrashchayushchegosya oborudovaniya [Mathematical optimization model of large rotating equipment cylindrical surface machining]. Trudy GOSNITI [Proceedings of GOSNITI]. 2015, vol. 119, no. 5, pp. 219–224. (In Russian)
15. Ninul A.S. Optimizatsiya tselevykh funktsii. Analitika. Chislennyye metody. Planirovaniye eksperimenta [Optimization of target functions. Analytics. Numerical methods. Design of an experiment]. Moscow: FIZMATLIT Publ., 2009. 336 p. (In Russian)
16. Kosilova A.G. Spravochnik tekhnologa-mashinostroyitelya [Technologist-mechanical engineer handbook]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1986. 493 p. (In Russian)
17. Volosukhin V.A., Tishchenko A.I. Planirovaniye nauchnogo eksperimenta [Planning of a scientific experiment]. Moscow: RIOR-Infra-m Publ., 2014. 176 p. (In Russian)
18. Sidnyaev N.I. Teoriya planirovaniya eksperimenta i analiz statisticheskikh dannykh [Theory of experiment planning and statistical data analysis]. Moscow: Yurait Publ., 2015. 496 p. (In Russian)
19. Vereshchaka A.S., Kushner V.S. Rezanie materialov [Cutting of materials]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2009. 536 p. (In Russian)
20. Troltsch F. Optimal Control of Partial Differential Equations: Theory, Methods and Applications (Graduate Studies in Mathematics). AMS, 2010. 408 p.

Критерии авторства

Бестужева О.В. имеет на статью авторские права и несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Bestuzheva O.V. have author's rights and bear equal 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 621.313.333

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-11-97-111>

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ГЕНЕРАТОРА С НЕССИМЕТРИЕЙ ФАЗНЫХ ОБМОТОК СТАТОРА И НАСЫЩЕНИЕМ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

© Г.В. Глазырин¹, Н.А. Митрофанов²

Новосибирский государственный технический университет,
630073, Российская Федерация, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20.

РЕЗЮМЕ: Рассматриваются переходные процессы синхронной машины при учете насыщения ее магнитной системы. Предложен метод численного моделирования переходных процессов синхронной машины с возможностью учета несимметрии обмотки статора и насыщения магнитной системы. Появление несимметрии возможно при повреждении синхронной машины, в частности, при межвитковых коротких замыканиях в обмотке статора. Непосредственное решение дифференциальных уравнений равновесия ЭДС и падений напряжений в обмотках в фазных координатах совместно с уравнением движения ротора. При этом контур каждой фазной обмотки статора описывается отдельным уравнением, и могут быть учтены отличающиеся параметры фаз. Математическая модель синхронного генератора, работающего на активно-индуктивную нагрузку, реализована в программном пакете MATLAB. В модели учтен один из возможных видов несимметрии – неодинаковое число витков в фазных обмотках, что позволяет моделировать межвитковые короткие замыкания без учета появления дополнительных короткозамкнутых контуров. Выполнен учет влияния демпферных обмоток на переходный процесс, вызванный внезапным коротким замыканием в системе, и произведено сравнение с моделью, где отсутствуют демпферные обмотки. Проведен анализ результатов моделирования при учете насыщения магнитной системы машины. Полученные результаты позволили сделать вывод об адекватности реализованной модели.

Ключевые слова: синхронная машина, переходной процесс, электроэнергетическая система, дифференциальные уравнения, численный метод

Информация о статье: Дата поступления 06 сентября 2018 г.; дата принятия к печати 30 октября 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 ноября 2018 г.

Для цитирования: Глазырин Г.В., Митрофанов Н.А. Моделирование переходных процессов генератора с несимметрией фазных обмоток статора и насыщением магнитной системы. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(11):97–111. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-97-111.

SIMULATION OF GENERATOR TRANSIENTS WITH STATOR PHASE WINDING ASYMMETRY AND MAGNETIC SYSTEM SATURATION

Gleb V. Glazyrin, Nikolay A. Mitrofanov

Novosibirsk State Technical University,
20 K. Marks St., Novosibirsk 630073, Russian Federation

ABSTRACT: The article deals with the transients of a synchronous machine with allowance for its magnetic system saturation. A method of numerical simulation of synchronous machine transients is proposed with the possibility of taking into account the asymmetry of stator winding and magnetic system. The asymmetry arises if the synchronous machine is damaged, in particular in the case when inter-turn short circuits occur in the stator winding. The study uses a direct solution of the differential equations of emf equilibrium and voltage drops in windings in phase coordinates together with the

¹Глазырин Глеб Владимирович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой электрических станций, e-mail: glazyring@gmail.com

Gleb V. Glazyrin, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Electric Power Stations, e-mail: glazyring@gmail.com

²Митрофанов Николай Александрович, аспирант, e-mail: n.a.mitrofanov27@gmail.com

Nikolay A. Mitrofanov, Postgraduate student, e-mail: n.a.mitrofanov27@gmail.com



rotor motion equation. In this case, the contour of each phase winding of the stator is described by a separate equation. Different phase parameters can be taken into account as well. The mathematical model of a synchronous generator operating into an active-inductive load is implemented in the software package MATLAB. The model takes into account one of the possible types of asymmetry: it is an unequal number of turns in phase windings. This enables the modeling of interturn short circuits without allowance for the occurrence of additional short-circuits. The effect of damper windings on the transient caused by a sudden short circuit in the system is accounted. It is compared with the damper winding-free model. The simulation results are analyzed taking into account the saturation of the machine magnetic system. The obtained results allowed to draw a conclusion about the adequacy of the implemented model.

Keywords: *synchronous machine, transient, electric power system, differential equations, numerical method*

Information about the article: Received September 6, 2018; accepted for publication October 30, 2018; available online November 30, 2018.

For citation: Glazyrin G.V., Mitrofanov N.A. Simulation of generator transients with stator phase winding asymmetry and magnetic system saturation. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(11):pp. 97–111. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-97-111.

Введение

Известно, что аналитическое исследование электромагнитных и электромеханических переходных процессов в синхронной машине с учетом всех влияющих факторов является весьма сложной задачей. В связи с чем для упрощения расчета приходится делать ряд допущений, которые вносят некоторые погрешности в оценку рассматриваемых параметров синхронной машины. К основным допущениям, применяемым в практических методах расчета, можно отнести следующие [1]:

1. Магнитная система машины не насыщена, в результате чего индуктивности машины не зависят от намагничивающей силы.
2. Вместо действительных кривых распределения магнитной индукции в воздушном зазоре по расточке статора учитываются только их составляющие первой гармоники.
3. В магнитной системе машины отсутствуют какие-либо потери.
4. Считается, что конструкция машины обеспечивает полную симметрию фазных обмоток статора. Ротор также симметричен относительно своих продольной и поперечной осей.

Однако в некоторых случаях принятые при расчете допущения не позволяют выявить и провести корректный анализ ненормальных режимов синхронной машины. К такому режиму, например, можно отнести несимметрию фазных обмоток статора, вызванную наличием витковых замыканий в одной из них и насыщение магнитной системы машины.

Существующие программные пакеты моделирования переходных процессов в электроэнергетических системах, такие как MATLAB Simulink [2], PSCAD, Mustang, используют для описания электромагнитных процессов синхронной машины уравнения Парка–Горева [1], которые записываются в неподвижной относительно ротора системе координат и предполагают полную симметрию фазных обмоток статора. Очевидно, что такой метод моделирования не может быть применен для расчета процессов в поврежденной синхронной машине с отличающимися параметрами фазных обмоток.

В статье приведен вывод системы дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы трехфазной синхронной машины с учетом индивидуальных активных сопротивлений и индуктивностей обмоток. Далее произведено сравнение результатов моделирования переходных процессов синхронной машины, с учетом вышеописанных факторов, которые получены с помощью предложенного метода.



Влияние демпферных контуров на переходные процессы, протекающие в синхронной машине

В синхронной машине при внезапном коротком замыкании возникает приращение продольного потока реакции якоря (статора) $\Delta\Phi_{ad}$, это приращение в свою очередь вызывает ответную реакцию ротора, которая образуется из приращения потока возбуждения $\Delta\Phi_f$. При наличии в синхронной машине демпферных контуров рассматривается уже результирующая составляющая приращений потоков, включающая в себя также и приращение потока продольной демпферной обмотки $\Delta\Phi_{yd}$.

Свободные токи при коротком замыкании (к.з.), возникающие не только в обмотке возбуждения, но и в демпферной обмотке, в большей мере компенсируют реакцию якоря, чем это имеет место при отсутствии демпферной обмотки.

Изменение реактивностей машины зависит от сопротивления магнитному потоку реакции статора, которое он встречает на пути прохождения через полюса и массив ротора. В установившемся режиме создаваемый ток статора магнитный поток частично замыкается по путям рассеяния статорной обмотки, а основная его часть, пройдя воздушный зазор, свободно замыкается через полюсы и массив ротора. Поскольку сопротивление для магнитного потока в данном режиме достаточно мало, то индуктивность, определяющая величину магнитного потока, получается большой. При внезапном изменении магнитного потока статора в обмотке возбуждения наводится ток, который создает магнитный поток, направленный встречно потоку статора, то есть Φ_{ad} встречает большее сопротивление и часть его вытесняется по пути рассеяния обмотки возбуждения. Та же намагничивающая сила (н.с.) статора в этих условиях создает меньший магнитный поток, что и обуславливает соответственно меньшую величину переходной продольной реактивности x'_d [1].

При наличии демпферной обмотки в продольной оси ротора вытеснение внезапно изменившегося магнитного потока статора получается более интенсивным, поскольку в этом участвуют совместно обмотка возбуждения и продольная демпферная обмотка. Сопротивление потоку статора в этом случае еще более возрастает и, следовательно, величина этого потока при той же н.с. становится меньше, чем и объясняется меньшее значение продольной сверхпереходной реактивности по сравнению с переходной. Чем больше замкнутых контуров на роторе, тем меньшая часть магнитного потока статора в переходном процессе может проникнуть в ротор [1].

Поэтому сверхпереходное индуктивное сопротивление машины с демпферной обмоткой x''_d оказывается меньше переходного индуктивного сопротивления x'_d в продольной оси. Это обстоятельство, как известно, приводит к увеличению тока к.з. за счет появления быстро затухающей составляющей.

В исследуемой модели синхронной машины учитывается по одному продольному и поперечному демпферному контуру, пренебрегая влиянием эффекта вытеснения токов. Совершенствованию методов расчета синхронной машины при учете ротора машины многоконтурными схемами активно занимается [3]. В рамках же поставленных в исследовании задач, допущение последним не приведет к потере точности и недостоверным результатам.

Влияние насыщения магнитной системы на переходные процессы, протекающие в синхронной машине

Пользуясь предположением об отсутствии насыщения магнитной системы синхронной машины, мы можем установить линейные зависимости между потокосцеплениями и токами в соответствующих контурах генератора.



В действительности же влияние насыщения сказывается на зависимости индуктивности от намагничивающей силы (или тока). Величина собственной и взаимной индуктивностей при этом зависит от потокосцепления обмотки возбуждения с учетом настоящей характеристики холостого хода конкретной машины, а не заменой ее характеристикой намагничивания зазора, где магнитная проницаемость принимается равной бесконечности. В таком случае введение постоянных коэффициентов собственной и взаимной индуктивностей не отражает в действительности фактические их значения во время работы синхронной машины.

Обращаясь к описанию электромагнитных процессов синхронной машины уравнения Парка–Горева, которые записываются в неподвижной относительно ротора системе координат, то продольное синхронное индуктивное сопротивление не является постоянным, а зависит от насыщения машины. Эта зависимость приближенно может выявлена с помощью характеристики х.х. машины. Подробно определение влияния насыщения магнитной системы на величину синхронного индуктивного сопротивления изложено в [4], где рассмотрено построение характеристики х.х. и выведены все необходимые величины. Приняв во внимание [4] выходит, что значение продольного синхронного индуктивного сопротивления x_d пропорционально тангенсу наклона прямой $tg\beta$, заменяющей характеристику х.х. и проходящей через точку на характеристике х.х, соответствующей продольной составляющей внутренней э.д.с. Из чего следует, что с ростом значения тока возбуждения i_f наклон прямой будет уменьшаться, как и значение продольного синхронного индуктивного сопротивления.

В предлагаемом исследовании учет насыщения магнитной системы синхронной машины выполняется через соответствующий коэффициент насыщения k_s , отражающий влияние действительной характеристики х.х. на рассматриваемый переходной процесс. Такой подход позволяет определить реальные значения индуктивностей на каждом шаге интегрирования и тем самым дает более достоверные результаты расчета переходных процессов в синхронной машине.

Исходные уравнения, характеризующие работу синхронной машины

Рассмотрим синхронную машину, имеющую три фазных обмотки, контур возбуждения, а также одну продольную и одну поперечную демпферные обмотки.

Обозначим через u_η ($\eta = a, b, c$) и u_f – мгновенные значения напряжений на фазных обмотках и обмотке возбуждения соответственно; i_η и i_f – мгновенные значения токов; ψ_η и ψ_f – результирующие потокосцепления обмоток; R_η и R_f – активные сопротивления фазных обмоток и обмотки возбуждения. Тогда дифференциальные уравнения равновесия ЭДС и падений напряжений в контурах синхронной машины будут иметь вид [1]:

$$\begin{cases} u_\eta = -\frac{d\psi_\eta}{dt} - R_\eta i_\eta & (\eta = a, b, c); \\ u_f = \frac{d\psi_f}{dt} + R_f i_f. \end{cases} \quad (1)$$

Кроме того, систему дифференциальных уравнений (1) следует дополнить уравнениями равновесия э.д.с. и падений напряжений в демпферных контурах:



$$\begin{cases} 0 = -\frac{d\psi_{yd}}{dt} - R_{yd}i_{yd}; \\ 0 = -\frac{d\psi_{yq}}{dt} - R_{yq}i_{yq}, \end{cases} \quad (2)$$

где ψ_{yd} и ψ_{yq} – результирующие потокоцепления продольной и поперечной демпферных обмоток соответственно, R_{yd} и R_{yq} – их активные сопротивления, i_{yd} и i_{yq} – мгновенные значения токов в демпферных контурах.

Предлагаемый метод расчета переходных процессов основан на совместном решении уравнений (1) и (2), дополненных выражениями падений напряжений на сопротивлениях нагрузки. Такой подход делает возможным моделирование синхронной машины с различными параметрами фазных обмоток за счет описания электромагнитных процессов в каждой фазе отдельным дифференциальным уравнением.

Вывод системы дифференциальных уравнений для генератора, работающего на автономную нагрузку со схемой соединения «треугольник»

Значительный вклад в описание электромагнитных переходных процессов в системах генерирования электрической энергии для автономных объектов внес С.А. Харитонов [5].

Наиболее простая результирующая система дифференциальных уравнений получается в случае подключения нагрузки по схеме «звезда» с нулевым проводом, не имеющим сопротивления [6]: достаточно выполнить замену u_η на $L_{\text{нг.}\eta}(di_\eta/dt) + R_{\text{нг.}\eta}i_\eta$ в уравнении (1).

В действительности схемы выдачи мощности электростанций предусматривают работу генераторов с изолированной нейтралью (без нулевого провода). Как правило, генератор подключается к обмотке повышающего трансформатора, соединенной в «треугольник». Для точного расчета переходных процессов в таких схемах необходимо моделирование как генератора, так и трансформатора, что значительно усложняет математические выкладки. В статье рассмотрен более простой случай работы генератора на автономную нагрузку, подключенную по схеме «треугольник» рис. 1.

При расчете режимов работы генератора, работающего на автономную активно-индуктивную нагрузку, подключенную по схеме «треугольник» необходимо учесть следующие преобразования, в которых u_k ($k = ab, bc, ca$) – мгновенные значения линейных напряжений на выводах синхронной машины; i_k – мгновенные значения линейных токов:

$$\begin{cases} u_{ab} = u_a - u_b; \\ u_{bc} = u_b - u_c; \\ u_{ca} = u_c - u_a; \end{cases} \quad \begin{cases} i_a = i_{ab} - i_{ca}; \\ i_b = i_{bc} - i_{ab}; \\ i_c = i_{ca} - i_{bc}. \end{cases}$$

Тогда уравнения равновесия э.д.с. и падений напряжений в контурах синхронной машины (1) будут определяться как:

$$\begin{cases} u_{ab} = -\frac{d\psi_{ab}}{dt} - (R_{g,a}i_a - R_{g,b}i_b); \\ u_{bc} = -\frac{d\psi_{bc}}{dt} - (R_{g,b}i_b - R_{g,c}i_c); \\ u_{ca} = -\frac{d\psi_{ca}}{dt} - (R_{g,c}i_c - R_{g,a}i_a), \end{cases} \quad (3)$$



где $R_{g,\eta}$ ($\eta = a, b, c$) – активное сопротивление контура фазной обмотки, u_k ($k = ab, bc, ca$) – мгновенные значения линейных напряжений на выводах синхронной машины, $\psi_{ij} = \psi_i - \psi_j$.

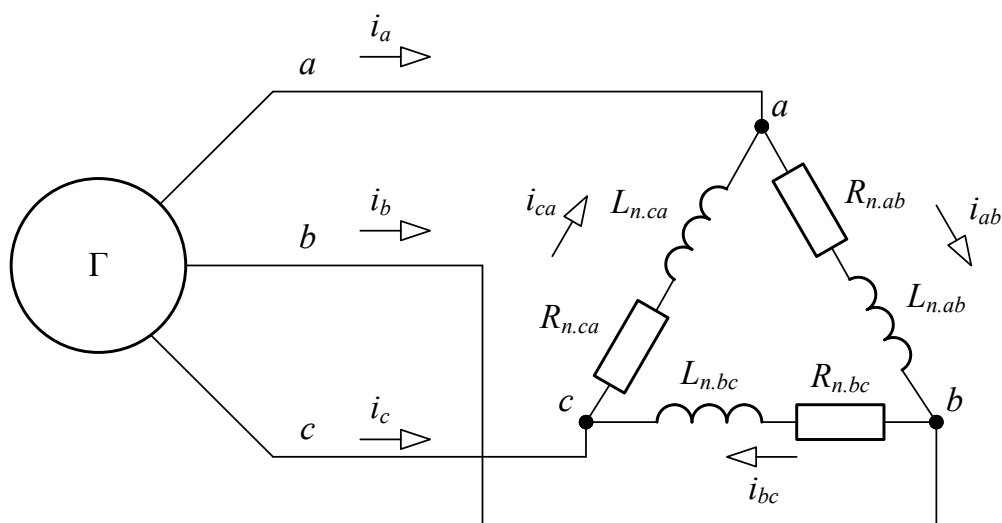


Рис. 1. Схема подключения нагрузки
Fig 1. Load connection diagram

При расчете режимов работы генератора, работающего на автономную активно-индуктивную нагрузку, подключенную по схеме «треугольник», система дифференциальных уравнений принимает вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\psi_{ab}}{dt} = -L_{n.ab} \frac{di_{ab}}{dt} - \left[(R_{g.a} + R_{g.b} + R_{n.ab}) i_{ab} - R_{g.a} i_{ca} - R_{g.b} i_{bc} \right]; \\ \frac{d\psi_{bc}}{dt} = -L_{n.bc} \frac{di_{bc}}{dt} - \left[(R_{g.b} + R_{g.c} + R_{n.bc}) i_{bc} - R_{g.b} i_{ab} - R_{g.c} i_{ca} \right]; \\ \frac{d\psi_{ca}}{dt} = -L_{n.ca} \frac{di_{ca}}{dt} - \left[(R_{g.c} + R_{g.a} + R_{n.ca}) i_{ca} - R_{g.c} i_{bc} - R_{g.a} i_{ab} \right]; \\ \frac{d\psi_f}{dt} = u_f - R_f i_f; \\ \frac{d\psi_{yd}}{dt} = -R_{yd} i_{yd}; \\ \frac{d\psi_{yq}}{dt} = -R_{yq} i_{yq}, \end{array} \right. \quad (4)$$

где $R_{n,k}$ – активное сопротивление нагрузки ($k = ab, bc, ca$), $L_{n,k}$ – индуктивность нагрузки.

Для упрощения восприятия условно примем замену переменных, где $L_{k\Sigma}$ ($k = ab, bc, ca$) – суммарные собственные индуктивности контуров, $M_{k,e}$ – эквивалентные взаимные индуктивности контуров, $u_{\Sigma k}$ – мгновенные значения падений напряжения на активных сопротивлениях контуров:



$$\begin{cases} L_{ab\Sigma} = L_a + L_b - 2M_{ab} + L_{n.ab}; \\ L_{bc\Sigma} = L_b + L_c - 2M_{bc} + L_{n.bc}; \\ L_{ca\Sigma} = L_c + L_a - 2M_{ca} + L_{n.ca}; \\ M_{ab.e} = M_{bc} + M_{ab} - M_{ca} - L_b; \\ M_{bc.e} = M_{bc} + M_{ca} - M_{ab} - L_c; \\ M_{ca.e} = M_{ca} + M_{ab} - M_{bc} - L_a; \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} u_{\Sigma ab} = (R_{g.a} + R_{g.b} + R_{n.ab})i_{ab} - R_{g.a}i_{ca} - R_{g.b}i_{bc}; \\ u_{\Sigma bc} = (R_{g.b} + R_{g.c} + R_{n.bc})i_{bc} - R_{g.b}i_{ab} - R_{g.c}i_{ca}; \\ u_{\Sigma ca} = (R_{g.c} + R_{g.a} + R_{n.ca})i_{ca} - R_{g.c}i_{bc} - R_{g.a}i_{ab}. \end{cases}$$

Введя допущение о линейности зависимости между потокосцеплениями обмоток и протекающими в них токами можно записать следующую систему уравнений [7]:

$$\begin{cases} \psi_{ab} = i_{ab}L_{ab\Sigma} + i_{bc}M_{ab.e} + i_{ca}M_{ca.e} + (M_{af} - M_{bf})i_f + (M_{ayd} - M_{byd})i_{yd} + (M_{ayq} - M_{byq})i_{yq}; \\ \psi_{bc} = i_{ab}M_{ab.e} + i_{bc}L_{bc\Sigma} + i_{ca}M_{bc.e} + (M_{bf} - M_{cf})i_f + (M_{byd} - M_{cyd})i_{yd} + (M_{byq} - M_{cyq})i_{yq}; \\ \psi_{ca} = i_{ab}M_{ca.e} + i_{bc}M_{bc.e} + i_{ca}L_{ca\Sigma} + (M_{cf} - M_{af})i_f + (M_{cyd} - M_{ayd})i_{yd} + (M_{cyq} - M_{ayq})i_{yq}; \\ \psi_f = i_{ab}(M_{af} - M_{bf}) + i_{bc}(M_{bf} - M_{cf}) + i_{ca}(M_{cf} - M_{af}) + L_f i_f + M_{fyd}i_{yd} + M_{fyq}i_{yq}; \\ \psi_{yd} = i_{ab}(M_{ayd} - M_{byd}) + i_{bc}(M_{byd} - M_{cyd}) + i_{ca}(M_{cyd} - M_{ayd}) + M_{fyd}i_f + L_{yd}i_{yd}; \\ \psi_{yq} = i_{ab}(M_{ayq} - M_{byq}) + i_{bc}(M_{byq} - M_{cyq}) + i_{ca}(M_{cyq} - M_{ayq}) + L_{yq}i_{yq}. \end{cases} \quad (6)$$

Коэффициенты пропорциональности $L_a, L_b, L_c, L_f, L_{yd}, L_{yq}$ есть собственные индуктивности фазных обмоток, обмотки возбуждения, продольной и поперечной демпферных обмоток соответственно, символом M обозначены взаимные индуктивности обмоток. Как определяются эти коэффициенты подробно раскрыто в [7] и останавливаться на их рассмотрении не имеет смысла. Стоит лишь отметить, что большинство индуктивностей, входящих в выражение (6), являются функциями угла поворота ротора γ .

При нарушении симметрии фазных контуров статора эти индуктивности могут быть определены с помощью дополнительного коэффициента, учитывающего долю замкнувшихся витков $k_{w\eta}$ ($\eta = a, b, c$).

При учете насыщения магнитной системы машины значения собственных и взаимных индуктивностей определяются следующим образом:

$$\begin{cases} L_{\eta} = k_s L_{\eta.ns} \quad (\eta = a, b, c); \\ M_k = k_s M_{k.ns} \quad (k = ab, bc, ca), \end{cases}$$

где $L_{\eta.ns}$ и $M_{k.ns}$ – значение собственной и взаимной индуктивностей без учета насыщения, которые можно определить по паспортным данным машины.

Для определения значения коэффициента насыщения k_s необходимо знать мгновенное значение потокосцепления обмотки возбуждения на каждом шаге интегрирования ψ_{fns} и



рассчитать номинальное потокоцепление обмотки возбуждения ψ_{fx} . После результат их отношения ψ_{fns}/ψ_{fx} , использовать для определения фактического значения ЭДС по характеристике х.х. для рассматриваемой машины. Расчетные выражения для нахождения коэффициента насыщения k_s , можно свести в следующую систему:

$$\begin{cases} \psi_{fx} = \sqrt{2}U_{nom}/\omega ; \\ \psi_{fns} = i_{ab}(M_{af} - M_{bf}) + i_{bc}(M_{bf} - M_{cf}) + \\ + i_{ca}(M_{cf} - M_{af}) + L_f i_f + M_{fyd} i_{yd}; \\ \psi_{fns.o.e} = |\psi_{fns}/\psi_{fx}|; \\ k_s = E_{xx} f(\psi_{fns.o.e})/\psi_{fns.o.e} \end{cases}$$

Решение системы уравнений (1) включает в себя определение производной $d\psi_k/dt$ от сложной функции, зависящей от токов в контурах и угла поворота ротора. Для этого к системе (2) применим следующую формулу производной сложной функции:

$$\frac{d\psi_k}{dt} = \frac{\partial \psi_k}{\partial \gamma} \frac{d\gamma}{dt} + \sum_m \frac{\partial \psi_k}{\partial i_m} \frac{di_m}{dt} \\ (k, m = ab, bc, ca, f, yd, yq)$$

и подставим полученные выражения в (1). Так как процесс определения производных для разных контуров однотипен, рассмотрим лишь одно уравнение для контура “ab” статора:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_{ab}}{dt} = \frac{\partial \psi_{ab}}{\partial \gamma} \omega + \frac{di_{ab}}{dt} L_{ab.e} + \frac{di_{bc}}{dt} M_{ab.e} + \frac{di_{ca}}{dt} M_{ca.e} + (M_{af} - M_{bf}) \frac{di_f}{dt} +, \\ + (M_{ayd} - M_{byd}) \frac{di_{yd}}{dt} + (M_{ayq} - M_{byq}) \frac{di_{yq}}{dt} = -L_{n.ab} \frac{di_{ab}}{dt} - u_{\Sigma ab}. \end{aligned} \quad (7)$$

Уравнения для остальных контуров могут быть получены тем же способом. Частную производную потокоцепления по углу, входящую в (7), выразим из (6):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi_{ab}}{\partial \gamma} = \frac{dL_{ab.e}}{d\gamma} i_{ab} + \frac{dM_{ab.e}}{d\gamma} i_{bc} + \frac{dM_{ca.e}}{d\gamma} i_{ca} + \frac{d(M_{af} - M_{bf})}{d\gamma} i_f + \frac{d(M_{ayd} - M_{byd})}{d\gamma} i_{yd} + \\ + \frac{d(M_{ayq} - M_{byq})}{d\gamma} i_{yq}. \end{aligned} \quad (8)$$

Полученные в (7) производные индуктивностей по углу можно определить, зная исходные выражения индуктивностей, полученные в [6].

В результате подстановки (8) в (7) получим уравнение, связывающее функции времени – токи в обмотках и угол поворота ротора – и производные этих функций.

При рассмотрении всех контуров синхронной машины вместо одного уравнения (7) получим следующую систему уравнений в матричном виде для нагрузки, подключенной по схеме «треугольник»:



$$\begin{bmatrix} L_{ab\Sigma} & M_{.ab.e} & M_{ca.e} & M_{abf} & M_{abyd} & M_{abyq} \\ M_{.ab.e} & L_{bc\Sigma} & M_{bc.e} & M_{bcf} & M_{bcyd} & M_{bcyq} \\ M_{ca.e} & M_{bc.e} & L_{ca\Sigma} & M_{caf} & M_{cayd} & M_{cayq} \\ M_{abf} & M_{bcf} & M_{caf} & L_f & M_{fyd} & 0 \\ M_{abyd} & M_{bcyd} & M_{cayd} & M_{fyd} & L_{yd} & 0 \\ M_{abyq} & M_{bcyq} & M_{cayq} & 0 & 0 & L_{yq} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} di_{ab}/dt \\ di_{bc}/dt \\ di_{ca}/dt \\ di_f/dt \\ di_{yd}/dt \\ di_{yq}/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(\partial\psi_{ab}/\partial\gamma)\omega - u_{\Sigma ab} \\ -(\partial\psi_{bc}/\partial\gamma)\omega - u_{\Sigma bc} \\ -(\partial\psi_{ca}/\partial\gamma)\omega - u_{\Sigma ca} \\ -(\partial\psi_f/\partial\gamma)\omega - R_f i_f + u_f \\ -(\partial\psi_{yd}/\partial\gamma)\omega - R_{yd} i_{yd} \\ -(\partial\psi_{yq}/\partial\gamma)\omega - R_{yq} i_{yq} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где M_{kf} , M_{kyd} , M_{kyq} ($k = ab, bc, ca$) – значения взаимной индуктивности обмотки возбуждения, продольной и поперечной демпферных обмоток.

Полученная система уравнений (9) позволяет определять производные токов в обмотках по известным значениям функций (токов, угла поворота ротора и частоты).

Для описания электромеханических процессов синхронной машины воспользуемся дифференциальным уравнением движения ротора в форме д'Аламбера [7]:

$$M_T - J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\partial W_M}{\partial \gamma} = 0, \quad (10)$$

где M_T – момент турбины, J – момент инерции ротора, W_M – энергия магнитных полей машины, которая может быть определена по формуле [7]:

$$W_M = \frac{1}{2} \sum_k i_k \psi_k, \quad k = a, b, c, f, yd, yq. \quad (11)$$

При подстановке (11) в (10) и преобразований получим следующее выражение для расчета производной частоты по известным значениям функций:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{P_T}{J\omega} + \frac{1}{2J} \cdot \left(i_a \frac{\partial \psi_a}{\partial \gamma} + i_b \frac{\partial \psi_b}{\partial \gamma} + i_c \frac{\partial \psi_c}{\partial \gamma} + i_f \frac{\partial \psi_f}{\partial \gamma} + i_{yd} \frac{\partial \psi_{yd}}{\partial \gamma} + i_{yq} \frac{\partial \psi_{yq}}{\partial \gamma} \right), \quad (12)$$

где P_T – мощность турбины. Частные производные потокосцеплений по углу, полученные в (12), входят также в систему уравнений (9), и их определение уже рассмотрено ранее.

Для получения полной системы дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы синхронной машины, необходимо (9) и (12) дополнить связью между угловой частотой и углом поворота ротора:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \omega. \quad (13)$$



Описание метода численного моделирования

Численное решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений (разностными методами) требует расчета производных функций по известным значениям самих функций на каждом шаге интегрирования [8,9]. Для этого система обычно представляется в форме Коши. В рассматриваемом случае два уравнения (12) и (13) содержат по одной производной в левой части, в то время как оставшиеся уравнения заданы в матричном виде (9), причем разделение переменных затруднительно из-за большого порядка матриц.

Кроме того, указанные уравнения имеют переменные коэффициенты, зависящие от угла поворота ротора γ . В итоге требуется пересчет большинства коэффициентов на каждом шаге интегрирования, и представление (9) в явной форме Коши не обеспечило бы существенного снижения объема вычислений.

Предложенная математическая модель синхронного генератора реализована при помощи программного пакета MATLAB. Данная программа широко применяется в различного рода исследований переходных процессах в синхронных и асинхронных машинах [10-13].

Для решения системы дифференциальных уравнений использована функция ode45, основанная на одношаговом явном методе Рунге-Кутты 4-го и 5-го порядка [2]. За основу метода расчета производных при численном решении системы дифференциальных уравнений взят алгоритм, предложенный в [6].

Однако, не всегда применение пакета MATLAB отвечает требуемому быстродействию. Для повышения скорости вычислений авторы [6,14] предлагают методы дополнительной оптимизации программного кода.

Анализ влияния демпферных обмоток на переходной процесс в реализуемой модели

В качестве примера выполнены расчеты переходных процессов генератора ТВВ-200-2АУЗ с полной симметрией фазных обмоток статора и следующими параметрами: $S_{\text{ном}} = 235.3 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, $U_{\text{ном}} = 15.75 \text{ кВ}$, $f_{\text{ном}} = 50 \text{ Гц}$, $x_d = 2.106$, $x'_d = 0.272$, $x''_d = 0.1805$, $x_q = 2.106$, $x''_q = 0.1805$, $x_\sigma = 0.166$, $T'_d = 0.91 \text{ с}$, $T''_d = 0.114 \text{ с}$, $T'''_d = 0.114 \text{ с}$, активное сопротивление обмотки статора $R_s = 0.00152 \text{ Ом}$.

Работа машины рассматривается при трехфазном коротком замыкании на выводах генератора и его работе в нагрузочном режиме для двух расчетных моделей: с учетом продольной и поперечной демпферных обмоток; без демпферных обмоток.

Результаты расчетов при трехфазном коротком замыкании на выводах генератора и его работе в нагрузочном режиме с учетом продольной и поперечной демпферных обмоток приведены на рис. 2.

Результаты расчетов при трехфазном коротком замыкании на выводах генератора и его работе в нагрузочном режиме в модели без демпферных обмоток приведены на рис. 3.

Из сравнения полученных результатов при трехфазном коротком замыкании на выводах генератора и его работе в нагрузочном режиме можно увидеть, что в модели с учетом продольной и поперечной демпферных обмоток: амплитудное значение тока фазного контура статора $i_a = 42.6 \text{ кА}$. При моделировании генератора без демпферных обмоток значение тока составляет $i_a = 38.9 \text{ кА}$. Время затухания апериодической составляющей тока к.з. фазы «А» до уровня 26 кА : при учете продольной и поперечной демпферных обмоток составляет $t_s = 0.25 \text{ с}$; без демпферных обмоток $t_s = 0.47 \text{ с}$.

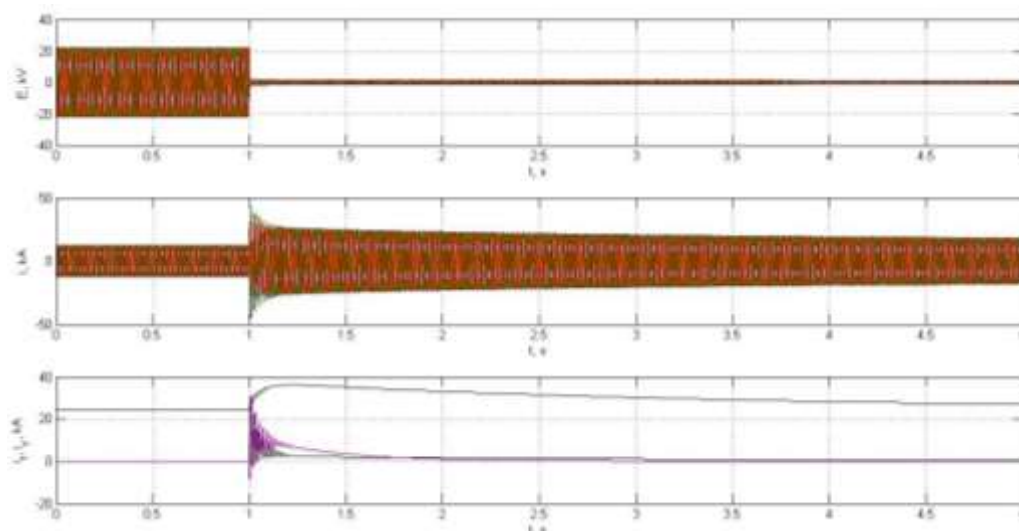


Рис. 2. Результаты расчетов для модели с учетом продольной и поперечной демпферных обмоток

Fig 2. Calculation results for the model with allowance for longitudinal and transverse damper windings

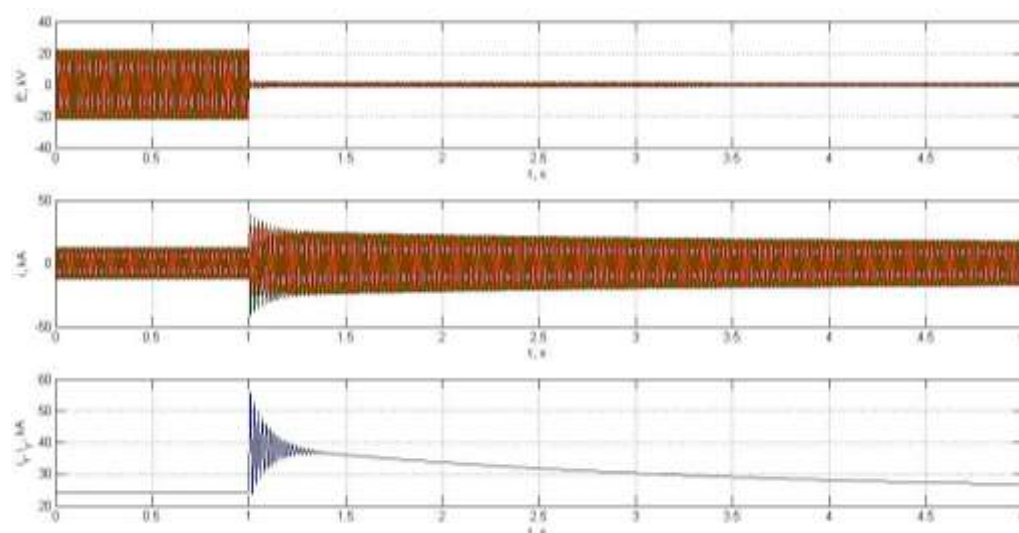


Рис. 3. Результаты расчетов для модели без демпферных обмоток

Fig. 3. Calculation results for the damper winding-free model

Анализ влияния насыщения магнитной системы на переходной процесс в реализуемой модели

Работа машины рассматривается в нескольких режимах: нормальном установившемся режиме при вариации нагрузки, подача напряжения на обмотку возбуждения при отключенной нагрузке. Во втором режиме сравниваются значения э.д.с. на фазных выводах обмотки статора с учетом насыщения магнитной системы и без. Генератор работает на автономную активно-индуктивную нагрузку, подключенную по схеме «звезда» с нулевым проводом. Подробнее о выводе дифференциальных уравнений равновесия э.д.с. и падений напряжений в обмотках со схемой соединения нагрузки «звезда» с нулевым проводом изложено в [7], поэтому останавливаться на данной системе уравнений не имеет смысла.

Значение тока возбуждения в расчетах приведено к обмотке статора генератора.



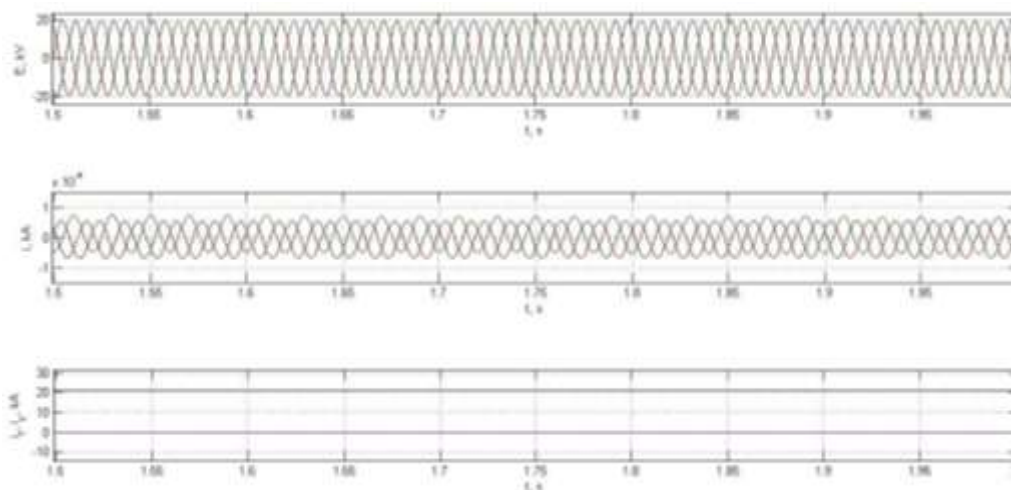
Таблица 1

**Анализ влияния насыщения при подаче напряжения на обмотку возбуждения
при отключенной нагрузке**

Table 1

**Analysis of the saturation effect when applying voltage to the excitation winding
under cut-off load**

С насыщением	e_a , кВ	12,9	13,6	16,1	18,2	19,2
Без насыщения		14,5	15,6	20,2	26,5	31,1
i_f , кА		9,77	10,51	13,67	17,87	21



**Рис. 4. Результаты расчетов при моделировании с учетом насыщения
в режиме холостого хода и $i_f=21$, кА**

**Fig. 4. Calculation results when modeling with allowance for saturation
in the no-load operation mode and $i_f=21$, kA**

Результаты расчетов при подаче напряжения на обмотку возбуждения и отключенной нагрузке с учетом насыщения магнитной системы приведены на рис. 4.

Результаты расчетов при подаче напряжения на обмотку возбуждения и отключенной нагрузке без насыщения магнитной системы приведены на рис. 5.

Сравнение полученных результатов режима холостого хода генератора показывает, что моделирование при отсутствии насыщения магнитной системы машины не позволяет получить достоверные результаты. В режиме х.х. значения э.д.с. на фазных выводах обмотки статора значительно отличаются от реальной характеристики холостого хода машины.

В нормальном установившемся режиме рассматриваются несколько значений нагрузки генератора: $0.25S_{nom}$; $0.5S_{nom}$; $0.75S_{nom}$ и S_{nom} .

Результаты расчетов в нормальном установившемся режиме с учетом насыщения магнитной системы приведены на рис. 6.

Результаты расчетов в нормальном установившемся режиме без насыщения магнитной системы приведены на рис. 7.

Сравнение полученных результатов нормального установившегося режима генератора показывает, что моделирование при отсутствии насыщения магнитной системы машины не позволяет получить достоверные результаты. В нормальном режиме работы значения э.д.с. на фазных выводах обмотки статора существенно отличаются от номинальных значений фазного напряжения рассматриваемого генератора. Так же с ростом значения нагрузки увеличивается провал напряжения.

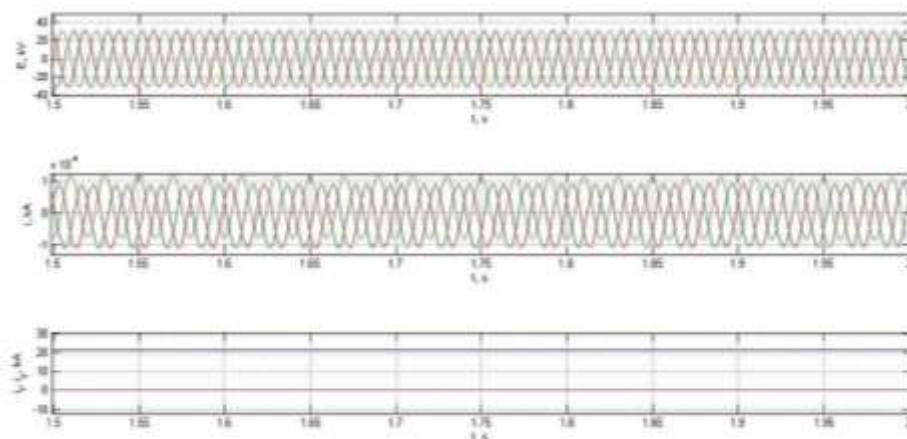


Рис. 5. Результаты расчетов при моделировании с без насыщения
в режиме холостого хода и $i_f=21$, кА

Fig. 5. Calculation results when modeling without allowance for saturation
in the no-load operation mode and $i_f=21$, кА

Таблица 2

Анализ влияния насыщения в нормальном установившемся
режиме при вариации нагрузки

Table 2

Analysis of the saturation effect in the normal steady state mode under
load variations

С насыщением	e_a , кВ	11,6	11,55	11,41	11,36
	i_a , кА	2,81	5,65	8,31	11,34
Без насыщения	e_a , кВ	12,85	12,87	12,81	12,84
	i_a , кА	3,07	6,15	8,98	12,23
i_{f0} , кА		10,97	14,46	18,07	22,54
Δi_f , кА		1,43	1,59	2,08	2,25
S , о.е.		$0.25S_{nom}$	$0.5S_{nom}$	$0.75S_{nom}$	S_{nom}

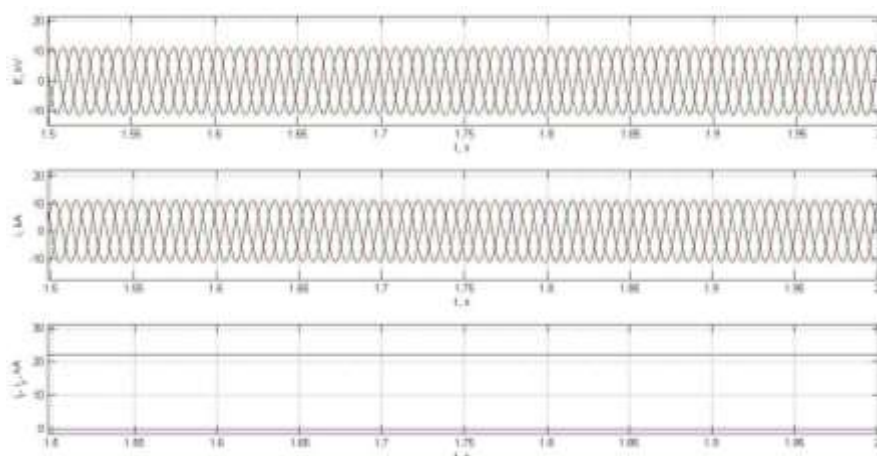


Рис. 6. Результаты расчетов при моделировании с учетом насыщения
в нормальном установившемся режиме и $S = S_{nom}$

Fig. 6. Calculation results when modeling with allowance for saturation
in the normal steady state mode and $S = S_{nom}$

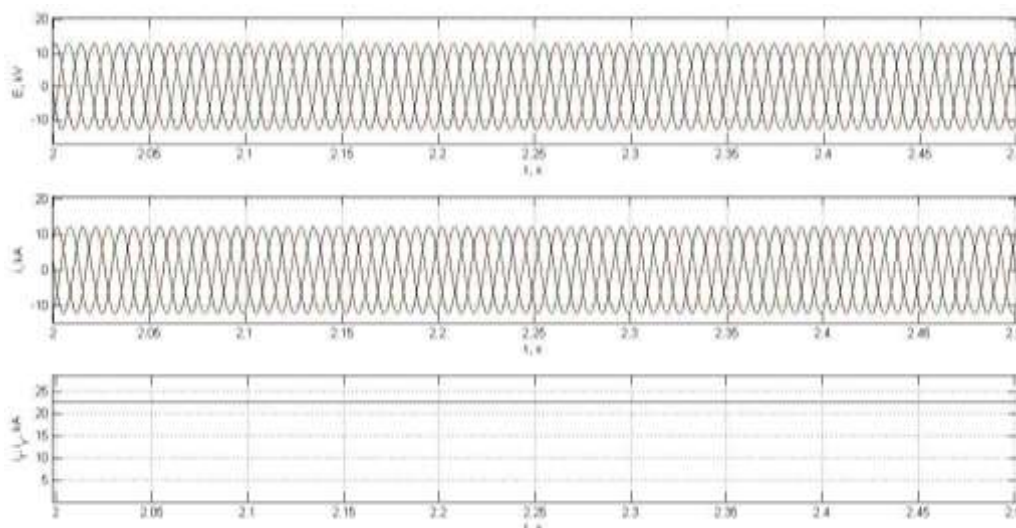


Рис. 7. Результаты расчетов при моделировании без насыщения

в нормальном установившемся режиме и $S = S_{nom}$

Fig. 7. Calculation results when modeling without allowance for saturation

in the normal steady state mode and $S = S_{nom}$

Выводы

Полученные в ходе исследования результаты анализа влияния демпферных обмоток и насыщения магнитной системы на условия протекания переходных процессов в расчетной модели генератора свидетельствуют о полноте и достоверности предлагаемого численного метода моделирования.

Реализованная математическая модель дает возможность рассматривать влияние несимметрии фазных контуров статора и насыщения магнитной системы при моделировании синхронной машины, что позволяет корректней оценивать результаты различных режимов работы генератора и своевременно выявлять аварийные режимы.

В перспективе предлагаемый метод позволит использовать результаты расчетов переходных процессов синхронной машины для анализа работы и создания новых алгоритмов релейной защиты генераторов электростанций.

Библиографический список

1. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. М.: Энергия, 1970. 518 с.
2. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2013. 288 с.
3. Сивокобыленко В. Ф. Математическое моделирование синхронной машины с многоконтурным ротором в фазных координатах. Техническая электродинамика. 2015. № 1. С. 51–58.
4. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем. М.: Энергия, 1979. 456 с.
5. Харитонов С.А. Электромагнитные переходные процессы в системах генерирования электрической энергии для автономных объектов: монография. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. 536 с.
6. Глазырин Г.В. Моделирование переходных процессов синхронной машины с несимметрией фазных обмоток статора // Вестник МЭИ. 2017. № 5. С. 34–39.
7. Горев А.А. Переходные процессы синхронной машины. Л.: Наука, 1985. 502 с.
8. Мэтьюз Д.Г., Финк К.Д. Численные методы. Использование MATLAB. 3-е изд. / Пер. с англ. М.: ИД "Вильямс", 2001. 720 с.
9. Турчак Л.И. Основы численных методов. М.: Наука, 1987. 318 с.
10. Файзиев М.М., Курбанов Н.А., Имомназаров А.Б., Бекишев А.Э. Моделирование пуска асинхронных двигателей в MATLAB // Вестник науки и образования. 2017. Т. 1. № 3 (27). С. 42–47.
11. Субботина В.А., Тюленев М.Е. Simulink – модель для исследования пуска синхронного двигателя при пони-



- женном напряжении // Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2014. № 11. С. 102–109.
12. Федий К.С., Встовский С.А., Полошков Н.Е. Моделирование переходных процессов в торцевом синхронном генераторе в пакете MATLAB // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2017. № 10 (5). С. 691–698.
13. Demiroren A., Zeynelgil H.L. Modelling and simulation of synchronous machine transient analysis using SIMULINK // International Journal of Electrical Engineering Education. 2002. 39/4. С. 337–346.
14. Hafnaoui I., Ayari R., Nicolescu G., Beltrame G. A simulation-based model generator for software performance estimation: SCSC '16 Proceedings of the Summer Computer Simulation Conference. USA, 2016. doi:10.22360/summersim.2016.scsc.025

References

1. Ulyanov S.A. *Elektromagnitnyye perehodnyye protsessy v elektricheskikh sistemah* [Electromagnetic transients in electrical systems]. Moscow: Energiya, 1970. 518 p.
2. *Modelirovanie elektrotehnicheskikh ustroystv v MATLAB. SimPowerSystems i Simulink*. [Simulation of electrical devices in MATLAB. SimPowerSystems and Simulink]. Moscow: DMK Press Publ., 2013. 288 p.
3. Sivokobylenko V. F. Mathematical modeling of synchronous machine with a multi-contour rotor in phase coordinates. *Tekhnicheskaya elektrodinamika* [Technical Electrodynamics]. 2015. no. 1. pp. 51–58.
4. Zhdanov P.S. *Voprosy ustoychivosti elektricheskikh sistem* [The sustainability of electrical systems]. Moscow: Energiya Publ., 1979. 456 p.
5. Haritonov S.A. *Elektromagnitnyye perehodnyye protsessy v sistemah generirovaniya elektricheskoy energii dlya avtonomnykh ob'ektov: monografiya* [Electromagnetic transients in electrical energy generation systems for stand-alone objects: a monograph]. Novosibirsk: NGTU Publ., 2011. 536 p.
6. Glazyrin G. V. Simulation of transients in a synchronous machine having asymmetry in the stator phase windings. *Vestnik MEI* [Vestnik MEI]. 2017, no. 5, pp. 34–39.
7. Gorev A.A. *Perehodnyye protsessy sinhronnoy mashiny* [Transients of the synchronous machine]. L.: Nauka, 1985. 502 p.
8. Metyuz D.G., Fink K.D. *Chislennyye metody. Ispolzovanie MATLAB* [Numerical methods. Use of MATLAB]. Moscow.: Vilyams Publ., 2001. 720 p.
9. Turchak L.I. *Osnovy chislennykh metodov* [Fundamentals of numerical methods]. M.: Nauka, 1987. 318 p.
10. Fayziev M.M., Kurbanov N.A., Imomnazarov A.B., Bekishev A.E. Modeling start asynchronous motor in MATLAB. *Vestnik nauki i obrazovaniya* [Bulletin of Science and Education]. 2017, no. 3 (27), pp. 42–47.
11. Subbotina V.A., Tyulenev M.E. *Simulink model for research of the start of the synchronous motor at reduced voltage. Elektrotehnika, informatsionnyye tehnologii, sistemy upravleniya* [PNRPU Bulletin. Electrotechnics, Informational Technologies, Control Systems]. 2014, no. 11, pp. 102–109.
12. Fediy K.S., Vstovskiy S.A., Poloshkov N.E. Simulation of transients in the end synchronous generator in Matlab package. *Zhurnal Sibirskogo federalnogo universiteta. Tekhnika i tehnologii* [Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies]. 2017. no. 10 (5). pp. 691–698.
13. Demiroren A., Zeynelgil H.L. Modelling and simulation of synchronous machine transient analysis using SIMULINK. *International Journal of Electrical Engineering Education*. 2002, 39 (4), pp. 337–346.
14. Hafnaoui I., Ayari R., Nicolescu G., Beltrame G. A simulation-based model generator for software performance estimation: SCSC '16 Proceedings of the Summer Computer Simulation Conference. USA, 2016.

Критерии авторства

Глазырин Г.В., Митрофанов Н.А. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Glazyrin G.V., Mitrofanov N.A. 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 681.532.63

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-11-112-125>

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ГРУЗОПОРШНЕВОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ДАТЧИКОВ АБСОЛЮТНОГО ДАВЛЕНИЯ

© А.В. Марков¹

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,
190005, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д. 1.

РЕЗЮМЕ. Цель – разработка математической модели автоматического задатчика давления, построенного на основе грузопоршневого манометра как измерительная основа автоматизированной грузопоршневой системы контроля качества датчиков абсолютного давления. Исследования включают теории автоматического управления и моделирования систем, а также основные законы и положения газовой динамики. Результаты теоретических исследований процессов течения воздуха с постоянными перепадами давлений через дросселирующие участки автоматического задатчика давления представлены в математической модели, установлены основные параметры газодинамических процессов, протекающих в замкнутом объеме, в котором задается абсолютное давление воздуха. Установлено, что величина задаваемого абсолютного давления в основном зависит от конструктивных особенностей автоматического задатчика давления, т.е. от параметров неуплотненного поршня, который с автоматического задатчика давления выполняет функции как регулирующего органа, так и чувствительного элемента системы автоматического регулирования давления. Это позволило с автоматического задатчика давления реализовать фундаментальный принцип измерения давления. Учитывая результаты теоретических исследований вопросов течения воздуха и конструктивные особенности автоматического задатчика давления, разработана математическая модель автоматического задатчика давления, позволяющая с точностью необходимой при проектировании автоматизированных систем контроля описывать динамические процессы в замкнутом объеме. Математическая модель приведена к расчетному уровню и может быть использована для решения задач проектирования автоматизированных грузопоршневых систем контроля качества датчиков абсолютного давления, в которых могут быть реализованы современные методы контроля.

Ключевые слова: измерения давления, задание давления, автоматизированный контроль, грузопоршневой манометр, неуплотненный поршень, датчики давления

Информация о статье: Дата поступления 13 августа 2018 г.; дата принятия к печати 30 октября 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 ноября 2018 г.

Для цитирования: Марков А.В. Математическая модель автоматизированной грузопоршневой системы контроля качества датчиков абсолютного давления. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(11):112–125. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-112-125.

A MATHEMATICAL MODEL OF AUTOMATED DEADWEIGHT PRESSURE SYSTEM FOR QUALITY CONTROL OF ABSOLUTE PRESSURE SENSORS

Andrey V. Markov

Baltic State Technical University VOENMEKh named after D.F. Ustinov,
1, First Krasnoarmeiskaya St., St. Petersburg 190005, Russian Federation

ABSTRACT: The purpose of the article is to provide a mathematical model for the automated pressure selector (APS) designed on the basis of a deadweight pressure gauge tester as a measuring basis of an automated deadweight pressure system for quality control of absolute pressure sensors. The research uses the methods of automated control theory, system modeling, and the basic principles and postulates of gas dynamics. The results of theoretical research of air-

¹Марков Андрей Валентинович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой И2 «Инжиниринг и менеджмент качества», e-mail: markov-av@mail.ru

Andrey V. Markov, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department I2 of Engineering and Quality Management, e-mail: markov-av@mail.ru



flow processes with continuous pressure differentials through the throttling sections of the automated pressure selector are presented in the mathematical model. The main parameters of gas dynamic processes occurring in a closed volume where the absolute air pressure is set are determined. It is found that the value of the set absolute pressure mainly depends on the design characteristics of the APS, i.e., on the parameters of the free piston, which performs the functions of both a regulating and sensing element of the automatic pressure control system within the APS. This allowed to implement the fundamental principle of pressure measurement in the automated pressure selector. Considering the results of the theoretical researches of airflow issues and APS design features, a mathematical model of the automated pressure selector has been developed allowing to describe dynamic processes occurring in closed volumes with the precision required for designing of automated control systems. The proposed mathematical model is reduced for calculations and can be used for designing of automated deadweight pressure system for quality control of absolute pressure sensors where modern control methods can be implemented.

Keywords: pressure measurement, setting pressure, automated control, dead-weight pressure-gauge tester, free piston, pressure sensors

Information about the article: Received August 13, 2018; accepted for publication October 30, 2018; available online November 30, 2018.

For citation: Markov A.V. A mathematical model of automated deadweight pressure system for quality control of absolute pressure sensors. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(11):pp. 112–125. (In Russian) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-112-125.

Введение

Развитие авиационной техники, постоянное совершенствование метрологических характеристик приборов контроля воздушно-скоростных параметров (ВСП) полета, широкое внедрение информационно-измерительных систем приводят к изменению содержания работ по контролю качества датчиков абсолютного давления [1, 2]. В связи с этим ужесточаются требования к средствам измерений давления воздуха [3–5]. Для повышения эффективности контроля качества датчиков ВСП создаются автоматизированные контрольно-поверочные комплексы. Данные комплексы могут проектироваться на различных физических принципах. Однако реализовать фундаментальный принцип измерения давления могут приборы, построенные на основе грузопоршневого манометра, позволяющие воспроизводить абсолютное давление газа с точностью 20 Па в диапазоне от 0,7 до 100 кПа и 0,01% в диапазоне от 100 до 285 кПа. Автоматизированная грузопоршневая система контроля (АГСК) задает давление воздуха в замкнутом объеме, к которому подключают контролируемый датчик давления, в соответствии с программой контроля. Процесс контроля качества заключается в сравнении выходных сигналов контролируемого датчика и АГСК [6–8].

Практическая реализация АГСК требует проведение теоретических и экспериментальных исследований вопросов течения воздуха через дросселирующие элементы и в замкнутых объемах, а также разработку математической модели автоматического задатчика давления (АЗД) как основного измерительного инструмента АГСК. Таким образом, целью статьи является разработка математической модели АЗД, построенного на основе грузопоршневого манометра.

Конструктивные особенности автоматического задатчика давления

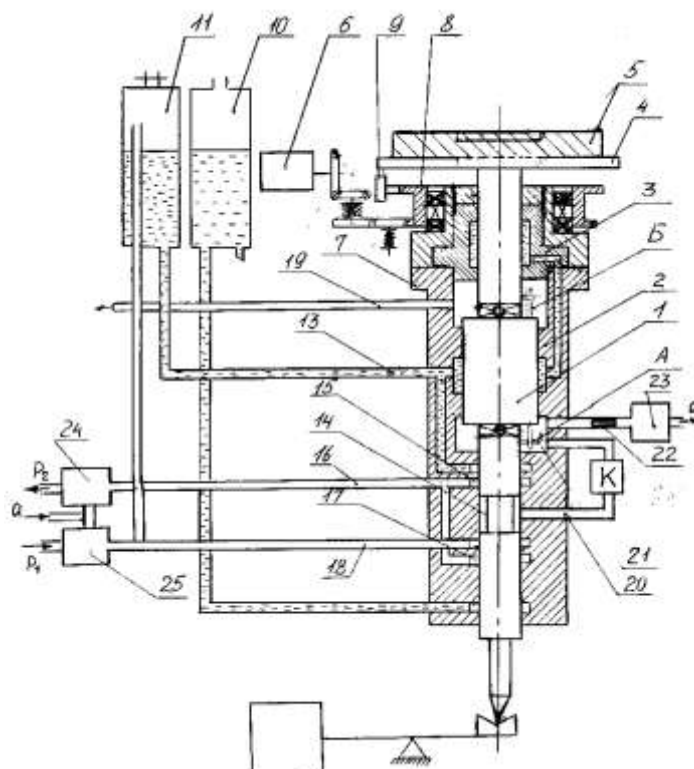
АЗД, построенный на основе грузопоршневого манометра с неуплотненным поршнем, обладает следующими особенностями конструкции (рисунок):

- наличие системы автоматического регулирования, обеспечивающей воспроизведение и стабилизацию давления на уровне, определяемом массой грузов 5 на грузоприемной платформе 4 неуплотненного поршня 1;
- применение дифференциальной поршневой пары с рычажным уравниванием, обеспечивающей возможность работы в режиме задания как абсолютного, так и относитель-



ного давления.

Основными узлами прибора являются: измерительно-регулирующая колонка и уравнивающий механизм.



Функциональная схема автоматического задатчика давления
Functional diagram of an automatic pressure selector

Грузопоршневая измерительно-регулирующая колонка прибора состоит из сборной нижней части – цилиндра 2, верхней части – цилиндра 3 и вращающегося в них неуплотненного дифференциального поршня 1 с грузоприемной платформой 4. Конструкция поршня также сборная, состоит из трех соосных, шарнирно-связанных прямых поршней, образующих своими уступами измерительную камеру А и камеру опорного давления Б. Сборная конструкция поршня применена для упрощения технологии его изготовления. На грузоприемную платформу накладываются выполненные тарированные пропорционально приведенной площади поршня грузы 5. Такой способ нагружения позволяет задавать дискретные различные значения давления в произвольной последовательности.

Для уменьшения механического трения между поршнем и цилиндрами, поршень приводится во вращение, обеспечиваемое кинематической связью приводного двигателя 6 через шестеренчатый редуктор, втулки 7 и 8, поводковое устройство 9 с грузоприемной платформой 4, жестко связанной с поршнем. Поводковое устройство 9 обеспечивает свободное перемещение поршня вдоль вертикальной оси. Трение в поводковом устройстве настолько мало, что при оценке погрешности работы прибора его можно не учитывать.

Для уравнивания массы поршня с грузоприемной платформой применено уравнивающее рычажное устройство с размещением на нем рейтерных грузов. Кроме этого уравнивающий механизм предназначен для обеспечения нулевого начала отсчета.

Для устранения «сухого» трения в кольцевой зазор между поршнем и цилиндрами 2 и 3 колонки вводится смазка. Смазка обеспечивается введением:

– масленки 10, в которой масло находится под атмосферным давлением:



- масленки 11 с маслом, находящимся под давлением питания;
- системы масляных каналов 12 с внешним маслопроводом, обеспечивающих смазку в верхнем и нижнем цилиндрах колонки под атмосферным давлением.

Система автоматического регулирования реализует принцип прямого регулирования, при котором неуплотненный поршень является измерительным и исполнительным элементом системы автоматического регулирования давления, что упрощает конструкцию АЗД.

Система автоматического регулирования расположена в нижней части поршневой пары и в ее состав входят:

1. регулирующий дроссель, состоящий из:
 - проточки 14 на поршне;
 - двух выточек 15 и 17 на внутреннем цилиндре колонки, которые через каналы 16 и 18 связаны с вакуумным насосом $P_{сб}$ (источник разрежения) и с источником давления $\Gamma_{пит}$ (источник питания) соответственно;
 - входного канала 20;
2. камера обратной связи А с пневмоклапаном и каналом 22;
3. ресивер 23, к которому подключаются контролируемые датчики давления.

Универсальность АЗД, возможность применения его в качестве задатчика как избыточного, так и абсолютного давления, обеспечивается наличием поршневой камеры опорного давления Б. При задании избыточного давления выходной канал 19 камеры опорного давления соединяется с атмосферой.

Для обеспечения задания абсолютного давления надпоршневую камеру опорного давления через канал 19 присоединяют к отдельному форвакуумному насосу и тем самым схема подготовлена к заданию абсолютного давления.

Работа системы автоматического регулирования давления протекает следующим образом. При наложении на грузоприемную платформу 4 поршня 1 груза 5, поршень опускается на нижний упор. В этом положении давление от компрессора через канал 18, выточку 17, проточку 14 и трубопровод 20 поступает в камеру обратной связи 21 и далее через трубопровод 22 в рабочий объем 23. По мере повышения давления в рабочем объеме 23 растет поддерживающая сила в камере обратной связи 21, и в момент, когда сила давления в этой камере станет примерно равной весу грузов, поршень начнет подниматься вверх к положению равновесия и перекрывать выточку 17, связанную каналом 18 с источником давления. Если в момент прихода поршня к равновесию давление в объемах 21 и 23 будет равно заданному тарированным грузом, а скорость поршня равна нулю, то на этом процесс регулирования закончится. Если же давление в этих объемах будет несколько больше заданного, то поршень пройдет положение равновесия, сбросит давление через приоткрывшийся клапан 15 и вернется к положению равновесия.

Характер переходного процесса установления давления при выбранных конструктивных параметрах элементов схемы регулирования давления определяется величиной объема ресивера и демпфирующими свойствами смазочной жидкости, заполняющей зазоры между поршнем и цилиндром. Выбор этих факторов обеспечивает установление давления в рабочем объеме по закону близкому к аperiodическому.

Для улучшения процесса задания давления воздуха в конструкции АЗД применено устройство стабилизации перепадов давления - пневморегуляторы 24 и 25, которые являются устройствами автоматического регулирования для задания постоянных перепадов давлений пневмопитания высокого и низкого (вакуума) на проточках соответственно 17 и 15 (см. рисунок) цилиндра поршневой пары, образующих вместе с проточкой 14 на поршне регулирующий орган системы автоматического регулирования давления.

Каждый пневморегулятор имеет:

- нагруженный задающей пружиной упругий чувствительный элемент (мембрану), разделяющий корпус регулятора на управляющую и рабочую полости и имеющий возможность



смещения от своего равновесного положения;

- входной канал;
- клапанное устройство.

Причем управляющие полости обоих пневморегуляторов пневматически соединены с ресивером, а рабочие полости пневморегуляторов впуска и выпуска соединены пневматически с впускным и выпускным клапанами соответственно, а их входные каналы с источниками высокого и низкого давления соответственно. Клапанное устройство каждого пневморегулятора имеет подвижный запорный элемент, кинематически связанный с упругим чувствительным элементом пневморегулятора, при этом рабочая полость пневматически связана либо с входным каналом, либо с управляющей полостью в зависимости от направления смещения упругого чувствительного элемента от равновесного положения, в котором рабочая полость, управляющая полость и входной канал пневматически разобщены запорным элементом.

Применение пневморегуляторов позволяет повысить точность и расширить диапазон задаваемых давлений, так как обеспечение с помощью пневморегуляторов достаточно малых, близких к равным величинам перепадов давления на дросселирующих участках от проточки 17 к проточке 14, от проточки 14 к проточке 15 поршневой пары образующих регулирующий орган, позволяет достичь близких к равным расходов через дросселирующие участки и симметрию расходных характеристик при регулировании давления. При этом значительно снижены максимальные величины расходов через регулирующие элементы поршневой пары в каналах предварительного регулирования (для нелинейной модели).

Уравнение динамики системы автоматического регулирования давления

Принцип действия системы автоматического регулирования давления (САР) иллюстрируется функциональной схемой (см. рисунок).

Уравнение поступательного движения поршня может быть записано следующим образом:

$$m_x \frac{d^2 x}{dt^2} = \sum F_i, \quad (1)$$

где m_x – приведенная масса подвижных частей АЗД; x – перемещение поршня; $\sum F_i$ – сумма всех сил, приложенных к поршню в равновесном положении системы.

Величина приведенной массы может быть определена выражением:

$$m_x = m_0 + \frac{Q_x}{g}, \quad (2)$$

где m_0 – приведенная масса без учета массы грузов; Q_x – вес грузов; g – ускорение свободного падения.

Сумма всех сил, приложенных к поршню в равновесном положении, будет равна

$$\sum F_i = Q_x + q + P_0 \cdot S'_2 + P_\sigma \cdot S'_1 - N_x - P_y \cdot S''_2 - P_\sigma \cdot S''_1 - F_{ж.т}, \quad (3)$$

где q – вес поршня; P_0 – абсолютное давление в камере Б; P_σ – барометрическое давление; P_y – абсолютное давление в камере А; S'_1 – эффективная площадь верхнего торца поршня; S''_1 – эффективная площадь нижнего торца поршня; S'_2 – эффективная площадь дифференциальной части поршня в камере Б; S''_2 – эффективная площадь дифференциальной части



поршня в камере А; N_x – реакция рычажного противовеса; $F_{ж.т}$ – сила жидкостного трения.

Сила жидкостного трения вычисляется по формуле

$$F_{ж.т} = \nu \frac{dx}{dt}, \quad (4)$$

где ν – коэффициент вязкости жидкости.

Реакция рычага при малых углах отклонения может быть записана в виде:

$$N_x = N + Cx, \quad (5)$$

где N – реакция противовеса $\mathcal{S}$ при $x=0$; C – жесткость гравитационной пружины рычага.

В выбранном положении равновесия при настройке АЗД можно обеспечить выполнение равенства:

$$q = N + Cx_0. \quad (6)$$

Тогда

$$q - N_x = C(x_0 - x). \quad (7)$$

При разработке технологии изготовления поршня АЗД необходимо обеспечить выполнение условий:

$$\begin{cases} S'_1 = S''_1 = S_1 \\ S'_2 = S''_2 = S_2 \end{cases} \quad (8)$$

При работе АЗД в режиме задания абсолютного давления из камеры Б воздух откачивается, т.е. $P_0 = 0$.

Тогда с учетом выполнения соотношений (5)–(8) и при условии

$$\begin{cases} Q_x = Q_{xi} = const \\ m_x = m_{xi} = const \\ P_0 = 0 \end{cases} \quad (9)$$

уравнение (1) примет следующий вид:

$$m_{xi} \frac{d^2x}{dt^2} + \nu \frac{dx}{dt} + Cx = Q_{xi} - P_y S_2 + Cx_0. \quad (10)$$

При $X = X_i = const$ и $P_y = P_{yi} = const$ получим уравнение статики:

$$P_{yi} S_2 = Q_{xi} - C(x_i - x_0). \quad (11)$$

Изменение и стабилизация давления на уровне, определенном уравнением (11) происходит за счет изменение расходных дросселирующих участков трубопроводов 18 и 16.



Введем обозначения: G_1 и G_2 – весовые секундные расходы воздуха от канала 18 до проточки 14 и от проточки 14 до канала 16 соответственно; G_3 – весовой секундный расход воздуха через дроссель 22.

Уравнение изменения давлений P_x и P_y могут быть получены при рассмотрении условий наполнения (опустошения) объемов V_x и V_y через дроссели переменного сечения регулирующего элемента САР (необходимо рассматривать условия равновесия газа через дроссели).

Используем уравнение состояния газа для объема V :

$$PV = q_{11}RT, \quad (12)$$

где P – абсолютное давление; V – объем; q_{11} – весовое количество газа в объеме; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура.

Продифференцируем обе части уравнения (12) по времени:

$$\frac{dq_{11}}{dt} = \frac{V}{RT} \cdot \frac{dP}{dt}. \quad (13)$$

Предполагая процессы истечения воздуха через дроссели квазистационарными, что допустимо при относительно медленном перемещении инерционной массы поршня, можно записать:

$$\frac{dq_{11}}{dt} = \sum G, \quad (14)$$

где $\sum G$ – алгебраическая сумма весовых расходов через дроссели в данный объем.

Подставляя (14) в (13) для объема камеры А получим уравнение изменения:

$$\frac{V_y}{RT} \cdot \frac{dP_y}{dt} = G_1 - G_2 - G_3. \quad (15)$$

где G_1 , G_2 и G_3 – весовые расходы воздуха через дроссели 25, 24 и 23 соответственно.

Аналогично получим уравнение изменения давления для объема камеры 23 V_x , где задается абсолютное давление воздуха и куда подключаются контролируемые датчики давления:

$$\frac{V_x}{RT} \cdot \frac{dP_x}{dt} = G_3. \quad (16)$$

При составлении уравнений (15) и (16) пренебрегали пневматическим сопротивлением участка трубопровода, соединяющего проточку 14 с камерой А, полагая объем V_y включающим в себя также объем проточки 14 и объем трубопровода. Полагаем также, что $V_y = const$, т.е. перемещение поршня не сказывается существенно на величине V_y . Эти допущения должно обеспечиваться конструкцией АЗД. Сопротивление участка трубопровода, связывающего камеры А и 23 учтено, т.к. при малых величинах V_y и больших V_x при принятой схеме



соединения объемов может иметь место значительное опережение установления давления P_y в объеме А даже при малом пневматическом сопротивлении дросселя 22.

При выводе вышеуказанных уравнений процесс изменения давлений в объемах V_x и V_y полагался изотермическим. Можно показать, что при небольших относительных изменениях давления $\Delta P / P$ в объеме V для реально имеющего место политропического процесса с показателем политропы $1 < n < 1,4$ в уравнениях вида (15) и (16) изменяются коэффициенты $\tau^* = \frac{V}{RT}$, а именно:

$$\tau = \frac{\tau^*}{n}, \quad (17)$$

т.е. можно проверить полученные результаты при предельных значениях τ согласно уравнению (17).

Расходные характеристики дросселей G_1 , G_2 , G_3 могут быть связаны с перемещением поршня и величинами давлений на входе и выходе дросселей, т.е.

$$\begin{cases} G_1 = G_1(P_1, P_y, X) \\ G_2 = G_2(P_y, P_2, X) \\ G_3 = G_3(P_y, P_x) \end{cases} \quad (18)$$

Тогда динамика системы АД может быть описана следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} m_{xi} \frac{d^2 x}{dt^2} + \nu \frac{dx}{dt} + Cx = Q_{xi} - P_y S_2 + Cx_0 \\ \tau_y \frac{dP_y}{dt} = G_1(P_1, P_y, x) - G_2(P_y, P_2, x) - G_3(P_y, P_x) \\ \tau_x \frac{dP_x}{dt} = G_3(P_y, P_x) \end{cases} \quad (19)$$

Расход G_1 (G_2) может быть рассчитан по формуле Пуазейля для кольцевого щелевого дросселя при ламинарном течении воздуха:

$$G_1 = G_2 = B(P_1 - P_y), \quad (20)$$

где

$$B = \frac{\pi \cdot 2 \cdot r \cdot \delta^3 \cdot \rho \cdot g}{12 \cdot \mu \cdot l}. \quad (21)$$

В выражении (21) введены следующие обозначения: r – радиус поршня; δ – зазор между поршнем и цилиндром; ρ – плотность воздуха; μ – динамическая вязкость воздуха;



l – длина щели.

Формула (20) с достаточной точностью описывает истечение газа через дроссель при малом перепаде давления на дросселе по сравнению со средним значением давления, т.е. при условии, когда плотность воздуха может быть принята постоянной. При больших перепадах давления на дросселе выражение (20) даст большое расхождение с экспериментальными расходными характеристиками. При ламинарном истечении с большими перепадами давления можно принять:

$$\rho = \rho_{cp} = \frac{P_1 + P_y}{2gRT}. \quad (22)$$

Тогда выражение (20) примет следующий вид:

$$G_1 = G_2 = \frac{K}{2 \cdot l} (P_1^2 - P_y^2), \quad (23)$$

где

$$K = \frac{2\pi R \delta^3}{12\mu RT}; \quad K' = \frac{K}{2}$$

Уравнение (23) справедливо для установившегося расхода.

В динамическом режиме $G_1 - G_2 = \Delta G \neq 0$.

При квазистационарных процессах расходы через дроссели G_1 и G_2 могут быть записаны:

$$\begin{cases} G_1 = \frac{K'}{l-x} \cdot (P_1^2 - P_y^2) \\ G_2 = \frac{K'}{l+x} \cdot (P_y^2 - P_2^2) \end{cases} \quad (24)$$

На дросселе 13 перепад давления во всех режимах мал по сравнению с величинами давлений P_x и P_y , поэтому для определения G_3 допустимо воспользоваться формулой Пуазейля для ламинарного истечения вязкой жидкости по трубам. С учетом зависимости (22) получим:

$$G_3 = B_3 \cdot (P_y^2 - P_x^2), \quad (25)$$

где $B_3 = \frac{\pi}{128\mu RT} \cdot \frac{d_3^4}{2l_3}$; d_3 - диаметр дросселя 22; l_3 - длина дросселя 22.

Подставив выражения (24) и (25) в уравнения (19) получим уравнения статического равновесия системы АД:



$$\begin{cases} Cx_i = Q_{xi} - P_{yi}S_2 + Cx_0 \\ \frac{K'}{l - X_i} \cdot (P_1^2 - P_{yi}^2) = \frac{K'}{l + X_i} \cdot (P_{yi}^2 - P_2^2) - B_3(P_{yi}^2 - P_{xi}^2) = 0 \\ B_3(P_{yi}^2 - P_{xi}^2) = 0 \end{cases} \quad (26)$$

При $P_1 = const$ и $P_2 = const = 0$ система уравнений (26) может быть записана следующим образом:

$$\begin{cases} P_{yi} = \frac{Q_{xi}}{S_2} - \frac{C}{S_2} \cdot (x_i - x_0) \\ X_i = l \cdot \left(2 \frac{P_{yi}^2}{P_1^2} - 1 \right) \\ P_{xi} = P_{yi} \end{cases} \quad (27)$$

Используя эту систему можно оценить статическую ошибку задания давления системы АРД:

$$Q_{pxi} = P_{xi} - \frac{Q_{xi}}{S_2} = \pm \frac{C}{S_2} \cdot \left(l \cdot \left(2 \frac{P_{yi}^2}{P_1^2} - 1 \right) - x_0 \right) \quad (28)$$

Выражение (28) может рассматриваться как приближительная оценка, т.к. выражение (24), которое использовалось при выходе (28) может не совпадать с экспериментальным. Ошибка регулирования Q_{xi} может быть определена экспериментально и учтена как статическая ошибка, соответствующей поправкой в задаваемое значение давления.

Определив из (27) значения переменных $P_{xi} = P_{yi}$ и $x = x_i$, запишем систему уравнений АРД в отклонениях от равновесного положения.

Обозначив $\Delta P_x = P_x - P_{xi}$; $\Delta P_y = P_y - P_{yi}$; $\Delta x = x - x_i$, получим:

$$\begin{cases} m_{xi} \frac{d^2 \Delta x}{dt^2} + \nu \frac{d \Delta x}{dt} + C \cdot \Delta x = -S_2 \cdot \Delta P_y \\ \tau_y \frac{d \Delta P_y}{dt} = -(K_{px} + K_{py}) \cdot \Delta P_y + K_{px} \cdot \Delta P_x + K_x \cdot \Delta x + F_x(\Delta P_x, \Delta P_y, x) \\ \tau \frac{d \Delta P_x}{dt} = K_{px} \cdot \Delta P_y - K_{px} \cdot \Delta P_x + F_y(\Delta P_x, \Delta P_y), \end{cases} \quad (29)$$

где F_x , F_y – сумма членов разложения в степенной ряд функций $\Delta G = G_1 - G_2$ и G_3 , зависящих от отклонений переменной в степени выше первой.



$$K_{py} = \left| \frac{\partial \Delta G}{\partial P_y} \right| > 0$$

$$K_{py} = \left| \frac{\partial \Delta G_3}{\partial P_x} \right| = \left| \frac{\partial G_3}{\partial P_y} \right| > 0$$

$$K_x = \left| \frac{\partial \Delta G}{\partial X} \right|$$

Полученные уравнения (29) являются линейными относительно отклонений ΔP_x , ΔP_y , ΔX , $\Delta P'_x$, $\Delta P'_y$, $\Delta x'$, $\Delta x''$ с постоянными коэффициентами.

Отбрасывая в (29) члены порядка малости выше первого, применив преобразование Лапласа при нулевых начальных условиях, опуская знак Δ перед соответствующими переменными, обозначив $K_{px} = \lambda_x$, $K_{py} = \lambda_y$, $K_x = \lambda_l$, получим:

$$\begin{cases} \left(\frac{m_{xi}}{C} p^2 + \frac{\nu}{C} p + 1 \right) x = -\frac{S_2}{C} P_y \\ \tau_y p \cdot P_y + \lambda_y P_y + \lambda_x P_y = \lambda_l X + \lambda_x P_x \\ \tau_x p \cdot P_x + \lambda_x P_x = \lambda_x P_y \end{cases} \quad (30)$$

Группируя необходимые члены в системе (30) получим:

$$\begin{cases} \left(\frac{m_{xi}}{C} p^2 + \frac{\nu}{C} p + 1 \right) x = -\frac{S_2}{C} P_y \\ \left(\frac{\tau_y}{\lambda_x + \lambda_y} p + 1 \right) \cdot P_y = \frac{\lambda_l}{\lambda_x + \lambda_y} \left(x + \frac{\lambda_x}{\lambda_l} P_x \right) \\ P_y = \left(\frac{\tau_x}{\lambda_x} p + 1 \right) \cdot P_x \end{cases} \quad (31)$$

Преобразуем систему уравнений. Исключим из второго уравнения члены, содержащие P_y . Тогда систему можно переписать:

$$\begin{cases} \left(\frac{m_{xi}}{C} p^2 + \frac{\nu}{C} p + 1 \right) x = -\frac{S_2}{C} P_y \\ \left[\frac{\tau_x}{\lambda_x} \cdot \frac{\tau_y}{\lambda_y} p^2 + \left(\frac{\tau_x}{\lambda_y} + \frac{\tau_x}{\lambda_x} + \frac{\tau_y}{\lambda_y} \right) \cdot p + 1 \right] \cdot P_x = \frac{\lambda_l}{\lambda_y} \cdot x \\ P_y = \left(\frac{\tau_x}{\lambda_x} p + 1 \right) \cdot P_x \end{cases} \quad (32)$$



На всех этапах преобразования следует учитывать, что отклонения обозначены также, как и переменные. Введем некоторые обозначения, учитывая следующие условие:

$$\frac{\nu}{C} \gg \frac{m_{xi}}{C}, \quad \tau_x \gg \tau_y, \quad \lambda_x \gg \lambda_y.$$

Введем обозначения:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_1 = \frac{\tau_x}{\lambda_y} + \frac{\tau_y}{\lambda_x} \cong \frac{\tau_x}{\lambda_y} \\ T_2 = \frac{\nu}{C} + \frac{m_{xi}}{C} \cong \frac{\nu}{C} \\ T_3 = \frac{m_{xi}}{\nu} \\ T_4 = \frac{\tau_y}{\lambda_x} \\ T_5 = T_k = \frac{\tau_x}{\lambda_x} \\ K = K_p \cdot K_x \\ K_p = \frac{S_2}{C} \\ K_x = \frac{\lambda_l}{\lambda_y} \end{array} \right. \quad (33)$$

Следовательно, получим систему:

$$\left\{ \begin{array}{l} (T_2 p + 1)(T_3 p + 1) \cdot X = -K_p P_y \\ (T_1 p + 1)(T_4 p + 1) P_x = K_x X \\ P_y = (T_k p + 1) P_x \end{array} \right. \quad (34)$$

В данном случае $T_1 \gg T_4$ и $T_2 \gg T_3$, т.е. можно записать, что $T_1 > T_2 \gg T_3 > T_4$ (постоянные времени пронумерованы в порядке их убывания).

Предлагаемая в работе математическая модель учитывает использование в конструкции АЗД пневморегуляторов постоянного перепада давлений 24 и 25 (рис. 1).

Необходимо отметить, что для разработки математической модели пневматической части АЗД должна использоваться полная система уравнений газовой динамики [9, 10]. Однако решение такой системы уравнений в общем виде представляет сложную задачу. Вместе с тем в большинстве практически важных случаев, связанных с проектированием автоматизированных систем контроля качества датчиков абсолютного давления, могут быть обоснованы и применены допущения, приводящие к упрощению математической модели:

- течение воздуха происходит при малых перепадах давлений, следовательно, можно не учитывать изменения плотности воздуха, связанное с изменением давления;
- различие расходных характеристик на дросселирующих участках на неустановившихся режимах работы пренебрежимо мало по сравнению со статическими условиями;
- разностью давлений в различных точках камеры можно пренебречь;
- некоторыми процессами изменения параметров воздушной среды в камере можно пренебречь (например, не учитывались условия теплопередачи через стенки);



– при исследовании переходных процессов в камерах в ряде случаев допустимо использование линеаризованных характеристик расхода воздуха через дросселирующие участки.

Выводы

Кроме простоты автоматизации процесса контроля качества датчиков давления, достоинством предлагаемой конструкции автоматизированной грузопоршневой системы контроля качества датчиков абсолютного давления является то, что в данном случае реализован фундаментальный принцип измерения давления, что обеспечивает достаточно точные и надежные измерения. Предлагаемая математическая модель автоматизированной грузопоршневой системы контроля качества датчиков абсолютного давления приведена к расчетному уровню и может быть использована для решения практических задач проектирования подобных систем, в которых могут быть реализованы современные методы контроля качества датчиков давления [11–15].

Библиографический список

1. Марков А.В. Проблемы и пути модернизации систем контроля качества датчиков абсолютного давления // Век качества. 2014. № 4. С. 30–32.
2. Марков А.В. Концепция систем контроля качества средств измерений абсолютного давления // Век качества. 2015. № 1. С. 34–35.
3. Пушков С.Г., Ловицкий Л.Л., Корсун О.Н. Аэродинамические погрешности систем измерения статического давления самолета при полете в режимах скольжения // Измерительная техника. 2018. № 2. С. 37–42.
4. Пушков С.Г., Горшкова О.Ю., Корсун О.Н. Математические модели погрешностей бортовых измерений скорости и угла атаки на режимах посадки самолета // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 18. С. 66–70.
5. Корсун О.Н., Николаев С.В., Пушков С.Г. Алгоритм оценивания систематических погрешностей измерений воздушной скорости, углов атаки и скольжения в летных испытаниях // Известия РАН. Теория систем управления. 2016. № 3. С. 118–129.
6. Лопарев В.К., Марков А.В., Степанян Н.М., Дрюк В.А. Структура автоматического поверочного комплекса приборов измерения давления воздуха // Информационные технологии на транспорте. Сб. науч. тр., СПб.: Политехника. 2003. С. 220–222.
7. Марков А.В. Проблемы метрологического обеспечения средств измерения давления // Тезисы докладов 61-й научно-технической конференции, посвященной Дню радио, СПбГЭТУ «ЛЭТИ»/ 2006. С. 226–228.
8. Лопарев В.К., Марков А.В., Спиридонов Э.И., Степанян Н.М. Организация поверки частотного датчика давления при соотношении погрешностей поверяемого и эталонного приборов // Методы прикладной математики в транспортных системах: Вып. 6, Сб. науч. тр., СПб.: СПбГУВК. 2002. С. 137–139.
9. Мирская В. А., Назаревич Д. А., Ибавов Н. В. Методика измерения давления на экспериментальной установке для исследования комплекса теплофизических свойств жидкостей и газов // Измерительная техника. 2017. № 9. С. 33–36.
10. Мирская В. А., Ибавов Н. В., Назаревич Д. А. Автоматизированная экспериментальная установка для исследования комплекса теплофизических свойств жидкостей и газов // Теплофизика высоких температур. 2016. Т. 54. № 2. С. 237–242.
11. Сирая Т.Н. Методы обработки данных при измерениях и метрологические модели // Измерительная техника. 2018. № 1. С. 9–14.
12. Коровина О.А. Оценка рисков изготовителя и заказчика при контроле погрешностей измерительных устройств в одной или нескольких точках // Измерительная техника. 2018. № 5. С. 14–17.
13. Данилевич С. Б. Достоверность результатов многопараметрического измерительного контроля // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 4. С. 171–179.
14. Цветков Э.И., Сулоева Е.С. Анализ параметров, определяющих достоверность результатов оценки пригодности средств измерений установленным нормам // Метрология. 2018. № 3. С. 3–13.
15. Чипулис В.П. Выбор оптимального соотношения погрешностей расходомеров для повышения точности косвенных измерений // Измерительная техника. 2018. № 7. С. 46–51.



References

1. Markov A.V. Problems and ways of absolute pressure sensor quality control system modernization. *Vek kachestva* [Age of Quality]. 2014, no. 4, pp. 30–32. (In Russian)
2. Markov A.V. Concept of quality control systems for absolute pressure measuring tools. *Vek kachestva* [Age of Quality]. 2015, no. 1, pp. 34–35. (In Russian)
3. Pushkov S.G., Lovitskii L.L., Korsun O.N. Aerodynamic errors of the systems aimed at measuring the static pressure of an aircraft in the sliding modes of flight. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement Techniques]. 2018, no. 2, pp. 37–42. (In Russian)
4. Pushkov S.G., Gorshkova O.Yu., Korsun O.N. Pushkov S.G., Gorshkova O.Yu., Korsun O.N. Mathematical models of airborne speed and angle of attack measurement error for aircraft landing mode. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automatization, Control]. 2013, no. 18, pp. 66–70. (In Russian)
5. Korsun O.N., Nikolaev S.V., Pushkov S.G. An algorithm for estimating systematic measurement errors for air velocity, angle of attack, and sliding angle in flight testing. *Izvestiya RAN. Teoriya sistem upravleniya* [Journal of Computer and Systems Sciences International]. 2016, no 3, pp. 118–129. (In Russian)
6. Loparev V.K., Markov A.V., Stepanyan N.M., Dryuk V.A. Structure of an automatic calibrating stand of air pressure measuring equipment. *Informatsionnye tekhnologii na transporte*. [Information technologies on transport.]. *Sbornik nauchnykh. trydov* [Collection of scientific papers]. Saint-Petersburg: Politeknika Publ., 2003, pp. 220–222. (In Russian)
7. Markov A.V. Problems of metrological support for pressure measuring instruments. *Tezisy dokladov 61-i nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, posvyashchennoi Dnyu radio* [Abstracts of 61 scientific and technical conference dedicated to the Day of Radio]. Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", 2006. pp. 226–228. (In Russian)
8. Loparev V.K., Markov A.V., Spiridonov E.I., Stepanyan N.M. Organization of frequency pressure sensor calibration under the ratio of errors of the calibrated and reference tools. *Metody prikladnoi matematiki v transportnykh sistemakh* [Methods of applied mathematics in transport systems]. *Sbornik nauchnykh. trydov*. [Collection of research papers]. Saint-Petersburg: Saint Petersburg State University of Water Communications Publ., 2002, pp. 137–139. (In Russian)
9. Mirskaya V.A., Nazarevich D.A., Ibaov N. V. Method of pressure measurement using an experimental setup for investigating a collection of thermophysical properties of liquids and gases. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement Techniques]. 2017, no. 9, pp. 33–36. (in Russian)
10. Mirskaya V.A., Ibaov N.V., Nazarevich D.A. Automated experimental facility to investigate a complex of thermophysical properties of liquids and gases. *Teplofizika vysokikh temperatur*. [High Temperature]. 2016, vol. 54, no 2, pp. 237–242. (In Russian)
11. Siraya T.N. Methods of data processing for measurements and metrological models. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement Techniques]. 2018, no. 1, pp. 9–14. (In Russian).
12. Korovina O.A. Assessment of manufacturer and customer risks when monitoring measuring instrument errors at one or several points. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement Techniques]. 2018, no. 5, pp. 14–17. (In Russian)
13. Danilevich S.B. Reliability of results of multi-parameter measurement control. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Systems of Control, Communication and Security]. 2015, no. 4, pp. 171–179. (In Russian)
14. Tsvetkov E.I., Suloeva E.S. Analysis of the parameters that determine the reliability of the results of conformity assessment of measuring instruments to the requirements. *Metrologiya* [Metrology]. 2018. no. 3. pp. 3–13. (In Russian)
15. Chipulis V.P. Choice of the optimal ratio of flowmeter errors to improve the accuracy of indirect measurements. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement Techniques]. 2018, no, 7, pp. 46–51. (In Russian)

Критерии авторства

Марков А.В. имеет на статью авторские права и несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Markov A.V. has author's rights and bear 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 519.673:658.264

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-11-126-144>

ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС «АНГАРА-ТС» ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ РАСЧЕТА И АНАЛИЗА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ ПРИ УПРАВЛЕНИИ КРУПНЫМИ МНОГОКОНТУРНЫМИ СИСТЕМАМИ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

© Н.Н. Новицкий¹, В.В. Токарев², З.И. Шалагинова³, А.В. Алексеев⁴, О.А. Гребнева⁵,
С.Ю. Баринава⁶

Институт систем энергетики имени Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

РЕЗЮМЕ: Цель – разработка программного комплекса для расчета и анализа функционирования крупных систем централизованного теплоснабжения при управлении режимами. Использованы методы: теория гидравлических цепей; теория графов; системные исследования в энергетике; многоуровневое моделирование; метод узловых давлений для расчетов гидравлических режимов; вычислительная математика; линейная алгебра; методы нелинейного программирования; информационные технологии. Выполнен анализ направлений развития централизованных теплоснабжающих систем в России и в ряде стран Северной Европы. Классифицированы типы режимов работы теплоснабжающих систем, а также цели и задачи их расчета на разных стадиях управления. Предложена адаптация математической модели для решения задачи наладочного расчета и анализа теплогидравлических режимов и особенности ее реализации. Описаны функции и свойства разработанного информационно-вычислительного комплекса «АНГАРА-ТС» и проанализированы его отличия от аналогов. Рассмотрены вопросы актуальности построения многоуровневых компьютерных моделей теплоснабжающих систем иерархической структуры для задач расчета режимов и исследованы возможности графического анализа априорной информации и результатов расчета средствами разработанного инструмента. Автоматизация управления, повышение надежности, экономичности и качества работы теплоснабжающих систем требуют внедрения современных методов математического моделирования и информационных технологий. Расчет теплогидравлических режимов является необходимым элементом оценки реализуемости решений, принимаемых на всех стадиях управления. Разработан информационно-вычислительный комплекс «АНГАРА-ТС» четвертого поколения для решения традиционных и новых задач из области анализа и управления режимами крупных ТСС.

Ключевые слова: теплоснабжающая система, теплогидравлический режим, расчет, графический анализ, компьютерное моделирование, информационно-вычислительный комплекс

¹Новицкий Николай Николаевич, доктор технических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией, e-mail: pienet@isem.irk.ru

Nikolay N Novitsky, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Head of the Laboratory, e-mail: pienet@isem.irk.ru

²Токарев Вячеслав Вадимович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: tslava@isem.irk.ru

Vyacheslav V. Tokarev, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, e-mail: tslava@isem.irk.ru

³Шалагинова Зоя Ивановна, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, e-mail: shalaginova@isem.irk.ru

Zoya I. Shalaginova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Leading Researcher, e-mail: shalaginova@isem.irk.ru

⁴Алексеев Александр Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: alexeev@isem.irk.ru

Aleksandr V. Alekseev, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, e-mail: alexeev@isem.irk.ru

⁵Гребнева Оксана Александровна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры ГСХ Института архитектуры и строительства, e-mail: oksana@isem.irk.ru

Oksana A. Grebneva, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Docent e-mail: oksana@isem.irk.ru

⁶Баринава Стефания Юозовна, ведущий инженер, e-mail: stefa@isem.irk.ru

Stefanija Y. Barinova, Leading Engineer, e-mail: stefa@isem.irk.ru



Благодарность: Исследование выполнено в рамках проекта III.17.4.3 программы фундаментальных исследований СО РАН (AAAA-A17-117030310437-4) при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Иркутской области в рамках научного проекта № 17-48-380021.

Информация о статье: Дата поступления 24 сентября 2018 г.; дата принятия к печати 30 октября 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 ноября 2018 г.

Для цитирования: Новицкий Н.Н., Токарев В.В., Шалагинова З.И., Алексеев А.В., Гребнева О.А., Барина С.Ю. Информационно-вычислительный комплекс «АНГАРА-ТС» для автоматизации расчета и анализа эксплуатационных режимов при управлении крупными многоконтурными системами теплоснабжения. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(11):126–144. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-126-144.

INFORMATION COMPUTING COMPLEX "ANGARA-HS" FOR CALCULATION AND ANALYSIS OF OPERATING CONDITIONS OF LARGE MULTILoop HEAT SUPPLY SYSTEMS UNDER CONTROL

Nikolay N. Novitsky, Vyacheslav V. Tokarev, Zoya I. Shalaginova, Aleksandr V. Alekseev, Oksana A. Grebneva, Stefania Yu. Barinova

Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russian Federation

ABSTRACT: Development of a software package for calculating and operation analyzing of large district heating systems under state control. Theory of hydraulic circuits. Graph the ory. System research in energy. Multilevel modeling. The method of nodal pressures for the calculation of hydraulic conditions. Computational Mathematics. Linear Algebra. Methods of non-linear programming. Information Technology. The analysis of the directions of centralized heat supply systems (HSS) development in Russia and in a number of countries of northern Europe is made. Types of HSS operation conditions are classified, as well as goals and tasks of their calculation at different stages of control. Adaptation of the mathematical model for the solution of the adjustment calculation problem and thermal-hydraulic conditions analysis and the features of its implementation are proposed. The functions and properties of the developed information and computing complex "ANGARA-HS" are described and its differences from analogues are analyzed. The questions of the relevance of the construction of multi-level computer models of hierarchical structure HSS for the problems of calculating conditions are examined. Possibilities of graphical analysis of a priori information and calculation results by means of the developed tool are explored. Automation of control, increase of reliability, economy and quality of HSS operation require the introduction of modern mathematical modeling methods and information technologies. Calculation of thermal-hydraulic condition is a necessary element for assessing the feasibility of decisions taken at all stages of control. An information and computer complex "ANGARA-HS" of the fourth generation was developed to solve traditional and new problems from the analysis and control of large HSS conditions.

Keywords: heat supply system, thermal-hydraulic state, calculation, graphical analysis, computer simulation, information-computational complex

Acknowledgement: The research was carried out within the project III.17.4.3 of the Fundamental research program of SB RAS (AAAA-A17-117030310437-4) with finance support of RFBR and the Government of Irkutsk Region in the framework of research project № 17-48-380021.

Information about the article: Received September 24, 2018; accepted for publication 30 October, 2018; available online 30 November, 2018.

For citation: Novitsky N.N., Tokarev V.V., Shalaginova Z.I., Alekseev A.V., Grebneva O.A., Barinova S.Yu. Information computing complex "ANGARA-HS" for calculation and analysis of operating conditions of large multiloop heat supply systems under control. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(11):pp. 126–144. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-126-144.

Введение

Централизованные теплоснабжающие системы (ТЦС) России по их количеству и суммарной мощности не имеют аналогов в других странах. Создание этих си-

стем, в основном завершившееся к середине 80-х гг. XX в., позволило наиболее эффективным способом решить проблему обеспечения тепловой энергией быстро



растущие города и промышленные центры. Несомненные экономические и экологические преимущества централизованных систем послужили причиной того, что они в последние десятилетия интенсивно сооружаются и развиваются и во многих зарубежных странах Европы (Дании, Швеции, Германии, Финляндии и др.) [1–8]. Есть перспективы развития таких систем и в северной Америке [9], однако пока они присутствуют только в некоторых городах и студенческих кампусах США и Канады.

В процессе становления рыночной экономики проявились и недостатки технической реализации Российских систем централизованного теплоснабжения, в основном связанные с их слабой управляемостью, отсутствием наблюдаемости, низкой надежностью, недостаточной оснащенностью контрольно-измерительными и регулируемыми приборами. Начиная с 2010 г. в России принимались законы и постановления правительства, призванные исправить сложившуюся ситуацию*. Для решения проблемы коммерческого учета тепловой энергии и повышения уровня наблюдаемости ТСС предусматривается стопроцентное оснащение теплосчетчиками всех крупных потребителей тепловой энергии, а также экономическая стимуляция установки квартирных приборов учета. К 2022 г. планируется прекращение использования в ТСС открытого водоразбора на нужды горячего водоснабжения (ГВС).

Законы регламентируют необходимость разработки схем теплоснабжения городов – документа, содержащего проектные материалы по обоснованию эффективного и безопасного функционирования ТСС, ее развития с учетом правового регулирования в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности. В период 2011–2014 гг. они активно разрабатывались, а в настоящее время требуется их периодическая актуализация.

Повышение надежности, экономичности и качества работы систем теплоснабжения требует комплекса мероприятий, связанных как с их техническим перевооружением, так и с внедрением современных аппаратных и программных технологий для оптимизации режимов и диспетчерского управления. Одним из основных способов оценки эффективности этих мероприятий является анализ режимов работы ТСС по результатам теплогидравлических расчетов, который актуален на стадиях: разработки схем теплоснабжения, проектирования, эксплуатации и диспетчерского управления. Необходимость периодических расчетов режимов также обусловлена изменением параметров ТСС вследствие старения оборудования, изменения структуры нагрузок, мероприятий по развитию и реконструкции, что приводит к отклонению режимов работы систем от запланированных и нарушениям обеспеченности потребителей.

Постановка задачи расчета эксплуатационных режимов работы ТСС

На предприятиях тепловых сетей широко внедряются программно-вычис-

лительные комплексы (ПВК) по расчету теплогидравлических режимов для задач

* О теплоснабжении: федер. закон от 27 июля 2010 № 190-ФЗ / О heat supply: Feder. Law, no. 190-FZ of 27 July 2010;

Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: федер. закон от 29 декабря 2014 № 261-ФЗ / On energy saving and energy efficiency and on amendments to certain legislative acts of the Russian Federation: Feder. law of 29 December 2014. no. 261-FZ;

О водоснабжении и водоотведении: федер. закон от 7 декабря 2011 № 416-ФЗ / On water supply and sanitation: Feder. law of 7 December 2011 № 416-FZ;

Правила горячего водоснабжения: постановление Правительства РФ от 29 июля 2013 г. № 642 / Rules of hot water supply: RF Government decree of 29 July 2013 № 642; и др./ etc.



планирования, наладки и имитации работы ТСС [10]. На практике выделяются следующие виды эксплуатационных режимов:

1) основной (зимний) режим, рассчитанный на максимальные нагрузки отопления и вентиляции и среднюю нагрузку ГВС. При этом в открытых неавтоматизированных системах отбор воды на ГВС осуществляется из обратной магистрали;

2) осенне-весенний режим, в котором отбор сетевой воды на ГВС осуществляется из подающей магистрали;

3) летний режим разрабатывается только на максимальную нагрузку ГВС;

4) аварийные режимы, которые имеют место при отключении элемента сети, вышедшего из строя в результате аварии и, как правило, разрабатываются при расчетных условиях, принятых для основного зимнего режима.

Проектирование новых тепловых сетей города или района осуществляется на основной (зимний) режим с последующей проверкой возможности функционирования ТСС в других эксплуатационных режимах. Существующие ТСС требуют периодической реконструкции и развития. Такие работы планируются заблаговременно с учетом перспективных нагрузок и застройки города. Для этого разрабатываются схемы теплоснабжения городов на длительный период (не менее 15 лет) с помощью многовариантных расчетов всех режимов.

Нормальные эксплуатационные режимы разрабатываются на очередной отопительный сезон. Однако в процессе эксплуатации ТСС может возникнуть необходимость их пересчета вследствие изменения нагрузок, схемы секционирования сети, состава работающего оборудования. Набор аварийных режимов определяется заблаговременно и под каждый из них на базе многовариантных расчетов разрабатывается схема переключений и порядок ликвидации аварии.

Расчет режимов ТСС требует создания компьютерной модели тепловой сети, которая включает: расчетную схему тепловой сети на плане местности; пьезометрические отметки, исходные данные по параметрам элементов (источников тепла, трубопроводных участков, насосных станций, потребителей); климатические данные (температуру наружного воздуха, скорость ветра), температурный график центрального регулирования отпуска тепловой энергии от источников тепла, режимные коэффициенты для перевода тепловых нагрузок потребителей в единицы расхода и учета допустимой доли снижения нагрузок в дефицитных и аварийных режимах.

Требуется определить параметры режима ТСС: давления и температуры в узлах сети; расходы теплоносителя на участках; температуры внутреннего воздуха у потребителей.

Цели и задачи расчета режимов на различных стадиях управления ТСС

Технологическое управление ТСС можно разбить на 3 стадии: долгосрочное, краткосрочное и оперативно-диспетчерское. К долгосрочному управлению относится проектирование ТСС, реконструкция и развитие. При этом целями расчетов является обоснование выбора: мест размещения оборудования, параметров работы источников и насосных станций, вариантов топологии тепловой сети и конструктивных параметров ее элементов (диаметров трубопроводов, типа и толщины изоляции, типа и мест установки: регуляторов, задвижек и компенсаторов). Для решения

этой задачи в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ) Сибирского отделения Российской академии наук разработан ПВК «СОСНА-М» [11, 12].

Краткосрочное управление включает разработку (планирование) режимов функционирования ТСС на очередной отопительный сезон, без строительства новых источников или других объектов ТСС и трубопроводных участков, но с возможностью изменения состояний существующих элементов и состава потребителей. Целью расчетов при организации режимов является определение: состава работающего



оборудования; параметров режима в узлах управления (на источниках тепла, промежуточных ступенях регулирования и у потребителей). В данном случае решаются задачи:

- гидравлического и теплового расчета;
- анализа допустимости параметров режима по диктующим узлам;
- поиска секционирования тепловой сети;
- расчета параметров дросселирующих устройств для поддержания требуемых параметров режима у потребителей и на сети;
- расчета и построения температурных и пьезометрических графиков;
- другие расчетно-аналитические задачи.

Для решения этих задач в ИСЭМ разработан информационно-вычислительный комплекс (ИВК) «АНГАРА-ТС».

При оперативном управлении диспетчер ограничен временем принятия решений (в отличие от инженера по режимам, который разрабатывает их заблаговременно). С одной стороны, используя поступающие данные от телеизмерений, он должен иметь возможность оценивать текущее состояние ТСС. С другой стороны, при обнаружении аварии, он должен максимально быстро принять решение по переключению на сети, проверив свое решение на компьютерной математической модели систе-

мы. Таким образом, при диспетчерском управлении можно выделить следующие задачи:

- оперативное прогнозирование нагрузок и планирование отпуска тепловой энергии от источников;
- контроль и коррекция режимов;
- контроль достоверности телеизмерений;
- оперативное обнаружение мест аварий и выработка рекомендаций по их устранению;
- выработка управляющих команд для организации телеуправления;
- имитация режима работы ТСС после внесения возмущений и оценка последствий;
- оперативный поиск нужного фрагмента ТСС или данных на карте города или района;
- ведение электронных журналов: переключений на сети, дефектов и повреждений, заявок на ремонтно-восстановительные работы, нарядов и распоряжений и т.д.

Целью расчетов при диспетчерском управлении является определение параметров режима ТСС в реальном времени и их допустимость, которые определяются в результате решения задачи оценивания состояния ТСС по данным измерений [13, 14]. ПВК для решения диспетчерских задач («АНГАРА-ДТС») разрабатывается в ИСЭМ.

Методическая база исследований и область ее приложения

На базе сформулированного и развиваемого в ИСЭМ научного направления – теории гидравлических цепей (ТГЦ) [15, 16], накоплен уникальный опыт создания методического и программного обеспечения для решения задач расчета и оптимизации трубопроводных систем различного типа и назначения [17–21], которое внедрено в десятках научно-исследовательских, проектных и эксплуатационных предприятий страны, а также за рубежом. При разработке ИВК «АНГАРА-ТС» использовалась так-

же сформулированная и развиваемая в ИСЭМ научно-методическая база – системные исследования в энергетике, как неразрывно связанная с математическим моделированием и применением вычислительной техники и позволяющая рассматривать работу ТСС в едином процессе производства, транспорта, распределения и потребления тепловой энергии. Многоуровневое моделирование ТСС, как научно-методологический подход, предназначен для преодоления проблем большой



сложности и размерности как самих ТСС, так и возникающих здесь задач. Для учета сетевой специфики задач расчета ТСС, использована теория графов, как наглядный и эффективный, с точки зрения алгоритмизации и программной реализации раздел математики. Базовыми методами для рас-

четов гидравлических режимов являются общие методы расчета потокораспределения: метод узловых давлений [22], метод контурных расходов [15], метод глобального градиента [23], другие оптимизационные методы [24].

Математическое моделирование теплогидравлических режимов ТСС в ИВК «АНГАРА-ТС»

При эксплуатации различают наладочные расчеты (с целью определения необходимых параметров в узлах управления, мест секционирования сети и параметров дросселирующих устройств в основном режиме) и поверочные (с целью определения отклонений параметров от допустимых значений из-за дискретности типоразмеров дросселирующих устройств в расчетном режиме и при изменении расчетных условий в остальных режимах).

Для расчета режима работы ТСС требуется задать следующие параметры: s – гидравлические сопротивления всех элементов; d , l – внутренние диаметры и длины участков трубопроводов; θ – требуемые тепловые потоки (нагрузки) потребителей; Y – действующие напоры источников тепла и насосных станций (приращения давлений активными элементами сети); k – коэффициенты теплопередачи для определения тепловых потерь через тепловую изоляцию на трубопроводных участках; $\bar{x}$, $\bar{P}$, $\underline{P}$ – ограничения, накладываемые на расходы потребителей, и давления в узлах сети регулирующими устройствами; τ_1 , τ_2 , τ_3 – температуры сетевой воды соответственно в подающем и обратном трубопроводах тепловой сети и в местной системе отопления по температурному графику; t_0 – температура окружающей среды.

В результате расчета определяются параметры режима: x , P , T – расходы на участках, давления и температуры в узлах

сети.

В традиционной постановке задачи наладочного гидравлического расчета, реализованной во многих отечественных ПВК, расчет выполняется с фиксированными расходами у потребителей. Особенность подхода, реализованного в ИВК «АНГАРА-ТС», заключается в моделировании режима с «фиктивными» регуляторами расхода на потребителях, уставки которых (величины расхода, которые должны поддерживать регуляторы) определяются по тепловым нагрузкам потребителей. Учет физически обоснованных функций поведения потребителей и регулирующих устройств позволяет получать потокораспределение, согласующееся с законами физики даже при недостаточной пропускной способности сети. Пьезометрический график, построенный по результатам анализа режима при недостаточном располагаемом напоре у потребителей, показывает слипание линий давления для подающей и обратной магистралей тепловой сети в виде «клюва» (рис. 1, а). При этом наблюдается уменьшение циркуляционных расходов в ТСС. В некоторых комплексах (например, в ПВК Zulu Thermo) расчет производится отдельно для подающей и обратной магистралей при фиксированных расходах теплоносителя через потребителей. В этом случае при наложении результатов расчета отдельных магистралей может возникнуть, не имеющая физического смысла ситуация, с пересечением линий давления в виде «ножниц» (см. рис. 1, б).

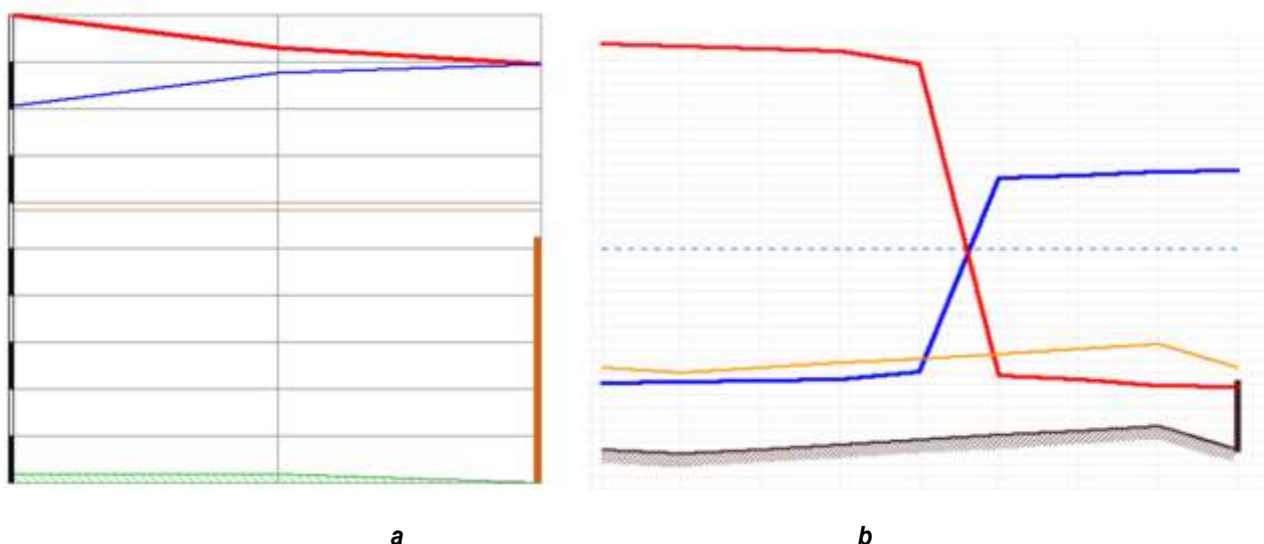


Рис. 1. Вид пьезометрического графика при недостаточной пропускной способности тепловой сети:
a – по расчету в ИВК «АНГАРА-ТС»; b – по расчету в ПБК ZuluThermo
Fig. 1. Type of piezometer chart with insufficient capacity of the heating network:
a – according to calculation in the "ANGARA-TS";
b – according to calculation in the «ZuluThermo»

Определение расходов сетевой воды у потребителей

Максимальная ($\theta_{\max}$) и средняя (θ) нагрузки, расчетные расходы теплоносителя на потребителей задаются в исходных данных по договорам, проектным данным или по нормативам (СНиП, СП). На практике можно выделить различные типы нагрузок: отопления (θ_o), вентиляции (θ_v), технологии (θ_{thn}) и ГВС (θ_{hm}); схем присоединения систем отопления (зависимые, независимые) и систем ГВС (открытые, закрытые). Для компенсации тепловых потерь в сети в ИВК «АНГАРА-ТС» рассчитываются индивидуальные поправочные коэффициенты к расходу теплоносителя по каждому виду тепловой нагрузки (k_c).

В открытых системах для учета величины и места отбора воды на ГВС (из подающего или обратного трубопровода) используется коэффициент δ (доля отбора воды на ГВС из подающего трубопровода), который позволяет при расчете распределить узловые отборы теплоносителя между подающей ($Q_{hm1} = \delta Q_{hm}$) и обратной ($Q_{hm2} = (1 - \delta) Q_{hm}$) магистралями.

Для обеспечения возможности синхронного изменения расходов теплоносителя у группы потребителей предусмотрено использование режимных коэффициентов (k_r) по видам нагрузки, которые определяются с учетом типа режима (расчетный, аварийный, дефицитный и т.д.) и нормативных коэффициентов k_1, k_2, k_3, k_4 (СНиП 41.02.2003 Тепловые сети), зависящих от схем присоединения нагрузок и масштаба ТСС.

Для перевода тепловой нагрузки (θ) в массовый расход (x) в соответствии с температурным графиком отпуска тепла от источников введено понятие «тепловой район». Каждый «тепловой район» содержит набор констант, которые включают: расчетные температуры сетевой воды в подающем (t_1^p) и обратном (t_2^p) трубопроводах и в подающем трубопроводе местных систем отопления (t_3^p); расчетную температуру воды на ГВС ($t_{гвс}^p$); температуру холодной воды в водоеме (t_x); удельные расходы сетевой воды по видам нагрузок



k_u (для отопления $k_{u,o} = \theta_o / [c \cdot (t_1^p - t_2^p)]$,

для вентиляции $k_{u,v} = \theta_v / [c \cdot (t_1^p - t_2^p)]$, для

ГВС $k_{u,hm} = \theta_{hm} / [c \cdot (t_{ГВС}^p - t_x)]$); набор параметров для расчета удельных тепловых потерь трубопроводами в зависимости от типа прокладки и температурного графика отпуска тепловой энергии от источника.

Таким образом, для каждого вида нагрузки массовые расходы примут значения:

$$x_o = k_{u,o} k_{r,o} k_{c,o} \theta_o; x_v = k_{u,v} k_{r,v} k_{c,v} \theta_v;$$

$$x_{thn} = k_{u,thn} k_{r,thn} k_{c,thn} \theta_{thn}$$

и

$$Q_{hm} = k_{u,hm} k_{r,hm} k_{c,hm} \theta_{hm}.$$

С учетом вышеизложенного, суммарные расходы сетевой воды на потребители x_Σ определяются по следующим зависимостям:

– для закрытой системы:

$$x_\Sigma = x_o + x_v + x_{thn} + x_{hm}; Q_{hm1} = 0; Q_{hm2} = 0;$$

– для открытой системы:

$$\text{при } Q_{hm2} < x_o + x_v + x_{thn}, x_\Sigma = x_o + x_v + x_{thn};$$

– для открытой системы:

$$\text{при } Q_{hm2} \geq x_o + x_v + x_{thn}, x_\Sigma = Q_{hm2}.$$

Модель теплогидравлического режима в узловой форме, соответствующая реализованным в ИВК методам, представлена в векторно-матричной записи [15–17, 25]:

$$Ax = Q, \quad (1)$$

$$\bar{A}^T \bar{P} = y, \quad (2)$$

$$y = f(x), \quad (3)$$

$$\bar{A}_1 X t_1 + \bar{A}_2 X t_2 = \theta, \quad (4)$$

$$t_1 = \bar{A}_1^T T, \quad (5)$$

$$t_2 = g(x, t_1). \quad (6)$$

где $\bar{A}$ и A – полная матрица инцидентностей узлов (m) и ветвей (n) расчетной схемы, размерностью $(m \times n)$ и для линейно независимых узлов, размерностью $(m-1) \times n$, соответственно; $\bar{A}_1, \bar{A}_2$ – $(m \times n)$ -матрицы, фиксирующие отдельно начальные и конечные узлы ветвей, которые могут быть получены из $\bar{A}$ заменой всех ее элементов a_{ij} , равных соответственно -1 или $+1$, нулями; x – n -мерный вектор массовых расходов на ветвях ГЦ; Q – $(m-1)$ -мерный вектор узловых расходов, $Q_j > 0$ – если в узле j приток, $Q_j < 0$ – если отбор, $Q_j = 0$ – если в узле j нет узлового расхода; $\bar{P}$ – m -мерный вектор давлений в узлах; y – n -мерный вектор перепадов давлений на ветвях; $f(x)$ – n -мерная вектор-функция гидравлических характеристик ветвей; t_1, t_2 – n -мерные векторы, состоящие из температур соответственно в начальных и конечных точках ветвей; θ – m -мерная вектор-функция, состоящая из величин $Q_j T_{n,j}$ в случае притока, где $T_{n,j}$ – температура притока, и $Q_j T_j$ в случае отбора, где T_j – температура смеси потоков в узле j ; T – m -мерный вектор температур смешанных потоков в узлах; $g(x, t_1)$ – n -мерная вектор-функция аналитических зависимостей, отражающих изменение температуры теплоносителя на ветвях.

Движение теплоносителя по многоконтурной тепловой сети происходит в установившемся режиме в соответствии с двумя известными законами Кирхгофа: соблюдение материального баланса в узлах тепловой сети (1) и условия суммарного нулевого изменения перепадов давлений для всех контуров сети. Второй закон



Кирхгофа в узловой форме опирается на использование полного вектора давлений $\bar{P}$ и поэтому не требует обращения к контурам. При этом уравнение (2) описывает связь между давлениями во всех узлах системы и их перепадами на участках. Движение на каждом участке сети сопровождается потерей энергии (давления), описываемой замыкающими соотношениями (3). Баланс расходов тепла во всех узлах описывается уравнением (4). Уравнение (5) описывает равенство начальных температур для потоков, исходящих из общего узла, т.е. условие полного смешения потоков в узлах. Закон падения температуры при течении теплоносителя по участкам сети описан уравнением (6).

Функции гидравлических (3) и теплофизических (6) характеристик ветвей принимают различный вид в зависимости от того, какому элементу ТСС они соответствуют: сетевому трубопроводному участку,

потребителю, источнику или насосной станции. В качестве примера, для i -й ветви трубопроводного участка можно привести следующую конкретизацию гидравлической (3) и теплофизической (6) характеристик:

$$y_i = s_i x_i | x_i | - Y_i,$$

$$t_{2,i} = t_{0,i} + (t_{1,i} - t_{0,i}) \exp\left(-\frac{\pi d_i l_i k_i}{c x_i}\right),$$

где s_i – гидравлическое сопротивление; Y_i – приращение давления для активного элемента (в случае пассивной ветви $Y_i = 0$); k_i – коэффициент теплопередачи; d_i , l_i – внутренний диаметр и длина трубопровода; c – теплоемкость транспортируемой среды; $t_{0,i}$ – температура окружающей среды.

Особенности вычислительной схемы расчета режимов

При реализации модели (1)–(6) в составе ИВК «АНГАРА-ТС» используется принцип декомпозиции задачи теплогидравлического расчета [25] на гидравлическую (1)–(3) и тепловую (4)–(6) составляющие. Данный подход позволяет уменьшить размерность решаемых задач и использовать более эффективные методы их решения. Примененный для задачи расчета гидравлического режима метод узловых давлений [15] с корректировкой шага, дает устойчивую сходимость итерационного процесса и позволяет адаптировать модель для учета регуляторов расхода и давления [22]. В сочетании с «релейной» методикой** он позволяет избежать двойных циклов итераций. При этом время расчета

потокораспределения сети с большим числом регуляторов увеличивается незначительно по сравнению с временем расчета сети без регуляторов. Расчеты режимов осуществляются в соответствии с методикой многоуровневого теплогидравлического расчета [21, 26].

ТСС крупных городов, как правило, имеют многоконтурную структуру. Однако для удобства эксплуатации и повышения наблюдаемости схема сети преобразуется в разветвленную при помощи секционированных задвижек. ИВК позволяет определять рациональные места секционирования ТСС [27].

Расчет теплового режима осуществляется на основе потокораспределения,

** Токарев В.В. Разработка математических моделей и программных комплексов для расчета, анализа и контроля режимов работы трубопроводных систем при диспетчерском управлении: дисс. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2000. 192 с.

Tokarev V. Development of mathematical models and software systems for calculation, analysis and control of pipeline systems operation modes at dispatching control: diss.... kand. tech. sciences. Irkutsk, 2000. 192 p.



результаты которого (расходы теплоносителя по участкам сети) являются исходными данными для теплового расчета^{***}. Расчет теплового режима сети производится с учетом остывания теплоносителя по длине трубопроводов и смешения потоков с различными температурами.

Тепловые пункты и потребители тепла, которые представляют собой разнообразные технологические системы, с происходящими внутри сложными гидравлическими и тепловыми процессами, на этапе моделирования режимов тепловых сетей представляются участками с эквивалентными сопротивлениями и разностью температур на входе и выходе, значения которых вычисляются при моделировании тепловых пунктов [28]. Модель теплового пункта является составной частью ИВК «АНГАРА-ТС» и описывает процессы поточного распределения, теплопередачи и теплового баланса в местных системах отопле-

ния, ГВС и вентиляции при различных схемах присоединения нагрузок. Результатами расчета являются температуры внутреннего воздуха в помещениях, воды на ГВС, обеспеченность потребителей требуемой нагрузкой.

Процессы, протекающие на источнике тепла, в модели подробно не рассматриваются. Источник моделируется активным участком с заданной температурой теплоносителя на выходе, давлением подпитки и напором насосов, установленных на источнике.

Сети ГВС при четырехтрубном исполнении распределительных тепловых сетей (РТС) имеют свою специфику. Сложность их моделирования заключается в необходимости определения циркуляционных расходов, при которых будет обеспечена температура горячей воды в местах водоразбора не ниже требуемой [29].

Основные характеристики ИВК «АНГАРА – ТС» для расчета режимов ТСС и сравнительный анализ с аналогичными программными комплексами

Разработанные в ИСЭМ методы расчета режимов ТСС впервые получили свою реализацию в виде программы «АСИГР» [30]. С помощью этой программы были проведены расчеты и разработаны рекомендации по организации режимов десятков городов СССР. Разработанные и опубликованные в [30] алгоритмы и по настоящее время используются во многих отечественных ПВК для расчета тепловых сетей. В дальнейшем были разработаны более эффективные методы, позволившие значительно увеличить размерность решаемых задач, повысить быстродействие и надежность расчетов, что нашло свое отражение в виде диалоговых систем «ДИСИГР», «ДИТЕГР», «ШАЙБА» и др. С появлением графических технологий эти

программы были интегрированы в один ПВК, получивший название «АРМ ТТС» (автоматизированное рабочее место инженера технолога тепловых сетей) [17, 18, 32]. Наглядное представление сетей на плане города с удобным диалоговым интерфейсом, а также высокое быстродействие расчетных алгоритмов, обеспечили уникальную возможность проведения многовариантных расчетов режимов работы тепловых сетей, насчитывающих тысячи элементов. В настоящее время разработана новая информационно-вычислительная среда (ИВС) «АНГАРА», как универсальное средство для моделирования трубопроводных систем различного типа и назначения (тепло-, водо-, нефте- газоснабжения и др.). На ее базе вышли несколько версий

^{***} Шалагинова З.И. Разработка и применение методов расчета теплогидравлических режимов в системах теплоснабжения с многоступенчатым регулированием: дисс. ... канд. техн. наук. Иркутск, 1995. 309 с.
Shalaginova Z. I. Development and application of methods for calculating thermal-hydraulic regimes in heat supply systems with multi-stage regulation: diss. ... kand. tech. sciences'. Irkutsk, 1995. 309 p.



ИБК «АНГАРА-ТС», последняя из которых работает в среде Windows и включает:

1. ИВС, обеспечивающую возможность создания графических, иерархически связанных баз данных по ТСС, включающих:

- электронные карты города;
- графическое изображение схем тепловых сетей и сетевых сооружений;
- цифровую и текстовую информацию по параметрам элементов ТСС.

Аналитические функции ИВС позволяют осуществлять поиск элементов плана и сети на карте города по любому параметру БД, выделять цветом и размером элементы схемы, выполнять групповые операции по заполнению полей БД, вычислять длины участков и автоматически заносить их в БД, анализировать данные по выделенному фрагменту, конвертировать графические данные, формировать отчеты и выборки и многое другое [20, 21, 32 – 34].

2. ПВК, обеспечивающий решение следующих задач.

Расчетные задачи (одно- и многоуровневые): наладочный и поверочный расчеты гидравлического режима, температурного поля и теплогидравлического режима работы ТСС [21, 26]; поиск мест секционирования [27]; расчет [35] и построение температурных графиков отпуска тепла от источников; расчет параметров дроселирующих устройств на абонентских системах потребителей и в тепловой сети; расчет гидравлических и теплофизических параметров трубопроводов.

Аналитические задачи: построение пьезометрических графиков; определение нарушений режима по ограничениям на допустимые значения давлений, расходов, скоростей, температур и других параметров ТСС.

Среди основных характеристик ИБК «АНГАРА-ТС» необходимо выделить развитый пользовательский интерфейс, предельно упрощающий процессы занесения, отладки информации и проведения вычислений.

ИБК обладает следующими основными особенностями:

- возможностью решения режимных и наладочных задач для сетей произвольной конфигурации (разветвленных, многоконтурных) и структуры (с произвольным числом и размещением насосных станций, источников, потребителей, регуляторов давления и расхода), с присоединением потребителей тепла, имеющих разнородные нагрузки;

- высоким быстродействием, в среднем 20–50 с для многоконтурных сетей, содержащих порядка 32000 ветвей расчетной схемы при расчете на компьютере с процессором Intel i5/3ГГц; возможностью проведения одно- и многоуровневых расчетов при многоуровневой организации данных по ТСС;

- возможностью решения задач большой размерности;

- повышенной надежностью за счет детального автоматизированного контроля корректности задания исходных данных и теоретически гарантированной сходимости вычислительного процесса, обеспечивающей получение решения с наперед заданной точностью;

- возможностью графической визуализации исходной информации и интерпретации результатов расчетов (автоматизированное построение, отображение, спецификация и вывод на печать пьезометрических и температурных графиков и др.);

- графическим представлением расчетной схемы на фоне городской застройки, с возможностью изменения состояний элементов системы;

- автоматическим определением нарушений в расчетном режиме и их визуализацией на схемах; возможностью работы со схемами и данными в компьютерной сети.

В настоящее время существует ряд программных комплексов для моделирования режимов функционирования ТСС: ИБК «АНГАРА-ТС» (Россия, г. Иркутск), Zulu-Thermo (Россия, г. Санкт-Петербург), Potok (Россия, г. Москва), Bentley (США) и другие.

Основные отличия ИБК «АНГАРА-ТС» от аналогичных программных комплексов:



- возможность, но не обязательность иерархического представления схемы тепловой сети с автоматической увязкой граничных параметров между уровнями и обеспечением многоуровневых расчетов;
- применение методов гидравлического расчета ТСС полной сети без декомпозиции на подающую и обратную магистраль;
- учет физически обоснованных функций поведения потребителей и регулирующих устройств, позволяющий получать потокораспределение, согласующееся с законами физики даже при недостаточной пропускной способности сети;
- развитый набор поисковых и аналитических функций, с возможностью расширения пользователем состава параметров для анализа режимов;
- возможность раздельного выполнения гидравлических и тепловых расчетов и анализа их результатов, что позволяет более гибко использовать возможности ИВК при эксплуатации, проектировании и в научных исследованиях.

Моделируемая в ИВК «АНГАРА-ТС» ТСС может состоять из множества расчетных схем различных типов. Схема определенного типа собирается из своего набора элементов. Реальный элемент ТСС (например, источник) может быть представлен как агрегированным элементом на верхнем уровне, так и собственной расчетной схемой на нижнем уровне. Каждый элемент может находиться в одном из нескольких состояний (включен, выключен и т.д.). При помощи различных состояний элементов можно смоделировать и рассчитать практически любой режим работы

ТСС.

Компьютерная модель ТСС основана на универсальной базе данных. Для информационной поддержки иерархических моделей в ИВК «АНГАРА» разработан специальный инструментарий, обеспечивающий:

- функцию универсального интерфейса пользователя;
- возможность интерактивной настройки информационно-вычислительного окружения на любые классы решаемых задач в области теплоснабжения и сферы возможного применения (проектирование, эксплуатация, диспетчерское управление, исследования и обучение).

В зависимости от решаемой задачи, представление схемы тепловой сети может быть: однолинейным или двухлинейным; одноуровневым или многоуровневым; подробным или агрегированным; с отображением органов управления (оперативная схема) или без них. ИВК автоматически преобразует топологию схемы под вид расчета и передает описание однолинейной схемы с размещенными на ней регуляторами и фиксируемыми узловыми параметрами (давление или узловой расход) в базу данных.

В случае многоуровневого представления ТСС, декомпозиция на уровни МТС и РТС осуществляется при формировании компьютерной модели с учетом степени влияния фрагмента сети на режим всей ТСС [36–39]. На нижний уровень могут быть вынесены только тупиковые в однолинейном представлении фрагменты ТСС без активных элементов и регуляторов на сети.

Результаты расчета режимов ТСС и их автоматизированный анализ

В результате расчета режима ТСС вычисляются текущие параметры ее элементов (расходы на трубопроводных участках, давления и температуры в узлах сети), а также требуемые параметры управляющих элементов для обеспечения допустимого режима.

Модели ТСС современных городов содержат десятки тысяч элементов и сотни тысяч параметров, что значительно осложняет анализ таких систем. Наиболее наглядным способом интерпретации исходных данных и результатов расчетов является графическое представление, кото-



рое позволяет:

- выделять элементы на схемах сетей (цветом, размером, анимацией);
- строить графики (пьезометрические, температурные и др.) в привычном для инженеров виде;
- использовать элементы деловой графики (столбчатые, линейные, круговые диаграммы).

Пьезометрический график (ПГ) представляет собой графическое изображение изменения давлений в подающей и обратной магистралях вдоль заданной трассы с учетом рельефа местности. В отличие от используемых в проектировании ПГ, встроенный в ИВК модуль имеет возможность вывода расширенных спецификаций вдоль трассы: геодезических отметок земли, высот зданий, результатов замеров, давлений и статических напоров в узлах сети, расходов, скоростей, удельных потерь на участках сети и т.д. При многоуровневой организации компьютерной модели можно построить ПГ с уровня МТС до любого узла РТС.

На рис. 2 приведен пример ПГ, построенный средствами ИВК для случая, когда начальной точкой является источник, а конечной – потребитель, находящийся в самых неблагоприятных условиях. Построение трассы и ПГ выполняются автоматически. Для этого достаточно указать лишь начальный и конечный узлы трассы, или выделить эти узлы на схеме. При наличии контуров в однолинейном отображении тепловой сети трасса может быть не единственной. В этом случае необходимо указать промежуточные узлы, через которые требуется провести трассу. Для расчетных схем, насчитывающих многие сотни элементов, протяженность трассы может оказаться значительной. Для этого предусмотрена возможность масштабирования ПГ пропорционально длине трассы, при котором наглядно виден уклон ПГ, а следовательно и участки с большими удельными потерями давления. Отображение ПГ не в масштабе позволяет видеть все спецификации, входящих в него участков.

ПГ дает возможность не только

определять места возможных нарушений по допустимым давлениям или располагаемым напорам, но и обнаруживать их причины, например, узкие места в сети, для которых наблюдается резкое падение давления. ПГ позволяет обнаружить узлы с нарушениями ограничений по давлениям и участки с нарушением ограничений по скоростям и с высокими удельными потерями давления.

К аналитическим функциям можно отнести выделения на схеме цветом и размером элементов схемы как по результатам проверки допустимости режима (рис. 3), так и по значениям любых параметров. При помощи функций графической визуализации можно анализировать достоверность исходных данных. Например, при выделении участков с различной толщиной линии (в зависимости от величины диаметра трубопровода) становится очевидным, где не внесены данные (минимальная толщина линии), а где значение диаметра участка резко отличается от прилежащих (значительное увеличение толщины линии), что говорит о возможной ошибке.

Графическая визуализация используется и для анализа результатов расчета. Градацией цвета отображается температура трубопровода, толщиной линии трубопровода – перепад давлений (см. рис. 3) в конечной точке участка (пространственный аналог пьезометрического графика), а также значение удельных потерь давления на участке (более толстой линией показываются слабые места ТСС с недостаточной пропускной способностью). Раскраска разными цветами в зависимости от номера независимого фрагмента сети (см. рис. 3) выделяет цветом автономно работающие магистрали и места секционирования. Градация цвета по значению скорости показывает участки: с малыми скоростями – большими потерями тепла; высокими скоростями – опасность возникновения вибрации, шума. Выделения цветом и размером можно накладывать друг на друга, параметры выделения сохранять в библиотеке «шаблонов», позволяющей впоследствии повторно применять типовые операции по

выделению объектов сетей. Таким образом, имеется возможность вместо просмотра многостраничных таблиц с данными выделить на схеме узлы с нарушением режимных параметров.

ИВС «АНГАРА» позволяет:

– задавать данные непосредственно с графической схемы (в специально настраиваемые формы), или в табличном

виде по типам элементов;

– создавать и выполнять SQL-запросы;
– осуществлять поиск по адресному плану или по параметрам элементов;
– выполнять групповые операции задания данных, суммирования параметров, экспорта отчетов в электронные таблицы MS Excel.

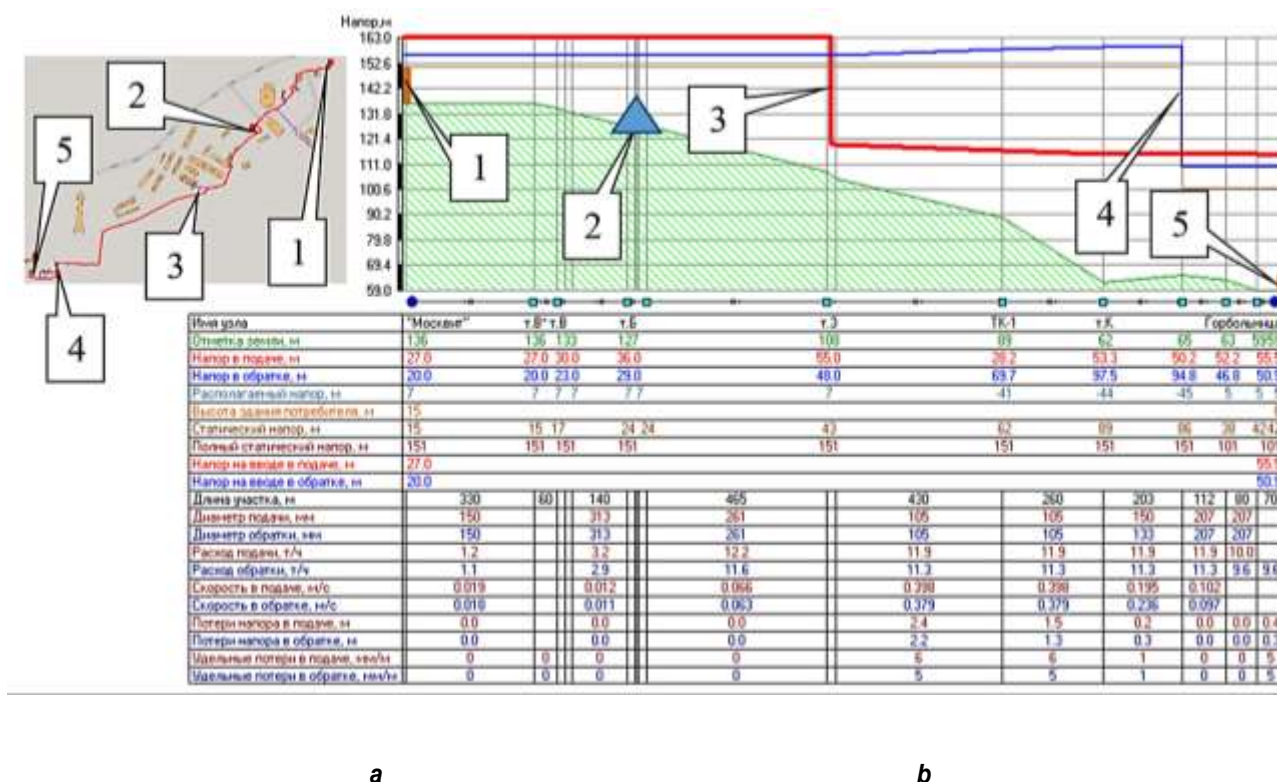


Рис. 2. Иллюстрация разработки режима работы ТСС в условиях пересеченной местности с помощью выбора параметров насосной станции и дросселирующих устройств в сети:

а – схема трассы тепловой сети; б – пьезометрический график; 1 – диктующий потребитель по давлению в обратном трубопроводе верхней зоны; 2 – источник тепла; 3 – балансировочный клапан; 4 – насосная станция; 5 – диктующий потребитель по давлению в подающем трубопроводе нижней зоны

Fig. 2. Illustration of the development of the HSS operation state in rough terrain conditions by selecting the parameters of the pumping station and throttling devices in the network:

а – scheme of the heating network route; б – piezometer chart;
1 – dictating consumer on the pressure in the return pipeline of the upper zone;
2 – the heat source; 3 – the balancing valve; 4 – the pumping station;
5 – the dictating consumer for the pressure in the delivery conduit of the lower zone

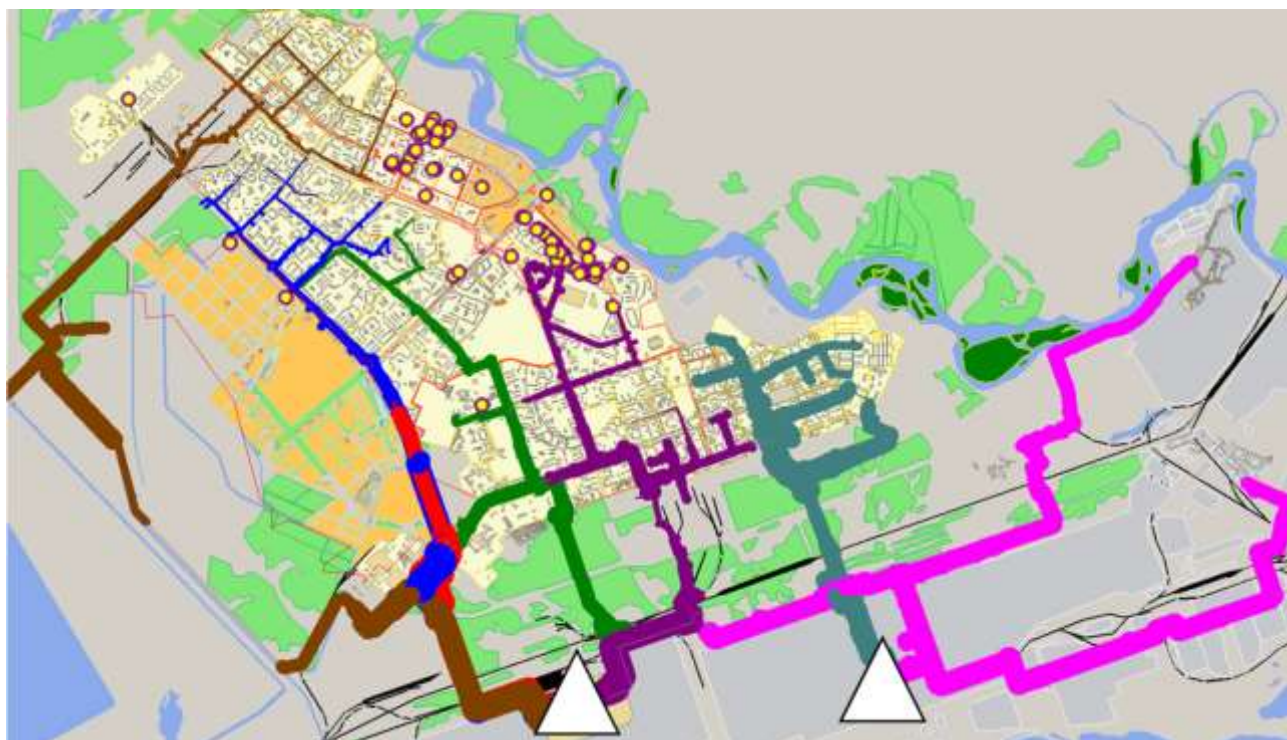


Рис. 3. Иллюстрация графической визуализации анализа режима.
На схеме выделены: толщиной линии – распределение располагаемых напоров в магистральной тепловой сети; цветом – независимо работающие магистрали; размером (окружности на схеме) – обобщенные потребители с нехваткой расхода теплоносителя

Fig. 3. Illustration of graphical visualization of state analysis. The scheme highlighted the thickness of the line – distribution of the available heads in the main heating network; color – independent working mains; size (circle on the scheme) – generic consumers with a shortage of coolant flow

Заключение

Раскрыта актуальность разработки и развития универсальной информационно-вычислительной технологии и применения программных реализаций методов ТГЦ для компьютерного моделирования крупных ТСС для различных классов решаемых задач и сфер возможного применения (проектирования, эксплуатации и диспетчерского управления). Дана характеристика современного состояния разработанного в ИСЭМ информационно-вычислительного комплекса «АНГАРА-ТС» четвертого поколения для решения традиционных и новых задач из области анализа и управления режимами ТСС. Представлены принципы реализации технологий, заложенных в основу ИВК «АНГАРА-ТС», такие как многоуровневое моделирование, декомпозиция схем и задач, позволяющие преодолеть проблемы боль-

шой размерности и сложности решаемых задач. Разработанный ИВК предназначен для автоматизации рабочего места технолога тепловых сетей и позволяет выполнять весь комплекс расчетов на стадии краткосрочного управления, необходимых при разработке режимов работы сложных ТСС большой размерности. ИВК реализован в среде Windows и обладает возможностью автоматизированного расчета крупных ТСС иерархической структуры с промежуточными ступенями управления на многоуровневой компьютерной модели. Комплекс был апробирован на реальных системах теплоснабжения городов Российской Федерации – Иркутск, Ангарск, Братск, Байкальск, Петропавловск-Камчатский, а также за рубежом – в Монголии – Улан-Батор, Дархан.



Библиографический список

1. Münster M., Morthorst, P. E., Larsen, H. V., Bregnbæk, L., Werling, J., Lindboe, H. H., Ravn, H. (2012). The role of district heating in the future Danish energy system. The role of district heating in the future Danish energy system // *Energy*. 2012. Vol. 48. Iss. 1. P. 47–55. doi: 10.1016/j.energy.2012.06.011
2. Werner S. District heating and cooling in Sweden // *Energy*. 2017. Vol. 126. P. 419–429.
3. Paiho S., Reda F. Towards next generation district heating in Finland, Renewable and Sustainable // *Energy Reviews*. 2016. Vol. 65. P. 915–924.
4. Klaassen R.E., Patel M.K. District heating in the Netherlands today: A techno-economic assessment for NGCC-CHP (Natural Gas Combined Cycle combined heat and power) // *Energy*. 2013. Vol. 54. P. 63–73.
5. Wojdyga K., Chorzelski M. Chances for Polish district heating systems // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 116. P. 106–118.
6. Comodi G., Lorenzetti M., Salvi D., Arteconi A. Criticalities of district heating in Southern Europe: Lesson learned from a CHP-DH in Central Italy // *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 112. P. 649–659.
7. Schmidt D., Kallert A.M., Blesl M., Sipilä K. Low Temperature District Heating for Future Energy Systems // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 116. P. 26–38. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.05.052
8. Latšov E., Volkova A., Siirde A., Kurnitski J., Thalfeldt M. Primary energy factor for district heating networks in European Union member states // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 116. P. 69–77.
9. Gils H.C. GIS-based assessment of the district heating potential in the USA // *Energy*. 2013. Vol. 58. P. 318–329.
10. Токарев В.В., Шалагинова З.И. Опыт применения новых технологий для организации режимов крупных теплоснабжающих систем // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2011. Т. 59. № 12. С. 240–248.
11. Соколов Д.В., Стенников В.А., Ощепкова Т.Б., Барахтенко Е.А. Программный комплекс нового поколения для схемно-параметрической оптимизации многоконтурных теплоснабжающих систем // *Теплоэнергетика*. 2012. № 4. С. 1–6.
12. Barakhtenko E.A., Barakhtenko E.A., Oshchepkova T.B., Sokolov D.V., Stennikov V.A. New results in development of methods for optimization of heat supply system parameters and their software implementation // *International Journal of Energy Optimization and Engineering*. 2013. Vol. 2(4). P. 80–99. DOI: 10.4018/ijeoe.2013100105
13. Новицкий Н.Н., Токарев В.В. Расчет установившихся теплогидравлических режимов работы тепловых сетей по ограниченному количеству измерений // *Теплофизика и аэромеханика*. 2007. Т. 14. № 2. С. 289–298.
14. Новицкий Н.Н., Токарев В.В., Шалагинова З.И. Моделирование режимов работы тепловых сетей в задачах диспетчерского управления // *Трубопровод-*
- ные системы энергетики: управление развитием и функционированием. Новосибирск: Наука. 2004. С. 352–361.
15. Меренков А.П., Хасилев В.Я. Теория гидравлических цепей. М.: Наука, 1985. 278 с.
16. Меренков А.П., Сеннова Е.В., Сумароков С.В., Сидлер В.Г., Новицкий Н.Н., Стенников В.А., Чупин В.Р., Каганович Б.М., Шалагинова З.И., Ефремов В.А., Ощепкова Т.Б., Шлафман В.В., Илькевич Н.И. Математическое моделирование и оптимизация систем тепло-, водо-, нефте- и газоснабжения. Новосибирск: Наука, 1992. 407 с.
17. Сеннова Е.В., Сухарев М.Г., Аверьянов В.К. Гидравлические цепи. Развитие теории и приложения. Новосибирск: Наука, 2000. 273 с.
18. Аверьянов В.К., Алексеев А.В., Алексеев М.И. Трубопроводные системы энергетики: развитие методов математического моделирования и оптимизации. Новосибирск: Наука, 2008. 311 с.
19. Аверьянов В.К., Сеннова Е.В., Карасевич А.М. Трубопроводные системы энергетики: математическое моделирование и оптимизация. Новосибирск: Наука, 2010. 418 с.
20. Сеннова Е.В., Сухарев М.Г., Сарданашвили С.А. и др. Трубопроводные системы энергетики: математическое и компьютерное моделирование. Новосибирск: Наука, 2014. 274 с.
21. Тевяшев А.Д. Трубопроводные системы энергетики: методические и прикладные проблемы математического моделирования. Новосибирск: Наука, 2015. 476 с.
22. Новицкий Н.Н., Токарев В.В. Релейная методика расчета потокораспределения в гидравлических цепях с регулируемыми параметрами // *Известия РАН. Энергетика*. 2001. № 2. С. 88–98.
23. Todini E., Pilati S. A gradient algorithm for the analysis of pipe networks // *Computer Applications in Water Supply*. 1988. Vol. 1. P. 1–20.
24. Ortiga J., Bruno J.C., Coronas A., Grossman I.E. Review of optimization models for the design of polygeneration systems in district heating and cooling networks. 17th European Symposium on Computer Aided Process Engineering (ESCAPE-17). Ed. by V. Pleşu, Ş. Agachi. Amsterdam: Elsevier, 2007. 1362 p.
25. Шалагинова З.И. Методы теплогидравлического анализа режимов крупных теплоснабжающих систем // *Теплоэнергетика*. 2009. № 12. С. 44–49.
26. Токарев В.В., Шалагинова З.И. Методика многоуровневого наладочного расчета теплогидравлического режима крупных систем теплоснабжения с промежуточными ступенями управления // *Теплоэнергетика*. 2016. № 1. С. 71–80.
27. Токарев В.В. Исследование задачи рационального секционирования тепловых сетей с помощью ИВК «АНГАРА-ТС» // *Трубопроводные системы энергетики: математическое и компьютерное моделирование*. Новосибирск: Наука, 2014. С. 168–182.
28. Шалагинова З.И. Математическая модель для



расчета теплогидравлических режимов тепловых пунктов теплоснабжающих систем // Теплоэнергетика. 2016. № 3. С. 69–80.

29. Шалагинова З.И., Токарев В.В., Гребнева О.А. Методика наладочного расчета распределительных сетей централизованного горячего водоснабжения // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 3 (98). С. 165–174.

30. Хасилев В.Я., Меренков А.П., Каганович Б.М., Светлов К.С., Такайшвили М.К. Методы и алгоритмы расчета тепловых сетей. М.: Энергия, 1978. 176 с.

31. Новицкий Н.Н., Токарев В.В., Шалагинова З.И. Новые информационно-вычислительные технологии для расчета и анализа режимов теплоснабжающих систем // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. 2001. № 1. С. 108–113.

32. Алексеев А.В., Новицкий Н.Н. Компьютерная технология «АНГАРА» для интеграции информационного и вычислительного пространства при моделировании трубопроводных систем // Научный вестник НГТУ. 2017 № 3. С. 26–41.

33. Алексеев А.В., Новицкий Н.Н., Токарев В.В., Шалагинова З.И. Принципы разработки и программная реализация информационно-вычислительной среды для компьютерного моделирования трубопроводных и гидравлических систем // Трубопроводные системы энергетики: методы математического моделирования и оптимизации: сб. науч. тр. Новосибирск: Наука, 2007. С. 221–229.

34. Информационно-вычислительная среда «АНГАРА» [Электронный ресурс]. URL: <http://51.isem.irk.ru/angara/> (26.10.17)

35. Шалагинова З.И. Задачи и методы расчета тем-

пературных графиков отпуска тепла на основе теплогидравлического моделирования систем теплоснабжения // Теплоэнергетика. 2004. № 7. С. 41–49.

36. Новицкий Н.Н., Токарев В.В., Шалагинова З.И., Алексеев А.В., Гребнева О.А., Баринаева С.Ю. Иерархическое моделирование тепловых сетей в задачах эксплуатации и диспетчерского управления // Тр. XII Байкальской Всерос. конф. «Информационные и математические технологии в науке и управлении» (Иркутск-Байкал, 02–11 июля 2007 г.). Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2007. С. 110–121.

37. Токарев В.В., Аверьянов В.К., Сеннова Е.В., Карасевич А.М. Декомпозиция и эквивалентирование расчетных схем тепловых сетей для задач эксплуатации и диспетчерского управления // Трубопроводные системы энергетики. Математическое моделирование и оптимизация. Новосибирск: Наука, 2010. С. 379–390.

38. Новицкий Н.Н., Шалагинова З.И., Токарев В.В., Гребнева О.А. Технология разработки эксплуатационных режимов крупных систем теплоснабжения на базе методов многоуровневого теплогидравлического моделирования // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2018. № 1. С. 12–24.

39. Алексеев А.В., Гребнева О.А., Новицкий Н.Н., Токарев В.В., Шалагинова З.И. Математические модели и методы для оценки и реализации потенциала энергосбережения при управлении режимами теплоснабжающих систем // Исследования и разработки СО РАН в области энергоэффективных технологий. Новосибирск: НИИ молекулярной биологии и биофизики, 2009. С. 38–49.

References

1. Münster M., Morthorst, P. E., Larsen, H. V., Bregnbæk, L., Werling, J., Lindboe, H. H., Ravn, H. (2012). The role of district heating in the future Danish energy system. The role of district heating in the future Danish energy system. *Energy*. 2012, vol. 48, iss. 1, pp. 47–55. doi: 10.1016/j.energy.2012.06.011
2. Werner S. District heating and cooling in Sweden. *Energy*. 2017, vol. 126, pp. 419–429.
3. Paiho S., Reda F. Towards next generation district heating in Finland, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016, vol. 65, pp. 915–924.
4. Klaassen R.E., Patel M.K. District heating in the Netherlands today: A techno-economic assessment for NGCC-CHP (Natural Gas Combined Cycle combined heat and power). *Energy*. 2013, vol. 54, pp. 63–73.
5. Wojdyga K., Chorzelski M. Chances for Polish district heating systems. *Energy Procedia*. 2017, vol. 116, pp. 106–118.
6. Comodi G., Lorenzetti M., Salvi D., Arteconi A. Criticalities of district heating in Southern Europe: Lesson learned from a CHP-DH in Central Italy. *Applied Thermal Engineering*. 2017, vol. 112, pp. 649–659.
7. Schmidt D., Kallert A.M., Blesl M., Sipilä K. Low

- Temperature District Heating for Future Energy Systems. *Energy Procedia*. 2017, vol. 116, pp. 26–38. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.05.052
8. Latšov E., Volkova A., Siirde A., Kurnitski J., Thalfeldt M. Primary energy factor for district heating networks in European Union member states. *Energy Procedia*. 2017, vol. 116, pp. 69–77.
9. Gils H.C. GIS-based assessment of the district heating potential in the USA. *Energy*. 2013, vol. 58, pp. 318–329.
10. Tokarev V.V., Shalaginova Z.I. Application experience of new technologies for mode organization of major heat supply systems. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2011, no. 12 (59), pp. 240–248. (In Russian)
11. Sokolov D.V., Stennikov V.A., Oshchepkova T.B., Barakhtenko E.A. The new generation of the software system used for the schematic-parametric optimization of multiple-circuit heat supply systems. *Teploenergetika* [Thermal engineering]. 2012, no. 4, pp. 72–77. (In Russian)
12. Barakhtenko E.A., Barakhtenko E.A., Oshchepkova T.B., Sokolov D.V., Stennikov V.A. New results in de-



velopment of methods for optimization of heat supply system parameters and their software implementation. International Journal of Energy Optimization and Engineering. 2013, vol. 2(4), pp. 80–99. DOI: 10.4018/ijeoe.2013100105 (In Russian)

13. Novitskii N.N., Tokarev V.V. Calculation of steady-state thermal-hydraulic modes of thermal networks operation by a limited number of measurements. *Teplofizika i aeromekhanika* [Thermophysics and aeromechanics]. 2007, vol.14, no. 2. pp. 289–298. (In Russian)

14. Novitskii N.N., Tokarev V.V., Shalaginova Z.I. *Modelirovanie rezhimov raboty teplovykh setei v zadachakh dispetcherskogo upravleniya. Truboprovodnye sistemy energetiki: upravlenie razvitiem i funktsionirovaniem* [Modeling of operating modes of thermal networks in problems of Supervisory control. Truboprovodnye sistemy energetiki: upravlenie razvitiem i funktsionirovaniem]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2004. C. 352–361. (In Russian)

15. Merenkov A.P., Khasilev V.Ya. *Teoriya gidravlicheskikh tsepei* [Theory of hydraulic circuits]. Moscow: Nauka Publ., 1985. 278 c. (In Russian)

16. Merenkov A.P., Sennova E.V., Sumarokov S.V., Sidler V.G., Novitskii N.N., Stennikov V.A., Chupin V.R., Kaganovich B.M., Shalaginova Z.I., Efremov V.A., Oshchepkova T.B., Shlafman V.V., Il'kevich N.I. *Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiya sistem teplo-, vodo-, nefte- i gazosnabzheniya* [Mathematical modeling and optimization of systems of heat, water, oil and gas]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1992. 407 c. (In Russian)

17. Sennova E.V., Sukharev M.G., Aver'yanov V.K. *Gidravlicheskie tsepi. Razvitie teorii i prilozheniya* [Hydraulic circuit. Development of theory and application]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2000. 273 p. (In Russian)

18. Aver'yanov V.K., Alekseev A.V., Alekseev M.I. *Truboprovodnye sistemy energetiki: razvitie metodov matematicheskogo modelirovaniya i optimizatsii* [Pipeline energy systems: development of mathematical modeling and optimization methods]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2008. 311 c. (In Russian)

19. Aver'yanov V.K., Sennova E.V., Karasevich A.M. *Truboprovodnye sistemy energetiki: matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiya* [Pipeline systems of power engineering: mathematical modeling and optimization]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2010. 418 c. (In Russian)

20. Sennova E.V., Sukharev M.G., Sardanashvili S.A. i dr. *Truboprovodnye sistemy energetiki: matematicheskoe i komp'yuternoe modelirovanie* [The Pipeline system of energy: mathematical and computer modeling]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2014. 274 c. (In Russian)

21. Tevyashev A.D. *Truboprovodnye sistemy energetiki: metodicheskie i prikladnye problemy matematicheskogo modelirovaniya* [Pipeline energy systems: methodological and applied problems of mathematical modeling]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2015. 476 c. (In Russian)

22. Novitskii N.N., Tokarev V.V. *Releynaya metodika*

rascheta potokoraspredeleniya v gidravlicheskikh tsepyakh s reguliruemymi parametrami [Relay method of calculation of flow distribution in hydraulic circuits with adjustable parameters]. *Izvestiya RAN. Energetika* [Izvestiya RAN. Energy]. 2001, no. 2, pp. 88–98. (In Russian)

23. Todini E., Pilati S. A gradient algorithm for the analysis of pipe networks. *Computer Applications in Water Supply*. 1988, vol. 1, pp. 1–20.

24. Ortiga J., Bruno J.C., Coronas A., Grossman I.E. Review of optimization models for the design of polygeneration systems in district heating and cooling networks. 17th European Symposium on Computer Aided Process Engineering (ESCAPE-17). Ed. by V. Pleşu, Ş. Agachi. Amsterdam: Elsevier Publ., 2007, 1362 p.

25. Shalaginova Z.I. Methods of thermal-hydraulic analysis of the major modes of heat supply systems. *Teploenergetika* [Thermal engineering]. 2009, no. 12, pp. 44–49. (In Russian)

26. Tokarev V.V., Shalaginova Z.I. The Method of multi-level adjustment calculation of thermal-hydraulic regime of large heating systems with intermediate levels of control // *Teploenergetika* [Thermal engineering]. 2016. № 1. pp. 71–80. (In Russian)

27. Tokarev V.V. *Issledovanie zadachi ratsional'nogo sektsionirovaniya teplovykh setei s pomoshch'yu IVK «ANGARA-TS»* [Study of the problem of rational partitioning of thermal systems with the help of "ANGARA-TS" IVK]. *Truboprovodnye sistemy energetiki: matematicheskoe i komp'yuternoe modelirovanie* [Pipeline systems of power engineering: mathematical and computer modeling]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2014. pp. 168–182. (In Russian)

28. Shalaginova Z.I. Mathematical model to calculate the thermal-hydraulic regime-the MOU for thermal stations heat power plants. *Teploenergetika* [Thermal engineering]. 2016, no. 3, pp. 69–80. (In Russian)

29. Shalaginova Z.I., Tokarev V.V., Grebneva O.A. Commissioning calculation technique for centralized hot water supply distribution networks. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2015, no. 3 (98), pp. 165–174.

30. Khasilev V.Ya., Merenkov A.P., Kaganovich B.M., Svetlov K.S., Takaishvili M.K. *Metody i algoritmy rascheta teplovykh setei* [Methods and algorithms of calculation of thermal networks]. Moscow: Energiya Publ., 1978. 176 p. (In Russian)

31. Novitskii N.N., Tokarev V.V., Shalaginova Z.I. New information and computing technologies for calculation and analysis of modes of heat supply systems. *Radioelektronika. Informatika. Upravlinnaya* [Radionics. Informatics. Superintendent]. 2001, no. 1. pp. 108–113. (In Russian)

32. Alekseev A.V., Novitskii N.N. Computer technology "Angara" for the integration of information and computing space in the modeling of pipeline systems. *Nauchnyi vestnik NGTU* [Scientific Bulletin of NSTU]. 2017, no. 3, pp. 26–41. (In Russian)

33. Alekseev A.V., Novitskii N.N., Tokarev V.V., Shala-



ginova Z.I. *Printsipy razrabotki i programmaya realizatsiya informatsionno-vychislitel'noi sredy dlya komp'yuternogo modelirovaniya truboprovodnykh i gidravlicheskiykh sistem* [Principles of development and software implementation of information-computing environment for computer simulation of pipeline and hydraulic systems]. *Truboprovodnye sistemy energetiki: metody matematicheskogo modelirovaniya i optimizatsii: sb. nauch. tr.* [Pipeline systems of energy: methods of mathematical modeling and optimization: collection of proceedings]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2007, pp. 221–229. (In Russian)

34. Informatsionno-vychislitel'naya sreda «ANGARA» [Information and computing environment "ANGARA"]. Available at: <http://51.isem.irk.ru/angara/> (accessed 26 October 2017)

35. Shalaginova Z.I. Zadachi i metody rascheta temperaturnykh grafikov otpuska tepla na osnove teplogidravlicheskogo modelirovaniya sistem teplosnabzheniya [Problems and methods of calculation of temperature graphs of heat release on the basis of thermal-hydraulic modeling of heat supply systems]. *Teploenergetika* [Thermal engineering]. 2004, no. 7, pp. 41–49. (In Russian)

36. Novitskii N.N., Tokarev V.V., Shalaginova Z.I., Alekseev A.V., Grebneva O.A., Barinova S.Yu. *Ierarkhicheskoe modelirovanie teplovykh setei v zadachakh ekspluatatsii i dispetcherskogo upravleniya* [Hierarchical modeling of heat networks in the problems of operation and dispatching control]. Tr. XII Baikal'skoi Vseros. konf. «Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii» [Tr. XII all-Russia Baikal. Conf. "Information and mathematical technologies in science and management"]. Irkutsk-Baikal, 02–11 July 2007 g. Ir-

kutsk: ISEM SO RAN, 2007, pp. 110–121. (In Russian)
37. Tokarev V.V., Aver'yanov V.K., Sennova E.V., Karasevich A.M. *Dekompozitsiya i ekvi-valentirovanie raschetnykh skhem teplovykh setei dlya zadach ekspluatatsii i dispetcher-skogo upravleniya. Truboprovodnye sistemy energetiki. Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiya* [Decomposition and equivalent design schemes of thermal networks for the tasks of operation and Manager-governance]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2010, pp. 379–390. (In Russian)

38. Novitskii N.N., Shalaginova Z.I., Tokarev V.V., Grebneva O.A. *Tekhnologiya razrabotki ekspluatatsionnykh rezhimov krupnykh sistem teplosnabzheniya na baze metodov mnogourovnnevo teplogidravlicheskogo modelirovaniya* [Technology of development of operating modes of large-scale heat supply systems based on the methods of multilevel thermal-hydraulic modeling]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Energetika* [News of the Russian Academy of Sciences. Energy.]. 2018, no. 1, pp. 12–24. (In Russian)

39. Alekseev A.V., Grebneva O.A., Novitskii N.N., Tokarev V.V., Shalaginova Z.I. *Mate-maticheskie modeli i metody dlya otsenki i realizatsii potentsiala energosberezheniya pri upravlenii rezhimami teplosnabzhayushchikh system. Issledovaniya i razrabotki SO RAN v oblasti energoeffektivnykh tekhnologii* [Mathematical models and methods for assessing and implementing energy saving potential in the management regimes of heat supply systems. Research and development of SB RAS in the field of energy efficient technologies]. Novosibirsk: NII molekulyarnoi biologii i biofiziki Publ., 2009, pp. 38–49. (In Russian)

Критерии авторства

Новицкий Н.Н., Токарев В.В., Шалагинова З.И., Алексеев А.В., Гребнева О.А., Барина С.Ю. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Novitsky N.N., Tokarev V.V., Shalaginova Z.I., Alekseev A.V., Grebneva O.A., Barinova S.Yu. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results 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 004.421.4

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-11-145-158>

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ

© Л.А. Сологубова¹, А.А. Кулаков³, Ф.Н. Байбекова³, О.В. Трунькина⁴, Н.М. Беспалова⁵

Краснодарское высшее военное училище им. генерала армии С.М. Штеменко,
350035, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Красина, 4.

РЕЗЮМЕ: Целью работы является выбор оптимального метода принятия решений при различных условиях и его программная реализация. Для достижения поставленной задачи был проведен сравнительный анализ методов принятия решений: метода анализа иерархий, метода Делфи, метода мозгового штурма. Требовалось найти универсальный метод принятия решений с возможностью обобщения мнений независимых экспертов, выявления противоречий в суждениях и учета влияния «человеческого фактора». В ходе проведения анализа были выявлены и обобщены достоинства и недостатки каждого метода. Наименее удовлетворяющим всем требованиям определен метод мозгового штурма в силу большого влияния на решения экспертов внешних и внутренних факторов. Оптимальным методом принятия решений, соответствующим большинству требований, признан метод анализа иерархий. Этот метод уникален тем, что является одновременно и качественным и количественным, подтвержден теоретически и практически, подходит для решения как простых, так и сложных задач и учитывает «человеческий фактор». Метод анализа иерархий обоснован аксиоматически и подтвержден необходимым и достаточным числом теорем, которые превращают его в математически обоснованный подход для получения шкал предпочтений при решении сложных и важных проблем. Приведено математическое описание метода анализа иерархий и этапы программной реализации. Математический аппарат метода анализа иерархий позволяет декомпозировать исследуемую проблему на составляющие, разложив их по уровням, а также позволяет логически упорядочить суждения (параметры сравниваются попарно с определением степени предпочтения одного параметра над другим) и дать им количественную оценку в форме ответа, представляющего набор приоритетов относительной значимости альтернатив.

Ключевые слова: метод анализа иерархий, принятие решений, эксперт, экспертные оценки, метод Делфи, мозговой штурм, шкала относительной важности

Информация о статье: Дата поступления 20 сентября 2018 г.; дата принятия к печати 30 октября 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 ноября 2018 г.

Для цитирования: Сологубова Л.А., Кулаков А.А., Байбекова Ф.Н., Трунькина О.В., Беспалова Н.М. Программная реализация принятия решений с помощью метода анализа иерархий. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(11):145–158. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-145-158.

DECISION-MAKING SOFTWARE IMPLEMENTATION USING HIERARCHY ANALYSIS METHOD

Larisa A. Sologubova, Andrei A. Kulakov, Fatima N. Baibekova, Ol'ga V. Trun'kina, Natal'ya M. Beshpalova

¹Сологубова Лариса Алексеевна, младший научный сотрудник, e-mail: sologubova_larisa@mail.ru

Larisa A. Sologubova, Junior Researcher, e-mail: sologubova_larisa@mail.ru

²Кулаков Андрей Анатольевич, начальник отдела, e-mail: sologubova_larisa@mail.ru

Andrei A. Kulakov, Head of the Department, e-mail: sologubova_larisa@mail.ru

³Байбекова Фатима Наильевна, младший научный сотрудник, e-mail: Fatima_n_b@mail.ru

Fatima N. Baibekova, Junior Researcher, e-mail: Fatima_n_b@mail.ru

⁴Трунькина Ольга Владимировна, кандидат экономических наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: sologubova_larisa@mail.ru

Ol'ga V. Trun'kina, Cand. Sci. (Econ.), Leading Researcher, e-mail: sologubova_larisa@mail.ru

⁵Беспалова Наталья Михайловна, научный сотрудник, e-mail: sologubova_larisa@mail.ru

Natal'ya M. Beshpalova, Research Fellow, e-mail: sologubova_larisa@mail.ru



Krasnodar Higher Military School named after the General of the Army S. Shtemenko,
4, Krasin St., Krasnodar, Krasnodar Territory, 350035, Russian Federation

ABSTRACT: The purpose of the work is to select an optimal decision-making method under various conditions and software implementation of the method. The set purpose is achieved through the use of a comparative analysis of decision-making methods including the hierarchy analysis method, Delphi method and brainstorm method. It was required to find a universal method of decision-making with the possibility to generalize the opinions of independent experts identifying contradictions in judgments and taking into account the influence of the "human factor". The conducted analysis allowed to identify and summarize the advantages and disadvantages of each method. The "Brainstorm" method meets all the requirements least of all due to the large influence of external and internal factors on expert decisions. The optimal decision-making method that meets most of the requirements is recognized to be the hierarchy analysis method. The uniqueness of the method is determined by the fact that it is both qualitative and quantitative, it is confirmed theoretically and practically, it is suitable for solving both simple and complex problems and takes into account the "human factor". The hierarchy analysis method is justified axiomatically and is confirmed by the necessary and sufficient number of theorems that transform it into a mathematically grounded approach for obtaining the scales of preferences in solving complex and important problems. This paper gives a mathematical description of the hierarchy analysis method and the stages of its software implementation. The mathematical apparatus of the hierarchy analysis method allows to decompose the investigated problem into components, sort them into levels, as well as logically order the judgments (parameters are compared in pairs with determining the preference degree of one parameter over another) and give them a quantitative evaluation in the form of a response that represents a set of priorities for the relative importance of alternatives.

Keywords: *hierarchy analysis method, decision-making, expert, expert evaluation, Delphi method, brainstorming, scale of relative importance*

Information about the article: Received September 20, 2018; accepted for publication October 30, 2018; available online November 30, 2018.

For citation: Sologubova L.A., Kulakov A.A., Baibekova F.N., Trunkina O.V., Bespalova N.M. Decision-making software implementation using hierarchy analysis method. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(11):pp. 145–158. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-145-158/

Введение

Одной из основных задач, возникающих перед должностными лицами органов военного управления при разработке документов, является правильное определение степени секретности. В ходе проведения оценки специалист сталкивается со сложной системой взаимозависимых компонент (ресурсы, нормативные требования, желаемые цели и результаты, лица или группы лиц и т.д.), которые необходимо проанализировать. Возникают ситуации, когда требуется рассмотреть несколько вариантов решений независимых друг от друга специалистов, либо использовать коллективное мнение специалистов, а так же, когда отдельное лицо не берет на себя ответственность за принятие решений. Зачастую проведение таких оценок представляется проблематичным или невозможным по следующим причинам:

- при проведении оценок необходимо оценивать множество различных параметров, которые могут носить как количественный, так и качественный характер;
- отсутствие или недостаточность данных, определяющих параметры систем количественно;
- имеющиеся сведения носят только качественный характер;
- оценка производится на основе личного опыта, интуиции, субъективных суждений лица, принимающего решение;
- исследуемые процессы и системы настолько сложны и многообразны, что разработка их адекватных математических моделей не представляется возможной.

Для облегчения деятельности специалистов и повышения качества их работы целесообразно использовать системы поддержки принятия решений (СППР), основанные на методах математического моделирования, позволяющих получать количественные оценки эффектив-



ности функционирования исследуемых систем. СППР – автоматизированная система, целью которой является помощь специалистам, принимающим решение в сложных условиях для полного и объективного анализа предметной деятельности. СППР возникли в результате слияния управленческих информационных систем и систем управления базами данных.

В случаях невозможности проведения оценок с помощью других СППР целесообразно воспользоваться так называемыми методами экспертных оценок, основанными на знаниях и опыте специалистов (экспертов), полученных ими в ходе практической деятельности в той или иной предметной области. Экспертная оценка – оценка параметров процессов или предметов, которые невозможно непосредственно измерить, либо применить точные науки, поэтому оценка проводится на основании профессионального опыта специалистов. Экспертная оценка может быть описательная, качественная, приближительная, количественная и т.д. Помимо констатирования существующих фактов экспертная оценка может содержать прогноз дальнейшего развития ситуации, процесса или присвоение процессу (документу, предмету) какого-либо статуса. Другими словами – это диагностический метод измерения, процедура получения оценки проблемы (процесса, документа) на основе мнения специалистов с целью последующего принятия решения (выбора). Экспертные оценки применяются на любом этапе исследования:

- в определении цели и задачи самого исследования;
- в построении и проверки гипотез;
- при выявлении проблемных ситуаций;
- в ходе интерпретации каких-либо процессов, событий или фактов;
- для обоснования адекватности используемого инструментария;
- в процессе выработки рекомендаций и т.д. [1]

Наиболее известными из методов экспертных оценок, применяемых для принятия решений являются: метод Делфи, мозговой штурм, метод анализа иерархий.

Метод анализа иерархий

Подробнее рассмотрим МАИ. Математический аппарат МАИ позволяет логически упорядочить суждения (какой из двух объектов приоритетнее и сравнительно на сколько) и дать им количественную оценку в форме ответа, представляющего набор приоритетов относительной значимости альтернатив, а так же позволяет декомпозировать исследуемую проблему на составляющие, разложив их по уровням. МАИ позволяет от простых суждений на уровне здравого смысла специалиста в данной предметной области с помощью сравнительно простого математического аппарата (теории матриц) перейти к обоснованным заключениям. Плюсы и минусы метода описаны в табл. 1.

Для выявления преимуществ были выбраны следующие характеристики методов экспертной оценки:

- универсальность метода;
- простота организации;
- простота расчетов;
- незначительность затрат времени и организационных усилий;
- наличие обратной связи между аналитической группой и специалистами;
- возможность обобщения мнений участников эксперимента;
- исключение влияния на специалиста со стороны других специалистов или внешнее влияние;
- возможность уменьшения колебаний по всей совокупности индивидуальных ответов;
- возможность прогнозирования событий при малом количестве информации;
- возможность учитывать «человеческий фактор» при подготовке принятия решения;
- возможность выявления противоречий в данных и их минимизации.



Далее представлена сравнительная таблица преимуществ МАИ (табл. 2).

Таблица 1

Плюсы и минусы МАИ

Table 1

Pros and cons of the hierarchy analysis method

Плюсы	Минусы
Позволяет учитывать «человеческий фактор» при подготовке принятия решения	Нет средств для проверки достоверности данных
Процедуры расчетов рейтингов достаточно просты	Трудоемкий процесс формирования структуры модели принятия решений
Наличие больших возможностей для выявления противоречий в данных и их минимизации	Не имеет внутренних средств для интерпретации рейтингов
Возможность привлечения специалистов, работающих независимо друг от друга над локальными задачами	–

Таблица 2

Сравнительная таблица преимуществ методов экспертных оценок

Table 2

Comparative table of the advantages of expert evaluation methods

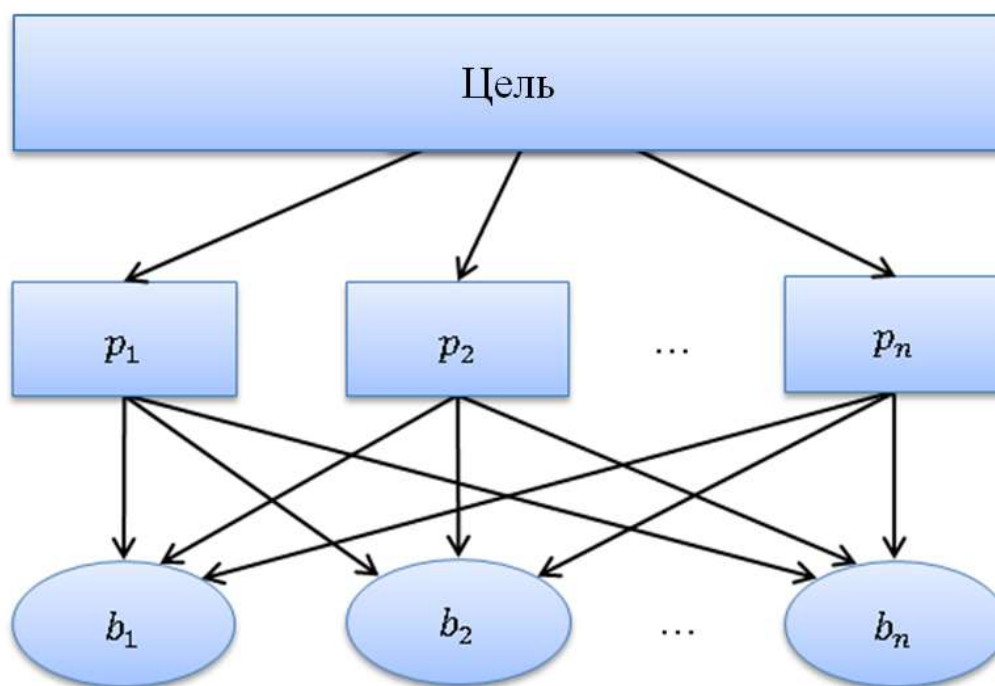
Характеристики методов экспертных оценок	Метод Делфи	Мозговой штурм	МАИ
универсальность метода	–	+	+
простота организации	–	+	
простота расчетов	–	+	+
незначительность затрат времени и организационных усилий	–	+	–
наличие обратной связи между аналитической группой и специалистами	+	–	–
возможность обобщения мнений участников эксперимента	+	+	+
исключение влияния на специалиста со стороны других специалистов или внешнее влияние	–	–	+
возможность уменьшения колебаний по всей совокупности индивидуальных ответов	+	–	
возможность прогнозирования событий при малом количестве информации	+	–	
возможность учитывать «человеческий фактор» при подготовке принятия решения	–	–	+
возможность выявления противоречий в данных и их минимизация	–	–	+

Таким образом, можно сделать вывод об уникальности метода анализа иерархий. Его уникальность заключается в том, что он является одновременно и качественным, и количественным. Будучи в основе качественным (так как используется информация о качественных сравнениях по лингвистическим критериям), метод позволяет количественно оценить приоритеты альтернативных решений. Кроме того, МАИ учитывает естественное мышление челове-

ка, принимающего решение, независимо от широты спектра проблемы и дает более общий подход, чем другие упомянутые методы. Это способствует полному и адекватному выявлению предпочтений лица (группы лиц), принимающего решение. Так же, оценка меры противоречивости использованных данных позволяет установить степень доверия к полученному результату [5].

МАИ обоснован аксиоматически и подтвержден необходимым и достаточным числом теорем, которые превращают его в математически обоснованный подход для получения шкал предпочтений при решении сложных и важных проблем.

Далее рассмотрим программную реализацию данного метода поэтапно. Математическую модель представим в виде дерева иерархий (рисунок).



*Дерево иерархической структуры
Hierarchical structure tree*

1-й этап – структурирование проблемы выбора в виде иерархии или схемы (принцип декомпозиции).

Доминантная иерархия представляет собой перевернутое дерево с основой в вершине [6].

Иерархия должна быть полной, т.е. каждый элемент заданного уровня функционирует, как показатель всех элементов нижестоящего уровня.

Иерархия строится следующим образом:

- вершина – общая цель;
- второй уровень – факторы или показатели, уточняющие цель ($p_1, \dots, p_n$) (выбор факторов должен быть проверен и подтвержден);
- третий уровень – альтернативные варианты решения ($b_1, \dots, b_n$).

2-й этап – установление приоритетов показателей.

МАИ состоит в сведении экспериментальной оценки к последовательности суждений в форме попарного сравнения по специальной «Шкале относительной важности» (табл. 3) [7].



Таблица 3

Шкала относительной важности МАИ

Table 3

Scale of hierarchy analysis method relative importance

Степень важности	Определение	Пояснение
1	Одинаковая значимость	Два действия (показателя) вносят одинаковый вклад в достижении цели
3	Некоторое преобладание Значимости одного показателя перед другим, слабая зависимость	Опыт и суждения дают легкое предпочтение одному действию (показателю) перед другим
5	Существенная или сильная значимость	Опыт и суждения дают сильное предпочтение одному действию (показателю) перед другим
7	Очень сильная или очевидная значимость	Предпочтение одного действия (показателя) над другим очень сильно, его превосходство практически явно
9	Абсолютная значимость	Свидетельство в пользу предпочтения одного действия (показателя) другому в высшей степени убедительно
2, 4, 6, 8	Промежуточные значения, между соседними значениями шкалы	Ситуация, когда необходимо компромиссное решение
Обратные величины приведенных чисел	Если при сравнении p_1 с p_2 присваивается одно из приведенных выше целых чисел (например, 3), то при сравнении p_1 с p_2 получаем обратную величину (т.е. 1/3)	Если над диагональю – целое число, то под диагональю – его обратное значение
Рациональное значение	Отношение, возникающее в заданной шкале	–

Строится квадратная матрица размером $n \times n$, где n – количество показателей (критериев).

	p_1	p_2	p_3	...	p_n
p_1	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{1j}	a_{1n}
p_2	a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{2j}	a_{2n}
p_3	a_{31}	a_{32}	a_{33}	a_{3j}	a_{3n}
...	a_{i1}	a_{i2}	a_{i3}	a_{ij}	a_{in}
p_n	a_{n1}	a_{n2}	a_{n3}	a_{nj}	a_{nn}



Попарные сравнения показателей a_{ij} осуществляются в терминах доминирования одного из элементов над другим. Эти суждения в шкале МАИ выражаются в целых числах. Если элемент p_1 доминирует над элементом p_2 , то клетка квадратичной матрицы a_{12} , соответствующей строке p_1 и столбцу p_2 , заполняется целым числом по шкале относительной важности, а клетка a_{21} , соответствующая строке p_2 и столбцу p_1 , заполняется обратным к нему числом. Если p_1 и p_2 эквивалентны, то в обе позиции записывается 1. Матрицы получаются положительными обратно симметричными, и необходимо произвести только определенное количество суждений $((n-1)/2)$, где n – количество сравниваемых критериев.

При этом не предполагается, что суждения специалистов полностью согласованы. На одном из последующих этапов метода проводится оценка согласованности путем расчета отношения согласованности (ОС). Если ОС превышает величину 0,20, то необходимо провести повторный опрос экспертов и уточнить данные матрицы суждений. Требование же обратной симметричности должно выполняться неукоснительно.

Для каждого следующего уровня иерархии по отношению к критериям из вышестоящего уровня строятся дополнительно n матриц (по количеству показателей размером $m \times m$ и заполняются аналогичным образом).

3-й этап – обработка результатов экспертного опроса, расчет необходимых величин.

Для каждой i -ой строки матрицы находим среднее геометрическое a_i по строке и записываем в правый дополнительный столбец матрицы:

$$a_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}. \quad (1)$$

Далее необходимо вычислить множество собственных векторов для каждой матрицы, а затем нормализовать результат, получая при этом нормализованный вектор приоритетов (НВП). Одним из способов получения собственных векторов является вычисление среднего геометрического [8].

Расчет НВП:

$$\bar{a}_i = \frac{a_i}{a_1 + \dots + a_j + \dots + a_n} = \frac{a_i}{\sum_{j=1}^n a_j}, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n \bar{a}_i = 1$$

```
/// <comment>
/// Класс расчета методом иерархий
/// </comment>
public class MAICounter
{
    /// <comment>
    /// Метод подсчета методом иерархий
    /// <param="params"> Матрица парметров </param>
    /// </comment>
    public List<float> Counter(float[][] params)
    {

```



```
// Средние геометрические каждой строки матрицы
var averages = new List<float>;

// Для каждой строки рассчитаем среднее геометрическое
foreach (var str in params)
{
    var summ = Summator(str);

    var count = str.Length();
    var average = Average(summ, count);
    averages.Push(average);
}

// Получаем сумму средних геометрических
var averagesSumm = Summator(averages);

// НВП для каждой строки
var nvpAverages = new List<float>;

// Для каждой строки получаем НВП
foreach (var average in averages)
{
    var nvp = Nvp(averagesSumm, average);
    nvpAverages.Push(nvp);
}
var check = Check(params, nvpAverages);
return nvpAverages;
}
```

4-й этап – проверка согласованности локальных приоритетов путем расчета трех характеристик.

Полученные выше результаты используются для оценки согласованности матрицы.

1. Рассчитывается собственное значение матрицы:

Сначала суммируется каждый столбец суждений. Затем сумма i -го столбца умножается на величину i -ой компоненты нормализованного вектора приоритетов (так для всех столбцов).

$$A_j = \sum_{i=1}^n a_{ij}, \quad k = \overline{1, n} \quad (3)$$

$$A'_i = A_i \cdot \overline{a_{ij}} \quad (4)$$

Полученные числа суммируются.

$$\lambda_{max} = \sum_{i=1}^n A'_i \quad (5)$$

Для обратно симметричной матрицы всегда $\lambda_{max} \geq n$.



a_{11}	a_{12}	...	a_{1n}			
a_{21}	a_{22}	...	a_{2n}		a_{ij}	$\overline{a_{ij}}$
a_{31}	a_{32}	...	a_{3n}			
A_1	A_2		a_{in}			
A_1'	A_2'		A_n'			λ_{max}

(6)

2. Рассчитывается индекс согласованности (ИС), который дает информацию о степени нарушений численной (кардинальной) и транзитивной (порядковой) согласованности.

$$ИС = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}, \quad (7)$$

где n – число сравниваемых элементов.

```

/// <comment>
/// Проверка согласованности суждений
/// <param="params"> Матрица параметров </param>
/// <param="nvpAverages"> Лист НВП для матрицы </param>
/// </comment>
private bool Check(float[][] params, List<float> nvpAverages)
{
    // Получаем значение матрицы
    var matrixValue = GetMatrixValue(params, nvpAverages);

    // Получаем модифицированные значения матрицы
    var modifiedMatrixValue = GetModifiedMatrixValue(matrixValue, nvpAverages);

    // Получаем лямбду матрицы
    var lambda = GetLambda(modifiedMatrixValue);

    // Рассчитываем индекс согласованности
    var confirmationIndex = (lambda - nvpAverages.Length()) / (nvpAverages.Length() -
1);

    // Рассчитываем отношение согласованности
    resultConfirmation = confirmationIndex / randomIndex.GetKey(nvpAverages.Length());
    return resultConfirmation < 0.10
        ? true
        : false;
}

```

3. Сравнивается полученная величина с величиной случайной согласованности (СС), определяемой теоретически для случая, когда оценки в матрице представлены случайным образом, и зависящую только от размера матрицы (табл. 4).



Таблица 4

Случайные согласованности для случайных матриц разного порядка

Table 4

Random consistencies for random matrices of different order

Размер матрицы/ matrix size (n)	Случайная согласованность/random consistency (CC)	Размер матрицы/ matrix size (n)	Случайная согласован- ность/random consisten- cy (CC)
1	0	9	1,45
2	0	10	1,49
3	0,58	11	1,51
4	0,9	12	1,48
5	1,12	13	1,56
6	1,24	14	1,57
7	1,32	15	1,59
8	1,41	—	—

/// <comment>

/// Коэффициенты случайной согласованности

private Dictionary<int,float> randomConfirmation = new Dictionary<int,float> {

{1,0},

{2,0},

{3,0.58},

{4,0.9},

{5,1.12},

{6,1.24},

{7,1.32},

{8,1.41},

{9,1.45},

{10,1.49},

{11,1.51},

{12,1.48},

{13,1.56},

{14,1.57},

{15,1.59}

};

}

Отношение ИС к среднему СС для матрицы суждений того же порядка называется отношением согласованности (ОС):

$$ОС = \frac{ИС}{СС}, \text{ при } n = const \quad (8)$$

где n – количество элементов матрицы.

Величина $ОС \leq 0,10$ считается приемлемым порогом допустимой согласованности суждений. Если значение $ОС > 0,10$, то данные в той или иной матрице суждений необходимо уточнить.



Таблица 5

Форма таблицы сравнения критериев

Table 5

Form of the table of criteria comparison

	p_1	p_2	...	p_n	Среднее геометрическое (по формуле (1))	НВП (по формуле (2))
p_1	a_{11}	a_{12}	a_{1j}	a_{1n}	a_1	$\bar{a}_1$
p_2	a_{21}	a_{22}		a_{2n}	a_2	$\bar{a}_2$
...			a_{ij}			
p_n	a_{n1}	a_{n2}	a_{nj}	a_{nn}	a_n	$\bar{a}_n$
λ_{max}	по формуле (5)					
ИС	по формуле (7)					
ОС	по формуле (8)					

5-й этап – попарное сравнение вариантов по каждому критерию.

Аналогично тому, как это делалось для критериев. По каждому критерию заполняется таблица (табл. 6) и проводится проверка согласованности локальных приоритетов путем расчета трех характеристик (см. 4-й этап).

Таблица 6

Форма таблицы сравнения вариантов по критериям
(заполняется по каждому j -му критерию сравнения p_j , $j = 1, n$)

Table 6

Form of the table of option comparison by criteria
(filled in for each j comparison criterion p_j , $j = 1, n$)

p_j	b_1	b_2	...	b_k	Среднее геометрическое (по формуле (1))	НВП (по формуле (2))
b_1			b_{1j}			$\bar{b}_1$
b_2						$\bar{b}_2$
...			b_{ij}			
b_k			b_{kj}			$\bar{b}_k$
Итого						
λ_{maxj}	по формуле (5)					
ИС _{j}	по формуле (7)					
ОС _{j}	по формуле (8)					

6-й этап – определение общего (глобального) приоритета для каждого варианта.

НВП $\bar{b}_{ij}$ по каждому критерию перемножаются на НВП $\bar{a}_j$ соответствующего показателя на вышестоящем уровне и суммируются.



$$W_i = \sum_{j=1}^n \bar{a}_j \cdot \bar{b}_{ij} \quad (9)$$

$$W^* = \max W_i \quad (10)$$

7-й этап – проверка достоверности решения.

Для этого заполняется обобщающая таблица (таблица 7). Рассчитывается обобщенный индекс согласованности (ОИС) [9]:

$$\text{ОИС} = \sum_{j=1}^n \text{ИС}_j \cdot \bar{a}_j \quad (11)$$

Рассчитывается обобщенное отношение согласованности (ООС):

$$\text{ООС} = \frac{\text{ОИС}}{\text{СС}} \quad (12)$$

Таблица 7

Форма таблицы расчета итоговых значений приоритетов

Table 7

Form of the table of priority final value calculation

	p_1	p_2	...	p_n	Итоговые значения приоритетов (по формуле (8))
	$\bar{a}_1$	$\bar{a}_2$		$\bar{a}_n$	
b_1	$\bar{b}_{11}$	$\bar{b}_{12}$		$\bar{b}_{1n}$	W_1
b_2	$\bar{b}_{21}$	$\bar{b}_{22}$		$\bar{b}_{2n}$	W_2
...			$\bar{b}_{ij}$		...
b_k	$\bar{b}_{k1}$	$\bar{b}_{k2}$		$\bar{b}_{kn}$	W_k
ИС	ИС ₁	ИС ₂	...	ИС _n	
ОИС	по формуле (11)				
ООС	по формуле (12)				

Решение принято, если величина $\text{ООС} \leq 0,10 \div 0,15$.

```
public class CriteriaCounter
{

}

/// <comment>
/// Класс расчета методом иерархий
/// </comment>
private class MethodOfAnalisislerarchie
{
    public Dictionary<string,List<float>> Result(Dictionary<string,List<float[][]>> data)
    {
```



```
var results = new Dictionary<string,List<float>>;  
  
var maiCounter = new MAICounter();  
  
foreach(var elem in data)  
{  
    var result = maiCounter(elem.Value);  
  
    results.Add(elem.Key, result);  
}  
  
return results;  
}  
}
```

Заключение

В данной работе приведена математическая модель и этапы ее реализации. Математический аппарат МАИ позволяет логически упорядочить суждения (какой из двух объектов приоритетнее и сравнительно на сколько) и дать им количественную оценку в форме ответа, представляющего набор приоритетов относительной значимости альтернатив, а так же позволяет декомпозировать исследуемую проблему на составляющие, разложив их по уровням.

Библиографический список

1. Экспертная оценка [Электронный ресурс] // Словарь бизнес терминов. URL: <https://biznes-prost.ru/ekspertnaya-ocenka.html> (13.10.2018)
2. Недашковский А. Мозговой штурм - это что такое? Оперативный метод решения проблемы // SYL.ru [Электронный ресурс]: URL: https://www.syl.ru/article/229865/new_mozgovoy-shturm---eto-cto-takoe-operativniy-metod-resheniya-problemyi (13.10.2018)
3. Сущность и черты метода Делфи [Электронный ресурс]: URL: https://vuzlit.ru/11086/suschnost_cherty_metoda_delfi (13.10.2018)
4. Соколов А. Российский Дельфи: методы и организации // VII Международная научная конференция «Модернизация экономики и общественное развитие» (5 апреля 2007 г., Москва). М.: Институт статистических исследований и экономики знаний ГУ-ВШЭ, 2010.
5. Кулаков А.А., Байбекова Ф.Н., Сологубова Л.А., Трунькина О.В. Принятие решений с помощью метода анализа иерархий // Инновации в науке. 2018. № 4 (80). С. 11–14.
6. Системный анализ в экономике [Электронный ресурс] // Финансовый университет при Правительстве РФ. URL: <https://studfiles.net/preview/3348062/page:3/> (13.10.2018)
7. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1993. 320 с.
8. Омельченко И.Н., Пилюгина А.В., Иванов А.Г. Принятие решений о выборе рациональной структуры капитала предприятия на основе метода анализа иерархий. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011.
9. Фурцев Д.Г., Коваленко А.Н., Ткаченко Е.А. Об оптимизации на основе метода анализа иерархий // Научные ведомости. Серия: История. Экономика. Информатика. 2014. № 1 (172). Вып. 29/1. С. 142–149.

References

1. *Ekspertnaya otsenka* [Expert evaluation]. Available at: <https://biznes-prost.ru/ekspertnaya-ocenka.html> (accessed 30 October 2018).
2. Nedashkovskii A. *Mozgovoi shturm - eto chto takoe? Operativnyi metod resheniya problem* [What is brainstorming it? Operational method of solving problems]. SYL.ru. Available at: https://www.syl.ru/article/229865/new_mozgovoy-shturm---eto-cto-takoe-operativniy-metod-resheniya-problemyi (accessed 13 October 2018)
3. *Sushchnost' i cherty metoda Delfi* [Delphi method essence and characteristics]. Available at: https://vuzlit.ru/11086/suschnost_cherty_metoda_delfi (accessed 13 October 2018)
4. Sokolov A. *Rossiiskii Del'fi: metody i organizatsii* [Russian Delphi: Methods and Organizations]. VII Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya «Modernizatsiya ekonomiki i obshchestvennoe razvitiye» [VII International Scientific Conference "Modernization of Economy and Social Development"]. 5 April, 2007. Moscow, 2007.



5. Kulakov A.A., Baibekova F.N., Sologubova L.A., Trun'kina O.V. *Prinyatie reshenii s pomoshch'yu metoda analiza ierarkhii* [Making decisions on the base of hierarchy analysis method]. *Innovatsii v nauke* [Innovations in Science]. 2018, no. 4 (80), pp. 11-14.
6. *Sistemnyi analiz v ekonomike* [System analysis in economy]. Available at: <https://studfiles.net/preview/3348062/page:3/> (accessed 13 October 2018)
7. Saati T. *Prinyatie reshenii. Metod analiza ierarkhii* [Decision Making. Hierarchy Analysis Method]. Moscow: Radio i svyaz' Publ., 1993, 320 p.
8. Omel'chenko I.N., Pilyugina A.V., Ivanov A.G. *Prinyatie reshenii o vybere ratsional'noi struktury kapitala predpriyatiya na osnove metoda analiza ierarkhii* [Making decisions on choosing a rational structure of enterprise capital based on the hierarchy analysis method]. Moscow: MGTU named after N.E. Bauman Publ., 2011.
9. Furtsev D.G., Kovalenko A.N., Tkachenko E.A. *On the optimization method based on the analytic hierarchy process. Nauchnye vedomosti. Seriya: Istoriya. Ekonomika. Informatika* [Research Bulletin of Bel-gorod State University. Series: History. Economics. Informatics.]. 2014, no. 1 (172), issue 29/1, pp. 142–149. (In Russian)

Критерии авторства

Сологубова Л.А., Кулаков А.А., Байбекова Ф.Н., Трунькина О.В., Беспалова Н.М. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Sologubova L.A., Kulakov A.A., Baibekova F.N., Trunkina O.V., Bepalova N.M. 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 621.311

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-11-159-169>

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПАКТНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С ВЕРТИКАЛЬНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ПРОВОДОВ

© Н.В. Буюкова¹, А.В. Крюков^{2,3}, Лэ Ван Тхао³

¹Ангарский государственный технический университет,
665835, Российская Федерация, г. Ангарск, ул. Чайковского, 60.

²Иркутский государственный университет путей сообщения,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

³Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

РЕЗЮМЕ: Цель - разработка методов и средств моделирования компактных линий электропередачи повышенной пропускной способности. Применялись методы определения режимов электроэнергетических систем (ЭЭС) на базе фазных координат, в основу которых положены модели элементов в виде решетчатых схем замещения с полносвязной топологией. Эти модели и методы реализованы в программном комплексе Fazonord-APC, обеспечивающем моделирование стационарных режимов ЭЭС, а также определение напряженностей электромагнитного поля, которое создается линиями электропередачи различного конструктивного исполнения. Представлены результаты моделирования режимов и электромагнитных полей на трассах компактных воздушных линий (КВЛ) электропередачи 220 кВ с горизонтальным расположением проводов. Для сравнения выполнены аналогичные расчеты для типовой линии электропередачи (ЛЭП) 220 кВ типовой конструкции (ТВЛ). Результаты моделирования позволили сформулировать следующие выводы: при одинаковом суммарном сечении проводов КВЛ и ТВЛ потери активной мощности в компактной ЛЭП существенно снижаются; так, например, при передаваемой мощности в 375 МВт потери в КВЛ уменьшаются на 45% по сравнению с типовой ЛЭП 220 кВ; на приемном конце компактной ЛЭП наблюдается более низкая несимметрия; КВЛ обеспечивают лучшие условия электромагнитной безопасности; напряженность электрического поля на высоте 1,8 м для оси КВЛ меньше аналогичного показателя для ТВЛ примерно в полтора раза; для магнитного поля снижение напряженности в этой же точке достигает 60%.

Ключевые слова: электроэнергетические системы, компактные линии электропередачи, электромагнитная безопасность

Информация о статье: Дата поступления 27 сентября 2018 г.; дата принятия к печати 30 октября 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 ноября 2018 г.

¹Буюкова Наталья Васильевна, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий, e-mail: bn_900@mail.ru

Buyakova Natalia Vasilievna, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Industrial Department, e-mail: bn_900@mail.ru

²Крюков Андрей Васильевич, доктор технических наук, академик Российской академии транспорта, член-корр. АН ВШ РФ и Российской инженерной академии, заслуженный энергетик Республики Бурятия, профессор кафедры электроснабжения и электротехники ИРНИТУ; профессор кафедры электроэнергетики транспорта ИРГУПС, e-mail: and_kryukov@mail.ru

Andrey V. Kryukov, Dr. Sci. (Eng.), Member of Academy of Transportation Academy of Russia. Member of Academy of Sciences of RF and Russian Engineering Academy, Honored Power Engineer of Buryat Republic, Professor of Electric Supply and Electric Equipment Department of Irkutsk National Research Technical University, e-mail: and_kryukov@mail.ru

³Лэ Ван Тхао, магистр техники и технологии, аспирант кафедры электроснабжения и электротехники, e-mail: vanthaoirk@mail.ru

Le Van Thao, Master of Technical and Technology Sciences, Ph. D Candidate of Electric Supply and Electric Equipment Department, e-mail: vanthaoirk@mail.ru



Для цитирования: Буякова Н.В., Крюков А.В., Лэ Ван Тхао. Моделирование компактных линий электропередачи с вертикальным расположением проводов. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(11):159–169. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-159-169.

MODELING COMPACT POWER LINES WITH VERTICAL WIRE ARRANGEMENT

Natalia V. Buyakova, Andrey B. Kryukov, Le Van Thao

Angarsk State Technical University,
60 Chaikovsky 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 development of methods and tools for modeling compact power lines of increased throughput capacity. The methods of finding electric power system modes based on phase coordinates are used. In their turn, the phase coordinates are based on the models of elements in the shape of grid equivalent circuits with the fully meshed topology. These models and methods are implemented in the Fazonord-APC software complex, which provides the modeling of electric power system steady-state modes and determination of electric field intensities. The electric field is created by power transmission lines of various designs. The paper presents the results of modeling the modes and electric fields of 220 kV compact overhead lines with horizontal wire arrangement. For comparison, similar calculations have been performed for a typical 220 kV power line of a typical design. The modeling results allowed to formulate the following conclusions: active power losses in a compact power line reduce significantly under the same total cross section area of the wires of compact and typical power lines. For example, when the transmitted power is 375 MW the losses in a compact power lines decrease by 45 % as compared with the typical 220 kV power line. A lower asymmetry is observed at the receiving end of a compact power line. The compact power line provides better conditions of electromagnetic safety. The electric field intensity at the height of 1.8 m is 1.5 times lower for the compact power line axis than the similar index of a typical power line. The fall of the magnetic field intensity in the same point reaches up to 60%.

Keywords: electric power systems, compact power lines, modes and electromagnetic safety

Information about the article: Received September 27, 2018; accepted for publication 30 October, 2018; available online 30 November, 2018.

For citation: Buyakova N.V., Kryukov A.V., Le Van Thao. Modeling compact power lines with vertical wire arrangement. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(11):pp. 159–169. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-159-169.

Введение

В настоящее время предложено большое число новых конструкций линий электропередачи (ЛЭП) повышенной пропускной способности, позволяющих существенно увеличить эффективность транспорта электроэнергии [1–16]. Особого внимания заслуживают компактные ЛЭП повышенной пропускной способности, позволяющие получить следующие положительные эффекты:

- сократить в полтора - два раза площади земельных участков, которые отчуждаются под строительство ЛЭП;
- снизить воздействие ЛЭП на природную среду и население за счет умень-

шения уровней напряженностей электромагнитных полей;

- повысить пропускную способность электропередач в 1,2–1,6 раза;
- снизить на 10–20% удельные затраты, приходящиеся на 1 МВт передаваемой мощности;
- уменьшить потери электроэнергии и повысить надежность ЭЭС.

Для практического использования таких ЛЭП необходимы адекватные методы и средства для определения режимов электроэнергетических систем, включающих в свой состав линии подобного типа. Не менее актуальной является задача мо-

делирования электромагнитных полей (ЭМП), создаваемых этими ЛЭП.

В статье представлены результаты разработки компьютерных моделей ком-

пактных линий электропередачи с горизонтальным расположением проводов расщепленных фаз.

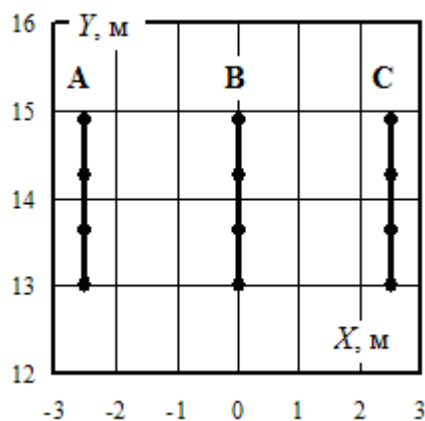
Методика компьютерного моделирования

Сформулированный выше комплекс задач по моделированию режимов и электромагнитных полей компактных ЛЭП может быть решен на основе методов моделирования ЭЭС в фазных координатах, предложенных в Иркутском государственном университете путей сообщения [17]. Разработанный на их основе программный комплекс Fazonord [17] позволяет проводить расчеты режимов ЭЭС и электромагнитных полей ЛЭП нетрадиционных конструкций [16, 18–21]. В комплексе реализован эффективный подход к моделированию многопроводных элементов со взаимными индуктивными и емкостными связями с помощью решетчатых схем замещения. Применение этого подхода позволяет моделировать различные типы многопроводных

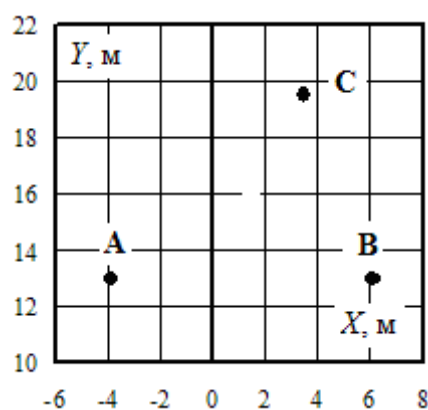
линий с большим количеством проводов.

При этом анализируемая ЛЭП рассматривается в неразрывной связи со сложной электроэнергетической системой. Ниже представлены результаты моделирования режимов и электромагнитных полей компактной воздушной линии электропередачи 220 кВ с расположением проводов (рис. 1, а).

Для сравнения выполнено моделирование типовой воздушной линии 220 кВ (рис. 1, б). Сечение проводов КВЛ принято равным 150 мм^2 , а ТВЛ – 600 мм^2 . Таким образом, суммарное сечение ЛЭП в обоих вариантах остается одинаковым. Моделирование осуществлялось с помощью комплекса программ Fazonord-APC.



a



b

Рис. 1. Координаты проводов: а – КВЛ; б – ТВЛ
Fig. 1. Wire coordinates: a – compact overhead power line;
b – typical overhead power line



Результаты компьютерного моделирования

Результаты моделирования режимов представлены в табл. 1 и на рис. 2 в виде зависимостей потерь в ЛЭП, а также коэффициентов несимметрии по обратной и нулевой последовательностям от величины передаваемой мощности.

Распределение токов по проводам ЛЭП показано на рис. 4. На рис. 5–8 представлены результаты моделирования электрического и магнитного полей в начале ЛЭП, на высоте 1,8 м от поверхности земли. Расчеты ЭМП проводились при

нагрузке на приемном конце ЛЭП, равной $50 + j50$ МВ·А и длине ЛЭП в 50 км.

На рис. 4 показано распределение составляющих напряженностей ЭМП по горизонтальной оси, перпендикулярной трассе ЛЭП. На рис. 5 представлено сопоставление амплитуд напряженностей для КВЛ и ТВЛ. На рис. 6 приведены аналогичные графики для плотности потока активной электромагнитной энергии на высоте 1,8 м.

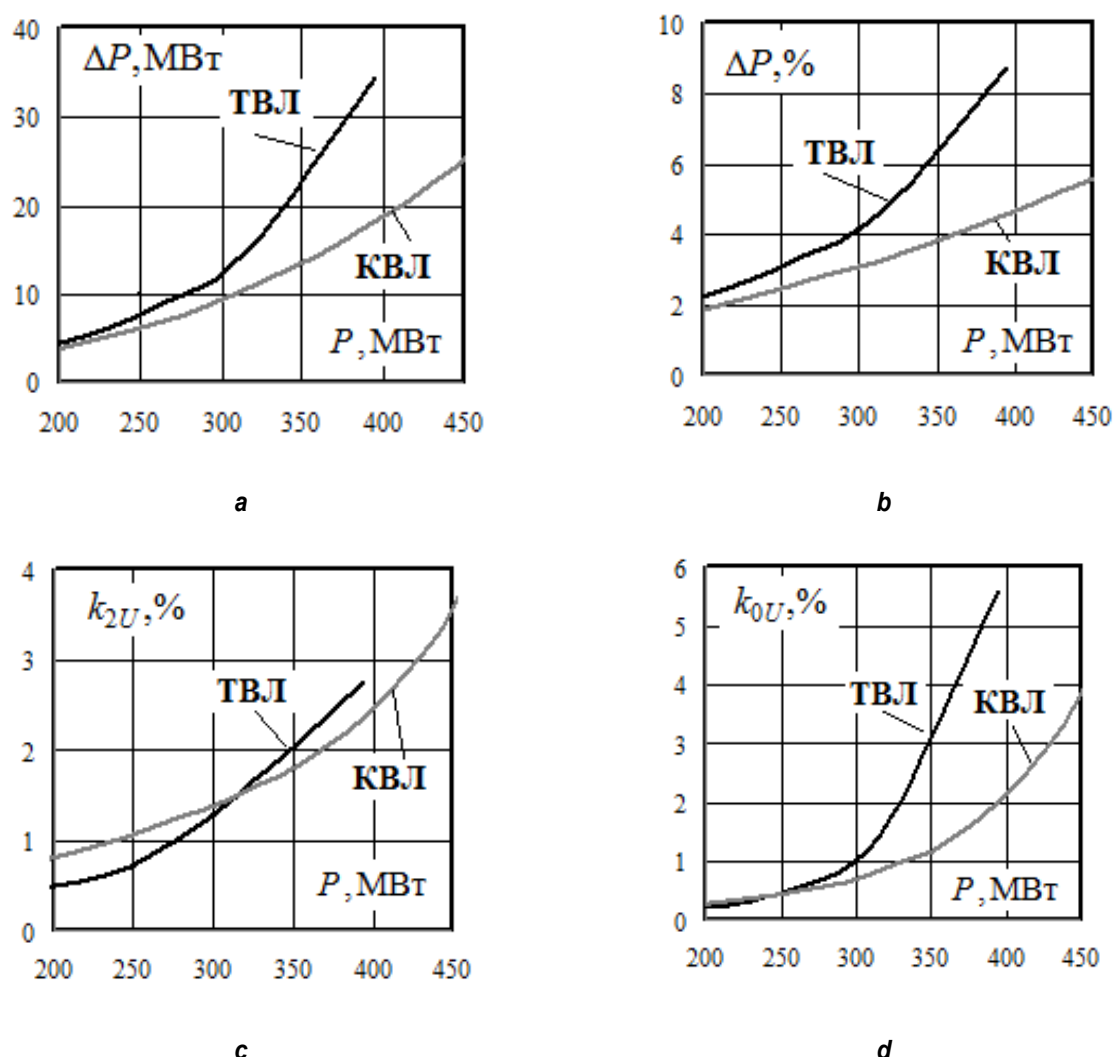


Рис. 2. Зависимости параметров режима от передаваемой мощности:
а – потери в МВт; б – потери в процентах; в – коэффициент несимметрии по обратной последовательности; д – коэффициент несимметрии по нулевой последовательности

Fig. 2. Dependences of mode parameters on transmitted power:
а – losses in MW; б – losses in percent; в – inversed sequence asymmetry coefficient;
д – zero sequence asymmetry coefficient



На рис. 7 показаны зависимости составляющих напряженностей ЭМП от времени и годографы векторов напряженностей в точке с координатами $X = 0$ м;

$Y = 1,8$ м. На рис. 8 представлены объемные диаграммы, характеризующие распределение напряженностей ЭМП в пространстве, окружающем провода ЛЭП.

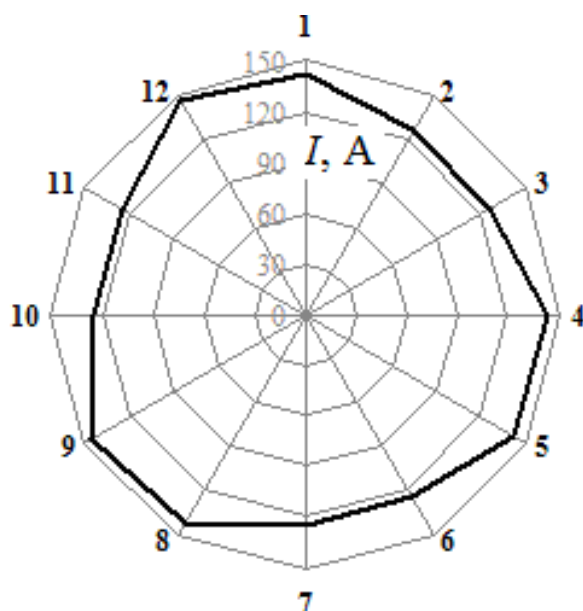
Таблица 1

Результаты расчета режимов

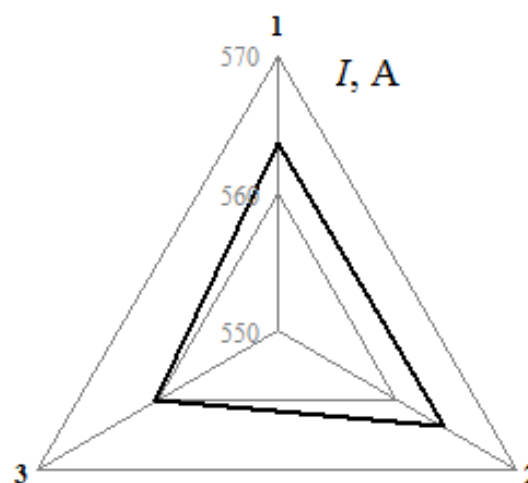
Table 1

Mode calculation results

Тип ЛЭП	Узлы	U , кВ	U , град.	I , А	I , град.
КВЛ	6	135,63	118,21	508,75	76,47
	5	135,80	-121,75	494,15	-162,79
	4	135,62	-1,73	501,18	-44,41
	7	132,34	117,08	534,31	-107,92
	8	132,49	-122,51	533,72	12,49
	9	131,00	-2,42	539,77	132,58
ТВЛ	6	134,92	118,23	550,29	71,58
	5	134,91	-121,77	550,7	-168,6
	4	134,94	-1,76	547,31	-48,48
	7	125,40	115,32	563,8	-109,67
	8	125,40	-124,87	563,9	10,13
	9	126,25	-4,90	560,07	130,1



a



b

Рис. 3. Распределение токов по проводам:

a – КВЛ; b – ТВЛ (нагрузка на приемном конце ЛЭП принималась равной $50 + j50$ МВ·А)

Fig. 3. Current distribution in wires:

a – compact overhead power line; b – typical power line (load at the power line receiving end was taken equal to $50 + j50$ MV·A)

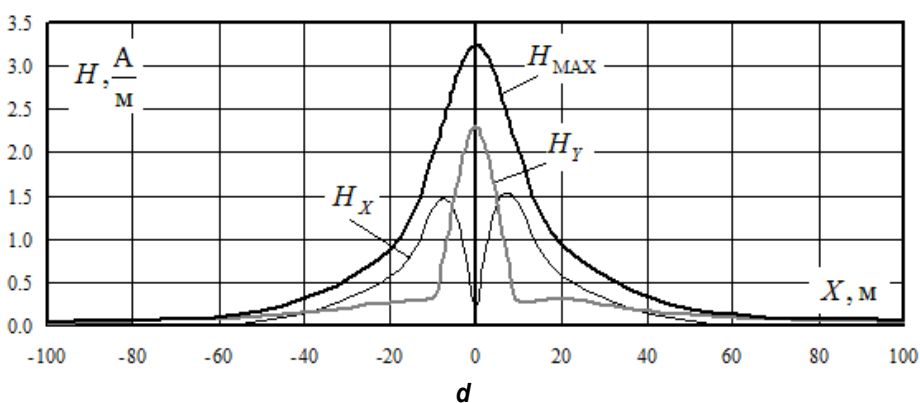
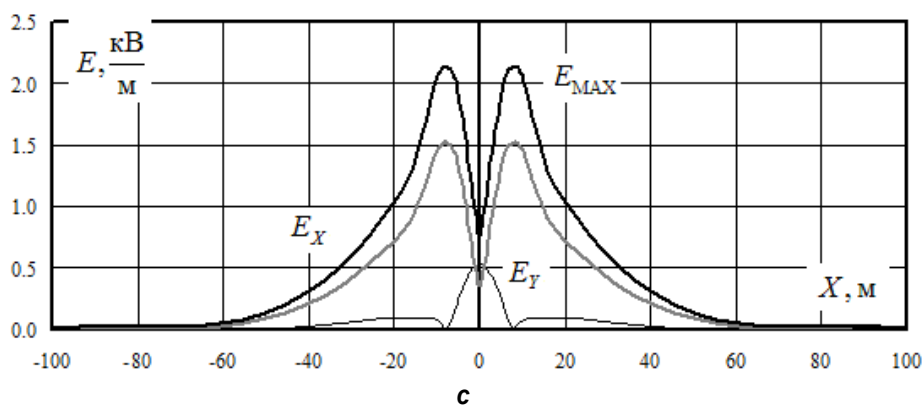
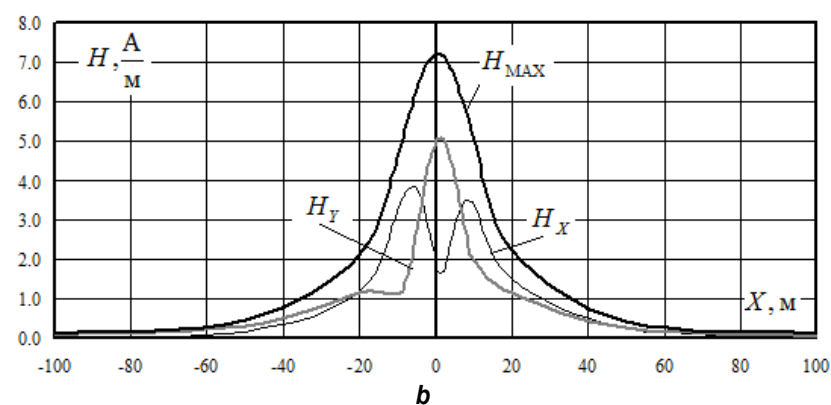
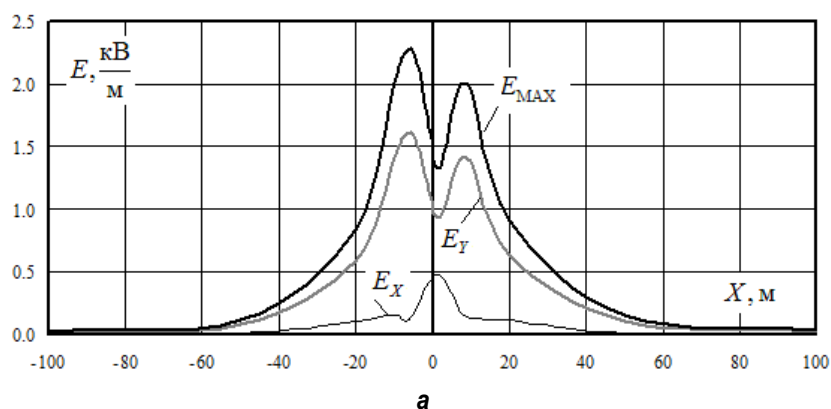
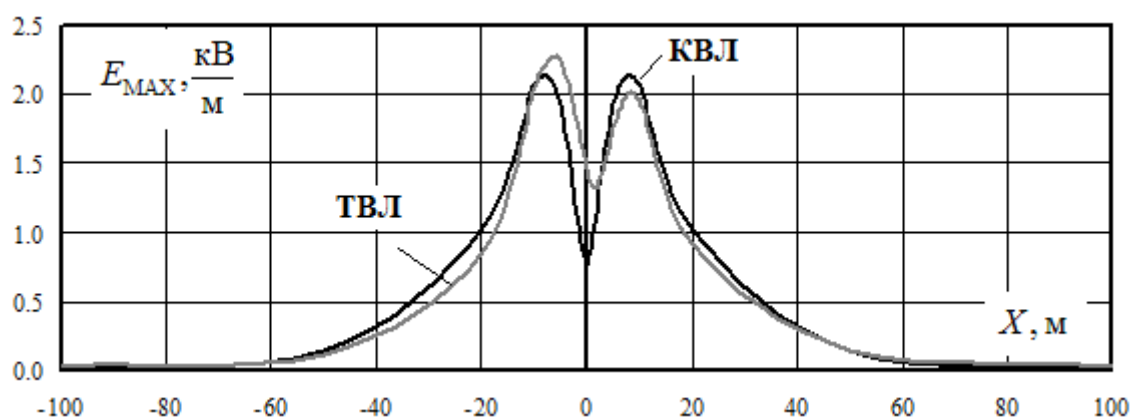
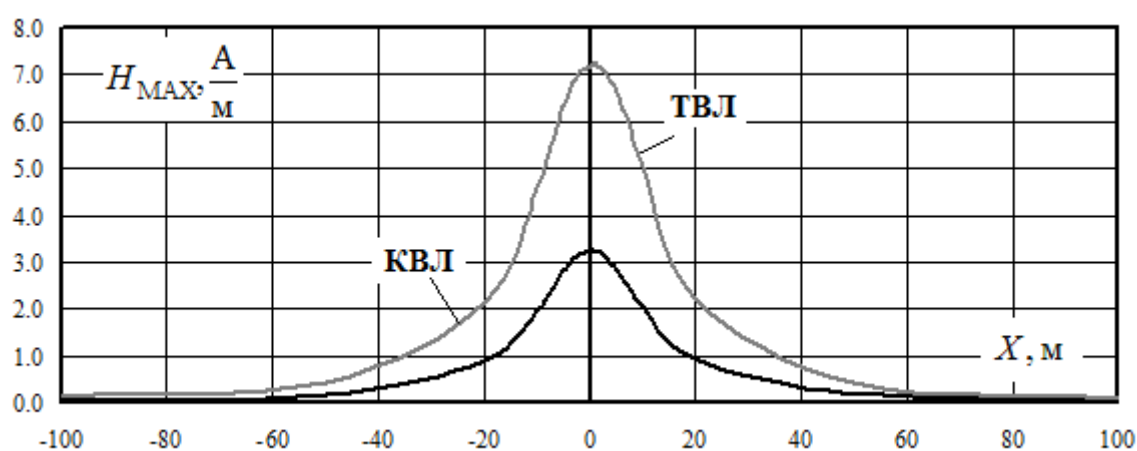


Рис. 4. Распределение напряженностей по горизонтальной оси ЛЭП:
а, б – ТВЛ; в, д – КВЛ; а, в – электрическое поле; б, д – магнитное поле
Fig. 4. Intensity distribution along the horizontal axis of a power line:
а, б – typical power line; в, д – compact power line; а, в – electric field; б, д – magnetic field



a



b

Рис. 5. Распределение напряженностей по горизонтальной оси:

a – электрическое поле; b – магнитное поле

Fig. 5. Intensity distribution along the horizontal axis:

a – electric field; b – magnetic field

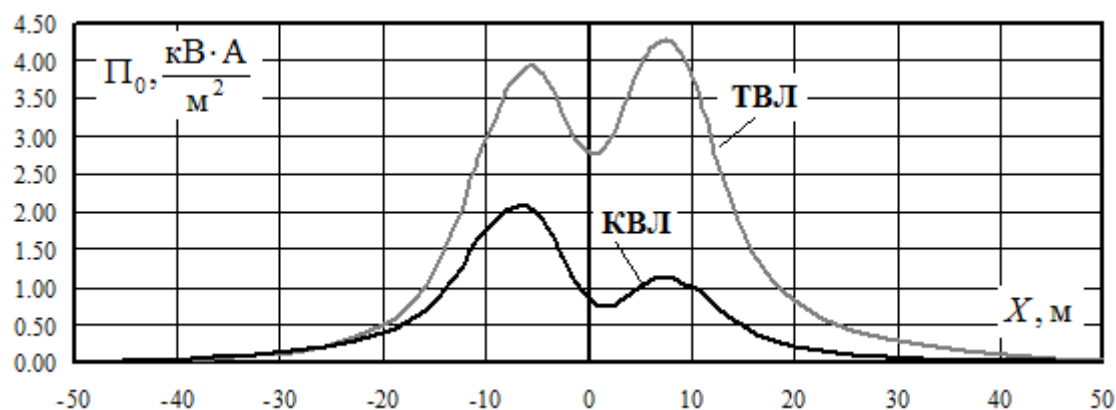


Рис. 6. Плотность потока активной электромагнитной энергии на высоте 1,8 м

Fig. 6. Active electromagnetic energy flow at the height of 1.8 m

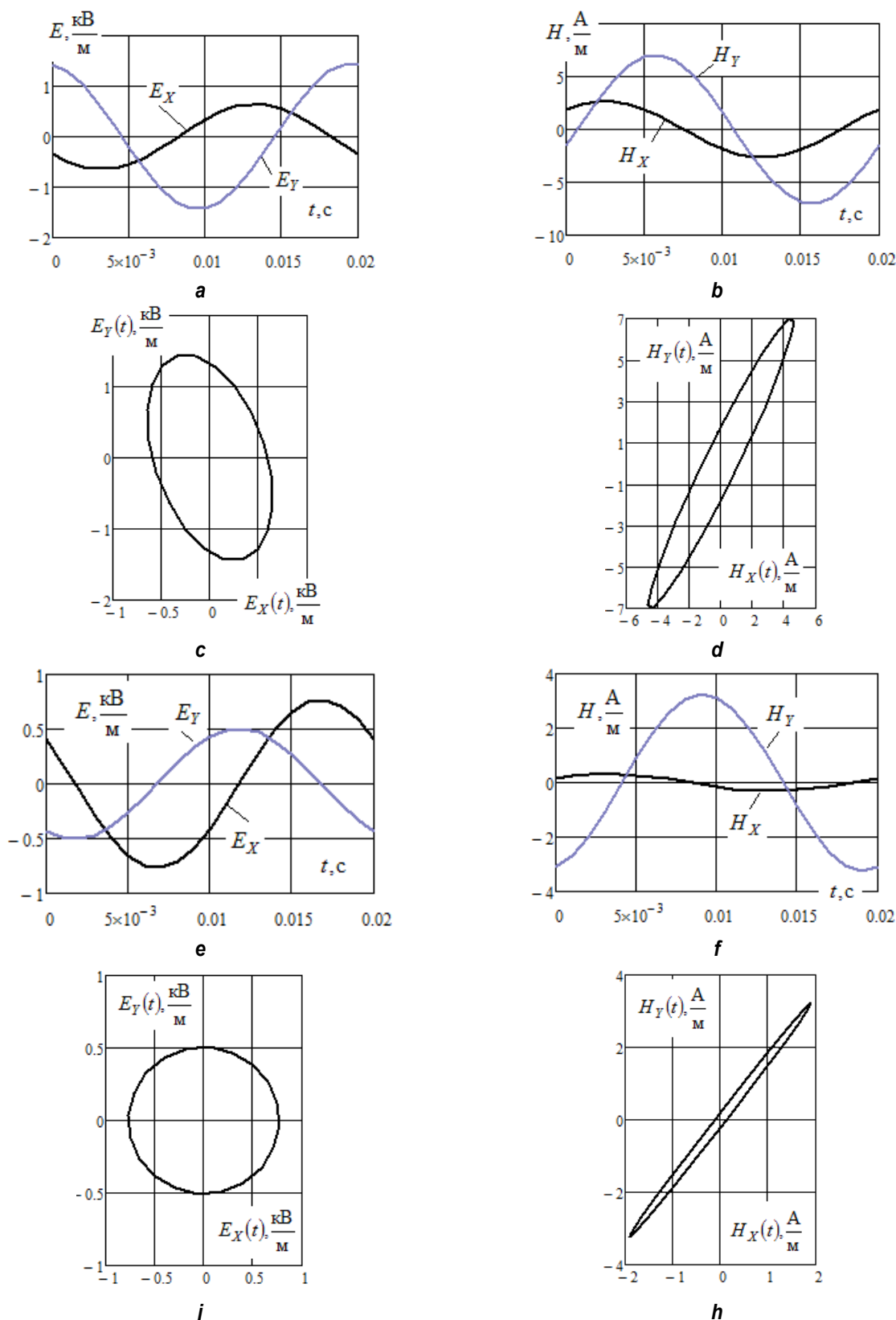


Рис. 7. Зависимости составляющих напряженностей ЭМП от времени и годографы векторов напряженностей в точке с координатами $X = 0$ м; $Y = 1,8$ м:

a, c, e, i – электрическое поле; b, d, f, h – магнитное поле; a, b, c, d – ТВЛ; e, f, i, h – КВЛ

Fig. 7. Dependences of electromagnetic field intensity components on time and hodographs of intensity vectors in the point with the coordinates $X = 0$ m; $Y = 1.8$ m:

a, c, e, i – electric field; b, d, f, h – magnetic field; a, b, c, d – typical overhead power line; e, f, i, h – compact overhead power line

Полученные результаты показывают следующее:

1. Компактная ЛЭП позволяет сократить в два раза площадь земельного участка, который необходимо занять под строительство ЛЭП.

2. При одинаковом суммарном сечении проводов КВЛ и ТВЛ потери активной мощности в компактной ЛЭП существенно снижаются; так, например, при передаваемой мощности в 375 МВт потери в КВЛ уменьшаются на 45% по сравнению с типовой ЛЭП 220 кВ.

3. На приемном конце компактной

ЛЭП наблюдается более низкая несимметрия; КВЛ обеспечивают лучшие условия электромагнитной безопасности. Напряженность электрического поля на высоте 1,8 м для оси КВЛ меньше аналогичного показателя для ТВЛ примерно в полтора раза; для магнитного поля снижение напряженности в этой же точке достигает двукратного значения.

4. Компактная ЛЭП имеет значительно больший предел передаваемой мощности по сравнению с линией традиционной конструкции.

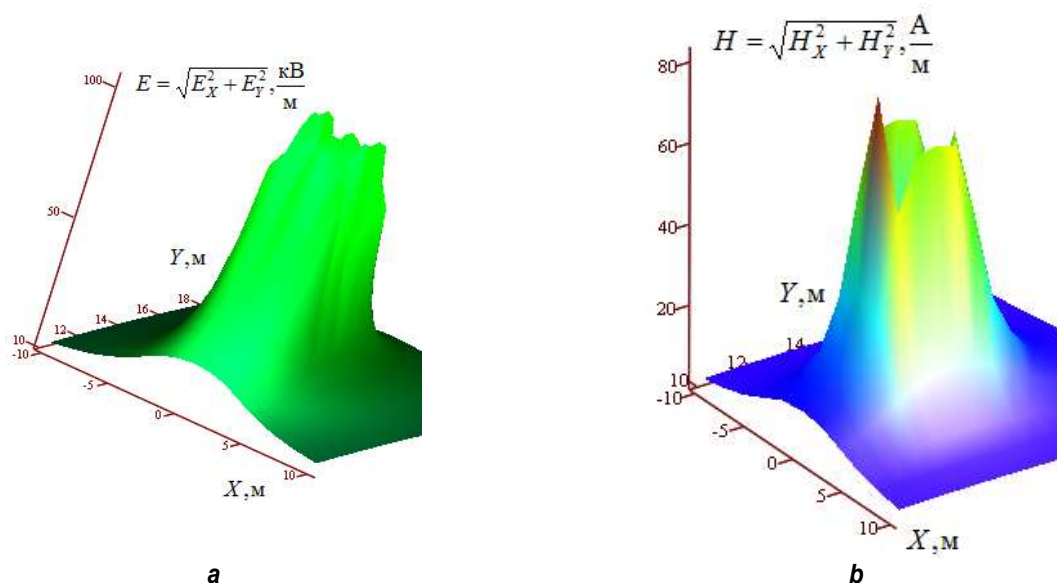


Рис. 8. Поверхности напряженностей ЭМП: а – электрическое поле; б – магнитное поле
Fig. 8. Electromagnetic field intensity surfaces: a – electric field; b – magnetic field

Заключение

Представлены методика и результаты моделирования электромагнитных полей, создаваемых компактными линиями электропередачи повышенной пропускной способности. Показано, что использование таких линий позволяет повысить мощности,

передаваемые по ЛЭП, снизить потери электроэнергии и улучшить ее качество на приемном конце ЛЭП. За счет компактного расположения проводов примерно в два раза уменьшаются площади участков земли, отчуждаемых под строительство ЛЭП.

Библиографический список

1. Александров Г.Н. Режимы работы воздушных линий электропередачи. СПб: ЦПКЭ, 2006. 139 с.
2. Дьяков А.Ф. Электрические сети сверх- и ультравысокого напряжения ЕЭС России // Теоретические основы. 2012. Т. 3. 368 с.
3. Степанов В.М., Карницкий В.Ю. Компактные линии электропередачи // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. № 3–5. С. 49–51.
4. Шакарян Ю.Г., Тимашова Л.В., Карева С.Н., По-

- столатий В.М. Эффективность передачи электрической энергии при применении компактных управляемых ВЛ // Энергия единой сети. 2014. № 3 (14). С. 4–15.
5. Шакарян Ю.Г., Тимашова Л.В., Карева С.Н., Постолатий В.М. Технические аспекты создания и режимные особенности работы в энергосистемах компактных управляемых ВЛ 220, 500 кВ // Энергия единой сети. 2012. № 4 (4). С. 36–43.
6. Зарудский Г.К., Самалюк Ю.С. О режимных осо-



бенностях компактных воздушных линий электропередачи напряжением 220 кВ // Электричество. 2013. № 5. С. 8–13.

7. Сотников В.В., Камаев В.В. Сравнительный анализ современных видов воздушных линий электропередачи и перспективы их развития // Электрика. 2013. № 9. С. 2–4.

8. Зуев Э.Н. Взгляд на проблемы передачи электроэнергии // Электро. 2005. № 2. С. 2–8.

9. Постолатий В.М., Быкова Е.В., Суслов В.М., Шакарян Ю.Г., Тимашова Л.В., Карева С.Н. Эффективность компактных управляемых высоковольтных линий электропередачи // Проблемы региональной энергетики. 2015. № 3 (29). С. 1–17.

10. Селиверстов Г.И., Комар А.В., Петренко В.Н. Конструкции и параметры компактных одноцепных линий электропередачи с концентрическим расположением фаз // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2012. № 6. С. 41–45.

11. Постолатий В.М., Быкова Е.В., Шакарян Ю.Г., Тимашова Л.В. Основные принципы создания и характеристики управляемых самокомпенсирующихся линий электропередачи // Електротехнічні та комп'ютерні системи. 2017. № 25 (101). С. 216–229.

12. Чипизубов Д.И., Константинов А.М. Режимно-технические ограничения многоцепных компактных воздушных линий 220 кВ // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI в. 2018. Т. 1. С. 257–264.

13. Постолатий В.М., Быкова Е.В., Суслов В.М., Шакарян Ю.Г., Тимашова Л.В., Карева С.Н. Методические подходы к выбору вариантов линий электропередачи нового поколения на примере ВЛ-220 кВ // Проблемы региональной энергетики. 2010. № 2. С. 1–18.

14. Петренко В.Н., Селиверстов Г.И. Физическая модель компактной электропередачи повышенной натуральной мощности // Вестник гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. 2003. № 3. С. 35–38.

15. Свешникова Е.Ю., Маколкин С.В. Технико-экономическое сопоставление электропередач 220 кВ компактного четырехцепного исполнения и 500 кВ традиционного одноцепного исполнения // Потенциал современной науки. 2018. № 1 (32). С. 4–7.

16. Мурзин С.Г. Анализ различных конструкций и систем линий электропередач переменного тока по оптимальной пропускной способности и минимальным потерям электроэнергии // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве. 2008. Т. 1. С. 206–213.

17. Буякова Н.В., Закарюкин В.П., Крюков А.В., Лэ Ван Тхао. Моделирование электромагнитных полей, создаваемых компактными многосегментными линиями электропередачи // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. Ангарск: Изд-во АГТУ, 2018. С. 152–161.

18. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркутского государственного университета, 2005. 273 с.

19. Буякова Н.В., Закарюкин В.П., Крюков А.В. Электромагнитная безопасность в системах электропитания железных дорог: моделирование и управление / Под общ. ред. А.В. Крюкова. Ангарск: Изд-во Ангарского государственного технического университета, 2018. 382 с.

20. Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of electrical fields in railway engineering structures // Advances in Engineering Research. 2018. vol. 158. P. 219–225.

21. Buyakova N., Zaharukin V., Kryukov A. Imitative Modelling of Electromagnetic Safety Conditions in Smart Power Supply Systems // Advances in Intelligent Systems Research. 2018. vol. 158. Vth International workshop "Critical infrastructures: contingency management, intelligent, agent-based, cloud computing and cyber security" (IWCI 2018), P. 20–25.

22. Electromagnetic Safety Enhancing in Railway Electric Supply Systems / Natal'ya Buyakova, Vasilii Zakaryukin, Andrey Kryukov, Tu Nguyen // E3S, Web of Conferences 58, 01006(2018) RSES 2018, P. 1–6.

References

1. Aleksandrov G.N. *Rezhimy raboty vozduzhnykh linii elektroperedachi* [Operation modes of overhead power lines]. St. Petersburg Publ., 2006. P. 139. (In Russian)

2. D'yakov A.F. *Elektricheskie seti sverkh- i ul'tra-vysokogo napryazheniya EES Rossii* [Electric grids of extra-high and ultra-high voltage of power electric systems of Russia]. *Teoreticheskie osnovy*. [Theoretic bases]. 2012, vol. 3, 368 p. (In Russian)

3. Stepanov V.M., Karnitskii V.Yu. *Kompaktnye linii elektroperedachi* [Compact power lines]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya TulGU. Technical Sciences]. 2010, no 3–5, pp. 49–51. (In Russian)

4. Shakaryan Yu.G., Timashova L.V., Kareva S.N., Postolatii V.M. Efficiency of electric power transfer in controlled compact overhead lines. *Energiya edinoi seti*

[Energy of Unified Grid]. 2014, no. 3 (14), pp. 4–15. (In Russian)

5. Shakaryan Yu.G., Timashova L.V., Kareva S.N., Postolatii V.M. *Tekhnicheskie aspekty sozdaniya i rezhim-nye osobennosti raboty v energosistemakh kompaktnykh upravlyaemykh VL 220, 500 kV* [Technical aspects of development and mode features of operation in 220-500 kV controlled compact overhead power lines]. *Energiya edinoi seti* [Energy of Unified Grid]. 2012, no. 4 (4), pp. 36–43. (In Russian)

6. Zarudskii G.K., Samalyuk Yu.S. On mode features of 220 kV compact overhead power lines. *Elektrichestvo* [Electricity]. 2013, no. 5, pp. 8–13. (In Russian)

7. Sotnikov V.V., Kamaev V.V. Comparative analysis of modern overhead power lines and their development



- prospects. *Elektrika* [Electrics]. 2013, no. 9, pp. 2–4. (In Russian)
8. Zuev E.N. A view on the problems of electric power transmission. *Elektro* [Electro]. 2005, no. 2, pp. 2–8. (In Russian)
9. Postolatii V.M., Bykova E.V., Suslov V.M., Shakaryan Yu.G., Timashova L.V., Kareva S.N. Efficiency of the compact controlled high-voltage power lines. *Problemy regional'noi energetiki* [Problems of the Regional Energetics]. 2015, no. 3 (29), pp. 1–17. (In Russian)
10. Seliverstov G.I., Komar A.V., Petrenko V.N. *Konstruktsii i parametry kompaktnykh odnotsepykh linii elektroperedachi s kontsentriruyemykh raspolozheniem faz* [Designs and parameters of compact single circuit power lines with concentric arrangement of phases]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob'edinenii SNG* [Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations]. 2012, no. 6, pp. 41–45. (In Russian)
11. Postolatii V.M., Bykova E.V., Shakaryan Yu.G., Timashova L.V. Main principles of creation and characteristics of controlled self-compensating electric transmission lines. *Elektrotekhnichni ta komp'yuterni sistemy* [Electric and computation systems]. 2017, no. 25 (101), pp. 216–229. (In Russian)
12. Chipizubov D.I., Konstantinov A.M. Regime and technical restrictions of multichain compact air-lines of 220 kV. *Nauchno-tekhnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI v.* [Scientific-technical and economic cooperation of Asian-Pacific Region countries in XXI century]. 2018, vol. 1, pp. 257–264. (In Russian)
13. Postolatii V.M., Bykova E.V., Suslov V.M., Shakaryan Yu.G., Timashova L.V., Kareva S.N. Methodical approaches to the choice of options of VL-220 kV new generation. *Problemy regional'noi energetiki* [Problems of the Regional Energetics]. 2010, no. 2, pp. 1–18. (In Russian)
14. Petrenko V.N., Seliverstov G.I. Physical model of compact power transmission of increased natural power. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P.O. Sukhogo* [Buletin of Sukhoi State Technical University of Gomel]. 2003, no. 3, pp. 35–38. (In Russian)
15. Sveshnikova E.Yu., Makoldin S.V. Technical and

Критерии авторства

Буякова Н.В. выполнила компьютерное моделирование электромагнитных полей. Крюков А.В. предложил методику моделирования, проанализировал полученные результаты, подготовил текст статьи. Буякова Н.В. и Крюков А.В. несут ответственность за плагиат. Лэ Ван Тхао выполнил моделирование режимов компактных линий электропередачи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

economic comparison of 220 kV transmission lines of a compact four-chain design and 500 kV of traditional one-chain design. *Potentsial sovremennoi nauki* [The Potential of Modern Science]. 2018, no. 1 (32), pp. 4–7. (In Russian)

16. Murzin S.G. Analysis of various designs and systems of alternating current power transmission lines by optimal throughput capacity and minimal losses of electric power. *Energoobespechenie i energosberezhenie v sel'skom khozyaistve* [Energy supply and saving in agricultural industry]. 2008, vol. 1, pp. 206–213. (In Russian)

17. Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Le Van Tkhaio. Modeling electromagnetic fields created by multiphase power lines. *Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Collection of scientific works of the Angarsk state technical university]. Angarsk: AGTU Publ., 2018, pp. 152–161. (In Russian)

18. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Slozhnonnesimmetrichnye rezhimy elektricheskikh sistem* [Complex non-symmetrical modes electric systems]. Irkutsk: Irkutsk state University Publ., 2005. 273 p. (In Russian)

19. Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Elektromagnitnaya bezopasnost' v sistemakh elektrosnabzheniya zheleznnykh dorog: modelirovanie i upravlenie* [Electromagnetic safety in power supply systems of railways: modeling and control]. Angarsk: Angarsk state technical university Publ., 2018, 382 p. (In Russian)

20. Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of electrical fields in railway engineering structures. *Advances in Engineering Research*. 2018, vol. 158, pp. 219–225.

21. Buyakova N., Zakaryukin V., Kryukov A. Imitative Modelling of Electromagnetic Safety Conditions in Smart Power Supply Systems. *Advances in Intelligent Systems Research. Vth International workshop "Critical infrastructures: contingency management, intelligent, agent-based, cloud computing and cyber security"* (IWCI 2018), 2018, vol. 158, pp. 20–25.

22. Natal'ya Buyakova, Vasilii Zakaryukin, Andrey Kryukov, Tu Nguyen Electromagnetic Safety Enhancing in Railway Electric Supply Systems. *E3S, Web of Conferences 58, 01006(2018) RSES*, 2018, pp. 1–6.

Authorship

Buyakova N.V. performed computer modeling of electromagnetic fields. Kryukov A.V. proposed the modeling method, analyzed the obtained results and prepared the manuscript. Buyakova N.V. and Kryukov A.V. bear the responsibility for plagiarism. Le Van Thao carried out the modeling of compact power line modes.

Conflict of interest

The authors declares no conflict of interest.



Оригинальная статья / Original article

УДК 351.86

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-11-170-181>

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЕТЕЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ИТАЛИИ И ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

© Е.В. Носырева¹

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

РЕЗЮМЕ: Приводится сравнительный анализ топологий сетей электроснабжения Италии и Восточной Сибири по нескольким параметрам: средняя степень узлов, средняя длина пути, средний коэффициент кластеризации, плотность графа, распределение степени узлов и коэффициенты корреляции мер центральностей. Для анализа сетей используется аппарат теории комплексных сетей. Выявлено, что данные сети имеют схожие характеристики и структуру. Они не описываются моделью классических случайных графов и не являются безмасштабными. Исследована корреляция мер центральностей для данных сетей. Выявлено, что характер корреляции схож для обеих сетей, это свидетельствует о похожести их топологических структур. Кроме того, это означает, что степень согласованности рангов узлов, полученных с помощью различных мер центральности, будет примерно одинакова. Следовательно, для сети Восточной Сибири можно ожидать аналогичной эффективности метода. Так как электросети Италии и Восточной Сибири имеют схожую топологию, метод выявления критически важных объектов будет эффективен для обеих сетей.

Ключевые слова: критические инфраструктуры, критически важные объекты, энергетика, комплексные сети, топология сетей, меры центральности

Благодарность: Результаты, представленные в статье, получены при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-07-00474.

Информация о статье: Дата поступления 02 июля 2018 г.; дата принятия к печати 30 октября 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 ноября 2018 г.

Для цитирования: Носырева Е.В. Сравнительный анализ топологических свойств сетей электроснабжения Италии и Восточной Сибири. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(11):170–181. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-170-181.

COMPARATIVE ANALYSIS OF TOPOLOGICAL PROPERTIES OF ELECTRICAL SUPPLY NETWORKS IN ITALY AND EASTERN SIBERIA

Elena V. Nosyreva

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

ABSTRACT: The article provides a comparative analysis of the topologies of the power supply networks in Italy and Eastern Siberia: the average degree of nodes, the average path length, the average clustering coefficient, the density of the graph, the distribution of the degree of nodes and the correlation coefficients of the centrality measures. The theory of complex networks is used to analyze the networks. The analysis has revealed the similarity of these networks characteristics and structure. It is shown that the network data are not described by the model of classical random graphs and are not scale-free. The correlation of centrality measures for these networks has been studied as well. It is revealed that the nature of the correlation is similar for both networks, it indicates the similarity of their logical structures. In addition, this means that the degree of consistency of node ranks obtained by different centrality measures will be approximately the same. Therefore, a similar efficiency of the method can be expected for the Eastern Siberia network. Since the electrical power supply networks in Italy and Eastern Siberia have a similar topology, the method of critical object identification will be effective for both networks.

¹Носырева Елена Владимировна, аспирант кафедры автоматизированных систем, e-mail: nev-7@list.ru
Elena V. Nosyreva, Postgraduate student of the Department of Automated Systems, e-mail: nev-7@list.ru



Keywords: critical infrastructures, critical objects, energy sector, complex networks, network topology, centrality measures

Acknowledgement: The results presented in the article were obtained with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research grant no. 16-07-00474.

Information about the article: Received July 02, 2018; accepted for publication 30 October, 2018; available online 30 November, 2018.

For citation: Nosyreva E.V. Comparative analysis of topological properties of electrical supply networks in Italy and Eastern Siberia. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(11):pp. 170–181. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-170-181.

Введение

Одним из главных аспектов национальной безопасности является обеспечение безопасности критических инфраструктур. Под критической инфраструктурой понимается часть гражданской инфраструктуры, представляющая собой совокупность физических или виртуальных систем и средств, важных для государства в такой мере, что их выход из строя либо уничтожение может привести к губительным последствиям в области обороны, экономики, здравоохранения и безопасности нации. Основной целью исследования критических инфраструктур является их защита. При этом главная задача состоит в выявлении ключевых объектов (или их совокупности), воздействие на которые может оказать наиболее негативный эффект на отрасль экономики, ключевой ресурс или всю инфраструктуру, а также в оценке последствий подобного воздействия и разработке механизмов снижения таких рисков [1, 2]. Эти ключевые объекты называются критически важными объектами. В [3] под критически важным объектом понимается объект, нарушение или прекращение функционирования которого приводит к потере управления экономикой Российской Федерации, субъекта Российской Федерации или муниципального образования, необратимому негативному изменению или разрушению экономики Российской Федерации, субъекта Российской Федерации или муниципального образования, либо существенному снижению безопасности жизнедеятельности населения, проживающего на этих территориях, на длительный период.

Анализ взаимосвязи секторов крити-

ческой инфраструктуры выявил, что из всех секторов наиболее важным является энергетический сектор [4]. Это не удивительно, так как энергетический сектор играет важную роль в социальной и экономической жизни страны, от него зависят все остальные сектора критической инфраструктуры.

Энергетический сектор представляет собой сложную взаимозависимую систему. Подобные системы удобно представлять в виде сложных (комплексных) сетей. Под сложными (комплексными) сетями понимаются сети с большим числом элементов, обладающие нетривиальными топологическими свойствами. Теория, занимающаяся изучением таких сетей, называется теорией сложных (комплексных) сетей. Подход к анализу сложных систем на основе теории комплексных сетей весьма эффективен во многих научных областях, например, в социологии, биологии, технике и т.д. [5–7]. Не является исключением и энергетика. Например, можно рассмотреть систему электроснабжения как комплексную сеть и проанализировать её методами теории сложных сетей с целью выявления критически важных объектов [4]. Эффективность данного подхода обусловлена, прежде всего, тем, что он позволяет абстрагироваться от лишних деталей, упрощая рассмотрение элементов и взаимодействий и сосредотачиваясь на поведении системы в целом. При этом свойства системы зависят от топологии сети, которая моделирует связи между элементами системы, поэтому особое внимание уделяется анализу топологических свойств этой сети.



Для определения важности или влияния узлов в теории сложных сетей вводится характеристика, называемая «центральность». В работе [4] на примере сети электроснабжения Италии было показано, что меры центральности можно эффективно применять для выявления критически важных объектов в энергетике. Однако значения мер центральности узлов зависят от топологии сети. В данном контексте нельзя гарантировать, что для сетей с разными топологическими свойствами подобный подход будет одинаково эффективен. В

связи с этим было решено сравнить магистральные сети электроснабжения Италии и России по нескольким параметрам: средняя степень узлов, средняя длина пути, средний коэффициент кластеризации, плотность графа, распределение степени узлов и коэффициенты корреляции мер центральностей. Так как сеть электроснабжения России намного больше, чем сеть Италии, было решено использовать для сравнения сеть Восточной Сибири, сопоставимую по размерам с сетью Италии.

Сравнение сетей электроснабжения Италии и Восточной Сибири

Для сравнения использовались сети электроснабжения Италии и Восточной Сибири. Данные по сети электроснабжения Италии были взяты из статьи [7], по сети электроснабжения Восточной Сибири из приказа «Об утверждении схемы и программы развития Единой энергетической системы России на 2016 - 2022 годы» [8]. Сеть электроснабжения Восточной Сибири включает линии электропередачи и подстанции напряжением 220кВ и выше, а также электростанции. Информация по уровням напряжений, используемым в сети электроснабжения Италии, отсутствует. Для данных сетей были построены неориентированные невзвешенные графы. Выбор такого вида графов обусловлен недостатком информации по сети электроснабжения Италии. Таким образом, вес каждого ребра в построенных сетях одинаков и равен 1. Однако такое упрощение не мешает сделать выводы об основных топологических свойствах данных сетей. Так как сеть Италии включает всего 67 узлов, а сеть Восточной Сибири 140, для получения более объективной картины случайным образом был выбран фрагмент сети Восточной Сибири, состоящий также из 67 узлов. Процедура выбора фрагмента сети состояла в следующем. За основу была выбрана подсеть, включающая линии электропередач и подстанции с уровнем напряжения 500кВ. Далее к ней добавлялись смежные узлы с более низким уровнем напряжения до тех

пор, пока общее число узлов не достигло 67. Также для сравнения с сетями энергоснабжения был смоделирован классический случайный граф. Цель такого сравнения – определить, возможно ли для моделирования сетей электроснабжения использовать случайные графы. Для генерации случайного графа использовалась модель Эрдёша-Реньи с параметрами

$$n = 67 \text{ и } p = 0,04,$$

где n – число узлов; p – вероятность соединения двух произвольных узлов ребром [9].

В данной модели фиксируется вероятность p , с которой любые две вершины соединяются ребром независимо от всех остальных пар вершин. Значение вероятности p было выбрано таким образом, чтобы число ребер случайного графа было сопоставимо с числом ребер сетей электроснабжения. Для расчета вероятности использовалась формула

$$p = 2m/n(n-1),$$

где m – число ребер; n – число узлов случайного графа.

Таким образом, проводилось сравнение четырех сетей: сети электроснабжения Италии, фрагмента сети Восточной Сибири (67 узлов), сети Восточной Сибири в целом и случайного графа. В табл. 1 приведены следующие параметры сетей: чис-



ло узлов, число ребер, средняя степень узла, средняя длина пути, средний коэффициент кластеризации и плотность графа.

Степень узла сети – это число связей данного узла, т.е. количество ребер, инцидентных вершине графа, соответствующей узлу сети. Средняя степень – это среднее значение степени по всем узлам сети. Длина пути – это длина кратчайшего маршрута между узлами сети. Средняя длина пути рассматривается как среднее значение длины пути по всем узлам. Коэффициент кластеризации узла – вероятность того, что два ближайших соседа узла сами являются соседями, вычисляется по формуле

$$C_i = \frac{2 * t}{q(q-1)},$$

где q – число ближайших соседей узла;
 t – число связей между ними.

Плотность графа показывает, насколько он близок к полному графу. Для полных графов плотность равна 1. По данным характеристикам можно сделать неко-

торые выводы о типе и свойствах сетей. Например, известно, что классические случайные сети или сети Эрдёша-Реньи имеют низкое значение коэффициента кластеризации и небольшую среднюю длину пути. Сети тесного мира обладают высокой кластеризацией и небольшой средней длиной пути. Сети тесного мира или сети Воттса-Строгатца (WS networks) можно рассматривать как суперпозицию регулярных решеток и классических случайных сетей Эрдеша – Реньи [5].

Анализируя табл. 1, можно сделать вывод, что рассматриваемые сети электроснабжения имеют схожие характеристики. Сети имеют невысокую среднюю длину пути и невысокий средний коэффициент кластеризации, однако эти характеристики выше, чем у случайного графа. Также можно заметить, что для сети Восточной Сибири с ростом числа узлов возрастает средняя длина пути и уменьшается коэффициент кластеризации, а также уменьшается плотность графа.

Таблица 1

**Характеристики сетей электроснабжения
Италии и Восточной Сибири**

Table 1

**Characteristics of electrical power supply networks
in Italy and Eastern Siberia**

Характеристика	Сеть			
	Италия	Восточная Сибирь (67 узлов)	Восточная Сибирь (140 узлов)	Случайный граф ($p = 0.04$)
Количество узлов	67	67	140	67
Количество ребер	90	94	197	89
Средняя степень	2,687	2,8	2,814	2,657
Средняя длина пути	6,799	5,3	8,905	4,407
Средний коэффициент кластеризации	0,146	0,223	0,192	0,022
Плотность графа	0,041	0,043	0,02	0,04



Одной из наиболее важных характеристик сети является распределение узлов по числу связей. Поскольку рассматриваемые графы не случайны, под распределением узлов по числу связей понимается частота появления узлов степени q в графе. Во многих случаях знания этой характеристики достаточно для понимания свойств этой сети и процессов, которые в ней происходят [5]. Для анализируемых сетей были построены гистограммы распределения узлов по числу связей (рис. 1). Из рис.1 видно, что внешний вид гистограмм схож для всех сетей, кроме случайного графа. Известно, что распределение степеней случайного графа является Пуассоновским. Для большей уверенности для сетей электроснабжения была выдвинута гипотеза о том, что распределение степени узлов также имеет распределение Пуассона.

Проверка с помощью критерия хи-квадрат при уровне значимости 0,05 не подтверждает данную гипотезу. Не является распределение узлов по числу связей и степенным. Как известно, степенным законом распределения описываются безмасштабные сети [5, 6]. Таким образом, можно сделать вывод, что исследуемые сети не описываются моделью классического случайного графа и не являются безмасштабными.

Поскольку основной целью исследования является анализ возможности использования мер центральности для выявления критически важных узлов сетей электроснабжения, для анализируемых сетей были рассчитаны следующие меры центральности: степень узла, эксцентриситет, центральность по близости, гармоническая центральность, нагрузка узла, HITS, PageRank и центральность собственного вектора.

Эксцентриситет вершины – это наибольший из кратчайших путей между данной вершиной и любой другой вершиной графа.

Центральность по близости (closeness centrality) показывает, насколько близко узел располагается относительно

других узлов. Чем больше центральность узла, тем ниже его общее расстояние от всех других узлов:

$$C_{clos}(x) = \frac{1}{\sum_y r(x, y)}, \quad (1)$$

где $r(x, y)$ – расстояние от узла x до узла y [10, 11].

Гармоническая центральность определяется следующим образом:

$$C_{garm}(x) = \sum_{y \neq x} \frac{1}{r(x, y)}. \quad (2)$$

Нагрузка узла x , или центральность по посредничеству (betweenness centrality), определяется как доля кратчайших путей между всеми остальными узлами, которые проходят через узел x :

$$C_{betw}(x) = \sum_{st} \frac{\sigma_{st}(x)}{\sigma_{st}}, \quad (3)$$

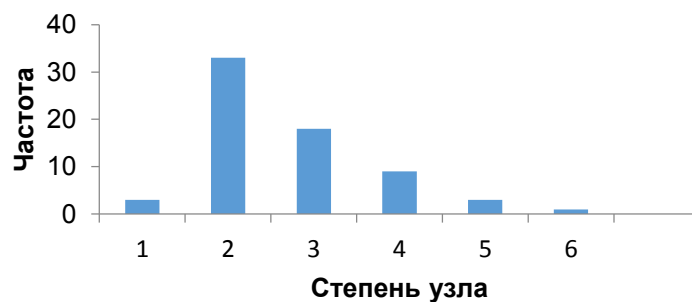
где $\sigma_{st}(x)$ – число кратчайших путей из узла s в узел t через узел x ; σ_{st} – общее число кратчайших путей между всеми парами s и t [10, 11].

В алгоритме HITS рассчитываются две оценки: оценка авторитетности и посредническая оценка:

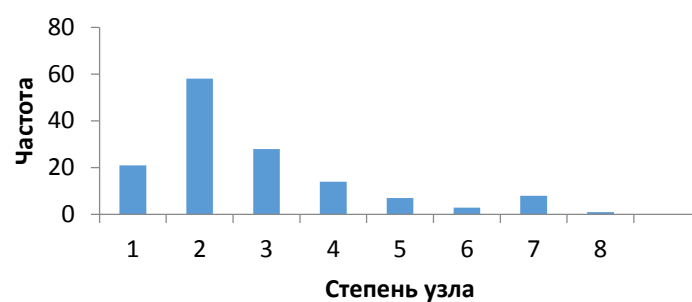
$$C_{Hauth}(x) = \sum_{y \in M_1(x)} C_{Hhub}(y), \quad (4)$$

$$C_{Hhub}(x) = \sum_{y \in M_2(x)} C_{Hauth}(y),$$

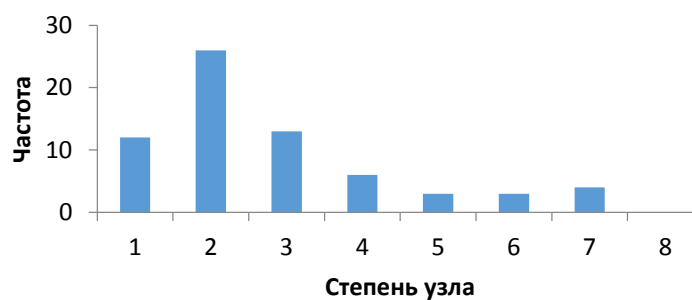
где $M_1(x)$ – множество узлов, связанных с x ; $M_2(x)$ – множество узлов, на которые указывает x . В общем случае C_{Hauth} определяет важность узла как источника, а C_{Hhub} – важность узла как посредника в потоке сети [10, 11].



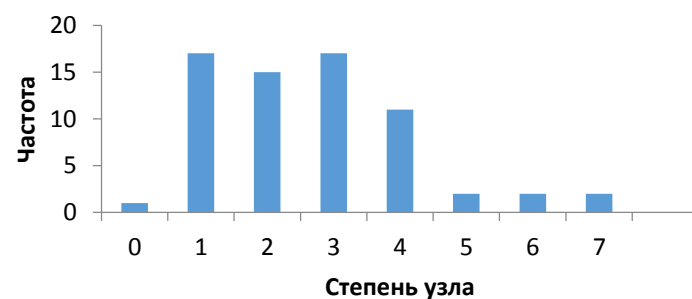
a



b



c



d

Рис.1. Распределение узлов по числу связей:
а – сеть электроснабжения Италии; б – сеть электроснабжения
Восточной Сибири; с – фрагмент сети Восточной Сибири (67 узлов); д – случайный граф
Fig.1. Degree distribution: a – power supply network in Italy; b – power supply network in Eastern Siberia;
с – subnetwork of Eastern Siberia (67 nodes); d – random graph



PageRank – это метод вычисления веса узла сети путем подсчета важности входящих в него дуг, т.е. узел, источники входящих связей которого имеют больший вес, сам получает больший вес. PageRank удовлетворяет следующему уравнению:

$$C_{PR}(x_i) = \alpha \sum_j a_{ji} \frac{C_{PR}(x_j)}{d^+(x_j)} + \frac{1-\alpha}{n}, \quad (5)$$

где $d^+(x)$ – количество исходящих связей узла x_j , a_{ji} – элемент матрицы смежности A ($a_{ji}=1$ если вершина j связана с вершиной i , в противном случае $a_{ji}=0$), α – константа, n – число узлов сети. Если у узла x_j нет исходящих связей, то $d^+(x)$ приравнивают к нулю, чтобы избежать деления на ноль. Для неориентированных графов $d^+(x) = d(x)$ [10, 11].

Пусть A – матрица смежности графа $G(V, E)$, т.е. $a_{ij}=1$ если вершина i связана с вершиной j и $a_{ij}=0$ в противном случае. Центральность вершины может быть определена следующим образом:

$$x_i = \frac{1}{\lambda} \sum_{j \in G} a_{ij} x_j, \quad (6)$$

где λ – константа. Это уравнение можно переписать в матричном виде:

$$Ax = \lambda x. \quad (7)$$

Решение этого уравнения является собственным вектором матрицы A . Главный собственный вектор матрицы A называется центральностью по собственному вектору [10, 11].

Следует заметить, что меры центральностей используются для выявления относительной важности узлов внутри сети и, как правило, не сравниваются по абсолютным показателям. Узлы сети ранжируются в зависимости от значения меры, и сравнению подлежат ранги полученных

узлов.

Для проверки согласованности рангов узлов, полученных с помощью разных мер центральности может быть использован коэффициент ранговой корреляции Кендалла. Коэффициент ранговой корреляции Кендалла применяется для выявления взаимосвязи между показателями, если их можно ранжировать и рассчитывается по формуле:

$$\tau = \frac{n_{core} - n_{discor}}{0,5n(n-1)},$$

где n_{core} – число конкордантных пар, n_{discor} – число дисконкордантных пар, n – общее число пар. Две пары наблюдений (x_i, y_i) и (x_j, y_j) являются конкордантными, если имеется согласие между рангами соответствующих элементов этих пар, т.е. $x_i > x_j$ и $y_i > y_j$, или $x_i < x_j$ и $y_i < y_j$. Коэффициент корреляции Кендалла можно трактовать как разность вероятностей совпадения и не совпадения рангов по обоим показателям для наугад выбранной пары объектов. Если для разных сетей уровень согласованности рангов узлов примерно одинаков, то можно считать, что метод ранжирования узлов с помощью мер центральностей одинаково эффективен для каждой из этих сетей. Кроме того, это также может указывать на близость топологических свойств данных сетей.

В табл. 2–5 показаны результаты расчета матрицы корреляций Кендалла для анализируемых сетей. В таблицах приняты следующие обозначения: d – степень вершины, e – эксцентриситет, C_{clos} – центральность по близости, C_{harm} – гармоническая центральность, C_{betw} – нагрузка узла, C_{HITS} – HITS, C_{PR} – PageRank, C_{ev} – центральность собственного вектора. Для HITS указан один коэффициент, так как значения коэффициентов для $C_{Hauth}(x)$ и $C_{Hhub}(x)$ совпадают. Жирным шрифтом в таблице выделены коэффициенты, большие 0,45,



курсивом – коэффициенты, большие 0,7. Отметим, что априори ожидается высокий уровень корреляции между центральностью по близости и гармонической цен-

тральностью, так как обе эти меры зависят от значения $r(x, y)$.

Таблица 2

Матрица корреляций Кендалла мер центральности для сети электроснабжения Италии

Table 2

Kendall correlation matrix for centrality measures for the electrical supply network of Italy

	d	e	C_{clos}	C_{harm}	C_{betw}	C_{HITS}	C_{PR}	C_{ev}
d	1,000	-0,245	0,379	0,534	0,513	0,329	0,817	0,586
e	-0,245	1,000	-0,589	-0,385	-0,397	-0,060	-0,126	-0,213
C_{clos}	0,379	-0,589	1,000	0,754	0,414	0,477	0,141	0,527
C_{harm}	0,534	-0,385	0,754	1,000	0,444	0,630	0,218	0,725
C_{betw}	0,513	-0,397	0,414	0,444	1,000	0,131	0,455	0,265
C_{HITS}	0,329	-0,060	0,477	0,630	0,131	1,000	0,088	0,650
C_{PR}	0,817	-0,126	0,141	0,218	0,455	0,088	1,000	0,206
C_{ev}	0,586	-0,213	0,527	0,725	0,265	0,650	0,206	1,000

Таблица 3

Матрица корреляций Кендалла мер центральности для фрагмента сети электроснабжения Восточной Сибири (67 узлов)

Table 3

Kendall correlation matrix for centrality measures for the electrical supply subnetwork of Eastern Siberia (67 nodes)

	d	e	C_{clos}	C_{harm}	C_{betw}	C_{HITS}	C_{PR}	C_{ev}
d	1,000	-0,305	0,372	0,499	0,560	0,315	0,825	0,498
e	-0,305	1,000	-0,657	-0,504	-0,383	-0,290	-0,195	-0,269
C_{clos}	0,372	-0,657	1,000	0,822	0,365	0,629	0,160	0,597
C_{harm}	0,499	-0,504	0,822	1,000	0,414	0,649	0,242	0,735
C_{betw}	0,560	-0,383	0,365	0,414	1,000	0,087	0,535	0,217
C_{HITS}	0,315	-0,290	0,629	0,649	0,087	1,000	0,027	0,785
C_{PR}	0,825	-0,195	0,160	0,242	0,535	0,027	1,000	0,195
C_{ev}	0,498	-0,269	0,597	0,735	0,217	0,785	0,195	1,000



Таблица 4
Матрица корреляций Кендалла мер центральности для сети электроснабжения
Восточной Сибири (140 узлов)

Table 4
Kendall correlation matrix for centrality measures for the electrical supply network
of Eastern Siberia (140 nodes)

	d	e	C_{clos}	C_{harm}	C_{betw}	C_{HITS}	C_{PR}	C_{ev}
d	1,000	-0,244	0,294	0,457	0,594	0,267	0,845	0,581
e	-0,244	1,000	-0,638	-0,575	-0,053	-0,384	-0,029	-0,563
C_{clos}	0,294	-0,638	1,000	0,813	0,140	0,703	0,107	0,621
C_{harm}	0,457	-0,575	0,813	1,000	0,270	0,657	0,234	0,756
C_{betw}	0,594	-0,053	0,140	0,270	1,000	0,115	0,598	0,259
C_{HITS}	0,267	-0,384	0,703	0,657	0,115	1,000	0,101	0,538
C_{PR}	0,845	-0,029	0,107	0,234	0,598	0,101	1,000	0,301
C_{ev}	0,581	-0,563	0,621	0,756	0,259	0,538	0,301	1,000

Таблица 5
Матрица корреляций Кендалла мер центральности для случайного графа
Table 5
Kendall correlation matrix for random graph centrality measures

	d	e	C_{clos}	C_{harm}	C_{betw}	C_{HITS}	C_{PR}	C_{ev}
d	1,000	-0,336	0,616	0,727	0,857	0,588	0,891	0,664
e	-0,336	1,000	-0,588	-0,510	-0,375	-0,533	-0,196	-0,462
C_{clos}	0,616	-0,588	1,000	0,883	0,603	0,829	0,408	0,832
C_{harm}	0,727	-0,510	0,883	1,000	0,677	0,792	0,506	0,861
C_{betw}	0,857	-0,375	0,603	0,677	1,000	0,542	0,753	0,597
C_{HITS}	0,588	-0,533	0,829	0,792	0,542	1,000	0,383	0,865
C_{PR}	0,891	-0,196	0,408	0,506	0,753	0,383	1,000	0,453
C_{ev}	0,664	-0,462	0,832	0,861	0,597	0,865	0,453	1,000

Анализ таблиц 2–5 показывает, что характер корреляции мер центральностей схож для всех графов, кроме случайного, и, следовательно, соотношение рангов узлов по данным мерам будет примерно одинаковым для исследуемых сетей электроснабжения. Видно, что для случайного графа коэффициенты корреляции в целом выше, т.е. ранги по разным мерам лучше согласуются между собой. Лучше всего коррелируют между собой следующие меры: степень и PageRank, центральность по близости и гармоническая центральность, гармоническая центральность и центральность собственного вектора. Как и ожидалось, коэффициент

корреляции между центральностью по близости и гармонической центральностью высокий, что связано с тем, что обе величины зависят от одного и того же значения $r(x, y)$. Можно предположить, что высокие значения коэффициента корреляции по другим мерам также связаны с подобной зависимостью и будут проявляться для любых видов графов. В таком случае возможно сокращение числа анализируемых мер путем исключения одной из двух мер, между которыми существует высокий уровень корреляции. Однако это предположение требует дальнейшей проверки.



Заключение

Одним из главных аспектов национальной безопасности является обеспечение безопасности критических инфраструктур. Основной целью исследования критических инфраструктур является их защита. При этом главная задача состоит в выявлении критически важных объектов, воздействие на которые может оказать наиболее негативный эффект на отрасль экономики, ключевой ресурс или всю инфраструктуру, а также в оценке последствий подобного воздействия и разработке механизмов снижения таких рисков [1, 2]. Среди всех секторов критической инфраструктуры наиболее важным является энергетический сектор [4]. Так как энергетический сектор представляет собой сложную взаимозависимую сеть, удобно представлять его в виде комплексной сети.

Для определения важности или влияния узлов в теории сложных сетей используется характеристика, называемая «центральность». Меры центральности можно эффективно применять для выявления наиболее важных объектов критических инфраструктур, в том числе и в энергетике. Однако значения мер центральности

узлов зависят от топологии сети. Поэтому для сетей со схожими топологическими свойствами данный подход будет одинаково эффективен.

В исследовании приведен сравнительный анализ топологических свойств сетей электроснабжения Италии и Восточной Сибири. В результате анализа выявлено, что данные сети имеют схожие характеристики и структуру. Показано, что данные сети не описываются моделью классических случайных графов и не являются безмасштабными. Также исследована корреляция мер центральностей для данных сетей. Выявлено, что характер корреляции схож для обеих сетей, что еще раз свидетельствует о схожести их топологических структур. Кроме того, это означает, что степень согласованности рангов узлов, полученных с помощью различных мер центральности, будет примерно одинакова. Эффективность данного метода для сети электроснабжения Италии была показана в работе [4]. Следовательно, для сети Восточной Сибири можно ожидать аналогичной эффективности метода.

Библиографический список

1. Кондратьев А. Современные тенденции в исследовании критической инфраструктуры в зарубежных странах // Зарубежное военное обозрение. 2012. № 1. С. 19–30
2. Массель Л.В. Конвергенция исследований критических инфраструктур, качества жизни и безопасности [Электронный ресурс] // Информационные технологии и системы тр. VI междунар. науч. конф. (Банное, Россия, 1–5 марта 2017 г.). Челябинск: Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2017. С. 170–175. URL: <http://iit.csu.ru/content/docs/science/itis2017/itis2017.pdf> (16.07.2018)
3. Методика отнесения объектов государственной и негосударственной собственности к критически важным объектам для национальной безопасности Российской Федерации. утв. МЧС 17.10.2012 №2-4-87-23-14. М., 2012 г.
4. Носырева Е.В. Применение теории комплексных сетей для выявления критически важных объектов энергетики // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 7. С. 51–66. doi: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-7-51-66>
5. Евин И.А. Введение в теорию сложных сетей // Компьютерные исследования и моделирование. 2010. Т. 2. № 2. С. 121–141
6. Albert R., Barabasi A.-L. Statistical mechanics of complex networks // Rev. Mod. Phys. 2002, V. 74, № 47; DOI: [arXiv:cond-mat/0106096](https://arxiv.org/abs/cond-mat/0106096).
7. Buldyrev, S. Parshani R., Paul G., Stanley H., Havlin Sh. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks. // Nature, Vol. 464|15 April 2010, pp. 1025–1028 DOI:10.1038/nature08932
8. Об утверждении схемы и программы развития Единой энергетической системы России на 2016–2022 годы: приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 1 марта 2016 г. №147. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/8170> (16.07.2018).
9. Райгородский А.М. Модели случайных графов и их применения. // Труды МФТИ. 2010. Т. 2. № 4. С. 130–140.
10. Щербакова Н.Г. Меры центральности в сетях //



Проблемы информатики. 2015. № 2. С. 18–30.

11. Boldi P., Vigna S. Axioms for Centrality // *Internet Mathematics*. 2014. V. 10. № 3-4. P. 222–262. DOI: arXiv:1308.2140v2 [cs.SI].
12. Boccaletti S., Bianconi G., Criado R., C.I. del Genio, Gomez-Gardenes J., Romance M., Sendina-Nadal I., Wang Z., Zanin M. The structure and dynamics of multilayer networks // *Phys. Reps.* 2014. V. 544. № 1. P. 1–122.
13. De Domenico M., Sole-Ribalta A., Gomez S., and Arenas A. Centrality in interconnected multilayer networks. arXiv:1306.0519 (2013).
14. De Domenico M., Sole-Ribalta A., Gomez S. and Arenas A. Navigability of interconnected networks under random failures, *PNAS* 111 (2014) no. 23, 8351–8356.
15. De Domenico M., Sole-Ribalta A., Cozzo E., Kivela M., Moreno Y., Porter M. A., Gomez S. and Arenas A. Mathematical formulation of multilayer networks, *Phys. Rev. X* 3 (2013) 041022.
16. Estrada E. and Gomez-Gardenes J. Communicability reveals a transition to coordinated behavior in multiplex networks, *Phys. Rev. E*, 89 (2014) 042819.
17. Gomez S., Daz-Guilera A., Gomez-Gardenes J., Perez-Vicente C., Moreno Y., and Arenas A. Diffusion dynamics on multiplex networks. *Physical Review Letters* 110, 028701 (2013).
18. Halu A., Mondragón R. J., Panzarasa P. and Bianconi G. Multiplex PageRank, *PLOS ONE*, 8 (2013) e78293.
19. Kivela M., Arenas A., Barthelemy M., Gleeson J. P., Moreno Y., Porter M. A. Multilayer Networks. // *J. Complex Netw.* 2014 2(3): 203–271. DOI: arXiv:1309.7233v4 [physics.soc-ph].
20. Sola L., Romance M., Criado R., Flores J., del Amo A. G., and Boccaletti S. Centrality of nodes in multiplex networks (2013), arXiv:1305.7445.
21. Sola L., Romance M., Criado R., Flores J., Garcia del Amo A. and Boccaletti S. Eigenvector centrality of nodes in multiplex networks. *Chaos*. 2013 23 033131.

References

1. Kondrat'ev A. *Sovremennye tendencii v issledovanii kriticheskoy infrastruktury v zarubezhnykh stranah* [Modern trends in studying critical infrastructure in foreign countries]. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie* [Foreign Military Review]. 2012, no. 1. pp. 19–30 (In Russian)
2. Massel' L.V. *Konvergenciya issledovaniy kriticheskikh infrastruktur, kachestva zhizni i bezopasnosti* [Convergence of critical infrastructure, life quality and safety researches]. *Informacionnye tekhnologii i sistemy: tr. Shestoj Mezhdunar. nauch. konf.* [Information technologies and systems: Proceedings of the Sixth International Scientific Conference]: Chelyabinsk: Chelyabinsk State University Publ., 2017, pp. 170–175. Available at: <http://it.csu.ru/content/docs/science/itis2017/itis2017.pdf> (accessed 10 May 2017) (In Russ.)
3. *Metodika otneseniya ob'ektov gosudarstvennoj i negosudarstvennoj sobstvennosti k kriticheski vazhnym ob'ektam dlya nacional'noj bezopasnosti Rossijskoj Federacii* [The method of classifying objects of state and non-state property to critical objects for the national security of the Russian Federation]. Moscow, 2012, approved by the Ministry of Emergency Situations 17 October 2012 no. 2-4-87-23-14 (In Russian)
- Nosyreva E.V. *Primenenie teorii kompleksnykh setey dlya vyivavleniya kriticheskikh vajnykh ob'ektov energetiki* [Application of complex network theory for critical energy sector object identification]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2017, no.7. pp. 51–66. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-7-51-66> (In Russian)
4. Evin I.A. *Vvedenie v teoriyu slozhnykh setey* [Introduction to the theory of complex networks]. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovaniye* [Computer Research and Modeling]. 2010, vol. 2, no.2, pp. 121–141 (In Russian)
5. Albert R., Barabasi A.-L. Statistical mechanics of complex networks. *Rev. Mod. Phys.* 74, 47, 2002; arXiv:cond-mat/0106096.
6. Buldyrev, S. Parshani R., Paul G., Stanley H., Havlin Sh. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks. *Nature*, Vol. 464|15 April 2010, pp. 1025–1028 DOI:10.1038/nature08932
7. Ob utverzhdenii skhemy i programmy razvitiya Edinoj ehnergeticheskoy sistemy Rossii na 2016 - 2022 gody: prikaz Ministerstva ehnergetiki Rossijskoj Federacii ot 1 marta 2016 g. [On the approval of the scheme and development program for the Unified Energy System of Russia for 2016–2022: the order of the Ministry of Energy of the Russian Federation of March 1, 2016] no.147. Available at: <https://minenergo.gov.ru/node/8170>. (accessed 16 June 2018) (In Russian)
8. Rajgorodskij A.M. *Modeli sluchajnykh grafov i ih primeneniya*. [Models of random graphs and their applications]. *Trudy MFTI* [Proceedings of MIPT]. 2010, vol. 2, no. 4, pp. 130–140.
9. Shcherbakova N.G. *Merya central'nosti v setyah* [Centrality measures in networks]. *Problemy informatiki* [Problems of Informatics]. 2015, no. 2, pp. 18–30. (In Russian)
10. Paolo Boldi, Sebastiano Vigna. Axioms for Centrality. *Internet Mathematics* 10 (3–4), 222–262. arXiv:1308.2140v2 [cs.SI].
11. Boccaletti S., Bianconi G., Criado R., C. I. del Genio, Gomez-Gardenes J., Romance M., Sendina-Nadal I., Wang Z. and Zanin M. The structure and dynamics of multilayer networks, *Phys. Reps.* 544 (2014) no. 1, 1–122.
12. De Domenico M., Sole-Ribalta A., Gomez S., and Arenas A. Centrality in interconnected multilayer networks. arXiv:1306.0519 (2013).
13. De Domenico M., Sole-Ribalta A., Gomez S. and Arenas A. Navigability of interconnected networks un-



der random failures, PNAS 111 (2014) no. 23, 8351-8356.

14. De Domenico M., Sole-Ribalta A., Cozzo E., Kivela M., Moreno Y., Porter M. A., Gomez S. and Arenas A. Mathematical formulation of multilayer networks, Phys. Rev. X 3 (2013) 041022.

15. Estrada E. and Gomez-Gardenes J. Communicability reveals a transition to coordinated behavior in multiplex networks, Phys. Rev. E, 89 (2014) 042819.

16. Gomez S., Daz-Guilera A., Gomez-Gardenes J., Perez-Vicente C., Moreno Y., and Arenas A. Diffusion dynamics on multiplex networks. Physical Review Letters 110, 028701 (2013).

17. Halu A., Mondragón R. J., Panzarasa P. and Bianconi G. Multiplex PageRank, PLOS ONE, 8 (2013) e78293.

18. Kivela M., Arenas A., Barthelemy M., Gleeson J. P., Moreno Y., Porter M. A. Multilayer Networks. // J. Complex Netw. 2(3): 203-271 (2014). arXiv:1309.7233v4 [physics.soc-ph].

19. Sola L., Romance M., Criado R., Flores J., del Amo A. G., and Boccaletti S. Centrality of nodes in multiplex networks (2013), arXiv:1305.7445.

20. Sola L., Romance M., Criado R., Flores J., Garcia del Amo A. and Boccaletti S., Eigenvector centrality of nodes in multiplex networks, Chaos 23 (2013) 033131.

Критерии авторства

Носырева Е.В. подготовила статью и несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Nosyreva E.V. has prepared an article and is responsible 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.



ИНТЕГРАЦИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМУ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

© С.В. Подковальников¹, М.А. Поломошина²

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

РЕЗЮМЕ: В статье рассматривается возможность использования возобновляемых источников энергии для электроснабжения механического завода. Производится оценка климатических условий местности, а также исследуется возможность установки альтернативных источников энергии на данном заводе. В качестве альтернативных источников предлагается использовать солнечные батареи. Выбирается необходимое оборудование и производится расчет количества солнечных установок и их мощности. Выполняются технико-экономические расчеты, по результатам которых оценивается эффективность установки солнечных источников энергии. Цель – оценить эффективность интеграции альтернативных источников энергии в систему электроснабжения промышленного предприятия. Расчет реальной мощности солнечных панелей производился с учетом таблицы солнечной инсоляции. Исходя из площади крыш зданий, было подсчитано количество солнечных модулей, инверторов и другого оборудования, подключаемого к ним. Для оценки экономической эффективности был рассчитан срок окупаемости установленного оборудования. В результате оценки климатических условий г. Иркутска было выявлено, что данная местность обладает сравнительно высоким потенциалом для развития солнечной энергетики, поэтому в данной работе подробно рассматривается внедрение солнечных модулей в систему электроснабжения промышленного предприятия. Произведен расчет их фактической мощности, которая напрямую зависит от солнечной активности и в среднем составляет 80% от номинальной. Расчет годового количества энергии, получаемой от солнечных панелей, показал, что возобновляемые источники энергии могут составить весомую долю в электроснабжении предприятия. Согласно полученным оценкам, экономическая эффективность их использования в настоящее время довольно низка. Однако учет тенденций снижения стоимости самих солнечных панелей и другого вспомогательного оборудования, а также повышения цен на электроэнергию, делают данные источники электроэнергии эффективными уже в ближайшей перспективе. Проведенное исследование наглядно показывает, что в систему электроснабжения промышленного предприятия вполне реально интегрировать альтернативные источники энергии, которые смогут покрыть значительную часть его электропотребления. При ожидаемом снижении затрат на оборудование и повышении цен на электроэнергию возобновляемые источники станут экономически эффективными.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, солнечная энергетика, ветроэнергетика, интеграция, энергетический потенциал, эффективность, системы электроснабжения

Информация о статье: Дата поступления 27 сентября 2018 г.; дата принятия к печати 30 октября 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 ноября 2018 г.

Для цитирования: Подковальников С.И., Поломошина М.А. Интеграция возобновляемых источников энергии в систему электроснабжения промышленного предприятия. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(11):182–198. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-182-198.

¹Подковальников Сергей Викторович, Cand. Sci. (Eng.), заведующий лабораторией межгосударственных электроэнергетических объединений, e-mail: spodkovalnikov@isem.irk.ru
Sergei V. Podkovalnikov, Candidate of technical sciences, Head of the Laboratory interstate electric power associations, e-mail: spodkovalnikov@isem.irk.ru

²Поломошина Марина Анатольевна, магистрант, e-mail: polomoshina@isem.irk.ru
Marina A. Polomoshina, Master degree student, e-mail: polomoshina@isem.irk.ru



INTEGRATION OF RENEWABLE ENERGY SOURCES INTO THE INDUSTRIAL ENTERPRISE ELECTRIC POWER SUPPLY SYSTEM

Sergei V. Podkovalnikov, Marina A. Polomoshina

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russian Federation

ABSTRACT: The paper addresses the possibility of using renewable energy sources for mechanical plant power supply. The area climatic conditions are given an assessment. The possibility to install alternative energy facilities at the plant is studied. Solar panels are proposed as alternative sources. The required equipment is selected and the calculation of the number and capacity photovoltaic cells is made. Conducted technical and economic calculations serve the basis for efficiency evaluation of installed photovoltaic cells. The purpose of the paper is to evaluate the effectiveness of alternative energy facilities integration into the power supply system of an industrial enterprise. The computation of the solar panel true power is made taking into account the table of solar insolation. The number of solar modules, inverters and other equipment connected to them has been calculated based on the area of building roofs. The economic effectiveness is estimated on the basis of the calculated payback period of the installed equipment. Assessment of Irkutsk climatic conditions has shown that the area under investigation has a relatively high potential for the development of solar energy. Therefore, this work gives a detailed consideration of the integration of solar modules into the power supply system of the industrial enterprise. Their actual power, which directly depends on solar activity and averages 80% of the capacity rate, is calculated. The calculated annual amount of power received from solar panels has showed that renewable energy facilities can make a significant part in enterprise power supply. According to the estimates obtained, the economic effectiveness of their use today is quite low. However, trends in reducing the cost of the solar panels themselves and other auxiliary equipment, as well as growth of electrical energy price make these power sources effective in the near future. The conducted study clearly shows that it is quite possible to integrate alternative energy facilities into the power supply system of an industrial enterprise, and they will be able to make a significant part of its power consumption. In view of expected drop of equipment costs and growth of electricity prices, the renewable sources will become cost-effective.

Keywords: *renewable energy sources, solar energy, wind energy, integration, energy potential, effectiveness, power supply systems*

Information about the article: Received September 27, 2018; accepted for publication October 30, 2018; available online November 31, 2018.

For citation: Podkovalnikov S.V., Polomoshina M.A. Integration of renewable energy sources into the industrial enterprise electric power supply system. *Vestnik Irkutskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(11):182–198. (in Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-182-198.

Введение

Данное исследование было выполнено в рамках дипломного проекта на тему «Проектирование системы электроснабжения механического завода». По проекту завод расположен в г. Иркутске, следовательно, при проектировании учитываются климатические особенности данной местности. Исходные данные содержат генеральный план предприятия с расположением цехов на территории завода, а также ведомость электрических нагрузок предприятия, содержащую подробную информацию о потребителях.

Питание завода электрической энергией осуществляется от подстанции энергосистемы. Проектирование системы электроснабжения (СЭС) включало в себя:

определение местоположения Главной понижающей подстанции завода и трансформаторных подстанций (ТП) цехов и их мощности, выбор напряжения системы внешнего и внутреннего электроснабжения, технико-экономические расчеты, выбор схемы электроснабжения и выбор оборудования. В дополнение ко всему, производился расчет молниезащиты и заземления, зона действия которых также может распространяться и на солнечные модули.

По результатам вычислений, расчетная активная мощность низковольтной нагрузки механического завода равна 13,7 МВт.



В качестве дополнительного источника электроснабжения рассматривались возобновляемые источники энергии (ВИЭ), такие как солнечные батареи и ветрогенерирующие установки.

Предварительно оценивались климатические ресурсы, показывающая энергетический потенциал ВИЭ в условиях данной местности. Отдельно изучался вопрос о синхронизации системы ВИЭ с общей се-

тью. Далее производился расчет количества и мощности данных установок, который позволяет оценить эффективность их применения на механическом заводе.

В статье подробно описывается интеграция альтернативных источников энергии в СЭС промышленного предприятия, а также оценивается их экономическая эффективность путем расчета срока окупаемости.

Роль возобновляемых источников энергии в мире и в России

Во многих развитых и развивающихся странах мира значительную долю в энергобалансах составляют возобновляемые источники энергии. В настоящее время при активном развитии промышленности довольно быстро происходит исчерпание угольных и нефтегазовых ресурсов, также отходы от сгорания ископаемого топлива выбрасываются в атмосферу и создают различные экологические проблемы. Поэтому переход от традиционных источников энергии к возобновляемым энергетическим ресурсам набирает оборот и приобретает все большую глобальную значимость. По результатам различных исследований в ближайшее время прогнозируется постепенный переход на альтернативные источ-

ники энергии. Такая трансформация требует длительного времени, но уже сейчас разрабатываются планы перехода на ВИЭ для крупных городов, регионов и даже целых стран.

Несмотря на глобальные тенденции, в России возобновляемая энергетика по-прежнему находится на начальных этапах развития, хотя формирование отрасли ВИЭ способно оказать существенное положительное влияние на российскую экономику. Так, за счет ВИЭ могут быть созданы новые компании и рабочие места, новые возможности для развития населенных пунктов, не подключенных к системам централизованного электроснабжения [1-3].

Оценка потенциала развития ВИЭ на механическом заводе в Иркутске

Солнечная радиация зависит, главным образом, от широты местности. Россия расположена между 41 и 82 градусами северной широты, и уровни солнечной радиации на ее территории существенно варьируются.

Многие регионы нашей страны являются перспективными в плане использования энергии солнца. Иркутская область также обладает огромным потенциалом для развития солнечной энергетики. Так, например, в Иркутске (52 градуса северной широты) уровень солнечной радиации достигает 1340 кВт·час/м², что является достаточно хорошим показателем. Для того чтобы в полной мере оценить перспективы установки солнечных батарей в г. Ир-

кутске обратимся к таблице 1, где представлены данные о суммах прямой солнечной радиации, падающей на горизонтальную поверхность при ясном небе [4].

В таблице представлено количество солнечной радиации за часовой интервал, за сутки, месяц и год. Из таблицы видно, что наибольшая солнечная активность будет достигаться в июне в полдень в ясную погоду и она составляет 2,81 МДж/м² за часовой интервал. В остальное время эта активность изменяется в зависимости от сезона и времени суток. Итак, Иркутская область обладает сравнительно хорошим потенциалом для развития солнечной энергетики, а значит, установка солнечных батарей на рассмат-



риваемом заводе остается актуальной.

Россия обладает огромным потенциалом ветровой энергии. Этому способствуют большая территория страны, а также широкое климатическое разнообразие. Наиболее перспективны районы крайнего севера, горные и холмистые местности, а также морские побережья. Главным показателем оценки потенциала для ветроэнергетики является средняя годовая скорость. Когда значения этой скорости менее 4 м/с использование ветровых установок не целесообразно, так как скорость необходимая

для запуска большинства ветрогенераторов равна 3,5–4 м/с. В то же время на большей части территории Иркутской области средняя годовая скорость ветра не превышает 3–4 м/с [5]. Эти величины справедливы как для районов с холмистым и низкорным рельефом, так и для равнин. Максимальная средняя годовая скорость ветра была отмечена лишь у побережья Байкала 5–8 м/с [5]. Таким образом, было принято решение не рассматривать ветрогенерирующие установки в выполняемом исследовании.

Таблица 1

Суммы прямой солнечной радиации (МДж/м²) при ясном небе на горизонтальную поверхность в г. Иркутске [4]

Table 1

Amount of direct solar radiation (MJ/m²) in a clear sky per a horizontal surface in Irkutsk [4]

	Часы	Месяц											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
За часовой интервал	0-1												
	1-2												
	2-3												
	3-4						0,02						
	4-5					0,11	0,20	0,13	0,02				
	5-6				0,14	0,41	0,54	0,46	0,26	0,02			
	6-7			0,09	0,51	0,79	0,95	0,89	0,59	0,23	0,02		
	7-8		0,12	0,41	0,95	1,23	1,41	1,41	1,05	0,69	0,31	0,01	
	8-9	0,13	0,51	0,52	1,41	1,71	1,89	1,87	1,56	1,10	0,69	0,20	0,07
	9-10	0,38	0,84	1,38	1,83	2,20	2,33	2,25	1,99	1,56	1,07	0,54	0,26
	10-11	0,59	1,12	1,69	2,20	2,58	2,66	2,56	2,30	1,92	1,41	0,82	0,46
	11-12	0,74	1,28	1,87	2,40	2,76	2,81	2,73	2,43	2,10	1,53	0,95	0,59
	12-13	0,74	1,28	1,87	2,40	2,76	2,81	2,73	2,43	2,10	1,53	0,95	0,46
	13-14	0,59	1,12	1,69	2,20	2,58	2,66	2,56	2,30	1,92	1,41	0,82	0,26
	14-15	0,38	0,84	1,38	1,83	2,20	2,38	2,25	1,99	1,58	1,07	0,54	
	15-16	0,13	0,51	0,92	1,41	1,74	1,94	1,87	1,56	1,12	0,69	0,20	
	16-17		0,12	0,41	0,95	1,25	1,43	1,41	1,05	0,66	0,31	0,01	
	17-18			0,09	0,51	0,82	0,95	0,89	0,59	0,23	0,02		
	19-20				0,14	0,43	0,54	0,46	0,26	0,01			
	20-21					0,11	0,20	0,13	0,02				
	21-22						0,02						
	22-23												
	23-24												
	За сутки	3,68	7,74	12,7	18,9	23,7	25,7	24,6	20,4	15,2	10,1	5,04	2,76
	За месяц	114	217	394	566	734	771	763	632	457	312	151	86
	За год	5197											

Условия и предпосылки для установки солнечных панелей на механическом заводе

Рассмотрим возможности применения солнечных установок на механическом заводе. Для того чтобы сократить потребление электроэнергии, на территории завода устанавливаются солнечные батареи.

Солнечные батареи будут располагаться только на крышах цехов и остальных зданий, так как в других возможных для этого местах на территории завода могут располагаться подъездные пути, склады и прочие объекты. Считается, что крыши зданий располагаются горизонтально и, следовательно, площадь крыши будет равна площади здания. Кроме того, расположение солнечных панелей на земле может оказаться неэффективным, так как в этом случае на них могут падать тени от заборов и цехов, расположенных поблизости. Поэтому расположение солнечных панелей на крышах цехов позволит достичь максимально возможной мощности солнечных панелей

На рис. 1 изображен план расположения цехов механического завода, где

указана площадь зданий. Видно, что цеха завода обладают достаточной площадью крыш для установки необходимого количества солнечных модулей.

На данном предприятии можно условно выделить две группы зданий:

- энергоемкие производственные цеха со своей трансформаторной подстанцией;
- непроизводственные здания, потребляющие значительно меньшую мощность и не имеющие собственной трансформаторной подстанции (проходная, заводоуправление и т.д.).

Предполагается, что на всей имеющейся площади крыши производственных цехов будут располагаться солнечные панели, чтобы покрыть большую часть графика электрической нагрузки предприятия. Однако, при этом, учитываются суточные графики нагрузок цехов, чтобы мощность генерации от солнечных батарей не превысила мощности нагрузки цеха и, чтобы не происходила выдача энергии обратно в

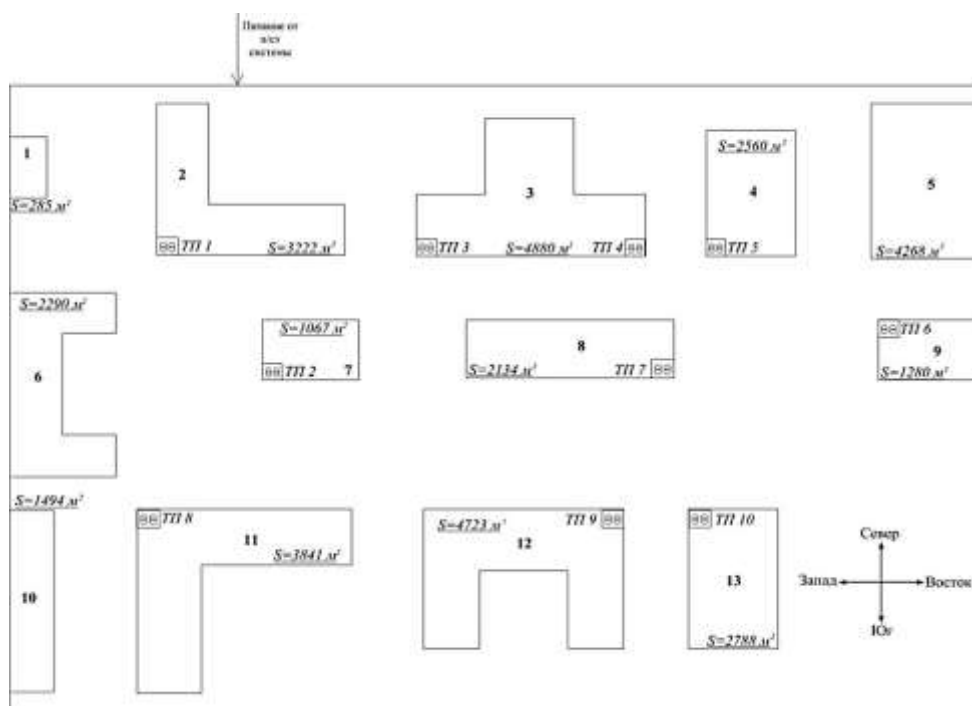


Рис. 1. План расположения цехов механического завода
Fig.1. Layout of mechanical plant departments



энергосистему. Такое ограничение на развитие солнечных установок принято, исходя из того, чтобы не ломать сложившуюся систему отношений на рынке электроэнергии и мощности, когда его участники имеют определенный установившийся статус потребителя или поставщика электроэнергии. Кроме того, возникновение обратных потоков, возможно, потребовало бы пересмотра организации защиты и автоматики в системе электроснабжения завода, на внешней питающей подстанции, а также самой СЭС.

При снижении поставки электроэнергии от энергосистемы за счет питания от солнечных панелей, выбранные ранее трансформаторная мощность, пропускные

способности кабелей и коммутационные аппараты не пересматривались. Это несколько ухудшало экономическую эффективность солнечных панелей, однако, было необходимо в силу того, что солнечная энергия непредсказуема и не может рассматриваться как гарантированная, поэтому требуется ее полное резервирование. Таким резервным источником выступает энергосистема. С другой стороны, ввиду соединения системы солнечных установок с централизованной сетью, было решено отказаться от использования аккумуляторов для солнечных установок в качестве дополнительного резервирования. Это позволит значительно удешевить систему солнечных установок.

Синхронизация возобновляемых источников энергии с централизованной сетью

Для синхронизации и подсоединения к сети электроснабжения завода солнечных батарей используются сетевые инверторы, которыми называют устройства, преобразующие постоянное напряжение от возобновляемых источников энергии в переменное напряжение.

Сетевые инверторы также называют синхронными преобразователями, так как они обладают отличительной особенностью - наличием синхронизации выходного напряжения и тока со стационарной сетью. Таким образом, сетевой инвертор осуществляет преобразование постоянного тока от солнечных модулей в переменный, с надлежащими значениями его частоты и фазы напряжения для сопряжения со стационарной сетью. Такой инвертор должен следить за фазой сети и с очень высокой точностью непрерывно поддерживать выходное напряжение немного выше напряжения сети. Высококачественный современный сетевой инвертор имеет фиксированный коэффициент мощности. Инвертор управляется микропроцессором, который следит за текущей формой сетевого напряжения переменного тока и выводит напряжение, точно соответствующее напряжению сети.

Сетевые инверторы промышленного назначения используют для передачи энергии от возобновляемых источников энергии в 3-х фазную сеть [6].

Для нашего случая используем трехфазный сетевой инвертор. В отличие от однофазного, он распределяет энергию, полученную от солнечных батарей равномерно между фазами. А в случае использования трех однофазных инверторов мощность на выходе каждого инвертора будет колебаться в зависимости от выдаваемой подключенной к его входу солнечной батареи. Если мощность солнечных панелей разная и/или каждая солнечная панель ориентирована или освещена по-разному, то, соответственно, будет отличаться и подаваемая по разным фазам мощность [7].

На рис. 2 показан основной принцип подключения солнечных модулей к сетевому инвертору, а также совместную работу инвертора с централизованной сетью.

Для выполнения дальнейшего расчета выбираем солнечные батареи Sila solar установленной мощностью 250 Вт каждая [8]. Данная модель имеет хорошие показатели производительности при сравнительно невысокой цене.

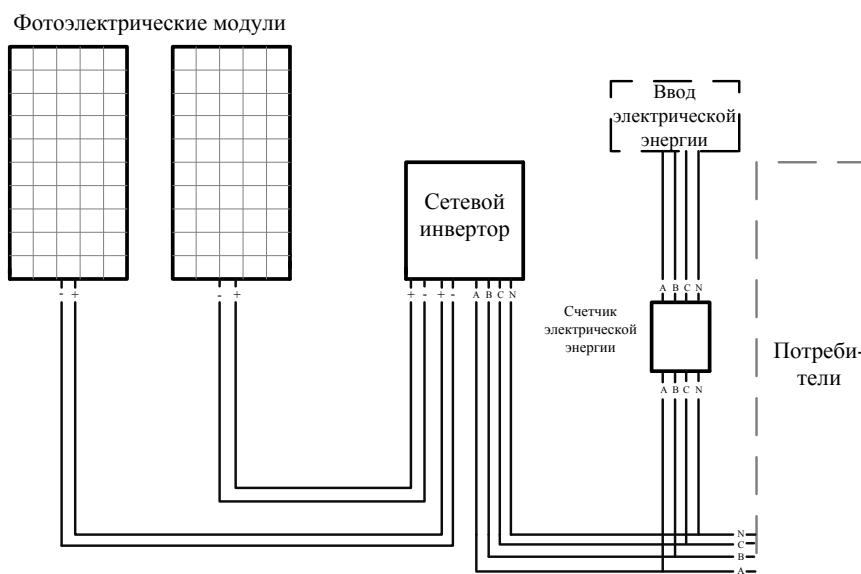


Рис. 2. Схема подключения солнечных модулей к потребителям
Fig. 2. Diagram of solar module connection to consumers

Расчет фактической мощности солнечного модуля

Фактическая мощность солнечных батарей в среднем составляет 75-85 % от ее номинальной мощности. Это зависит, в первую очередь, от климатических факторов, а также от угла наклона (угол между горизонтальной плоскостью и солнечной панелью) и ориентации этих модулей на юг (для северного полушария). Наибольшей эффективности солнечные панели достигают в том случае, когда они направлены на солнце и их поверхность перпендикулярна солнечным лучам. Солнечные панели располагаются на крышах цехов завода в фиксированном положении, поэтому не расположены под прямым углом к солнечным лучам в течение всего дня. В таком случае подбирается такой угол наклона самих панелей, который обеспечит их нахождение под прямым углом к солнечным лучам наиболее продолжительное время.

Оптимальный угол наклона солнечных установок подбирается в зависимости от широты местности. В г. Иркутске, расположенном на широте 52 градуса оптимальный угол наклона составляет 36 градусов [9].

В данном случае считается, что расположенные на крышах цехов солнечные

панели будут ориентированы на юг. Из рис. 1, видно, что такое географическое положение завода позволяет обеспечить минимальное отклонение от южного направления. Следовательно, принимаем отклонение от южного направления равное 5 градусов. При таком отклонении мощность, выдаваемая солнечными батареями, является максимальной [10].

Чтобы рассчитать реальную мощность одной солнечной панели воспользуемся формулой [10]:

$$E = \frac{I \cdot V \cdot k_o \cdot k_{nom}}{U_{ucn}}, \quad (1)$$

где E – фактическая мощность одной панели, Вт; I – количество солнечной энергии, падающее на горизонтальную поверхность Земли, кВт·ч/м (дано в таблице 1 с пересчетом в указанные единицы измерения); V – номинальная мощность одной солнечной панели, Вт (дана в характеристиках солнечной панели Sila Solar 250 [8]); k_o – поправочный коэффициент, зависящий от угла наклона солнечной панели и от отклонения от южного направления (принимается из [10] в соответствии с углом



наклона панели и отклонением от южного направления); k_{nom} – коэффициент, характеризующий потери (принимается равным 0,94 и включает в себя потери, связанные с ростом температуры модуля, с затенением и загрязнением солнечных панелей, потери в период низкого уровня солнечного излучения и в шунтирующих диодах); $U_{исп}$ – интенсивность солнечной радиации, при которой тестируются солнечные панели, кВт/м² (дана в справочных характеристиках солнечной панели Sila Solar 250 [8]).

Пользуясь формулой (1), рассчитаем фактическую мощность солнечных панелей. Данные расчета сведем в табл. 2.

Из расчета видно, что наибольшая мощность одного солнечного модуля будет выработана в дневные часы суток (11.00–13.00) в июне. В остальное время фактическая мощность одного модуля будет уменьшаться пропорционально уменьшению количества прямой солнечной радиации.

Таблица 2

Фактическая мощность одного солнечного модуля в зависимости от часов суток и времени года в г. Иркутск (Вт)

Table 2

Real capacity of one solar module depending on the hour of day and season in Irkutsk (W)

	Часы	Месяц											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
За часовой интервал	0-1												
	1-2												
	2-3												
	3-4						1,5						
	4-5					8,1	14,8	9,6	1,5				
	5-6				10,3	30,2	39,8	33,9	19,2	1,5			
	6-7			6,6	37,6	58,3	70,1	65,6	43,5	16,9	1,5		
	7-8		8,9	30,2	70,1	90,7	104	104	77,5	50,9	22,9	0,7	
	8-9	9,6	37,6	38,3	104	126	139	138	115	81,1	50,1	14,8	5,2
	9-10	28,1	61,9	102	135	162	172	166	147	115	78,9	39,8	19,2
	10-11	43,5	82,6	125	162	190	196	189	170	142	104	60,5	33,9
	11-12	54,6	94,4	138	177	204	207	201	179	155	113	70,1	43,5
	12-13	43,5	94,4	138	177	204	207	201	179	155	113	70,1	33,9
	13-14	28,1	82,6	125	162	190	196	189	170	142	104	60,5	19,2
	14-15	9,6	61,9	102	135	162	176	166	147	117	78,9	39,8	
	15-16		37,6	67,9	104	128	143	138	115	82,6	50,1	14,8	
	16-17		8,9	30,2	70,1	92,2	105	104	77,5	48,7	22,9	0,7	
	17-18			6,6	37,6	60,5	70,1	65,6	43,5	16,9	1,5		
	19-20				10,3	31,7	39,8	33,9	19,2	0,7			
	20-21					8,1	14,7	9,6	1,5				
	21-22						1,5						
	22-23												
	23-24												
	За сутки	271	571	938	1393	1747	1896	1815	1505	1124	742	372	204
	За месяц	8409	16006	290063	51750	54142	56872	56282	46619	33710	23014	11138	6343
	За год	383350,93											



Расчет энергетических показателей солнечных модулей

Ранее было определено, что солнечные модули будут располагаться на крышах зданий предприятия под углом наклона равным 36° . Отклонение от южного направления задается равным 5° . Стоит отметить, что подъем модулей на заданный угол наклона также позволит обеспечить минимальное отклонение от южного направления. На генеральном плане предприятия (см. рис. 1) указано географическое расположение, которое учитывается при ориентации солнечных панелей на юг. В табл. 3 представлены размеры зданий завода. За счет расположения солнечных панелей под наклоном, увеличится и их площадь, тем самым позволяя устанавливать большее число панелей, чем на горизонтальной поверхности.

Площадь солнечных панелей с учетом угла их наклона рассчитывается по следующей формуле:

$$S = 0,9 \frac{l}{\cos \alpha} \cdot b,$$

где l – длина здания, м; α – угол наклона солнечных панелей, равный 36° ; b – ширина здания, м; 0,9 – коэффициент, учитывающий площадь технических проходов для обслуживания солнечных модулей. Данные расчета для цехов представлены в табл. 3.

Для расчета годового производства электроэнергии солнечными установками используем табл. 1. Путем умножения данных табл. 1 на количество солнечных модулей, установленных на крыше цеха, получим данные мощности и энергии для конкретного цеха. Далее подсчитываем суммарную энергию, генерируемую солнечными установками цеха за год. Пример расчета мощности и энергии солнечных панелей цеха № 2 в зависимости от часов суток и времени года приведен в табл. 4, из которой берем суммарное значение вырабатываемой энергии за год. Это значение необходимо для расчета экономической эффективности солнечных установок. Итоги расчетов заносим в табл. 5.

Таблица 3

Расчет площади солнечных панелей

Table 3

Calculation of solar panel square

Цех №	$S_{\text{цеха}},$ м^2	Длина здания l , м	Длина поверх. накл. l_1 , м	Ширина здания b , м	$S_{\text{поверх.}}$ $\text{крыши}, \text{м}^2$	$S_{\text{солн. пан.}}, \text{м}^2$
1	285	21,34	26,05	13,34	347,33	312,6
2	322	85,34	109,19	26,67	3724,65	3352,18
3	4880	26,67	32,56	101,35	5956,7	5361,03
4	2560	64,01	78,14	40,01	3125,96	2813,37
5	4268	80,01	97,67	53,34	5209,94	4688,95
6	2290	85,34	104,19	18,67	2642,11	2377,9
7	1067	26,67	32,56	40,01	1302,49	1172,24
8	2134	26,67	32,56	80,01	2604,97	2344,47
9	1280	26,67	32,56	48,01	1562,98	1406,68
10	1494	93,35	113,95	16	1823,48	1641,13
11	3841	90,68	110,7	24	4321,49	3889,34
12	4723	74,68	91,16	48,01	5514,41	4962,97
13	2788	74,68	91,16	37,34	3403,83	3063,45



Число модулей для одного цеха рассчитывается согласно выражению

$$N = \frac{S_{\text{крыши цеха}}}{S_{\text{модуля}}}.$$

новки для цеха рассчитывается как

$$P_{\text{Σсолн.цеха}} = N \cdot P_{\text{ном.модуля}}.$$

Результаты расчета для цехов приведены в табл. 5.

Номинальная мощность всей уста-

Таблица 4

Энергия, вырабатываемая солнечными модулями цеха № 2

Table 4

Energy produced by solar modules of the department no. 2

	Часы	Месяц											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
За часовой интервал	0–1												
	1–2												
	2–3												
	3–4						3,1						
	4–5					16,9	30,7	19,9	3,1				
	5–6				21,5	62,9	82,9	70,7	39,9	3,1			
	6–7			13,8	78,3	121	146	137	90,6	35,3	3,1		
	7–8		18,4	62,9	146	189	217	217	161	106	47,6	1,5	
	8–9	19,9	78,3	79,9	217	263	290	287	240	167	106	30,7	10,8
	9–10	58,4	129	212	281	338	358	346	306	240	164	82,9	39,9
	10–11	90,6	172	260	338	396	409	393	353	295	217	126	70,7
	11–12	114	197	287	369	424	432	419	373	323	235	146	90,6
	12–13	114	197	287	369	424	432	419	373	323	235	146	70,7
	13–14	90,6	172	260	338	396	409	393	353	295	217	126	39,3
	14–15	58,4	129	212	281	338	366	346	306	243	164	82,9	
	15–16	19,9	78,3	141	217	267	298	287	240	172	106	30,7	
	16–17		18,4	62,9	146	192	220	217	161	101	47,6	1,5	
	17–18			13,8	78,3	126	146	137	90,6	35,3	3,1		
	19–20				21,5	66,1	82,9	70,7	39,9	1,5			
	20–21					16,9	30,7	19,9	3,1				
	21–22						3,1						
	22–23												
	23–24												
За сутки		565	1189	1954	2899	3637	3949	3778	3133	2341	1545	774	424
За месяц		1750 8	3332 7	6051 2	8692 8	1127 30	1184 13	1171 84	9706 5	7011 88	4791 8	2319 1	1320 8
За год		798175,78											



Таблица 5

Расчетные данные солнечных установок цехов

Table 5

Calculated data of department solar installations

Подст- станция	Цех	Площадь солн. мод., м ²	Расчетная мощность Р _р ', кВт	Кол-во модулей шт.	Ном. мощность модулей, кВт	Генер. энергия, МВт·ч/г.
ТП1	2	3352,18	1431,08	2082	520,53	798,18
ТП2	7	1172,24	1247,313	728	182,02	279,12
ТП3	3	2969,67	1266,936	1845	461,13	707,10
ТП4	3	2391,36	1248,182	1485	371,33	569,40
ТП5	4	2813,37	2764,521	1747	436,86	669,88
ТП6	9	1406,68	1147,897	874	218,43	334,94
ТП7	8	2344,47	1830,188	1456	364,05	558,23
ТП8	11	3889,34	1174,512	2416	603,93	926,08
ТП9	12	4962,97	2789,062	3083	770,65	1181,71
ТП10	13	3063,45	1737,349	1903	475,69	729,43
–	1	312,60	10,84	25	6,25	9,58
–	6	2377,90	189,36	250	62,50	95,84
–	10	1641,13	26,74	100	25,00	38,34
–	5	4688,95	206,43	490	122,50	187,84
Итого				18483	4620,87	7085,65

Сравнение потребляемой активной мощности цехов с мощностью
солнечных панелей

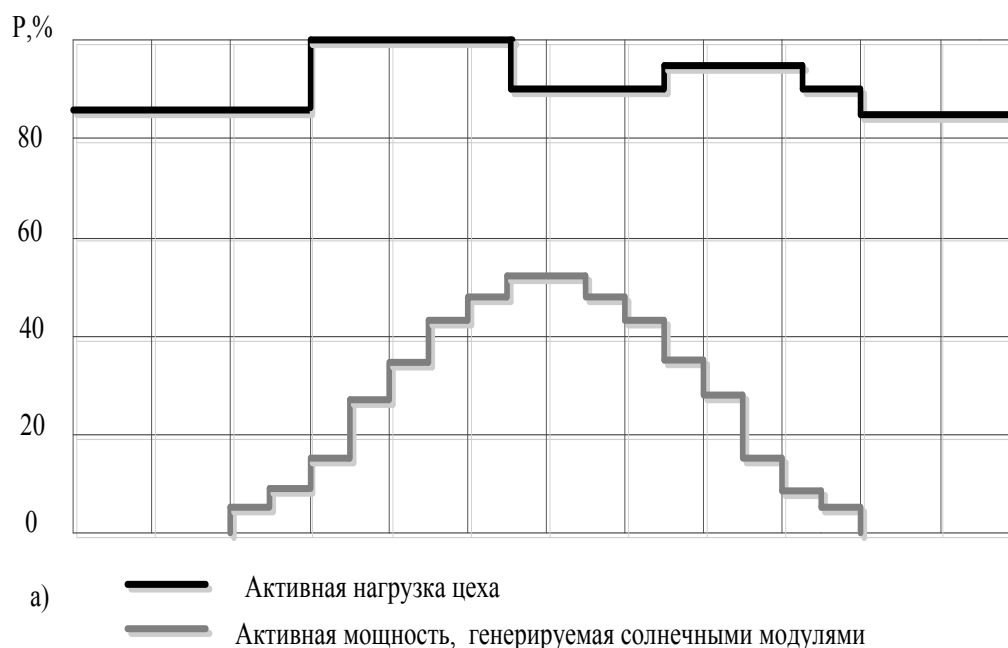
Для того чтобы исключить возможность обратной отдачи электроэнергии в энергосистему, которая может возникнуть, когда генерируемая мощность солнечных панелей превышает потребляемую мощность цехов, необходимо сравнить суммарную мощность модулей для каждого цеха с расчетной активной нагрузкой цехов.

Для проверки отсутствия отдачи энергии в сеть были построены графики нагрузок для каждого цеха, где изображена типовая суточная нагрузка [11] и мощность, генерируемая солнечными панелями. На рис. 3 для примера представлен такой график для цеха термической обработки. Также был построен скорректированный суточный график нагрузки (рис. 3), учитыва-

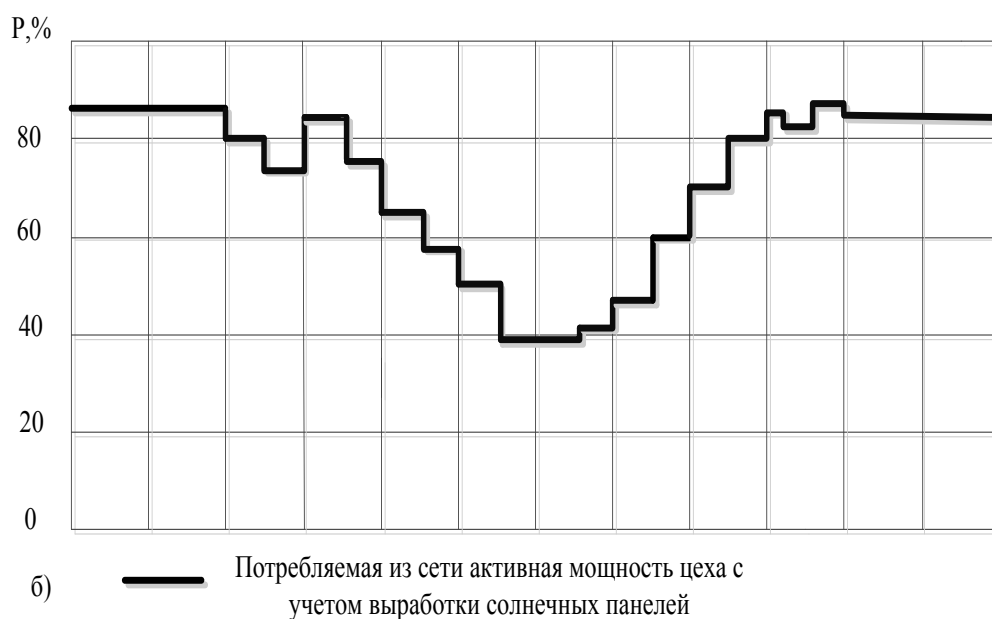
ющий выработку электроэнергии солнечными панелями.

Графики нагрузки показывают, что выработка энергии солнечными панелями покрывает только некоторую их часть, и не превышает расчетную активную нагрузку цехов, что исключает возможность обратной отдачи электроэнергии в сеть.

Однако для цехов № 1, 5, 6, 10 проверка показала, что указанное условие не выполняется, в связи с чем площадь солнечных панелей для них была соответствующим образом скорректирована. В табл. 6 приведены расчетные данные по площади солнечных модулей с учетом данной корректировки.



a



b

Рис. 3. График нагрузки цеха термической обработки:

a – плановый; b – скорректированный

Fig. 3. Load curve of the heat treatment department: a – planned; b – corrected

Выбор вспомогательного оборудования

Для преобразования постоянного тока в переменный и для синхронизации солнечных установок с СЭС выбираем 3-фазный фотоэлектрический сетевой инвертор Sofar 11ktl [12].

Так как максимальная мощность одного инвертора не соответствует мощности подключаемых панелей, то необходимо рассчитать количество инверторов, требующихся для каждого цеха.



Сетевой инвертор Sofar 11kti позволяет подключить до 48 солнечных модулей мощностью 250 Вт [13]. Для производственных цехов, солнечные панели, на крышах которых занимают практически всю площадь, количество солнечных модулей, подключаемых к одному инвертору равно 48. А для остальных цехов, где площадь крыши занимает ими лишь частично, для равномерного распределения нагрузки подсчитано число подключаемых панелей к одному инвертору, которое приведено в таблице 6.

Произведем уточненный расчет количества солнечных модулей приходящихся на один инвертор, с учетом мощности каждого цеха и технических параметров оборудования.

Для расчета используется информация из таблицы 5, результаты представлены в табл. 6.

Напряжение системы должно лежать в диапазоне входного напряжения ин-

вертора (160–960 В). А так как рабочее напряжение одной панели равно 30,9 В, то необходимо использовать смешанное (последовательно-параллельное) соединение панелей.

Примем число последовательно соединенных панелей равным 10. Тогда напряжение, подаваемое на вход инвертора будет равно 309 В. Зная мощность и напряжение на входе инвертора, по известной формуле рассчитаем ток для системы солнечных модулей.

В результате выбирается кабель для солнечных батарей HELUKABEL Solarflex PV1-F NTS сечением 10 мм² с допустимым током 40 А [14]. Длина кабеля, проходящего от солнечных панелей до инвертора оценивается в 30 метров. Расчет суммарной длины кабеля производится путем умножения количества инверторов на длину кабеля, проходящего от панелей до инвертора. Результаты вышеперечисленных расчетов приведены в табл. 6.

Таблица 6

Расчет количества инверторов и суммарной длины кабеля

Table 6

Calculation of the number of inverters and total cable length

П/ст	Цех	Кол-во инверторов, шт.	Кол-во модулей на один инвертор, шт.	Длина кабеля, м
ТП1	2	44	48	1320
ТП2	7	16	46	480
ТП3	3	39	48	1170
ТП4	3	31	48	930
ТП5	4	37	48	1110
ТП6	9	19	46	570
ТП7	8	31	47	930
ТП8	11	51	48	1530
ТП9	12	65	48	1950
ТП10	13	40	48	1200
–	1	1	25	30
–	6	6	42	180
–	10	3	34	90
–	5	11	45	330
Итого		394		11820



Расчет экономической эффективности солнечных установок

Ранее было выбрано все необходимое оборудование для установки солнечных батарей. Ниже приведены исходные и расчетные данные о стоимости этого оборудования (табл. 7).

$$I_{\text{рем.}} = 0,2 \cdot I_{\text{ам.}},$$

где $I_{\text{ам.}}$ – издержки на амортизацию;

Таблица 7

Стоимость оборудования

Table 7

Equipment cost

Наименование оборудования	Цена, тыс. руб.	Кол-во, шт.	Сумма, тыс. руб.
Sofar 11kti 3-фазный фотоэлектрический сетевой инвертор	120	394	47 280
Кабель для солнечных батарей HELUKABEL Solarflex PV1-F NTS 10 мм ²	0,19	11 820	2 246
Солнечные батареи Sila solar 250 Вт	9,1	18 483	168 195
Итого			217 721

Цена монтажа принимается в размере 15% от стоимости всей установки [15]. С учетом этого итоговая стоимость всей установки будет равна 250 379 тыс. руб.

Согласно расчетам, произведенным ранее (см. табл. 6), в год солнечные панели вырабатывают энергию, равную 7 085,65 кВт·ч.

Это составляет 27% от общезаводского электропотребления. Такое количество энергии экономится, благодаря данной установке (иначе говоря, на данную величину снижается потребление электроэнергии заводом от энергосистемы).

Учитывая, что цена на электроэнергию для промышленных предприятий с потребляемой мощностью более 10 МВт в Иркутской области равна 2951,22 руб/МВт·ч с учетом НДС (на август 2018 г.) [16], стоимость сэкономленной электроэнергии составит 20911,31 тыс. руб/г.

Далее произведем расчет годовых издержек солнечных установок по формулам:

$$I = I_{\text{ам.}} + I_{\text{рем.}};$$

$$I_{\text{ам.}} = \frac{1}{T} \cdot K$$

$I_{\text{рем.}}$ – издержки на ремонт и обслуживание; T – срок службы установки; K – капитальные затраты в установке.

В итоге суммарные годовые издержки составили 10015,17 тыс. руб.

Рассчитаем срок окупаемости солнечных установок [17]:

$$T = \frac{K}{C - I},$$

где C – стоимость сэкономленной за счет выработки солнечных панелей электроэнергии.

Расчеты показали довольно низкую эффективность солнечных установок. Срок их окупаемости составил 23 г., что для инвесторов является весьма длительным периодом, сильно ограничивающим их активность в финансировании такого рода проектов.

Однако следует иметь в виду, что за последние десять лет цены на солнечные батареи снизились почти на 90% [18]. И такая динамика падения цен будет продолжаться. Прогнозируется, что к 2022 г. цены на солнечные панели упадут еще на 27%, и далее ежегодно будут падать на 4,4%. Снизится не только себестоимость солнечных



панелей, а также инверторов и другого оборудования [19].

Помимо снижения затрат на оборудование существует перспектива повышения цены электрической энергии. Так, согласно отчетным данным [16], стоимость электроэнергии для промышленных предприятий с потребляемой мощностью более 10 МВт в Иркутской области за последние пять лет выросла почти на 30%. Нет оснований полагать, что этот тренд не будет продолжен в перспективе. Рассчитаем срок

окупаемости при снижении на 27% стоимости оборудования, а также увеличении цены на электроэнергию на 30%.

С учетом указанных факторов срок окупаемости солнечных установок составил 11 лет, т.е. снизился более чем в два раза. Таким образом, интеграция возобновляемых источников энергии в систему электроснабжения промышленного предприятия может стать достаточно эффективной уже в относительно близкой перспективе.

Заключение

В статье рассмотрена возможность установки альтернативных источников энергии для частичного замещения электроэнергии, получаемой механическим заводом от системы централизованного электроснабжения. Для этого рассматривались возможности использовать солнечные батареи и ветрогенерирующие установки. Производилась оценка потенциала развития солнечной энергетики и ветряной энергетики в городе Иркутске. Результаты оценки климатических условий показали, что использование ветрогенераторов является нерациональным из-за низких средних годовых скоростей ветра, поэтому вопрос установки ветрогенераторов не рассматривается. При этом ввиду повышенной солнечной активности в рассматриваемом регионе использование солнечных батарей для электроснабжения завода является актуальным. Особенность конструктивного исполнения цехов позволяют установить на крышах достаточное количество солнечных панелей, что даст возможность покрыть значительную часть графика нагрузки цеха в дневное время суток.

Для внедрения на предприятие системы солнечных установок, был рассмотрен вопрос об их синхронизации с сетью, который был решен с помощью выбора трехфазных сетевых инверторов.

Был произведен расчет общего количества солнечных панелей и генерируемой ими энергии. Для полного исключения обратной отдачи электроэнергии в энергосистему было выполнено сравнение нагрузки цехов и мощности, получаемой от панелей.

Была рассчитана стоимость солнечных установок с учетом монтажа, и определен срок их окупаемости, который составил 23 г., что свидетельствует о довольно низкой эффективности проекта. Однако ожидаемый рост цены электроэнергии и дальнейшее неуклонное снижение стоимости оборудования для солнечных установок существенно повысят в достаточно близкой перспективе их экономическую привлекательность, что было расчетно подтверждено в статье, и стимулируют ускоренное внедрение в системы электроснабжения потребителей России.

Библиографический список

1. Барина В.А., Ланьшина Т.А. Особенности развития возобновляемых источников энергии в России и в мире // Российское предпринимательство. 2016. Т. 17. № 2. С. 259–270.
2. Марченко О.В., Соломин С.В. Анализ экономической эффективности возобновляемых источников энергии в децентрализованных системах электроснабжения // Международный научный журнал

- «Альтернативная энергетика и экология». 2009. Т. 73. № 5. С. 78–84.
3. Иванова И.Ю., Майсюк Е.П., Тугузова Т.Ф. Экологическая оценка использования возобновляемых источников энергии и местных видов топлива для энергоснабжения потребителей прибрежной зоны оз. Байкал: сб. ст. по материалам науч.-практ. конф. с междунар. участием «Экологическая, промышлен-



ная и энергетическая безопасность» (Севастополь, 11–15 сентября 2017 г.). / Ред. Ю.А. Омельчук, Н.В. Лямина, Г.В. Кучерик. Севастополь: Изд-во Севастопольского государственного университета, 2017. С. 535–537.

4. Копель Л.В. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Иркутская область и западная часть Бурятской АССР. Л.: Гидрометеиздат, 1991 г. 605 с.

5. Батуев А.Р., Богоявленский Б.А. Атлас. Иркутская область: экологические условия развития. М.: Иркутск, 2004 г.

6. Сетевые инверторы [Электронный ресурс]. URL: http://net220.ru/katalog_produkcii/inventory_i_ibp1/setevye_inventory/ (04.09.2018).

7. Особенности работы трехфазных фотоэлектрических сетевых инверторов [Электронный ресурс]. URL: <http://www.solarhome.ru/solar/pv/3-1-phase-grid-tie-inverter.htm> (04.09.2018)

8. Солнечная батарея Sila solar [Электронный ресурс]. URL: <https://e-solarpower.ru/solar/solar-panels/poli-panel/solnechnaya-panel-sila-250vt/> (04.09.2018)

9. Ориентация солнечных панелей [Электронный ресурс]. URL: <http://uekvarma.ru/article/orientatsiya-solnechnyih-paneley> (04.09.2018)

10. Расчет средней производительности солнечной батареи [Электронный ресурс]. URL: <http://solarsoul.net/raschet-solnechnoj-batarei> (04.09.2018)

11. Рокотян С.С. Справочник по проектированию электроэнергетических систем. М.: Энергоатомиз-

дат, 1985 г. 352 с.

12. SOFAR 11KTL трехфазный фотоэлектрический инвертор [Электронный ресурс]. URL: <http://shop.solarhome.ru/sofar-11ktl-3-faznij-fotoelektricheskij-invertor.html> (04.09.2018)

13. Подбор модулей для сетевых инверторов [Электронный ресурс]. URL: <http://www.solarhome.ru/equipment/inverter/podbor-modulej-dlya-setevyh-invertorov.htm> (04.09.2018)

14. HELUKABEL Solarflex PV1-F NTS Кабель для солнечных батарей [Электронный ресурс]. URL: <http://стройторг.com/products/helukabel-solarflex-pv1> (04.09.2018)

15. Установка солнечных батарей [Электронный ресурс]. URL: <http://solar-batarei.ru/ustanovka-solnechnih-batarei-cena.html> (04.09.2018)

16. Предельные нерегулируемые цены на розничном рынке [Электронный ресурс]. URL: <https://sbyt.irkutskenergo.ru/qa/2103.html> (04.09.2018)

17. Велькин В.И., Завьялов А.С., Стариков Е.В. Расчет автономной фотоэлектрической системы электроснабжения для резервирования собственных нужд АЭС, Екатеринбург: УРФУ, 2014. 25 с.

18. Цены на солнечные батареи [Электронный ресурс]. URL: <https://aftershock.news/?q=node/642261&full> (04.09.2018)

19. Цена на солнечную энергию [Электронный ресурс]. URL: <https://hightech.fm/2017/06/28/solar-price> (04.09.2018)

References

1. Barinova V.A., Lanshina T.A. Features of renewable energy sources development in Russia and in the world]. *Rossiyskoe predprinimatel'stvo* [Russian Journal of Entrepreneurship]. 2016, vol. 17, no. 2, pp. 259-270. (In Russian)

2. Marchenko O.V., Solomin S.V. The analysis of economic effectiveness of renewable energy sources in decentralized energy systems. *Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal al'ternativnaya energetika i ekologiya* [The International Scholarly Journal Alternative Energy and Ecology]. 2009. no. 5. pp. 78-84. (In Russian)

3. Ivanova I.Yu., Majsyuk E.P., Tuguzova T.F. *Ekologicheskaya ocenka ispol'zovaniya vozobnovlyаемы источников энергии i mestnyh vidov topliva dlya energosnabzheniya potrebitelej pribrezhnoj zony oz. Bajkal* [Environmental assessment of the use of renewable energy sources and local fuels for energy supply of lake Baikal coastal zone consumers]. *Sb. st. po materialam nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem "Ekologicheskaya, promyshlennaya i energeticheskaya bezopasnost"* [Collection of articles on the materials of scientific and practical conference with international participation "Environmental, Industrial and Energy Security"]. Sevastopol', 11–15 September 2017. Sevastopol', 2017, pp. 535–537.

4. Kopel L.V. *Nauchno-prikladnoy spravochnik po cli-*

matu SSSR. Irkutskaya oblast' i Zapadnaya chast' Buryatskoy ASSR [Scientific and applied reference book on the USSR climate. Irkutsk district and western part of Buryat ASSR]. Saint-Petersburg: Gidrometeizdat Publ., 1991, 605 p. (In Russian)

5. Batuev A.R., Bogoyavlensky B.A. Atlas. *Irkutskaya oblast': ekologicheskie usloviya razvitiya* [Atlas. The Irkutsk district: environmental development conditions]. Irkutsk, 2004.

6. *Setevye inventory* [Network inverters]. Available at http://net220.ru/katalog_produkcii/inventory_i_ibp1/setevye_inventory/ (accessed 4 September 2018).

7. *Osobennosti raboty trekhfaznykh fotoelektricheskikh setevykh invertorov* [Features of three-phase photovoltaic network inverters operation] Available at <http://www.solarhome.ru/solar/pv/3-1-phase-grid-tie-inverter.htm> (accessed 4 September 2018).

8. *Solnechnaya batareya Sila solar* [Solar battery "Sila Solar"]. Available at <https://e-solarpower.ru/solar/solar-panels/poli-panel/solnechnaya-panel-sila-250vt/> (accessed 4 September 2018).

9. *Orientatsiya solnechnykh paneley* [Solar panel orientation]. Available at <http://uekvarma.ru/article/orientatsiya-solnechnyih-paneley> (accessed 4 September 2018).

10. *Raschet sredney proizvoditel'nosti solnechnoy ba-*



batarei [Calculation of solar battery average performance]. Available at: <http://solarsoul.net/raschet-solnechnoj-batarei> (accessed 4 September 2018).

11. Rokotyan S.S. *Spravochnik po proektirovaniyu elektroenergeticheskikh sistem* [Handbook for electric power system design]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1985. 352 p.

12. *SOFAR 11KTL trekhfaznyi fotoelectrichesky inverter* [SOFAR 11KTL three-phase photovoltaic inverter]. Available at: <http://shop.solarhome.ru/sofar-11ktl-3-faznij-fotoelektricheskij-invertor.html> (accessed 4 September 2018).

13. *Podbor moduley dlya setevykh invertorov* [Selection of modules for network inverters]. Available at: <http://www.solarhome.ru/equipment/inverter/podbor-modulej-dlya-setevyh-invertorov.htm> (accessed 4 September 2018).

14. *HELUKABEL Solarflex PV1-F NTS Kabel' dlya solnechnykh batarey* [Cable for solar batteries]. Available at: <http://стройторг.com/products/helukabel-solarflex-pv1> (accessed 4 September 2018).

15. *Ustanovka solnechnykh batarey* [Solar battery in-

stallation]. Available at:

<http://solar-batarei.ru/ustanovka-solnechnih-batarei-cena.html> (accessed 4 September 2018)

16. *Predel'nye nereguliruyemye tseny na roznichnom rynke* [Marginal unregulated prices in the retail market]. Available at: <https://sbyt.irkutskenergo.ru/qa/2103.html> (accessed 4 September 2018)

17. Velkin V.I., Zav'yalov A.S., Starikov E.V. *Raschet avtonomnoi fotoelectricheskoi sistemy electrosnabzheniya dlya rezervirovaniya sobstvennykh nuzhd AES* [Calculation of a stand alone photovoltaic power supply system for nuclear power plant own needs backup]. Yekaterinburg: Ural Federal University Publ., 2014, 24 p. (In Russ.)

18. *Tseny na solnechnye batarei* [Prices of solar batteries]. Available at: <https://aftershock.news/?q=node/642261&full> (accessed 4 September 2018)

19. *Tsena na solnechnuyu energiyu* [Solar energy price]. Available at: <https://hightech.fm/2017/06/28/solar-price> (accessed 4 September 2018)

Критерии авторства

Подковальников С.В., Поломошина М.А. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authorship criteria

Podkovalnikov S.V., Polomoshina M.A. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results 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 621.793

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-11-199-208>

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМ НАПЫЛЕНИЕМ

© С.И. Аганаев¹, Н.В. Астраханцев², С.А. Зайдес²

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

РЕЗЮМЕ: Цель – исследование возможности снижения утечек в уплотнениях с герметизирующим металлическим кольцом (на примере вакуумного фланцевого соединения стандарта ConFlat) путем нанесения на поверхность кольца покрытия из мягкого металла ионно-плазменным способом. Покрытие наносилось при помощи оригинального ионно-плазменного источника с жидким анодом. Уплотнительные кольца для соединения CF40 испытывались на герметичность на сверхвысоковакуумном стенде с масс-спектрометрическим квадрупольным газоанализатором ХТ-100М, настроенным на контроль натекания гелия в вакуумную камеру стенда. Экспериментально установлено, что при повторном использовании уплотнительного кольца с нанесенным на его поверхность медным покрытием уменьшается величина натекания. Получены микроснимки поверхности кольца на сканирующем электронном микроскопе. Нанесение слоя мягкого металла на контактные поверхности однократно использовавшегося металлического кольца не только восстанавливает ее герметизирующие свойства, но и уменьшает натекание по сравнению с новой прокладкой. Эффект обеспечивается формированием плотного контакта твердого металла фланцевых клиньев с выровненной поверхностью пластичного покрытия по всей длине окружности, восстановленной благодаря сглаживанию впадин на кольце, которые образовались при предшествующей затяжке фланцевого соединения.

Ключевые слова: фланцевое соединение с металлическим уплотнителем, герметичность, ионно-плазменный источник, напыление, вакуумная установка, масс-спектрометрический газоанализатор, сканирующий электронный микроскоп

Информация о статье: Дата поступления 20 сентября 2018 г.; дата принятия к печати 30 октября 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 ноября 2018 г.

Для цитирования: Аганаев С.И., Астраханцев Н.В., Зайдес С.А. Повышение качества уплотнительных элементов ионно-плазменным напылением. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(11):199–208. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-199-208.

IMPROVING SEALING ELEMENT QUALITY BY ION-PLASMA SPUTTERING

Sergey I. Aganaev, Nikolay V. Astrakhantsev, Semen A. Zaides

Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 663074, Russian Federation

ABSTRACT: The purpose of the work is to study the possibility of reducing leakages in the seals with metal O-rings (on example of a vacuum flange joint of the ConFlat standard) by ion-plasma sputtering deposition of a soft metal on the ring surface. The coating was applied using an original ion-plasma source with a liquid anode. The hermeticity of sealing o-

¹Аганаев Сергей Игоревич, аспирант, e-mail: Aganaev.s@mail.ru

Sergey I. Aganaev, Postgraduate student, e-mail: Aganaev.s@mail.ru

²Астраханцев Николай Вениаминович, кандидат физико-математических наук, инженер-исследователь Технопарка ИРНИТУ, e-mail: plasma@istu.edu

Nikolay V. Astrakhantsev, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Research Engineer of IRNITU Research and Technology Park, e-mail: plasma@istu.edu

³Зайдес Семен Азикович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой МТМ, e-mail: zsa@istu.edu
Semen A. Zaides, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Mechanical Engineering Technology and Materials, e-mail: zsa@istu.edu



rings of the CF40 joint was tested on an ultrahigh vacuum test bench with a XT-100M mass spectrometer quadrupole gas analyzer tuned to control the in-leakage of helium in the test bench vacuum chamber. Conducted experiments allowed to determine that the amount of in-leakage decreases under the reusing of a sealing ring sputtered with a copper coating. Ring surface micrographs were obtained using a scanning electron microscope. Sputtering deposition of a soft metal layer on the contact surfaces of a single-used metal ring restores surface sealing properties as well as reduces in-leakage as compared to a new liner. The effect is provided by the formation of a tight contact of the flange wedge solid metal with the surface of the plastic coating leveled along the entire circumference, which was restored by smoothing ring cavities formed during the previous tightening of the flange joint.

Keywords: flange joint with a metal seal, hermeticity, ion-plasma source, sputtering, vacuum installation, mass spectrometry gas analyzer, scanning electron microscope

Information about the article: Received September 20, 2018; accepted for publication October 30, 2018; available online November 30, 2018.

For citation: Aganaev S.I., Astrakhantsev N.I., Zaides S.A. Improving sealing element quality by ion-plasma sputtering. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018; 22(11) pp. 199–208. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-199-208.

Введение

Уплотнения как элементы трубопроводной арматуры широко применяют в конструкциях различных аппаратов и механизмов. От их работоспособности в значительной степени зависят функциональные возможности оборудования. Степень нарушения целостности уплотнительных поверхностей зависит от того, насколько структура материала и геометрия поверхности способны противостоять воздействию монтажных и эксплуатационных нагрузок [1–3].

Современные тенденции мирового развития арматуростроения описаны в обзоре [4], где отмечается, что серьезное внимание в мире уделяется безопасности, надежности и качеству работы уплотнительной арматуры. Особое значение имеет герметичность: так, по оценке Американского агентства по охране окружающей среды типичный нефтеперерабатывающий завод имеет 11000 единиц арматуры, которая из-за утечек в соединениях выделяет в воздух 3,3 т летучих органических веществ в сутки. Такое нарушение снижает экономичность производства [5].

Нанесение специальных тонкопленочных покрытий и модификация поверхностных слоев уплотнительных элементов трубопроводной арматуры высокого давления позволит существенно улучшить экс-

плуатационные характеристики [6]. В первую очередь, это повышение герметичности, а также кратное увеличение срока службы ответственных деталей трубопроводов в условиях высокого давления и агрессивной среды (включая возможность многократного использования уплотнительных прокладок в разъемных соединениях, что улучшает экономические показатели).

Среди разнообразных методов нанесения покрытий особое место занимают вакуумные ионно-плазменные методы, где атомы и молекулы в ионизованном или возбужденном состоянии интенсивно взаимодействуют друг с другом [7]. Процесс нанесения покрытий становится все более эффективным и широко применяется для нанесения упрочняющих покрытий на детали механизмов и режущий инструмент [8].

В работе [9], целью которой было исследование возможности применения различных покрытий в разъемных соединениях трубопроводного оборудования химического и нефтяного машиностроения, экспериментально показано, что нанесение ионно-плазменных покрытий из мягкого металла, более чем на порядок снижает уровень протечки уплотнений типа плоскость-плоскость при давлениях до 10 МПа. При этом нанесение классических твердых по-



крытий (титан, нитрид титана) на уплотняющие поверхности привело к увеличению протечек.

В нефтегазохимической индустрии для сочленения трубопроводов высокого давления, температуры и больших сечений (до 100 МПа, 400°C, Ду 160 мм и более) применяется так называемое бугельное соединение с уплотнительным элементом в виде стального кольца эллипсоидального поперечного сечения – «линзы». При затяжке бугельного соединения [10] сопрягаемые поверхности в зоне контакта взаимодействуют сложным образом, включая пластическую деформацию сдвига. Ожидаемый эффект использования линз с покрытием может заключаться в снижении необходимых усилий затяжки уплотнения и возможности повторного использования линзы после восстановления покрытия.

Цель работы – проверка возможности устранения утечек в уплотнении на примере фланцевого соединения стандарта ConFlat (далее по тексту – CF) при повторном использовании металлического кольца путем нанесения на его уплотняющие поверхности слоя мягкого металла ионно-плазменным способом.

В отличие от ранее цитированной статьи [9], в которой испытаниям на герметичность подвергались уплотнения типа плоскость-плоскость, поверхность уплотнительного кольца в соединении CF при затяжке подвергается сложной контактной деформации, включая сдвиговую.

Таким образом, настоящее исследование является подготовительным этапом к разработке оригинальных конструкций уплотнений и технологии изготовления уплотнительных элементов с покрытием.

Методика исследования

Объектом настоящего исследования являются одноразовые уплотнительные кольца, извлеченные после расстыковки узла уплотнения CF40, на поверхность которых при помощи оригинального источника металлической плазмы [11] (рис.1) наносится медное покрытие, и восстановленные кольца испытываются на герметичность в вакуумной установке с масс-спектрометрическим газоанализатором.

Соединения CF используются при изготовлении сверхвысоковакуумных камер и магистралей (предельное остаточное давление до 10^{-11} Па) и могут применяться в широком температурном диапазоне (от -200°C до 450°C) [12]. Для того чтобы обеспечить уплотнение, фланец CF имеет «клин». Кольцо из отожженной меди укладывается между «клиньями» двух фланцев CF, имеет толщину 2 мм и центруется по внешнему диаметру 48 мм проточкой на внутренних сторонах фланцев CF [13]. При затягивании соединяющих болтов «клин» каждого из фланцев деформирует поверхность кольца, и сплющивает, выдавливая его к внешней стороне фланца. В результа-

те материал кольца оказывается запертым в полости, образованной «клиньями» и внутренними поверхностями проточки фланцев [14].

После стыковки и протяжки болтов на кольцо в зоне герметизации увеличивается микротвердость, формируются продольные риски, и в соответствии с инструкцией такое кольцо не может использоваться повторно. Поставлена задача повысить кратность использования кольца путем нанесения слоя мягкого металла на его поверхности, деформированные при первичном использовании.

Схема ионно-плазменного источника, который использовался для восстановления поверхностного слоя уплотнительных колец, приведена на рис. 1. Источник позволяет наносить металлические покрытия (медь, свинец, кадмий, олово), причем скорость осаждения более чем на порядок выше по сравнению с магнетронным или вакуумно-дуговым напылением. Источник состоит из смонтированного на водоохлаждаемом вакуумном вводе графитового тигля – анода 1, в чашку которого поме-

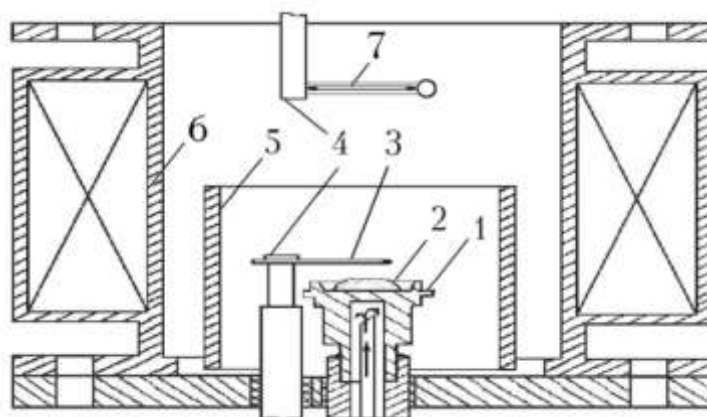


Рис. 1. Схема ионно-плазменного источника:

**1 – водоохлаждаемый анод; 2 – рабочий материал; 3 – прямонакальный катод;
4 – держатель; 5 – вспомогательный электрод;
6 – магнитная катушка; 7 – восстанавливаемое кольцо**

Fig. 1. Ion-plasma source diagram

**1 – water-cooled anode, 2 – working material, 3 – filament-type cathode,
4 – holder, 5 – auxiliary electrode, 6 – magnetic coil, 7 – reparable ring**

щается рабочий материал 2; в настоящем эксперименте – медный цилиндр диаметром 18 мм и высотой 9 мм. На расстоянии 3–5 мм от поверхности тигля и рабочего материала закреплен прямонакальный катод 3 из вольфрамовой проволоки диаметром 0,5 мм изогнутый в виде петли диаметром 15 мм. Концы спирали закреплены в держателях 4 из нержавеющей стали, на которые от понижающего разделительного трансформатора подается переменное накальное напряжение 8–10 В, обеспечивающее разогрев катода до температуры, при которой ток термоэлектронной эмиссии может достигать значений 0,5–1 А (в зависимости от расстояния между катодом 3 и анодом 1).

Источник плазмы работает следующим образом. К аноду прикладывается потенциал +650 В относительно заземленного катода, ускоряющий термоэлектроны, торможение которых в рабочем материале приводит к его разогреву и испарению. Через несколько минут, когда давление паров рабочего вещества в разрядном промежутке достигает порогового значения, происходит зажигание пучково-плазменного разряда с возрастанием анодного тока до максимальной величины 3,5 А – ток «короткого замыкания» источника анодного напряжения с падающей вольт-амперной характе-

ристической. При этом в зависимости от величины накального напряжения потенциал анода снижается до 120–200 В. [15].

Для облегчения зажигания разряда и с целью увеличения зоны ионизации паров рабочего материала пара катод-анод окружена вспомогательным электродом 5, на который подается положительный потенциал 25–110 В поддерживаемый всегда ниже, чем потенциал анода, а вся зона плазмообразования находится в продольном магнитном поле, создаваемом с помощью магнитной катушки 6.

Источник пристыковывается к металлической вакуумной камере диаметром 125 мм и длиной 400 мм, которая откачивается до предельного абсолютного давления 10^{-3} Па турбомолекулярным насосом. На оси камеры на расстоянии 120 мм от торца анода размещается подлежащее восстановлению кольцо 7. Поток паров рабочего материала с поверхности анода и ионизированных атомов этого же материала из зоны плазмообразования распространяется преимущественно вдоль оси камеры и конденсируется на восстанавливаемом кольце с образованием слоя меди, толщина которого зависит от времени напыления и расстояния от анода до кольца.



Результаты испытания на герметичность

Испытанию на герметичность подвергались три образца:

а – новое стандартное кольцо;

б – стандартное кольцо, извлеченное из разобранного фланцевого соединения после первого испытания и повторно установленное в это же соединение;

в – кольцо, ранее однократно использованное, на обе рабочие поверхности которого нанесен слой меди толщиной около 0,06 мкм.

На рис. 2 показано кольцо с покрытием, уложенное в проточку фланца CF40, перед их стыковой со вторым фланцем. На поверхности хорошо видна кольцевая вмятина – результат воздействия фланцевого клина на кольцо при первичной затяжке.

Интенсивность утечки определялась масс-спектрометрическим способом [16]. Для этого был изготовлен экспериментальный стенд, (рис. 3) (предельно достигаемое абсолютное давление 10^{-7} Па), откачиваемый турбомолекулярным насосом HiPace 80. В вакуумную камеру установки через фланцевое соединение CF40 вводилась вакуумируемая часть квадрупольного масс-спектрометра XT-100M (рис. 3, 1) [17]. В качестве испытываемого узла уплотнения использовалось вышеупомянутое фланцевое соединение CF40 масс-спектрометра. Зона зазора между фланцами этого соединения (рис. 3, 3) через трубку обдувалась пробным газом.

В качестве пробного газа использовался гелий (He), имеющий максимальную проникающую способность среди всех газов. Масс-спектрометр настраивался на регистрацию атомной/молекулярной массы в диапазоне от 3 до 5 а.е.м.; при проникновении гелия через уплотнение в вакуумную камеру на масс-спектрограмме регистрировался пик на 4 а.е.м. С учетом того, что естественное содержание гелия в атмосфере ничтожно мало, данный метод контроля герметичности имеет максимально возможную чувствительность и широко используется в промышленных течеискателях масс-спектрометрического типа.

Процедура проведения испытаний следующая. Образец уплотнялся во фланцевом соединении по единой схеме с одинаковым усилием поочередного затягивания болтов. Затем производилась откачка до абсолютного давления не более 10^{-3} Па, включался масс-спектрометр, и откачка продолжалась в течение не менее 1 ч, до тех пор, пока относительная скорость изменения абсолютного давления не уменьшалась до 5% за 10 мин. Далее зона стыка фланцев CF обдувалась пробным газом, и производилась дополнительная протяжка болтов фланцевого соединения до тех пор, пока амплитуда пика гелия на масс-спектрограмме не переставала уменьшаться. Эта амплитуда пика принималась за показатель степени негерметичности соединения.

Результаты испытаний на герметичность образцов «а» - «в» показаны на рис. 4.

Из сравнения рис. 4, а и б следует, что при повторном использовании стандартного кольца, степень натекания пробного газа увеличилась в 7 раз. Это происходит вследствие повышения жесткости из-за локальной деформации кольца при первом затягивании, а также несовпадения микроструктуры контактирующих поверхностей вследствие проворачивания кольца относительно фланцев, что по совокупности препятствует формированию плотного контакта для герметизации.

При сравнении рис. 4, а и с видно, что степень натекания через кольцо с покрытием при одинаковых условиях затяжки уменьшилась более чем в 50 раз, по отношению к стандартному новому кольцу. Это говорит о том, что возможно не только повторное использование кольца после его ионно-плазменной обработки, но и целесообразно нанесение дополнительного покрытия на новое кольцо для снижения усилия затяжки, при которой обеспечивается герметичность фланцевого соединения.

Для выявления факторов, способствующих положительному эффекту от



нанесения покрытия на однократно использованное кольцо, образец «а» после испытаний на герметичность и образец «в» с нанесенным покрытием перед уплотнением

исследовались на сканирующем электронном микроскопе JEOL JIB-Z4500. Микроснимки поверхности уплотнительных колец показаны на рис. 5.

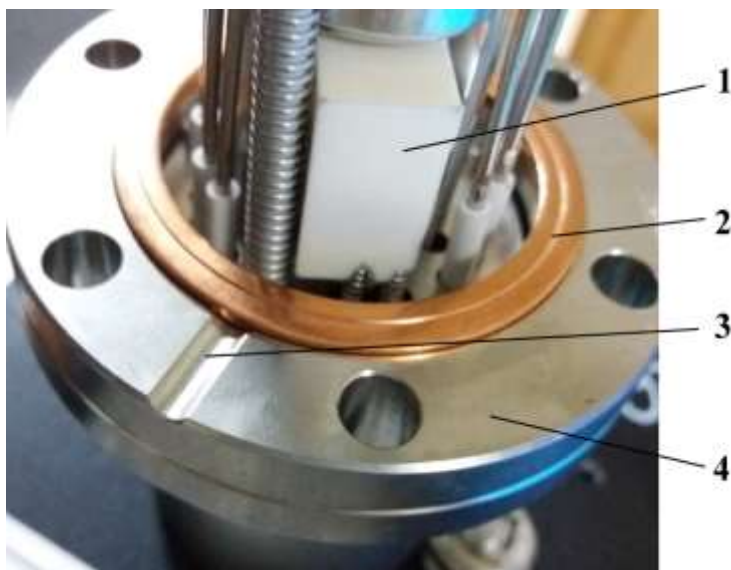


Рис. 2. Укладка уплотнительного кольца:

1 – вакуумируемая часть квадрупольного масс-спектрометра ХТ-100М;
2 – уплотнительное кольцо; 3 – лунка; 4 – фланец соединения CF40

Fig. 2. O-ring laying:

1 – vacuumized part of the XT-100M quadrupole mass spectrometer; 2 – sealing ring;
3 – groove; 4 – joint flange CF40



Рис. 3. Экспериментальный стенд для испытания медного кольца на герметичность:

1 – корпус газоанализатора ХТ-100; 2 – трубка для подвода газа; 3 – исследуемое соединение KF40;
4 – вакуумная камера; 5 – турбомолекулярный насос

Fig. 3. Experimental test bench for testing copper ring hermeticity:

1 – XT-100 gas analyzer body; 2 – gas supply tube; 3 – joint KF40 under investigation; 4 – vacuum chamber;
5 – turbo molecular pump

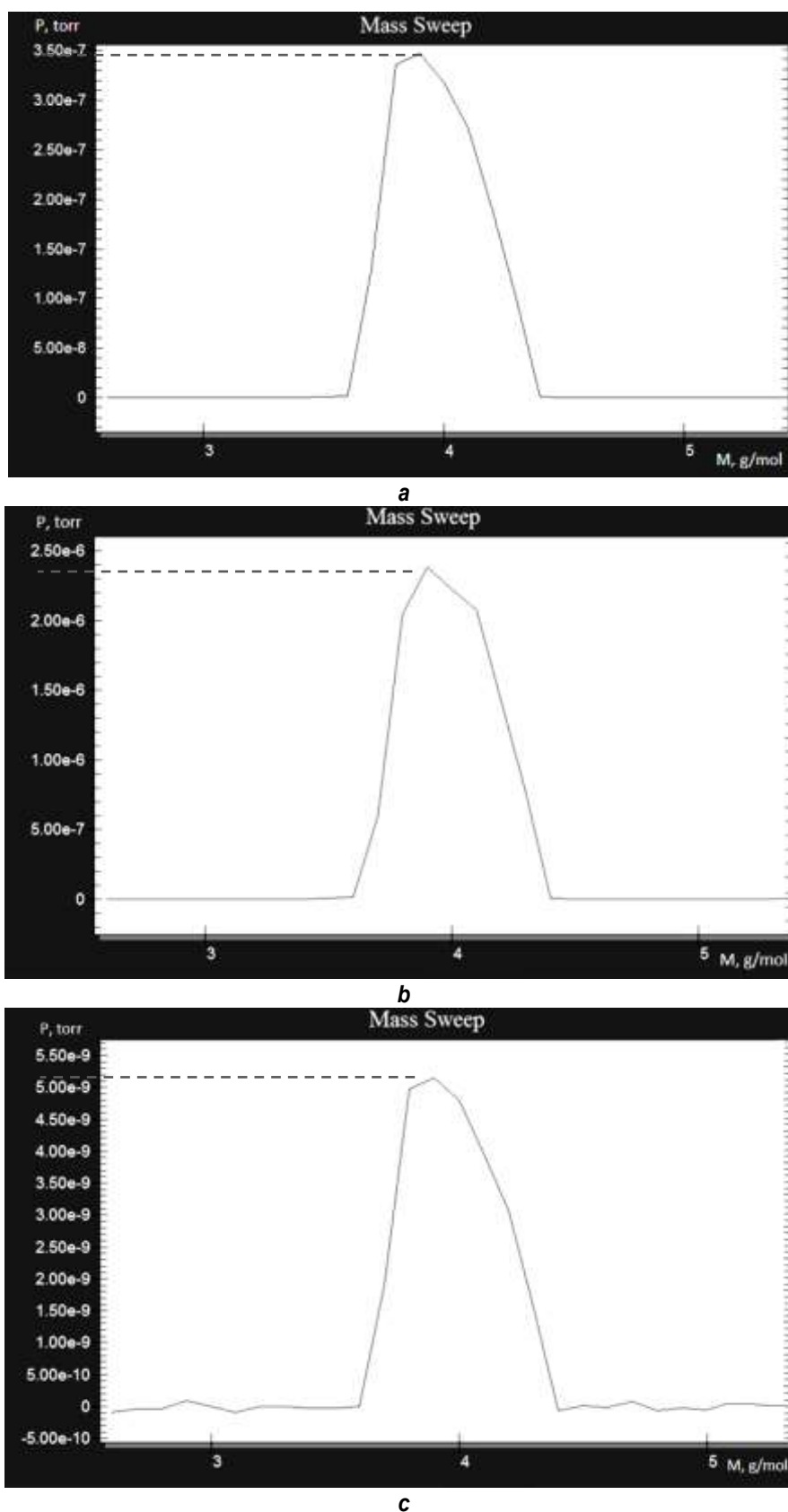


Рис. 4. Масс-спектрограммы, показывающие натекание гелия через фланцевое соединение с тремя образцами уплотнительных колец: а – стандартное кольцо; б – повторное использование кольца; с – кольцо с напылением
Fig. 4 Mass spectrograms showing helium in-leakage through a flange joint with three o-ring specimens: a – standard ring; b – reused ring; c – sputter deposition ring

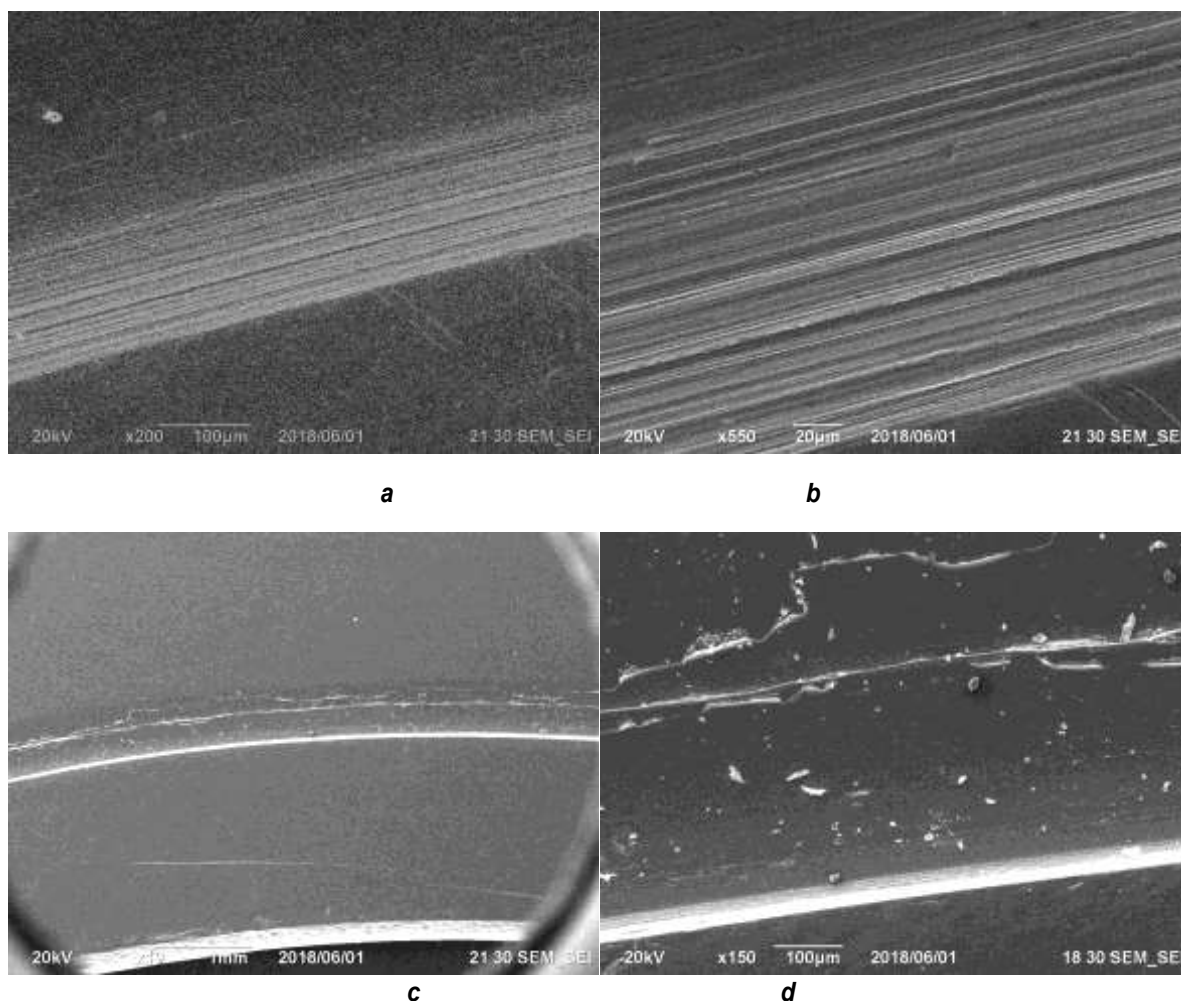


Рис. 5. Микроснимки поверхности фланцевых колец с различным масштабом увеличения:

a – 100 мкм; b – 20 мкм; c – 1 мм; d – 100 мкм;

a, b – стандартное кольцо после однократного использования;

c, d – кольцо после однократного использования и нанесения покрытия
Fig. 5. Micro images of flange ring surfaces with different magnification scales:

a – 100 μm; b – 20 μm; c – 1 mm; d – 100 μm;

a, b – standard ring after a single use; c, d – ring after a single use and coating

На всех снимках рис. 5, с различными масштабами показаны участки поверхности колец с пластической деформацией, возникшей при уплотнении фланцевого соединения. На рис. 5, *a* и *b* показаны микроснимки однократно уплотненного кольца (образец *a*) без покрытия. В зоне уплотнения видны полосы кольцевой формы, причиной образования которых является пластическая деформация поверхности меди в зоне контакта с фланцевым клином, возникающая из-за малых перемещений клина относительно кольца при поочередном затягивании болтов во фланцевом соединении CF40. Поскольку болты затягивались вручную без контроля момента силы, пери-

одичность расположения полос в радиальном направлении не наблюдается.

На рис. 5, *b* и *d* приведен микроснимок участка поверхности кольца, прошедшего цикл однократного использования и восстановления путем нанесения покрытия. Видно, что нанесенное покрытие сгладило полосы, а точечные дефекты, представляющие микрокапли расплавленного металла, на качество герметизации принципиального влияния не оказывают. Опасность для нарушения уплотнения представляют именно полосы в форме микровпадин – царапин на поверхности уплотнительного кольца.



Заключение

Экспериментально показано, что уплотнительное кольцо, восстановленное путем нанесения на контактные поверхности слоя мягкого металла (меди толщиной 0,06 мм), повышает герметичность фланцевого соединения стандарта CF. Это позволяет повторно использовать кольцо, причем степень уплотнения даже улучшается по сравнению со стандартной новой прокладкой.

Полученный результат носит качественный характер и требует проведения

дальнейших исследований, связанных с изготовлением специального вакуумного стенда с измерением усилия затяжки уплотнительного кольца.

Представляет интерес развитие данного метода для многократного использования уплотнительных колец, а также исследование возможности применения технологии нанесения покрытий на герметизирующие элементы трубопроводной аппаратуры, эксплуатируемые в условиях высоких давлений, температур и агрессивных сред.

Библиографический список

1. Материалы уплотнений трубопроводной аппаратуры. Свойства уплотнительных материалов [Электронный ресурс] // Старт ИМПЭКС. URL: <https://starimpex.ru/raznoe/svoystva-uplotnitelnyh-materialov.html> (26.09.2018).
2. Крепление скважин [Электронный ресурс] // Добыча нефти и газа. URL: <http://oilloom.ru/component/content/article/78-tehnika-i-tehnologii-stroitelstva-skvazhin/170-kreplenie-skvazhin> (26.09.2018).
3. Уплотнение – важнейший компонент гидравлической конструкции [Электронный ресурс] // Основные средства: URL: <http://www.os1.ru/article/7328-uplotnenie-vajneyshiy-komponent-gidravlicheskoj-konstruktsii> (10.10.2018).
4. Промышленная экология [Электронный ресурс]. URL: <http://www.alfar.ru/smart/1/1054/> (10.10.2018).
5. Божко Г.В. Разъемные герметичные соединения // Вестник ТГТУ. 2010. Т. 16. № 2. С. 404–120
6. Аганаев С.И., Тютрин Н.О. Исследование технологии получения герметичных покрытий на уплотнительных элементах ионно-плазменным методом // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): материалы VII Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием (Иркутск, 26–28 апреля, 2018 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2018. С. 213–220.
7. Артеменко Н.В., Симонов В.Н., Власова Д.В. Исследование процесса осаждения нитрида титана на установке ионно-плазменного напыления МАП-3 // Труды ВИАМ. 2017. № 12 (60). С. 110–122
8. Сейткулов А.Р. Особенности процесса получения покрытий вакуумным ионно-плазменным методом // Вестник КазНКА. 2010. № 3 (64). С. 151–155.
9. Паперный В.Л., Погодин В.К., Перминова Е.А. Исследование герметичности уплотнительных соединений плоскость – плоскость с ионно-плазменными покрытиями // Химическое и нефтегазовое машиностроение 2013. № 9. С. 3–6.
10. Пат. № 2322632, Российская Федерация Разъемное соединение / В.К. Погодин, В.П. Вирюкин, И.М. Рудых, А.М. Кузнецов, Меринов С.П. Елшин А.И. 04.08.2006 г.
11. Пат. №170029, Российская Федерация Устройство для создания потока металлической плазмы / О.И. Шипилова, Н.В. Астраханцев, Н.В. Лебедев, В.Л. Паперный. 12.04.2017 г.
12. ООО "АВАКС" Научно-производственная фирма: Уплотнительные прокладки соединений CF (conflat) [Электронный ресурс]. URL: <https://avacuum.ru/rus/armature/59/g179/> (10.10.2018).
13. Fittingplus: Пассивная арматура вакуумных систем. [Электронный ресурс]. URL: http://fittingplus.ru/pdf/vacuum_fitting+.pdf (10.10.2018).
14. Никитин О. Ф. Обоснование размеров канавки установки кольца контактных уплотнительных устройств // Наука и образование МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. № 6. С. 113–118.
15. Борисенко А.Г. Источник бескапельных плазменных потоков для наноэлектроники // Технология и конструирование в электронной аппаратуре 2013. № 4. С. 37–41.
16. Пат. № 95112665/09, Российская Федерация. Масс-спектрометр для газового анализа / А.В. Козловский. 27. 01.1998.
17. Pyramid Vacuum: Масс-анализаторы серии Extorr XT [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pyramid-vacuum.ru/extrr.htm> (15.10.2018).

References

1. Mechanized scraping of coal foam on the electrolyzer with C1 anode. Seal materials for pipeline valves. Properties of sealing materials. Start IMPEKS. Available at: <https://starimpex.ru/raznoe/svoystva-uplotnitelnyh-materialov.html> (accessed September 26, 2018).
2. Well casing. Dobycha nefiti i gaza [Oil and Gas Pro-



duction] Available at:

<http://oiloot.ru/component/content/article/78-tehnika-i-tehnologii-stroitelstva-skvazhin/170-kreplenie-skvazhin> (accessed September 26, 2018).

3. Compacting as an essential component of hydraulic structure. *Osnovnyye sredstva* [Primary tools] Available at: <http://www.os1.ru/article/7328-uplotnenie-vajneyshiy-komponent-gidravlicheskoy-konstruktsii> (accessed September 26, 2018).

4. *Proyshlennaya ekologiya* [Industrial ecology] Available at: <http://www.alfar.ru/smart/1/1054/> (accessed October 10, 2018).т

5. Bozhko G.V. *Raz"yemnyye germetichnyye soyedineniya* [Split Hermetical Compounds]. *Vestnik TGTU* [Transactions of the TSTU]. 2010. Vol.16, no 2, pp. 404-120 (In Russ.)

6. Aganaev S. I. Tyutrin N. O. *Issledovaniye tekhnologii polucheniya germetichnykh pokrytiy na uplotnitel'nykh elementakh ionno-plazmennym metodom* [Study of the production technology of hermetic coatings on sealing elements by the ion-plasma method]. *Materialy VIII Vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem. 2018 'Zhiznennyy tsikl konstruktsionnykh materialov (ot polucheniya do utilizatsii)'* [Materials of VIII All-Russian Scientific and Technical Conference with the international participation. 2018 "Life cycle of structural materials (from production to disposal)"]. Irkutsk, IRNITU Publ., 2018, pp. 213-220. (In Russian)

7. Artemenko N.V., Simonov V.N. Vlasov D.V. *Issledovaniye protsessy osazhdeniya nitrida titana na ustanovke ionno-plazmennogo napyleniya MAP-3* [Study of titanium nitride deposition on the ion-plasma spraying installation MAP-3] *Trudy VIAM*.

8. [Proceedings of VIAM]. Moscow: VIAM Publ. 2017. no 12(60)

9. Seytkulov A.R. Features of coating production by the vacuum ion-plasma method. *Vestnik KazKKA* [Bulletin of the Tynyshpaev Kazakh Academy of Transport and Communications]. 2010, no 3(64), pp. 151–155.

10. Paperniy V.L., Pogodin V.K., Perminova E.A. Hermiticity study of face – face sealing joint with ion-plasma

coatings. *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and Petroleum Engineering]. 2013, no 9, pp. 3–6.

11. Pogodin V.K., Viryukin V.P., Rudykh I.M., Kuznetsov A.M., Merinov S.P. Yolshin A.I. *Raz"yemnoye soyedineniye* [Detachable joint] // Patent of the Russian Federation for invention no. 2322632. Date of state registration August, 4. 2006 (In Russ.)

12. Shipilova O.I. Astrakchantsev, N.V. Lebedev, N.V. Paperniy V.L. Device for metallic plasma flow creation. Patent of the Russian Federation for the Utility Model no.170029. Date of state registration April, 12. 2018 (In Russ.)

13. ООО "АВАКС" Научно-производственная фирма. [Scientific and production company AVAKS LLC] *Uplotnitel'nyye prokladki soyedineniy* [Sealing liners for CF (conflat) joints] Available at:

<https://avacuum.ru/rus/armature/59/g179/> (accessed October 10, 2018).

14. Fittingplus: *Passivnaya armatura vakuumnykh sistem* [Fittingplus: Passive valves of vacuum systems.] Available at: http://fittingplus.ru/pdf/vacuum_fitting+.pdf (accessed October 10, 2018)

15. Nikitin O. F. Justification of groove dimensions for mounting a ring of contact sealing devices. *Nauka i obrazovaniye MGTU im. N.E. Baumana*. [Scientific Periodical of the Bauman MSTU Science and Education]. 2013. no 6. - pp 113-118

16. Borisenko A.G. The source of macroparticle-free plasma flows for nanoelectronics. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature* [Technology and design in electronic equipment]. 2013. №4. - P. 37-41.

17. Kozlovskiy A.V. *Mass-spektrometr dlya gazovogo analiza* [Mass Spectrometer for Gas Analysis]. Patent of the Russian Federation for invention no. 95112665/09. Date of state registration January, 27. 1998 (In Russian)

18. Pyramid Vacuum: *Mass-analizatory serii Extorr XT* [Pyramid Vacuum: Mass Analyzers of Extorr XT Series] Available at: <http://www.pyramid-vacuum.ru/extrr.htm> (accessed October 15, 2018)

Критерии авторства

Аганаев С.И., Астраханцев Н.В., Зайдес С.А. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authorship criteria

Aganaev S.I., Astrakchantsev N.I., Zaides S.A. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results 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: 669.046.5

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-11-209-218>

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

© А.В. Никаноров¹

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

РЕЗЮМЕ: Цель исследования – сравнение компьютерных программ, используемых для моделирования литейных процессов – литья заготовок из сплавов металлов. Для сравнительного анализа были использованы следующие компьютерные программы: Magmasoft, Polygon, SolidCAST, PROCAST. При моделировании использовалось несколько объектов (образцов) литья разной степени сложности. В результате проведенного компьютерного моделирования в системе PROCAST были автоматически устранены дефекты чертежей, выявленные в начальной модели. Были построены двухмерная (2D) и трехмерная (3D) сетки, которые сделали форму для литья более качественной и многофункциональной как для самой отливки, так и для формы литья. Получены результаты моделирования литья в программе PROCAST. На основе полученных результатов было показано, что программный комплекс PROCAST является наиболее профессиональной компьютерной программой для моделирования литейных процессов из принятых для сравнения программ.

Ключевые слова: моделирование литейных процессов, компьютерное моделирование, программы Magmasoft, Polygon, SolidCAST, PROCAST

Информация о статье: Дата поступления 15 августа 2018 г.; дата принятия к печати 30 октября 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 ноября 2018 г.

Для цитирования: Никаноров А.В. Сравнительный анализ компьютерных программ для моделирования литейных процессов. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(11):209–218. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-209-218.

COMPARATIVE ANALYSIS OF COMPUTER PROGRAMS FOR FOUNDRY PROCESS SIMULATION

Alexander V. Nikanorov

Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 663074, Russian Federation

ABSTRACT: The purpose of the research is to compare some computer programs used for the simulation of foundry processes including alloy casting. Magmasoft, Polygon, SolidCAST, PROCAST computer programs are used for the comparative analysis. Several foundry samples of the various degree of complexity are used for the simulation. The performed computer simulation in the PROCAST system allowed to eliminate the drawing defects identified in the original model. A 2D and a 3D grid networks were built. They improved the quality of the casting mould and made it multifunctional for both a casting and a casting mould. Foundry simulation results in PROCAST program have been received. The obtained results suggest the software system PROCAST to be the most efficient computer program for foundry process simulation of all tested.

Keywords: foundry process simulation, computer modeling, Magmasoft, Polygon, SolidCAST, PROCAST programs.

¹Никаноров Александр Витальевич, кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии цветных металлов, e-mail: nikanoroff@list.ru

Alexander V. Nikanorov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Non-Ferrous Metals Metallurgy, e-mail: nikanoroff@list.ru



Information about the article: Received August 15, 2018; accepted for publication October 30, 2018, 2018; available online November 30, 2018.

For citation: Nikanorov A.V. Comparative analysis of computer programs for foundry process simulation. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(11):pp. 209–218. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-209-218.

Введение

Литейное производство является основной базой машиностроительного, авиационного и металлургического комплекса, и его развитие зависит от темпов развития данных отраслей в целом. Производство российских литевых деталей за годы реформирования сократилось в 4,5 раза: с 18,5 млн т до 4,2 млн т. Количество предприятий, производящих литейную продукцию, сократилось почти в три раза – с 3500 до 1250. Ликвидировано 10 научно-исследовательских институтов по литейному производству. Экспорт литья незначителен, а экспорт литейного оборудования практически отсутствует. Вместе с тем импорт литейного оборудования, в том числе для литейных цехов металлургических заводов, за 10 лет с 2003 г. увеличился почти в 9 раз, превысив 1 млрд долл. США в 2012 г. [1, 2].

Однако получение литевых деталей на основе сплавов цветных металлов с улучшенными физико-химическими характеристиками является очень важной производственной задачей, на решение которой нацелены ученые и производственники [3–5].

Из анализа современного состояния и перспектив развития инновационных технологий следует, что, прежде всего, необходимо значительное увеличение объема инвестиций в науку: исследования и разработки, создание новых машин, оборудования и технологий, проектно-конструкторские работы, приобретение патентов или лицензий, программных продуктов, обучение и подготовка кадров. Именно этих ресурсов не хватает для проведения модернизации литейного производства [6, 7]. Необходимо целый комплекс технологических решений, позволяющих наиболее эффективно реализовать приоритетные направ-

ления.

Такой «критической технологией», которая способна внести наибольший вклад в ускорение экономического роста, повышение конкурентоспособности продукции, является информационная технология (ИТ). Реализуется она через компьютерное проектирование, электронный архив, в который складывается вся информация и откуда она попадает к технологам, к метрологам, а от них к объектам проектирования. При этом выявляется большое количество недостатков в организации нашего производства и появляется возможность для их устранения [8, 9].

В настоящее время одной из главных идей развития промышленности должна стать неоиндустриализация, представляющая собой процесс крупномасштабной модернизации, основанной на безотходных технологиях автоматизированного производства – компьютеризованного и роботизированного [10].

Перечисленные факторы позволяют сформулировать основные направления стратегии дальнейшего развития литейного производства. Эти направления охватили практически весь комплекс проблем современного промышленного производства, а именно:

- состояние и направления развития мирового и отечественного литейного производства;
- современные технологии, материалы и оборудование;
- диагностика, сертификация и управление качеством отливок;
- компьютерные технологии в литейном производстве;
- экология и охрана труда;
- экономика и организация производства;



– подготовка кадров.

Как видно из вышеизложенного, одним из основных стратегических направлений развития литейного производства на современном этапе - это развитие моделирования и компьютерных технологий.

Развитие моделирования и компьютерных технологий предполагает:

– моделирование формирования отливки в форме – система синтеза по всем элементам процесса [11];

– автоматизированное проектирование литейной технологии;

– проектирование литейной технологии и оснастки в CAD-системе с последующим её изготовлением на станках с числовым программным управлением (ЧПУ);

– разработка системы быстрого прототипирования;

– компьютерное управление технологическим оборудованием [12, 13].

Сегодня в мире насчитывается большое количество программ для моделирования литейных процессов. В мировой практике основное распространение получили программы, представленные в табли-

це.

К сожалению, российским специалистам известны лишь такие программы, как Magmasoft, PROCast, SolidCast, а также две отечественные разработки – «Полигон» и LVMFlow.

Основные проблемы при выборе конкретной программы для моделирования технологических процессов состоят в отсутствии достоверной информации о возможностях самой программы, принципах работы с ней, а также в отсутствии специалистов на предприятиях России. Существенным фактором для отечественных предприятий при выборе программы для моделирования литейных процессов остается ее стоимость [14].

Программы для моделирования литейных процессов, используемые сегодня в России, в основном различаются степенью полноты факторов, учитываемых при моделировании, и, соответственно, стоимостью. Второе существенное различие связано с методами получения и решения уравнений: уравнения тепломассопереноса могут быть записаны в дифференциальном или интегральном виде.

Программы для моделирования литейных процессов и страны создатели

Programs for casting process simulation and the country of origin

Страна –разработчик	Программа	Страна-разработчик	Программа
Германия	Magmasoft	США	Flow3D
Германия	WinCast	США	PowerCast
Франция	PROCast	США	SolidCast (AFSolid)
Франция	QuikCast	США	CAPCast
Франция	PAM-Cast	США	RAPID/CAST
Франция	CalcoSoft	Корея	AnyCasting
Испания	Vulcan	Финляндия	CastCAE
Япония	JSCAST	Россия, г. Ижевск	LVMFlow
Россия, г. Санкт-Петербург	Poligon («Полигон»)	Россия, г. Москва	FlowVision
Англия	Mavis-Flow	Индия	AutoCast
Китай	InteCast	Австралия	Castflow, Casttherm



Метод конечных разностей (МКР) [15], используемый в таких программах, как Magmasoft, SolidCast, CastCAE, JSCAST, AnyCasting и других, позволяет в кратчайшие сроки получить распределение усадочных дефектов в проектируемой отливке и вовремя исправить технологию литья. Однако для устранения усадочной пористости в отливках ответственного назначения такие программы не подходят, так как применяемый математический метод недостаточно хорошо работает в случае тонкостенных отливок, когда толщина стенок становится сравнимой с шагом сетки. Связано это с тем, что разбиение исходной геометрической модели происходит путем наложения прямоугольной сетки с постоянным шагом, что приводит к резкому увеличению числа расчетных ячеек в случае получения тонкостенных отливок больших габаритных размеров.

Метод конечных элементов (МКЭ) [15], используемый в таких программах, как Poligon («Полигон»), WinCast и т.д., позволяет максимально учесть геометрию отливки и выявить даже незначительные дефекты. Связано это с разбиением исходной геометрической модели отливки на конечные элементы (чаще всего – тетраэдры). Встроенные генераторы сеточной модели в самих программах дают большие погрешности. Проблема решается путем использования внешнего генератора сетки КЭ, что приводит к удорожанию приобретаемого программного обеспечения, увеличению

времени работы, а также требует от персонала высокой квалификации.

Метод контрольных объемов (МКО) (используемый в программах Flow-3D, LVMFlow) сочетает в себе простоту и факторизацию МКР и хорошую аппроксимацию границ между различными материалами и различными фазами. Это позволяет проводить моделирование максимально быстро, не теряя при этом точности расчетов. LVMFlow – единственная полноценная программа для моделирования литейных процессов, которая использует данный метод. Программа Flow-3D также использует МКО и является лидером для расчета гидродинамических задач, однако не является изначально предназначенной для процессов литья, поэтому не так часто используется для решения исследуемых задач.

К сожалению, ценовая политика программного обеспечения остается в России основным критерием выбора необходимой программы. Уровень цен колеблется примерно от 10 тыс. до 120 тыс. долл. за 1 рабочее место [16].

Стоит обратить внимание на удобство использования данных программ, так как некоторые из них имеют весьма громоздкий интерфейс и не переведены на русский язык. Большинство программ, базирующихся на МКЭ, имеют очень трудный для пользователя интерфейс, что в сочетании с отсутствием опыта работы на ЭВМ технологов-литейщиков сводит использование любой хорошей программы к нулю.

Цель и методы исследования

Целью исследования явился сравнительный анализ некоторых компьютерных программ для моделирования литейных процессов. При моделировании использовались объекты литья разной степени сложности: Magmasoft, Poligon, SolidCAST, PROCAST.

Результаты компьютерного моделирования литейных процессов и их обсуждение

Нами было проведено моделирование процессов литья заготовок.

Программа **Magmasoft** – многофункциональная специализированная САЕ-программа, позволяющая моделиро-

вать разнообразные литейные процессы. Программа относится к классу конечно-разностных систем анализа и имеет более 400 инсталляций (рис. 1). Программа обладает хорошей точностью получаемых ре-



зультатов и богатым набором параметров для проведения моделирования.

К недостаткам программы следует отнести: высокая стоимость, очень сложный интерфейс без поддержки русского языка, отсутствие отечественной базы данных по материалам и сплавам, большие временные затраты на ввод данных.

При использовании программы **Polygon** («Полигон») моделирование ведется на базе МКЭ, который позволяет использовать наиболее адекватные физические и геометрические модели (ГМ). Все модели и функции реализованы для трехмерных ГМ (рис. 2).

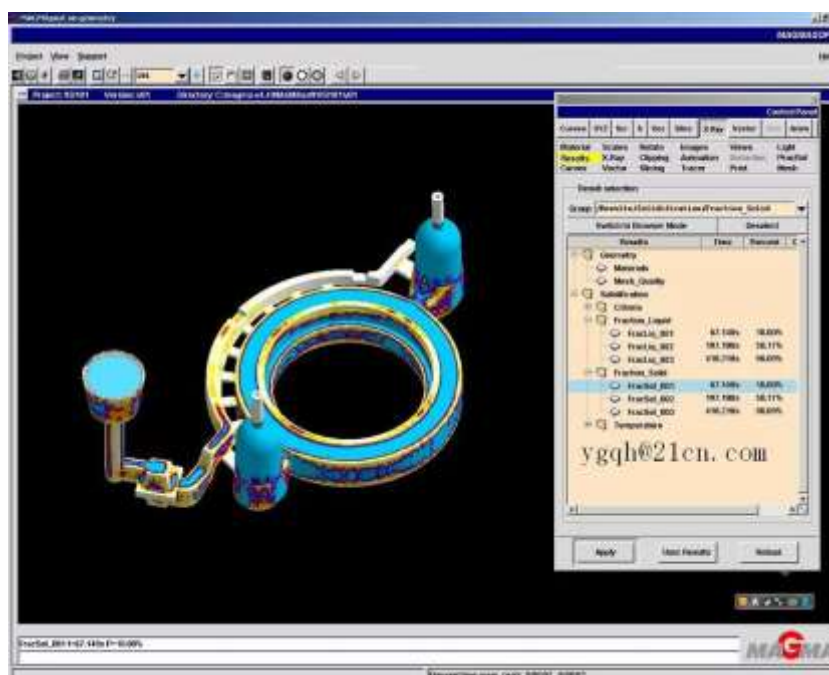


Рис. 1. Интерфейс программы Magmasoft
Fig. 1. Magmasoft interface

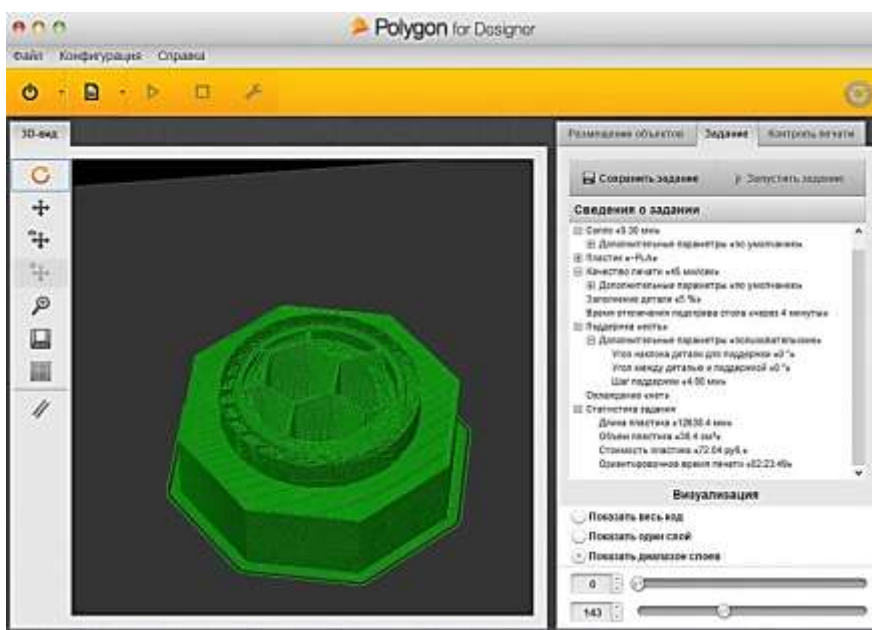


Рис. 2. Интерфейс программы «Полигон»
Fig. 2. Polygon interface



В решателях можно использовать не только прямой, но и итерационный метод расчета. Это позволяет в 10–15 раз уменьшить время расчета и требуемую оперативную память, что в сочетании с МКЭ делает доступным на персональном компьютере расчет отливок любой сложности. 3D-геометрический препроцессор «Полигона» при подготовке расчетных ГМ позволяет импортировать сетки практически всех известных генераторов: FEMAP, HyperMesh, ANSYS 4,4–5,3, ProCAST, Nastran, GiD, Pro/Mesh, StressLab, генератор Unigraphics и др. Для генерации 3D конечно-элементных сеток совместно с «Полигоном» могут поставляться автоматические генераторы сеток FEMAP или GiD, которые используют исходные ГМ в форматах IGES, PARASOLID, VDA FS, STL и др. Это позволяет совместно с «Полигоном» использовать все наиболее популярные 3D CAD-системы: SolidWorks, Unigraphics, ProEngineer, Компас-3D, EUCLID, CATIA, Cimatron, CADD5 и др.

К недостаткам программы можно отнести следующие: крайне неудобный интерфейс, сложность подготовки сеточной модели, сложность ввода данных, недостаточная база данных по материалам и сплавам, а также необходимость в приобретении дополнительного лицензионного программного обеспечения для генерации сеточной модели. По нашему мнению, «Поли-

гон» не может выступать как повседневная программа для разработки технологии получения отливок. «Полигон» следует использовать в паре с другой литейной программой как проверочное средство для отливок ответственного назначения. Возможно другое применение «Полигон»: организация учебного процесса в высших учебных заведениях [17].

Программа **SolidCAST** различает при моделировании следующие виды литья: непрерывное литье, литье по выплавляемым моделям, литье в кокиль, литье в песчаную форму, гравитационное литье.

SolidCast – базовый модуль (рис. 3). Включает в себя «быструю заливку» и анализ процесса затвердевания. В данном модуле отсутствует учет предварительного заполнения формы металлом, имеется только имитация.

Стоимость SolidCast составляет 17700 долл. США за 5 рабочих мест. Это означает, что купив 1 лицензию, реально смогут работать 5 технологов одновременно, но моделируя только процесс затвердевания. FlowCast – полноценный модуль учета движения расплава. Приобретается отдельно к каждому рабочему месту. Стоимость – 12000 долларов. Модуль OptiCast позволяет автоматически построить объемные модели прибылей в тепловых местах отливки. Стоимость модуля – 8000 долл. США.

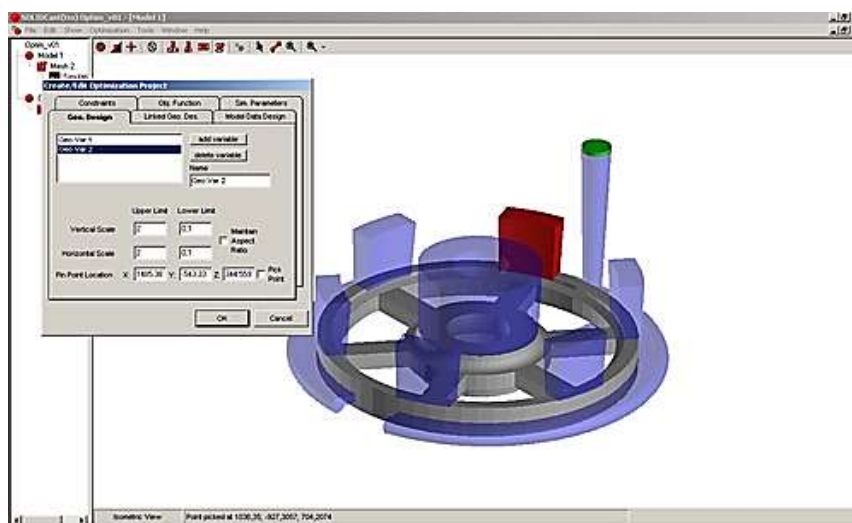


Рис. 3. Интерфейс программы SolidCast
Fig. 3. SolidCast interface



Недостатки SolidCast: неудобный интерфейс, несмотря на возможность перевода меню на русский язык, неудобный вывод результатов расчета для визуального анализа, отсутствует отечественная база данных по материалам и сплавам, чрезмерная длительность компьютерного расчета.

SolidCast – программа для моделирования литейных процессов начального уровня. Моделирует основные задачи, с которыми сталкиваются технологи. По своему функциональному назначению напоминает LVMFlow. Ежегодно выходят новые версии. Можно рекомендовать предприятиям с большой номенклатурой несложных отливок, т.к., приобретая 1 рабочее место, предприятие получает 5 рабочих мест. Однако автор не рекомендует программу Solidcast, поскольку она имеет значительно меньше возможностей, чем LVMFlow, уступает по скорости расчетов и значительно дороже.

ESI Group (PROCAST) представляет обширный набор приложений, модулей и инструментов для удовлетворения самых серьезных производственных нужд для литейной промышленности (рис. 4). PROCAST, основанный на МКЭ, способен кроме этого прогнозировать возникновение деформаций и остаточных напряжений в отливке и может применяться для анализа

таких процессов как изготовление стержней, центробежное литье, литье по выжигаемым моделям, непрерывное литье.

PROCAST поставляется с 3D-генератором тетрагональной сетки и средством чтения и анализа геометрии из CAD-систем, что обеспечивает связь между средой разработки и редактором сеток. Имеются конвертеры для следующих форматов: IGES, STEP, VDA, Parasolid, Unisurf, ACIS, UNIGRAPHICS, AutoCAD, CATIA v4 и v5. Имеется автоматический генератор оболочек, позволяющий создавать оболочковые формы для литья по выплавляемым моделям (включая многослойные оболочки). Специальная опция для создания послойных сеток, обладающая повышенной точностью, позволяет генерировать совпадающие и несовпадающие сетки. Генератор позволяет выполнять сборки поверхностных сеток с проведением булевых операций.

Точное описание геометрии, обусловленное применяемым МКЭ, позволяет системе PROCAST моделировать заполнение формы жидким расплавом и получать верные представления о: размывании песчаной формы, воздушных карманах, оксидах и турбулентном течении, возрасте материала, непроливах и холодных спаях, длине течения, переливах.

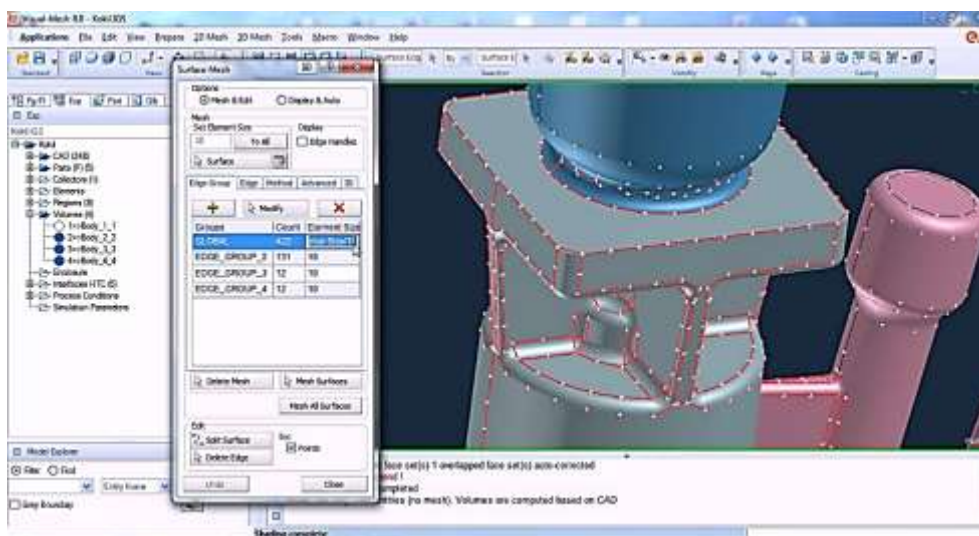


Рис. 4. Интерфейс программы PROCAST
Fig. 4. PROCAST interface



Расчет течения описывается полным уравнением Навье-Стокса [11] и может проводиться совместно с анализом температуры и напряжений. В решатель добавлены специальные модели для анализа турбулентных потоков, тиксотропных или твердожидких материалов, центробежного литья, литья по выжигаемым моделям и производства стержней. Термический решатель позволяет рассчитывать тепловой поток с учетом теплопроводности, конвекции и излучения. С помощью энтальпии учитывается тепловыделение, связанное и изменением фазового состава при кристаллизации и в твердом состоянии.

Существующий решатель напряжений работает совместно с термическим и гидродинамическим решателями и реализует упруго-пластичную и упруго-вязкопластичную модели поведения материалов. Кроме этого, могут применяться более простые модели, например, упругая, свободная или жесткая. Совместный расчет напряжений позволяет прогнозировать с высокой точностью: термический и механический контакты, горячие трещины и разломы, разрушение и деформации, усталость, напряжения в отливке и форме.

С программой PROCAST поставляется большая база данных материалов для литейных моделей. Ее содержание постоянно пополняется достоверными данными, проверенными в условиях действующего производства. В PROCAST включена уникальная термодинамическая база данных, которая позволяет пользователю, введя химический состав сплава, автоматически получить температурные кривые свойств,

необходимых для проведения точного расчета литейного процесса.

PROCAST предоставляет законченное решение для моделирования непрерывного и полунепрерывного литья заготовок. Программа способна моделировать установившийся режим, начальную и конечную стадии процесса.

Модуль инверсного расчета позволяет автоматически рассчитать параметры материала или процесса на основе температур, измеренных в заданных точках или в заданные моменты времени. Первичное и вторичное охлаждения могут быть определены по инверсному расчету.

К недостаткам программы можно отнести отсутствие русскоязычного интерфейса и высокую стоимость, но она оправдана возможностями программы.

PROCAST – действительно лучшая литейная программа из опробованных и представленных в данной статье. Она предоставляет пользователю неограниченные возможности для моделирования всех видов литья. Интуитивно понятный интерфейс и качественная генерация сеточной модели.

PROCAST идеален для предприятий авиакосмического производства, где временные затраты (месяц и более) на оптимизацию одной отливки оправдываются достигнутыми целями. Для рядовых предприятий PROCAST не рекомендуется, т.к. возможности программы в полном объеме использоваться не будут, а проведение моделирования вызовет серьезные сложности и потребует много времени.

Заключение

В результате проведенного компьютерного моделирования в системе PROCAST автоматически устранены дефекты чертежей, которые были в исходной модели. Была построена 2D- и 3D-сетки, которые обеспечили создать форму для литья более качественной и многофункциональной как для самой отливки, так и для формы литья. В SolidCAST это

недоступно: данная программа может лишь подготовить модель непосредственно перед литьем, без устранения дефектов и прочего функционала, который использует PROCAST. Кроме того, в программе PROCAST присутствует гибкая система выбора материала для литья, которых недостаточно в SolidCAST. Но в обеих программах присутствует процесс литья и за-



твердевания.

Единственный недостаток программы PROCAST – это ее дороговизна на рынке программ, предназначенных для моделирования литейных процессов.

Программы Magmasoft, Poligon, которые также нами были опробованы для моделирования литейных процессов, обладают крайне сложным и неудобным интерфейсом, сложностью подготовки сеточной модели и ввода данных.

Библиографический список

1. Ткаченко С.С., Евсеев В.И. Состояние и перспективы развития литейного производства в станкостроительной отрасли промышленности России [Электронный ресурс] // Литейный консилиум онлайн. URL: <https://litkons.com/info/innovations/sostoyanie-i-perspektivy/> (26.10.2018)
2. Дибров И.А. Состояние и перспективы развития литейного производства в России // Тр. VIII съезда литейщиков России. Т. 1. С. 3–11.
3. Kovalyova T., Eremin E., Arinova S., Medvedeva I., Dostayeva A. Enhancing surface roughness of castings when sand-resin mold casting // *Metallurgija*. 2017. T. 56. № 1-2. С. 135–138.
4. Немчинова Н.В., Тютрин А.А. Металлографическое исследование образцов алюминиевых рондолой // *Фундаментальные исследования*. 2015. № 3. С. 124–128.
5. Ромашкин А.Н., Дуб В.С., Иванов И.А., Марков С.И., Мальгинов А.Н., Толстых Д.С. Разработка сквозного технологического процесса производства заготовок для машиностроения на основе компьютерного моделирования // *Металлург*. 2014. № 9. С. 109–117.
6. Широких Э.В., Перфилова В.Ю. Совершенствование литниковых систем с помощью компьютерного моделирования литейного процесса // *Вестник Московского государственного областного социально-гуманитарного института*. 2015. № 20 (4). С. 65–69.
7. Кучуков Р.А. Модернизация экономики: проблемы и задачи // *Экономист*. 2008. № 9. С. 3–27.
8. Губанов С.С. Неоиндустриализация плюс вертикальная интеграция (о формуле развития России) // *Экономист*. 2009. № 11. С. 3–17.

9. Приходько Э.В., Тогобицкая Д.Н. Базы физико-химических и технологических данных для создания информационных технологий в металлургии // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1999. №3. С. 17–21.
10. Спирин Н.А., Лавров В.В. Информационные технологии в металлургии. Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2004. 495 с.
11. Коптев А.В. Уравнения Навье – Стокса. От теории к решению практических задач // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2016. № 7-4 (49). С. 86–89. DOI: <https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.49.141>
12. ProCAST // ESI Group (France) [Электронный ресурс]. URL: www.esi-group.com (26.10/2018).
13. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. М.: Горячая линия-Телеком, 2009. 608 с.
14. Монастырский, А.В. О современных методах разработки и оптимизации технологических процессов в литейном производстве // *Литейное производство*. 2010. № 5. С. 19–22.
15. Warming R.F., Hyett B.J. The modified equation approach to the stability and accuracy analysis of finite-difference method // *J. Comp. Phys*. 1974. V. 14. P. 159–179.
16. Турищев В. Моделирование литейных процессов: что выбрать? // *CADmaster*, 2005. № 2 (27). С. 33–35.
17. Белов В.Д. О литейном производстве в машиностроительной отрасли России и роль литейных кафедр в его развитии // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. 2013. № 4. С.20-23.

References

1. Tkachenko S.S., Evseev V.I. *Sostoyanie i perspektivy razvitiya liteinogo proizvodstva v stankostroitel'noi otrasli promyshlennosti Rossii* [State and development prospects of foundry production in Russian machine-tool industry]. *Liteinyi konsilium on-lain* [Online foundry council]. Available at: <https://litkons.com/info/innovations/sostoyanie-i-perspektivy/> (accessed 26 October 2018).
2. Dibrov I.A. State and development prospects of foundry production in Russia. *Trudy VIII s'ezda liteishchikov Rossii* [Proceedings of the VIII Congress of Russian foundry workers]. Vol. 1. pp. 3–11. (In Russian)
3. Kovalyova T., Eremin E., Arinova S., Medvedeva I.,

- Dostayeva A. Increasing surface roughness of castings under sand casting. *Metallurgija* [Metallurgy]. 2017. Vol. 56. No. 1-2, pp. 135–138. (in Russian)
4. Nemchinova N.V., Tyutrin A.A. Metallographic investigation of aluminum rondol samples. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research]. 2015, no 3, pp. 124–128.
5. Romashkin A.N., Dub V.S., Ivanov I.A., Markov S.I., Mal'ginov A.N., Tolstykh D.S. Development of an end-to-end technological process for blank production for mechanical engineering based on computer modeling. *Metallurg* [Metallurgist]. 2014. no 9. pp. 109–117.
6. Shirokikh E.V., Perfilova V.Yu. Improving pouring



gate systems via casting process computer modeling. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo sotsial'no-gumanitarnogo instituta* [Bulletin of the Moscow Region State University]. 2015. no 20 (4). pp. 65–69. (in Russian)

7. Kuchukov R.A. Modernization of economy: problems and challenges // *Ekonomist* [The Economist]. 2008, no 9, pp. 3–27. (in Russian)

8. Gubanov S.S. Neoindustrialization plus vertical integration (on the formula of Russia's development). *Ekonomist* [The Economist]. 2009, no 11, pp. 3–17. (in Russian)

9. Prikhod'ko E.V., Togobitskaya D.N. *Bazy fiziko-khimicheskikh i tekhnologicheskikh dannykh dlya sozdaniya informatsionnykh tekhnologii v metallurgii* [Databases of physico-chemical and technological data to create information technologies in metallurgy]// *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and mining industry]. 1999. no 3. pp. 17–21. (in Russ.)

10. Spirin N.A., Lavrov V.V. *Informatsionnye tekhnologii v metallurgii* [Information technologies in metallurgy]. Ekaterinburg: UGTU–UPI Publ., 2004. 495 p.

11. Koptev A.V. The Navier – Stokes equations. From theory forward to solution of practical problems // *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal* [International Research Journal]. 2016, no 7-4 (49),

pp. 86–89. (in Russ.)

12. ProCAST. ESI Group (France). Available at: www.esi-group.com (accessed 26 October 2018).

13. Denisenko V.V. *Komp'yuternoe upravlenie tekhnologicheskimi protsessami, eksperimentom, oborudovaniem* [Computer control of technological interaction, experiment, equipment]. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2009. 608 p.

14. Monastyrskii A.V. *O sovremennykh metodakh razrabotki i optimizatsii tekhnologicheskikh protsessov v liteinom proizvodstve* [On modern development and optimization methods of technological processes in the foundry industry]. *Liteinoe proizvodstvo* [Foundry]. 2010. no 5. pp. 19–22.

15. Warming R.F., Hyett B.J. The modified equation approach to the stability and accuracy analysis of finite-difference method. *J. Comp. Phys.* 1974, Vol. 14, pp. 159–179.

16. Turishchev V. *Modelirovanie liteinykh protsessov: chto vybrat'?* [Modeling of casting processes: what to choose?] *CADmaster*, № 2(27), 2005, pp. 33–35

17. Belov V.D. About foundry production in the Russian machine building industry and the function of departments of casting in its development. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [Science-intensive technologies in mechanical engineering]. 2013, no 4, pp. 20–23.

Критерии авторства

Никаноров А.В. имеет на статью авторские права и несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Nikanorov A.V. have author's rights and bear 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.



ФОРМИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ТОПОЛОГИИ ИНФРАСТРУКТУРНОЙ СЕТИ АГЛОМЕРАЦИИ НА ОСНОВЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РЕЛЬСОВОГО И КОЛЕСНОГО ТРАНСПОРТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНСТРУМЕНТАРИЯ ДИСКРЕТНОЙ МАТЕМАТИКИ И ТЕОРИИ ГРАФОВ

© И.Н. Макаров¹

Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Липецкий филиал, 398600, Российская Федерация, г. Липецк, ул. Интернациональная, 12б.

РЕЗЮМЕ: Работа посвящена анализу возможностей развития транспортных систем крупных городов и городских агломераций. Основное внимание уделяется инструментарию формирования оптимальной топологии транспортной сети агломерации. В работе сформулирована последовательность формирования графа транспортной сети крупного города, функционирующей на основе взаимодействия рельсового транспорта, скоростных городских автомобильных магистралей и традиционного общественного транспорта. Цель работы – разработка теоретических основ формирования оптимального графа транспортной сети города в условиях высокого уровня автомобилизации, функционирующей на основе взаимодействия рельсового и колесного транспорта. Использовались следующие методы научного анализа: диалектический, сравнительный экономический и статистический, системный, системно-функциональный и историко-генетический анализа, экономико-математическое моделирование, теории управления организационно-экономическими системами и метод научной абстракции. Комплексное их применение позволило обеспечить достоверность проведенного исследования. Сформулирован алгоритм формирования графа транспортной сети агломерации. Разработаны, раскрыты и обоснованы критерии квазиоптимального графа городской транспортной системы. Показана необходимость многоуровневых структур в интегральной топологии транспортной системы и их роли в формировании комплексной эффективности функционирования транспортной системы крупного города. Автором сформулированы, обоснованы и раскрыты особенности формирования транспортных кластеров агломерации и установления связей между ними. Особенностью современного этапа развития транспортных систем городов и агломераций является тенденция существенного превышения потока заявок на коммуникации (как со стороны автомобилистов, так и со стороны пользователей общественного транспорта) над пропускной способностью системы, что обуславливает необходимость кардинального решения, заключающегося в трансформации топологии транспортной сети города и построение ее оптимального графа, формируемого с учетом имеющегося и перспективного взаимодействия колесного, рельсового и иного возможного транспорта. При этом формирование центров тяжести мест в сочетании с имеющейся застройкой и наличествующей инфраструктурой будет формировать систему транспортных кластеров агломерации. Таким образом, формирование эффективного многоуровневого графа транспортной сети агломерации необходимо с точки зрения обеспечения оптимальности всего агломерационного развития.

Ключевые слова: городская транспортная система, агломерация, сеть, дорога, транспорт, территория

Информация о статье: Дата поступления 07 сентября 2018 г.; дата принятия к печати 30 октября 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 ноября 2018 г.

Для цитирования: Макаров И.Н. Формирование оптимальной топологии инфраструктурной сети агломерации на основе взаимодействия рельсового и колесного транспорта с использованием инструментария дискретной математики и теории графов. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(11):219–230. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-219-230.

¹Макаров Иван Николаевич, кандидат экономических наук, доцент кафедры «Экономика, менеджмент и маркетинг», e-mail: excellenzz@mail.ru
Ivan N. Makarov, Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor of the Department of Economics, Management and Marketing, e-mail: excellenzz@mail.ru



FORMATION OF AGGLOMERATION INFRASTRUCTURE NETWORK OPTIMAL TOPOLOGY BASED ON RAIL AND WHEELED TRANSPORT INTERACTION USING DISCRETE MATHEMATICS AND GRAPH THEORY TOOLS

Ivan N. Makarov

Finance University under the Government of the Russian Federation, Lipetsk branch,
12b, Internatsionalnaya St., Lipetsk 398600, Russian Federation

ABSTRACT: The given work deals with the analysis of the development possibilities of transport systems of large cities and urban agglomerations. It focuses on the tools for forming an optimal topology of the agglomeration transport network. The paper formulates the formation sequence of the graph of the large city transport network that operates on the basis of rail transport, high-speed urban highways and traditional public transport interaction. The purpose of this work is to develop the theoretical foundations for the formation of the optimal graph of the city transport network under high motorization conditions, whereas the urban network operation is based on rail and wheeled transport interaction. The following methods of scientific analysis are used: dialectical, comparative economic and statistical, system, system-functional and historical-genetic analysis, economic and mathematical modeling, management theories of organizational and economic systems and the method of scientific abstraction. Complex application of these methods allowed to ensure the reliability of the conducted research. The paper formulates an algorithm for forming the graph of the agglomeration transport network. The criteria of the quasi-optimal graph of the urban transport system are developed, specified and justified. The need for multilevel structures in the integrated topology of the transport system and their role in the formation of the integrated efficiency of large city transport system operation is shown. The author formulates, substantiated and described the formation features of agglomeration transport clusters and determination of their relationships. The feature of the current development stage of transport systems of cities and agglomerations is the tendency of a significant excess of the application flow for communications (both from motorists and users of public transport) over the capacity of the system. This determines the need for a comprehensive solution, which consists in the transformation of the city transport network topology and the construction of its optimal graph formed taking into account the existing and future interaction of wheel, rail and other possible kinds of transport. In this case, the formation of the centers of gravity of places together with the existing real estate development and the existing infrastructure will form a system of transport clusters of agglomeration. Thus, the formation of an effective multi-level graph of the agglomeration transport network is necessary in terms of ensuring the optimality of the entire agglomeration development.

Keywords: urban transport system, agglomeration, network, road, transport, area

Information about the article: Received September 07, 2018; accepted for publication 30 October, 2018 2018; available online 30 November, 2018.

For citation: Makarov I.N. Formation of agglomeration infrastructure network optimal topology based on rail and wheeled transport interaction using discrete mathematics and graph theory tools. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(11):pp.219–230. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-219-230.

Введение

В настоящее время вследствие высоких темпов автомобилизации населения и истерпанности свободных площадей для экстенсивного расширения транспортных артерий в городах и, в особенности, в городских агломерациях, наличествует крайне актуальная необходимость поиска новых решений развития городской транспортной системы (ГТС).

В качестве наиболее вероятных вариантов развития ГТС большинством специалистов предполагается внедрение рельсовых видов транспорта, обладающего собственным транспортным простран-

ством, включая использование железнодорожного транспорта, развитие скоростных трамваев и, возможно, внедрение городских платных автомобильных магистралей.

Однако, реализация всех вышеперечисленных мероприятий, прежде всего требует оптимизации топологии ГТС, что, в свою очередь, предполагает необходимость формализации и решения задачи оптимального размещения с учетом взаимодействия различных видов (колесного и рельсового, а в перспективе, возможно, электромагнитного), транспорта.

Задача оптимального размещения,



сформулированная и анализируемая в работах И.Г. фон Тюнена, В. Лаунхарта, В. Кристаллера, А. Вебера по своей сути является тройственной задачей:

1. Задачей оптимального размещения производства;
2. Задачей оптимального размещения потребления относительно производительных сил;

3. Задачей оптимального распределения транспортных услуг – или, в конечном счете, оптимального размещения транспортных инфраструктурных услуг.

Это является отправной точкой в решении задачи формирования оптимальной топологии инфраструктурной сети крупного города или городской агломерации.

Анализ современного состояния транспортной сети типичного крупного города

Опираясь на выводы предыдущих исследователей относительно функционирования транспортных систем городов в современных условиях, мы предполагаем в ближайшем будущем необходимость значимых эволюционных трансформаций транспортных систем крупных городов как единственной возможности избежать транспортного коллапса* [1–22].

Необходимость разработки столь кардинальных мер как изменение пространственной структуры транспортной сети города и формирование ее оптимального графа, учитывающего взаимодействие колесного и рельсового транспорта обусловлено следующим фактором – в процессе своего функционирования ГТС фактически выступает многоканальной системой массового обслуживания с неравномерной плотностью пока заявок, при этом, уже в настоящее время, поток заявок зачастую превышает пропускную способность системы, что графически отображено на рис. 1.

На диаграмме видно два пика нагрузки – утренний и вечерний, обуслов-

ленный необходимостью перемещения населения с мест постоянного проживания на рабочие места и учебу утром, и в обратном направлении вечером. При этом вечерний пик нагрузки на транспортную систему, как правило, более длителен, поскольку обусловлен стремлением значительной части населения посетить после работы места торговли и развлечений.

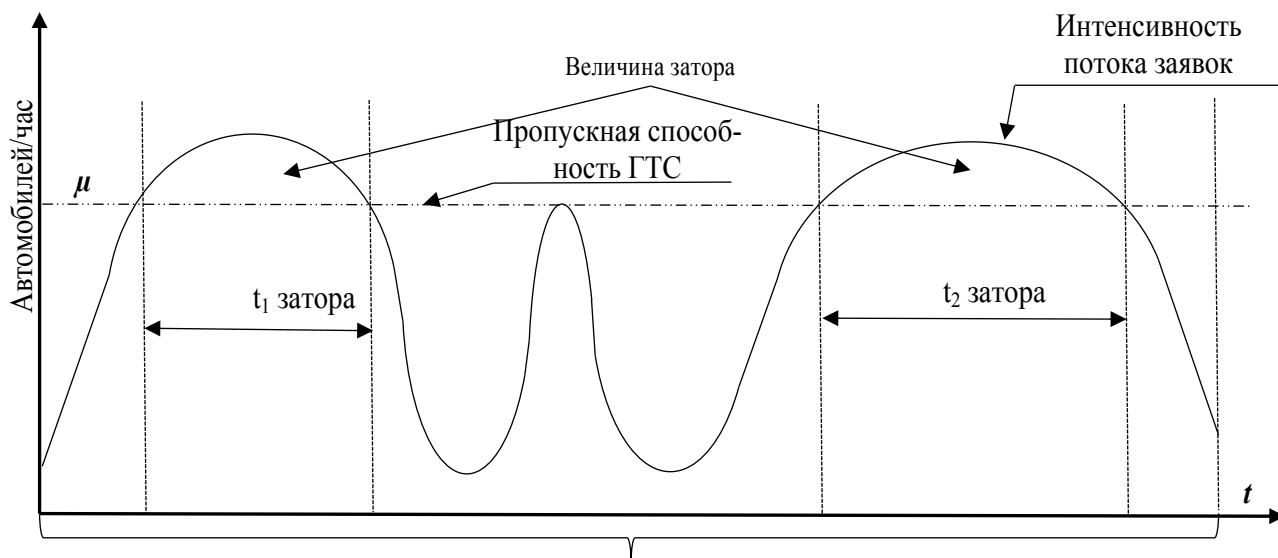
Здесь (рис. 1) также имеет место всплеск в середине рабочего дня, связанный с передвижением работников во время обеденного перерыва. Данный всплеск, как правило, не столь велик по сравнению с утренними и вечерними пиками, ибо лишь небольшая часть работников возвращается к месту своего постоянного проживания – как правило, поездки в данное время носят непродолжительный во времени и не дальний по расстоянию характер.

Аналогичная ситуация будет происходить и в узлах городской / агломерационной транспортной системы.

Представим графически суточный поток заявок на типичном загруженном перекрестке в крупном городе (рис. 2).

* Варламов В.С., Галабурда В.Г., Казанский Н.Н. Экономическая география транспорта: учебник для вузов / Под ред. Казанского Н.Н. М.: Транспорт, 1991. 280 с. / Varlamov V.S., Galaburda V.G., Kazanskiy N.N. The economic geography of transport: textbook for universities / under edition of Kazanskiy N.N. M.: Transport, 1991. 280 p.; Ковалева Н.А. Пространственно-технологическое развитие городских пассажирских транспортных систем: дисс. ... канд. техн. наук. 05.22.01. Ростов-н/Д, 2015. 150 с. / Kovaleva N.A. Spatial and technological development of urban passenger transport systems: Candidate's Dissertation in technical sciences. 05.22.01. Rostov-on-Don, 2015. 150 p.;

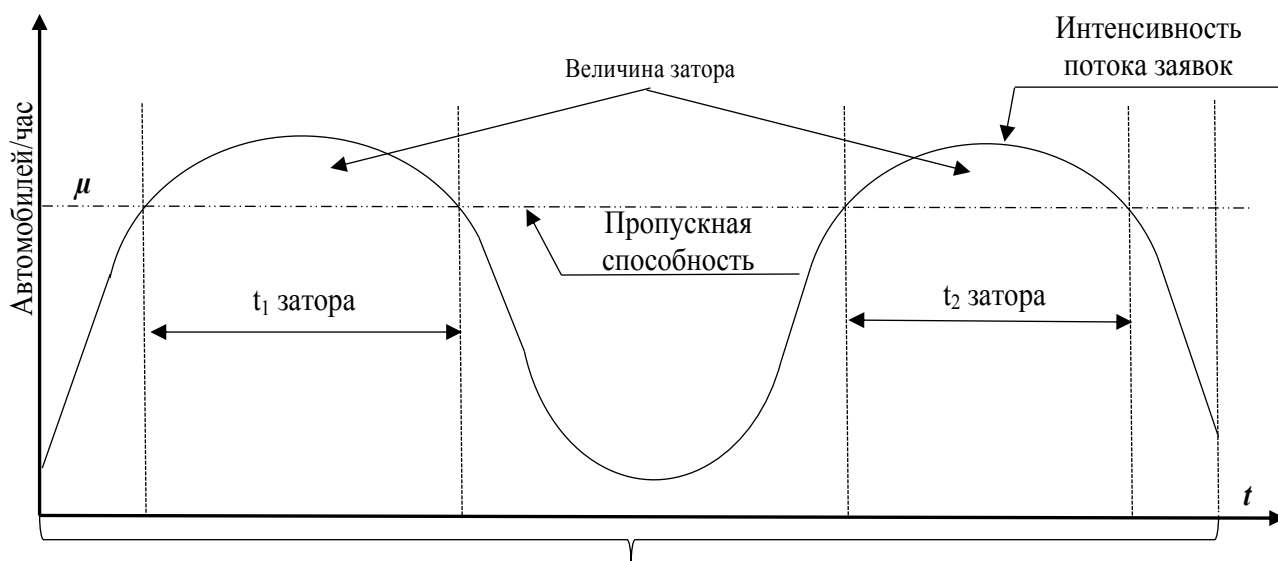
Пугачев И.Н. Теоретические принципы и методы повышения эффективности функционирования транспортных систем городов: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.22.01. Екатеринбург, 2010. 367 с. / Pugachev I.N. Theoretical principles and methods of improving operation efficiency of urban transport systems: Doctoral Dissertation in technical sciences. 05.22.01. Ekaterinburg, 2010. 367 p.;



Суточный цикл потока заявок в городской транспортной системе [0, 24]

Рис. 1. Диаграмма суточного цикла потока заявок усредненной городской транспортной системы (транспортной системы агломерации)

Fig. 1. Diagram of the daily cycle of the application flow of the average urban transport system (agglomeration transport system)



Суточный цикл потока заявок на перекрестке [0, 24]

Рис. 2. Диаграмма суточного цикла потока заявок на типичном перекрестке крупного города или агломерации

Fig. 2. Diagram of the daily cycle of the application flow at a typical intersection of a large city or agglomeration

На рис. 2 можно увидеть, что в условиях пиковой нагрузки на перекрестке как элементе ГТС формируется очередь из длительно необслуживаемых заявок – потока машин, не проехавших перекресток.

Если формируется очередь из такого количества автомобилей, которое не может проехать пересечение за один цикл работы светофора, будет происходить накопление автомобилей на перекрестке, приводящее к



формированию затора.

Если пиковые значения несущественно превышают пропускную способность участка сети и длятся непродолжительно, решение очевидно, можно найти путем реорганизации движения - соответственно, решением проблемы может стать внедрение интеллектуальной транспортной системы – то есть, системы, трансформирующей движение на перекрестке с информированием об этом водителей, в зависимости от интенсивности потока заявок. Данная система должна работать автоматически иначе теряется смысл ее внедрения. При этом интенсивность потока заявок и длина очереди должны определяться на основе датчиков и служить основой для принятия решения о смене режима функционирования системы и, соответственно, режима функционирования пересечения.

Аналогичная ситуация будет возникать и в результате использования рельсового транспорта при неоптимальной схеме капиллярных линий иного общественного транспорта.

Однако особенностью современного этапа развития является тенденция существенного превышения потока заявок на коммуникации (как со стороны автомобилистов, так и со стороны пользователей общественного транспорта) над пропускной способностью ГТС во многих городах центральной России. И здесь требуется уже иное решение, заключающееся в трансформации топологии транспортной сети города и построение ее оптимального графа, формируемого с учетом имеющегося и перспективного взаимодействия колесного, рельсового и иного возможного транспорта – то есть, фактически, решение задачи оптимального размещения.

Рассмотрим теоретические подходы, которые позволят нам добиться более высокой степени формализации и алгоритмизации выбора наиболее значимых проектов реконструкции транспортной сети города.

Мы предлагаем основы методики, состоящей из ряда следующих друг за другом этапов:

1. Ранжирование городских/агломерационных магистралей с присвоением им соответствующей категории – ранга. Ранжирование дорог, входящих в транспортную сеть города или городской агломерации, возможно и целесообразно проводить на основе децильных коэффициентов, поскольку они дают достаточно объективную картину значимости той или иной коммуникации.

2. Секторный анализ территории города / агломерации – разделение площади города / магистрали на транспортные районы (ячейки, кластеры) – секторы, выявление плотности расселения, основных параметров формирования транспортных потоков и особенностей процесса коммуникации между районами (ячейками) и построение транспортных кластеров, состоящих из совокупностей ячеек, учитывающих особенности реальной застройки, инфраструктуры и иных особенностей ландшафта.

3. Формирование квазиоптимального, с параметрами максимально возможно близкими к оптимальному графа транспортной сети города / агломерации – оптимальный граф в данном случае будет математической конструкцией, а квазиоптимальный – реальным решением, учитывающим особенности ландшафта города.

4. Формирование сети транспортных магистралей городского / агломерационного значения (автомобильного и рельсового транспорта).

5. Формирование сети общественного транспорта, традиционного для крупных городов и городских агломераций.

6. Формирование сети транспорта, нетрадиционного для городов и городских агломераций (например, железнодорожного) и новых видов транспорта (электромагнитного транспорта, тоннелей гиперпетли (Hyperloop) и иных).

При ранжировании дорог, согласно предложенной методике, по аналогии с анализом распределений в макроэкономике, предполагается использовать децильный коэффициент. В данном случае за базис можно взять интенсивность движения на самых загруженных магистралях города



или городской агломерации (можно взять несколько самых загруженных магистралей города, отличающихся по параметрам напряженности транспортного потока менее чем на 10% (поскольку речь идет о децильном коэффициенте)), а за минимум – интенсивность движения на наименее загруженных автомобильных дорогах городской агломерации или крупного города, фактический суточный поток автомобилей на которых составляет менее 1 автомобиля в час (и потому может быть принят за условный ноль).

Соответственно, разделив автомобильные дороги города / городской агломерации или города на 10 категорий в соответствии с параметрами интенсивности движения мы получим ранг значимости дороги в городе / агломерации.

Данная методика должна, тем не менее, предполагать, как минимум, одно исключение – если данная дорога является

безальтернативным вариантом для связи частей города, ей автоматически должен быть присвоен наивысший коэффициент значимости.

Указанный подход, с точки зрения инженерной логики и практического опыта транспортной планировки городов, предполагает, что при выборе наиболее значимых магистралей должны учитываться:

1. Магистрали с высоким уровнем интенсивности транспортного потока ((интенсивность движения (автомобилей в час, автомобилей на метр ширины магистрали за определенные периоды времени))

2. Наибольшая продолжительность «пробок» – соотношение времени затрудненного движения к 24-часовому суточному циклу и недельному циклу

3. Протяженность сети магистрали как доля общей протяженности сетей автомобильных дорог транспортной системы города.

Теоретическая модель формирования оптимального графа городской транспортной системы

Далее, сосредоточимся на проблематике разработки алгоритм-модели формирования оптимального графа городской транспортной системы.

При формировании системы скоростных сквозных автомобильных магистралей или путей рельсового транспорта возникает следующая проблема – ограниченность количества данных, касающихся возможного поведения пассажиров, ограниченность земельных ресурсов и ограниченность финансовых ресурсов. Это предполагает необходимость решения задачи многомерной оптимизации.

Для формулировки подобной задачи и осмысления теоретических подходов к ее решению построим транспортную кластерную модель города, функционирующую на основе взаимодействия индивидуального колесного (в данном случае – автомобильного), общественного колесного (автобус, троллейбус), обслуживающего капиллярные маршруты, и скоростного рельсового

транспорта (скоростной трамвай, легкое метро), представленную ниже в графическом виде (рис. 3).

Для построения данной модели, необходимо разделить все пространство агломерации на транспортные районы (ячейки) (чтобы можно было задать параметры-координаты каждой коммуникации, каждой точки внутри агломерации, а также иметь возможность определения центра тяжести каждого транспортного кластера) и использовать анализ по следующим критериям:

1. Наименьшего времени доставки пассажира (затрат времени пассажира при использовании маршрута по определенной коммуникации);

2. Наименьшего значения затрат индивидуума – пассажира или водителя индивидуального транспортного средства, перемещающегося по транспортной сети города/агломерации;

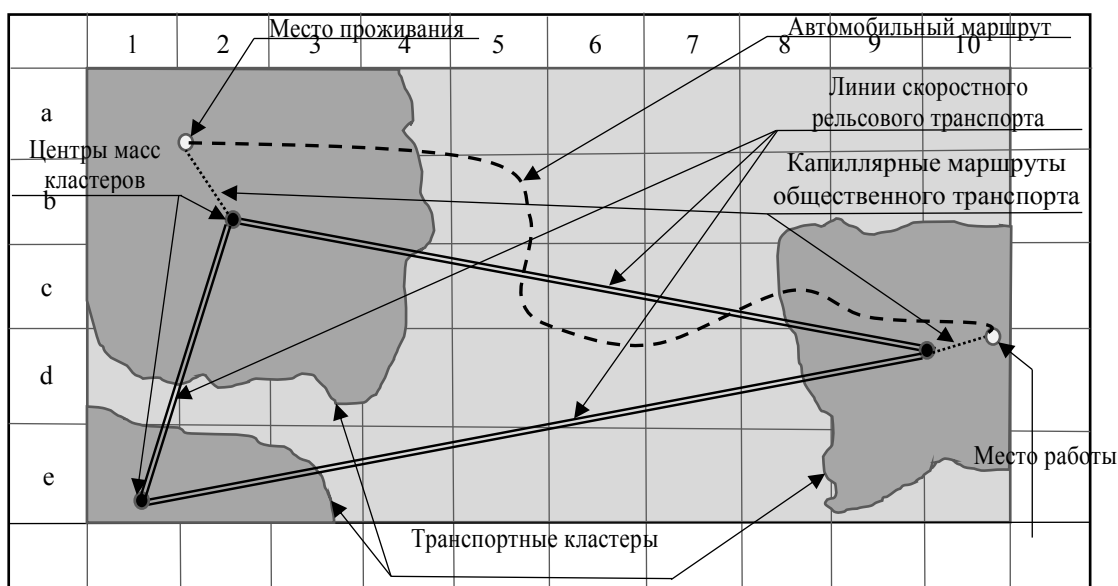


Рис. 3. Кластерная транспортная модель (части) крупного города / агломерации
Fig. 3. Cluster transport model (of a part) of a large city / urban agglomeration

3. Наименьшего значения совокупных затрат (пассажиров, перевозчиков, муниципалитетов), включая затраты, обусловленные экологическим вредом транспорта.

Критерием формирования границ транспортного кластера – транспортного района более высокого уровня - совокупности тесно объединённых транспортных районов более низкого уровня (ячеек) произвольной формы – будет минимальное расстояние всех капиллярных дорог до транспортной точки (остановки транспорта, въезда на магистраль) определённого уровня, чем до любой иной аналогичной точки этого же уровня.

В идеальном варианте форма транспортного кластера будет иметь форму правильного шестиугольника, а все пространство города будет покрыто сетью данных шестиугольников, однако неоднородности городской застройки, иная изотропность городского пространства будут существенно искажать его форму.

Кроме того, при формировании транспортных кластеров и транспортных сетей любого порядка необходимо учитывать наличие естественных (например, ре-

ка, лес, парковая зона) или искусственных (крупные общественно-значимые объекты) препятствий, разграничивающих кластеры.

Соответственно, формируются следующие критерии кластеризации:

1. Расстояние между двумя любыми соседними точками кластера существенно меньше, чем с любой ближайшей точкой соседнего кластера.

2. Изотропность пространства внутри кластера более высока по сравнению с окружающим пространством (мы предполагаем, что в пространстве почти любого реального города, обладающего значительной неоднородностью территории, наряду с кластерами, можно выделить межкластерное пространство – то есть пространство, где интенсивность любых транспортных существенно ниже, чем в кластерах – по аналогии с галактиками, представляющими собой звездные кластеры, и межгалактическим пространством).

3. Возможна коммуникация между любыми двумя точками внутри кластера.

Одним из условий формирования оптимального графа сети скоростного транспорта является условие соединения центров масс транспортных кластеров – в



этом случае величины (общая длина) капиллярных маршрутов должны быть минимальными.

Математически данные условия должны выглядеть следующим образом: сумма любых ребер графа сети (с учетом коэффициентов предпочтения) по каждой конкретной коммуникации должна быть не более суммы ребер квазиоптимального графа сети, с учетом потребительских предпочтений – формирование истинно оптимального графа транспортной сети города представляется крайне трудной на практике почти нерешаемой задачей вследствие наличия множественных ограничений, связанных с характером застройки, особенностями ландшафта и иными неоднородностями городского пространства.

Основные коммуникации города/агломерации должны соединять центры тяжести основных зон расселения/проживания, торговли, производства, мест проведения досуга.

Определение оптимального местоположения критических точек транспортной сети – транспортных узлов, станций, мест пересадки пассажиров, перехватывающих стоянок, следует проводить с применением методики выявления центра масс плоской фигуры (для районов с примерно однородной застройкой) и центра масс фигур (тел) переменной плотности (для районов с неоднородной застройкой, а также районов концентрации рабочих мест агломерации).

При этом возникает вопрос – если зона (под которой подразумевается транспортный район – кластер или ячейка – в зависимости от уровня рассмотрения), в границах которой определяется центр тяжести, имеет сложную форму и/или значительную площадь, либо протяженность, как можно определить не только центр ее тяжести, но сформировать сеть оптимальных капиллярных маршрутов. Подходом к решению может быть следующее:

1. Расчет центров тяжести транс-

портных районов (ячеек, кластеров) в соответствии с административным делением города (микрорайоны), либо характером имеющейся застройки.

2. Нахождение центра масс фигуры исходя из:

- критерия непересечения транспортных потоков;

- предельных расстояний перемещения – расстояние между остановками капиллярного транспорта не должно превышать 300–500 м (в зависимости от климатической зоны, согласно^{**}), а общее количество остановок маршрута капиллярного транспорта от границ обслуживаемого пространства до «центра тяжести» должно быть минимальным.

Соответственно, мы можем установить «зоны притяжения» основных транспортных узлов города. Вокруг них, в свою очередь, формируются вторичные и третичные узлы транспортной сети. При этом необходимо исходить из имеющейся застройки и основных тенденций развития агломерации.

«Центры тяжести» транспортных кластеров, как и их границы, должны определяться не только по текущему состоянию агломерации, но и на перспективу. При этом также необходимо учитывать преимущественно реверсивный характер основных транспортных потоков, а также наличие всплесков в транспортной системе в межпиковые интервалы.

При формировании структуры транспортной сети агломерации необходимо учесть следующее:

1. Основу транспортной сети первого, наиболее важного уровня должен формировать граф сети скоростного рельсового транспорта, связывающего центры масс (центры транспортного притяжения) населенных пунктов, входящих в состав агломерации, и основные районы крупного города – центра агломерации. При этом, скорость передвижения рельсового транспор-

^{**} Шафиркин Б.И. Единая транспортная сеть и взаимодействие различных видов транспорта: учебник для вузов. М.: Высш. школа, 1977. 240 с. / Shafirkin B.I. Unified transport network and interaction of different types of transport: a textbook for universities. M.: Vysshaya Shkola, 1977. 240 p.



та может быть существенно выше разрешенных^{***} и действующими правилами дорожного движения (ПДД) параметров.

2. Движение по скоростным радиальным (возможно – платным) магистралям, формирующим граф сети второго уровня города и агломерации, должно осуществляться с использованием особого скоростного режима, позволяющего осуществлять движение значительно быстрее разрешенных нынешним ПДД скоростей (что потребует принятия соответствующих поправок в ПДД), при этом на данных магистралях не должно допускаться наличие одноуровневых пересечений с автомобильными дорогами и иными элементами транспортного пространства города, по которому осуществляется движение любых транспортных средств или пешеходов.

3. Другие транспортные сети и маршрутная сеть иного общественного транспорта формируют граф сети третьего и иных более низких уровней.

Расчет оптимизации сети должен вестись на основе критерия транспортной доступности, выраженного в категории времени, необходимого для осуществления поездки – критерия минимума временных затрат жителя / гостя агломерации. Для этого следует осуществить внедрение коэффициента предпочтения - k , обусловленного предпочтением индивида воспользоваться собственным автомобильным транспортом, а не общественным. По нашему мнению, данный критерий может быть выражен в качестве отношения предпочтения:

$$\left\{ \begin{array}{l} t_{avt} \geq t_{st} \Rightarrow AVT \succ \\ t_{avt} \geq k t_{st} \Rightarrow AVT \sim ST \\ (t_{avt} \geq x k t_{st}) \cup (x > 1) \Rightarrow AVT \prec \end{array} \right.$$

где t_{st} – время поездки на общественном транспорте; t_{avt} – время поездки на автомо-

биле; ST – набор услуг, предоставляемый общественным транспортом; AVT – набор услуг, предоставляемый автомобилем; k – коэффициент предпочтения потребителя, отображающий стремление к пользованию собственным автомобилем в городах и городских агломерациях; x – некое положительное число, больше единицы.

Данный критерий численно может выражаться в такой прибавке времени движения в собственном автомобиле, при которых отношение предпочтения автомобиля общественному транспорту сменится на отношение их эквивалентности.

В результате должна получиться система зависимостей и ограничений, которую следует решать в качестве совместного уравнения с рядом нижеследующих критериев:

1. Критерием минимума ребер графа транспортной сети;

2. Критерием минимизации стоимости земли под каждой новой магистралью и сетью ГТС в целом;

3. Наличием окружной дороги и системой радиальных трасс колесного транспорта, а также линий скоростного рельсового транспорта;

4. Ограниченное количество радиальных трасс колесного транспорта, а также линий скоростного рельсового транспорта;

5. Взаимодействие с рельсовым транспортом – пригородным железнодорожным и трамвайным и скоростным трамваем внутри агломерации.

6. Параметров осуществимости (правомерности осуществимости) трансформаций графа транспортной сети ГТС, выражаемых с помощью булевых функций: при формировании графа транспортной системы возможность прокладки каждой магистрали, представляющей собой граф транспортного потока определенной коммуникации транспортных ячеек определен-

^{***} СНиП 2.07.01-89 Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Утв.: 28.12.2010. Введ. 20.05.2011. М.: Росстандарт, 2011. / SNiP 2.07.01-89 Town planning. Planning and development of urban and rural settlements. Approved: 28 December 2010. Introduced 20 May 2011. Moscow: Rosstandart, 2011.



ного уровня необходимо задать при помощи булевых функций, принимающих определенные значения (0 или 1) в зависимости

от возможности воплощения данного варианта.

Заключение

На основании проведенного исследования мы можем резюмировать следующее:

1. Особенностью современного этапа развития транспортных систем городов и агломераций является тенденция существенного превышения потока заявок на коммуникации (как со стороны автомобилистов, так и со стороны пользователей общественного транспорта) над пропускной способностью ГТС.

2. Соответственно, необходимо кардинальное решение, заключающееся в трансформации топологии транспортной сети города и построение ее оптимального графа, формируемого с учетом имеющегося и перспективного взаимодействия колесного, рельсового и иного возможного транспорта. Данное решение предполагает следующие основные альтернативы для типичного жителя города:

А. Вариант – движение на автомобиле с последующей пересадкой и продолжении движения на городском общественном

транспорте с использованием скоростного рельсового транспорта:

Б. Вариант – движение на автомобиле по обычной городской дороге и по агломерационной магистрали (возможно – платной) с последующим возвратом на обычные городские дороги.

3. Формирование центров тяжести мест в сочетании с имеющейся застройкой и наличествующей инфраструктурой будет формировать систему транспортных кластеров агломерации.

4. Вторичные центры тяжести сопряженных кластеров определенного, в частности, вторичного и третичного уровня, должны иметь возможность осуществления коммуникации без выхода на участки сети более высокого или более низкого уровня.

Таким образом, формирование эффективного многоуровневого графа транспортной сети агломерации необходимо с точки зрения обеспечения оптимальности всего агломерационного развития.

Библиографический список

1. Ershova S., Smirnov E. Conceptual Justification of Town-Planning Design Standards for Streets and Roads in Large Cities for Ensuring Traffic Safety // Transportation Research Procedia. 2017. № 20. P. 180–184.
2. Karpova G., Julmukhamedova G. Models for Estimating Human Capital Losses Due to Traffic-Related Deaths // Transportation Research Procedia. 2017. № 20. P. 267–271.
3. Kerimov M., Safiullin R., Marusin A., Marusin A. Evaluation of Functional Efficiency of Automated Traffic Enforcement Systems // Transportation Research Procedia. 2017. № 20. P. 288–294.
4. Kvitko A., Karpov B., Petukhov P., Ushakov A. Criteria for Substantiation of Rational Pavement Design as Bases of Traffic Safety throughout Life Cycle of Transport Structures // Transportation Research Procedia. 2017. № 20. P. 384–392.
5. Lukinskiy V., Pletneva N., Gorshkov V., Druzhinin P.

- Application of the Logistics “Just in Time” Concept to Improve the Road Safety // Transportation Research Procedia. 2017. № 20. P. 418–424.
6. Makarov I., Plotnikov V. Public-private partnership as a financial instrument for the transport infrastructure modernizing // MATEC Web of Conferences. 2018. P. 05012.
7. Акофф Р.Л. Планирование в больших экономических системах. М.: Советское радио, 1972. 224 с.
8. Андреев К.П. Совершенствование городской маршрутной сети // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 3. С. 102–106.
9. Баркалов С.А., Бакунец О.Н., Гуреева И.В., Колпачев В.Н., Руссман И.Б. Оптимизационные модели распределения инвестиций на предприятии по видам деятельности. М.: ИПУ РАН, 2002. 68 с.
10. Ванько В.И., Ермошина О.В., Кувыркин Г.Н. Вариационное исчисление и оптимальное управление / Под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. 3-е изд.



исправл. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 488 с.

11. Дунаев О.Н. Проблемы управления транспортом в регионе в условиях перехода к рынку. М.: ГАУ, 1991. 219 с.

12. Мамаев Э.А., Ковалева Н.А. Железнодорожный транспорт в системе развития городского и пассажирского транспорта на примере г. Ростова-на-Дону // Вестник Ростовского государственного экономического университета (РИНХ). 2013. № 4 (44). С. 53–59.

13. Мамаев Э.А., Ковалева Н.А. К оценке потерь экономики от неэффективности организации движения в транспортной сети // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС). 2014. № 2 (54). С. 64–69.

14. Ковалева Н.А., Мамаев Э.А. Формирование скоростных маршрутов в городской транспортной системе [Электронный ресурс] // Инженерный вестник

Дона. 2015. № 3. Режим доступа:

<http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3225> (14.05.2018)

15. Липидус Б.М., Мачерет Д.А. Макроэкономическая роль железнодорожного транспорта: Теоретические основы, исторические тенденции и взгляд в будущее. М.: КРАСАНД, 2014. 234 с.

16. Леонтьев Р.Г. Формирование единой региональной транспортной системы: Программно-целевой подход. М.: Наука, 1987. 152 с.

17. Лившиц В.Н. Системный анализ экономических процессов на транспорте. М.: Транспорт, 1986. 240 с.

18. Литвиненко Р.С., Павлов П.П., Аухадеев А.Э. Оценка влияния надежности элементов наземного городского транспорта на его пропускную способность // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 2. С. 95–103.

References

1. Ershova S., Smirnov E. Conceptual Justification of Town-Planning Design Standards for Streets and Roads in Large Cities for Ensuring Traffic Safety. Transportation Research Procedia, 2017, no. 20, pp. 180–184.

2. Karpova G., Julmukhamedova G. Models for Estimating Human Capital Losses Due to Traffic-Related Deaths. Transportation Research Procedia. 2017, no. 20, pp. 267–271.

3. Kerimov M., Safiullin R., Marusin A., Marusin A. Evaluation of Functional Efficiency of Automated Traffic Enforcement Systems. Transportation Research Procedia. 2017, no. 20, pp. 288–294.

4. Kvitko A., Karpov B., Petukhov P., Ushakov A. Criteria for Substantiation of Rational Pavement Design as Bases of Traffic Safety throughout Life Cycle of Transport Structures. Transportation Research Procedia. 2017, no. 20, pp. 384–392.

5. Lukinskiy V., Pletneva N., Gorshkov V., Druzhinin P. Application of the Logistics “Just in Time” Concept to Improve the Road Safety. Transportation Research Procedia. 2017, no. 20, pp. 418–424.

6. Makarov I., Plotnikov V. Public-private partnership as a financial instrument for the transport infrastructure modernizing. MATEC Web of Conferences. 2018, p. 05012.

7. Akoff R.L. *Planirovanie v bol'shikh ekonomicheskikh sistemakh* [Planning in large economic systems]. Moscow: Sovetskoe radio Publ., 1972, 224 p. (In Russian)

8. Andreev K.P. Improving urban route network. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and Quality of Complex Systems.]. 2017, no. 3 (19), pp. 102–106.

9. Barkalov S.A., Bakunets O.N., Gureeva I.V., Korpachev V.N., Russman I.B. *Optimizatsionnye modeli raspredeleniya investitsii na predpriyatii po vidam deyatel'nosti* [Optimization models of investment distri-

bution at an enterprise by types of activities]. Moscow: IPU RAN Publ., 2002. 68 p.

10. Van'ko V.I., Ermoshina O.V., Kuvyrkin G.N. *Variatsionnoe ischislenie i optimal'noe upravlenie* [Variational calculation and optimal control]. Moscow: MG TU named after N.E. Bauman Publ., 2006. 488 p. (In Russian)

11. Dunaev O.N. *Problemy upravleniya transportom v regione v usloviyakh perekhoda k rynku* [Problems of transport management in the region under conditions of transition to the market]. Moscow: GAU Publ., 1991. 219 p.

12. Mamaev E.A., Kovaleva N.A. Railway transport in the development system of urban and passenger transport on example of Rostov-on-Don. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta (RINH)* [Vestnik of Rostov state university of economics]. 2013, no. 4 (44), pp. 53–59.

13. Mamaev E.A., Kovaleva N.A. On the assessment of economic loss from inefficient organization of traffic in a transport network. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya (RGUPS)* [Bulletin of the Rostov State Transport University]. 2014. no. 2 (54). pp. 64–69.

14. Kovaleva N.A., Mamaev E.A. Formation of high-speed routes in the urban transport system. *Inzhenernyi vestnik Dona* [Engineering Journal of Don] On-line journal. 2015, no. 3. Available at:

<http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3225> (accessed 14 May 2018)

15. Lapidus B.M., Macheret D.A. Makroekonomicheskaya rol' zheleznodorozhnogo transporta: Teoreticheskie osnovy, istoricheskie tendentsii i vzglyad v budushchee [Macroeconomic role of rail transport: Theoretical foundations, historical trends and a look into the future]. Moscow: KRASAND Publ., 2014. 234 p.

16. Leont'ev R.G. Formirovanie edinoi regional'noi



transportnoi sistemy: Programmno-tselevoi podkhod [Formation of a unified regional transport system: a program and target approach]. M.: Nauka, 1987. 152 p.
17. Livshits V.N. Sistemnyi analiz ekonomicheskikh protsessov na transporte [System Analysis of Economic Processes on Transport]. M.: Transport, 1986. 240 p.

Критерии авторства

Макаров И.Н. самостоятельно подготовил рукопись статьи, разработал предложения по повышению эффективности использования транспортного пространства городов и городских агломераций, сформулировал критерии, на базе которых возможно определить эффективность использования транспортного пространства города. Автор несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

18. Litvinenko R.S., Pavlov P.P., Aukhadeev A.E. Evaluation of effect reliability influence on crossing capacity of ground city electric transport. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and Quality of Complex Systems] 2018. no. 2. P. 95–103.

Authorship criteria

Makarov I.N. has prepared the manuscript of the article, developed the proposals to improve the efficiency of using the transport space of cities and urban agglomerations, formulated the criteria on the basis of which it is possible to determine the efficiency of using the urban transport space. The author bears the responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

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



АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОЛЬЦЕВОГО ПЕРЕСЕЧЕНИЯ С ПЕШЕХОДНЫМИ ПЕРЕХОДАМИ

© Н.А. Никитин¹

Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта,
236016, Российская Федерация, г. Калининград, ул. А. Невского, 14.

РЕЗЮМЕ: В данной статье описано, каким образом пешеходные переходы влияют на пропускную способность кольцевых пересечений. В последние годы существует тенденция отдавать предпочтение кольцевым пересечениям вместо перекрестков со светофорным регулированием, так как кольцевое пересечение обладает значительными преимуществами, особенно в периоды времени между часами пик. Сбалансированность транспортных потоков оказывает существенное влияние на производительность кольцевого пересечения. В ходе проведения натурных обследований были зафиксированы заторовые ситуации, концентрация которых была особенно велика на въездах и на выездах наблюдаемого кольцевого пересечения. Сравнение эмпирических данных со значениями, приведёнными в нормативной документации по проектированию кольцевых пересечений, показало необходимость конструирования двухуровневой кольцевой развязки. Информация о корреспонденциях на исследуемом пересечении была обработана для дальнейшего её применения в имитационной модели. Для оценки транспортной ситуации и влияния на неё пешеходных потоков, была построена модель кольцевого пересечения. Основным параметром, по которому оценивалась эффективность работы данного участка улично-дорожной сети, было выбрано время задержки транспортных средств при проезде по пересечению. Моделирование проводилось по трём различным сценариям: кольцевое пересечение со светофорным регулированием и без него, а также при полном отсутствии пересекающихся пешеходных и транспортных потоков. Результаты компьютерного моделирования кольцевого пересечения подтвердили наличие больших задержек транспорта на данном участке улично-дорожной сети, которые были вызваны, в том числе, расположенными в непосредственной близости от въездов и выездов кольцевого пересечения пешеходных переходов.

Ключевые слова: кольцевое пересечение, транспортный поток, VISSIM, пропускная способность

Информация о статье: Дата поступления 08 сентября 2018 г.; дата принятия к печати 30 октября 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 ноября 2018 г.

Для цитирования: Никитин Н.А. Анализ эффективности кольцевого пересечения с пешеходными переходами. Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018;22(11):231–240. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-231-240.

EFFICIENCY ANALYSIS OF A ROUNDABOUT WITH PEDESTRIAN CROSSINGS

Nikolay A. Nikitin

Immanuel Kant Baltic Federal University,
14 A. Nevskiy St., Kaliningrad 236016, Russian Federation

ABSTRACT: This article describes the effect of pedestrian crossings on the roundabout capacity. Recently there is a tendency to use roundabouts instead of crossroads with traffic light regulation, since ring intersection has significant advantages, especially during the periods between rush hours. The balance of traffic flows has a significant impact on the performance of the roundabout. During the field surveys traffic jams were recorded. Their concentration was particularly high at the entrances and exits of the observed roundabout. Comparison of empirical data with the figures given in the regulatory documentation for the design of roundabouts, showed the need to design a two-level roundabout. Information on correspondences at the intersection was processed for further use in the simulation model. To assess the traffic situation and the impact of pedestrian flows on it, the roundabout model was constructed. The main parameter for assessing

¹Никитин Николай Андреевич, аспирант кафедры машиноведения и технических систем, e-mail: ninikitin@kantiana.ru

Nikolay A. Nikitin, Postgraduate of the Department of Machine Science and Engineering Systems, e-mail: ninikitin@kantiana.ru



the performance of this road network section was the delay time of vehicles when passing through the intersection. The simulation was carried out in three different scenarios: the roundabout with and without traffic lights as well as the complete absence of intersecting pedestrian and traffic flows. The results of roundabout's computer simulation confirmed the presence of big traffic delays on this section of the road network, which were caused, among other things, by the pedestrian crossings located in the close proximity to the roundabout's entrances and exits.

Keywords: roundabout, traffic flow, VISSIM, traffic capacity

Information about the article: Received September 08, 2018; accepted for publication 30 October, 2018; available online 30 November, 2018.

For citation: Nikitin N.A. Efficiency analysis of a roundabout with pedestrian crossings. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(11):pp. 231–240. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-231-240.

Введение

Пересечения играют важную роль в функционировании улично-дорожной сети. В местах, где несколько дорог соединяются, пересечения позволяют контролировать количество транспортных средств, которые могут одновременно двигаться по соединяемым дорогам. Пропускная способность пересечения в городских условиях напрямую влияет на пропускную способность всей улично-дорожной сети города, особенно на дорогах с высокими интенсивностями движения.

Пересекающие и поворачивающие транспортные потоки необходимо направлять таким образом, чтобы обеспечивались максимальная безопасность и производительность пересечения.

На пересечениях основных магистральных дорог со средними или большими интенсивностями, а также при пересечении в одном месте четырёх и более дорог целесообразно устраивать кольцевые пересечения [1, 2].

Количество кольцевых пересечений в России постоянно растёт. Ключевыми аргументами при выборе типа пересечения руководствуются в первую очередь соображениями безопасности. Кольцевые пересечения в области безопасности движения имеют ряд преимуществ в сравнении с дру-

гими видами пересечений: меньшее количество конфликтных точек и небольшие углы слияния и переплетения транспортных потоков [3, 4].

Однако при проектировании или реконструкции пересечения инженеры часто сталкиваются с выбором типа пересечения, которое обеспечит приемлемые уровни безопасности и пропускной способности [5, 6]. Данный выбор обусловлен тем, что с каждым годом количество автомобилей неуклонно возрастает, что приводит к увеличению транспортных потоков. Поэтому для того, чтобы сделать выбор, необходимо принимать во внимание, какое из этих пересечений обладает большей пропускной способностью [7–9].

Правильно спроектированное кольцевое пересечение обладает увеличенной пропускной способностью в сравнении с нерегулируемым движением. Повышение пропускной способности наблюдается даже в тех случаях, когда преобладают потоки поворачивающих транспортных средств.

В основных нормативно-технических документах, в которых даются рекомендации по планировке кольцевых пересечений, таких как «Методические указания по проектированию кольцевых пересечений автомобильных дорог»^{*} и

^{*} Методические указания по проектированию кольцевых пересечений автомобильных дорог. Утв. Министерством автомобильных дорог РСФСР 04.10.79 [Электронный ресурс] // Техэксперт. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200041476> (04.10.2018) / Guidelines for the design of ring intersections of roads. Approved. Ministry of roads of the RSFSR 04.10.79. Techexpert. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200041476> (accessed 04 October 2018)



ОДМ 218.4.005-2010** имеется номограмма – обоснование выбора типа пересечения, которая представлена на рис. 1 [1, 3].

В перечисленных выше документах используется соотношение интенсивностей движения на пересекающихся дорогах и созданы рекомендации по планировочным решениям [1, 3]:

- простые необорудованные пересечения;
- частично канализированные пересечения с направляющими островками на второстепенной дороге;
- канализированные пересечения с направляющими островками на второстепенной и главной дорогах и переходно-скоростными полосами, расположенными по главной дороге;
- кольцевые пересечения: а) со средними центральными островками; б) с малыми центральными островками; в) при числе пересекающихся дорог $n \geq 5$ и с большими центральными островками;

– пересечения: а) кольцевые, обеспечивающие лучшие условия движения более загруженному направлению (с эллиптическим центральным островком и др.); б) в разных уровнях; в) при стадийном строительстве (I этап – кольцевое пересечение и II этап – пересечение в разных уровнях);

– пересечения: а) кольцевые с малыми центральными островками; б) в разных уровнях;

– пересечения: а) стадийное развитие (I этап – кольцевые пересечения с малыми центральными островками, II этап – пересечения в разных уровнях); б) пересечения в разных уровнях.

Правильно спроектированное кольцевое пересечение обладает увеличенной пропускной способностью в сравнении с нерегулируемым движением. Повышение пропускной способности наблюдается даже в тех случаях, когда преобладают потоки поворачивающих транспортных средств.

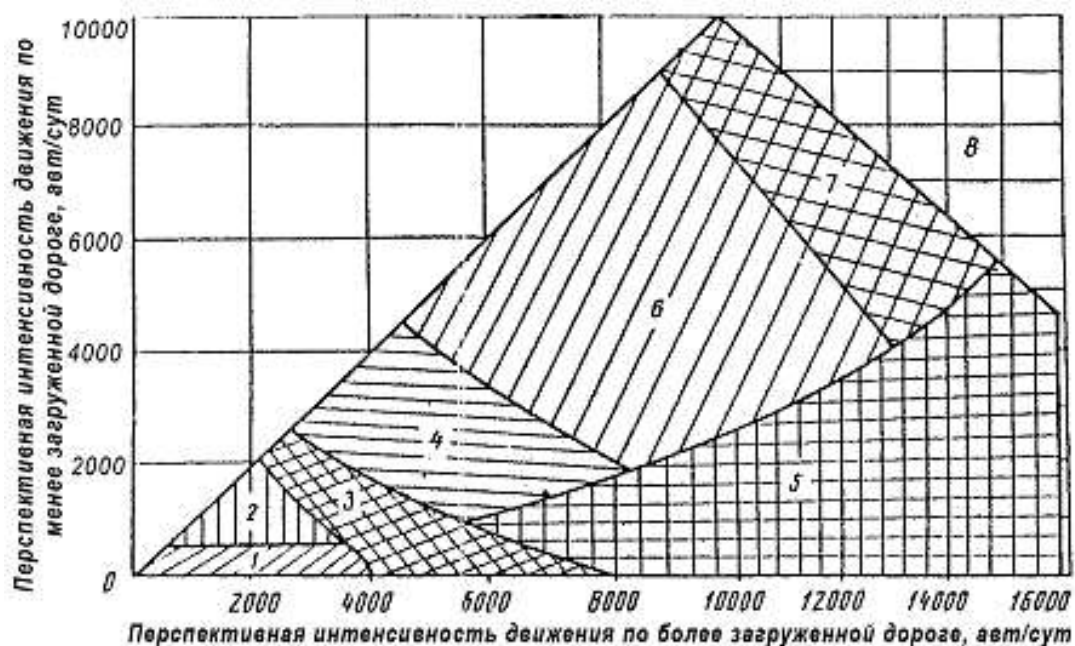


Рис. 1. Номограмма выбора типа планировочного решения пересечений
Fig. 1. Nomogram for choosing the type of an intersection planning solution

** ОДМ 218.4.005-2010 Рекомендации по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах [Электронный ресурс] // Техэксперт. Режим доступа: URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200084056> (04.10.2018) / ODM 218.4.005-2010 Recommendations to ensure traffic safety on roads. Techexpert. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200084056> (accessed 04 October 2018)



Однако при наличии больших пешеходных и велосипедных потоков сводит к нулю положительные эффекты кольцевых пересечений. Большинство колец строится в местах с высокой концентрацией населения, где ожидаемы плотные пешеходные потоки. По правилам дорожного движения РФ водитель обязан заблаговременно снизить скорость перед пешеходным переходом и пропустить пешеходов, даже если он один [10]. Таким образом, сочетание пешеходов, пересекающих дорогу в непосредственной близости от кольца, и больших транспортных потоков, въезжающих на кольцо, снижает общую пропускную способность и уровень транспортного обслуживания кольцевых пересечений.

Пешеходы, пересекая дорогу, влияют как на входящие, так и на исходящие

потоки транспортных средств кольцевого пересечения. Влияние на исходящие потоки представляется более важным, так как покидающие кольцевое пересечение транспортные средства могут блокировать потоки с других примыканий, что приводит к снижению пропускной способности участка улично-дорожной сети.

Для оценки влияния пешеходных потоков использовалось программное обеспечение PTV VISSIM, предназначенное для построения компьютерных моделей участков улично-дорожной сети. В данной работе это программное обеспечение использовалось для аналитического анализа производительности кругового пересечения с большими транспортными и пешеходными потоками.

Подготовка модели

Производительность кольцевого пересечения напрямую зависит от сбалансированности транспортных потоков. Это может проявляться, например, когда поток с основного направления блокирует въезд на кольцо со второстепенных направлений или в случаях, когда с основного направления преобладают левопоротный поток. Подобные ситуации вызывают очереди и задержки при движении по данному участку улично-дорожной сети.

Основным потоком на кольце могут быть:

- большой непрерывный транспортный поток;
- небольшой, но постоянный поток со второстепенного направления, который имеет преимущество над основным.

Входные данные были собраны с помощью видеосъёмки на кольцевом пересечении площади Василевского и двух

близлежащих перекрёстках. Дополнительно была собрана информация о месторасположении дорожных знаков и светофорных объектов [11]. Кольцевое пересечение было смоделировано с помощью программного пакета PTV VISSIM, который регулярно применяется для решения подобных задач [14]. При микроскопическом моделировании было рассмотрено два случая: с пешеходными потоками и без них. Конфигурация кольцевого пересечения представлена на рис. 2.

Кольцевое пересечение было смоделировано, чтобы оценить транспортную ситуацию и влияние на неё пешеходных потоков. Ключевой характеристикой, которая характеризует эффективность работы пересечений является время задержки транспортных средств при проезде по данному участку улично-дорожной сети.



Рис. 2. Кольцевое пересечение на площади Василевского
Fig. 2. Roundabout on Vasilevsky Square

Сравнение результатов

Представленные результаты являются средним значением многократных запусков с разными стартовыми числами. Параметры модели, которые применялись в VISSIM, представлены в табл. 1.

Кольцевое пересечение на площади Василевского имеет четыре подъезда.

Транспортные потоки и направления движения, полученные в результате обработки видеосъемки, которые были использованы при моделировании, представлены в табл. 2. Также имеются три пешеходных перехода с плотными потоками.

Таблица 1

Настройки для микромоделирования VISSIM

Table 1

Settings for VISSIM micromodeling

Транспорт	Скорость движения
Легковые автомобили	40 км/ч (с зонами снижения до 30 км/ч)
Грузовой транспорт	40 км/ч
Общественные транспорт	30 км/ч
Пешеходы	5 км/ч
Велосипедисты	10 км/ч
Конфликтные зоны	Стандартные настройки
Диаметр внутреннего островка кольца	28 м



Таблица 2

Транспортные и пешеходные потоки на площади Василевского

Table 2

Transport and pedestrian flows on Vasilevsky Square

Ул. Черняховского (условных автомобилей в час)	
Направо	641
Прямо	701
Налево	1521
Ул. 9 Апреля (условных автомобилей в час)	
Направо	349
Прямо	1006
Налево	611
Ул. Литовский вал (условных автомобилей в час)	
Направо	712
Прямо	1393
Налево	96
Ул. А.Невского (условных автомобилей в час)	
Направо	1137
Прямо	1261
Налево	120
Пешеходы (в час)	–
Черняховского	483
9 Апреля	168
Литовский вал	140

Из данных табл. 2 видно, что на кольцевое пересечение приходится серьезная нагрузка как со стороны как автомобильного транспорта, так и со стороны пешеходного движения. При сравнении значений в табл. 2 со значениями на рис. 1 необходимо на данном участке использовать развязку в разных уровнях, что свидетельствует о серьезном просчёте при технико-экономическом обосновании. Для предотвращения подобных ошибок в будущем необходимо в полной мере учитывать транспортные потоки, а также пешеходные потоки в непосредственной близости от пересечения.

Симуляции в VISSIM были использованы для анализа взаимосвязи между временем задержки и транспортными потоками при различных способах контроля движения на кольцевом пересечении. Модель была откалибрована и сравнена с

данными полевых исследований. Ввиду неудачной конфигурации зон пересечения и слияния потоков в модели использовались правила приоритета вместо конфликтных зон.

В процессе моделирования рассматривались следующие варианты регулирования движения на кольцевом пересечении:

- с фиксированными фазами для всех участников движения (реальная ситуация);
- нерегулируемое движение;
- перенос пешеходных переходов вблизи кольца под землю (отсутствие пешеходных потоков).

На рис. 2 представлена сигнальная программа, которая была определена в результате полевых наблюдений за перекрёстком.



Рис. 3. Сигнальная программа кольцевого пересечения
Fig. 3 Roundabout signal program

Как можно заметить, программа с фиксированным временем является очень простой. При расчёте цикла и отдельных фаз не учитывались различные особенности пересечения, такие как:

- трамвайное движение, препятствующее движению по кольцу;
- крупные потоки транспорта в прямом направлении и налево.

Также можно отметить, что одна из дорог остаётся не зарегулированной, что снижает эффективность светофорного регулирования.

При полевых исследованиях были замечены проблемы с пропускными способностями на подходах к перекрёстку, которые были вызваны наличием пешеходных потоков. Результаты микроскопического моделирования подтвердили наличие проблемы, что показано в табл. 3 (столбец 2).

Результаты микромоделирования показали, что пешеходные потоки напрямую влияют на производительность кольцевого пересечения. Данный факт обусловлен геометрией данного участка улично-дорожной сети. По законодательству РФ, если пешеход пересекает дорогу с более чем 2 полосами движения, то пешеходный переход обязательно должен быть

оборудован светофором. По данным табл. 3 (столбец 3) можно отметить, что подход к кольцу, не оборудованный светофором и не имеющий пересекающих его пешеходных потоков, обладает наименьшими показателями времени задержки.

На следующем этапе работы производилось микромоделирование пересечения без светофорного регулирования пешеходных потоков (табл. 3, столбец 3).

При сравнении результатов микромоделирования для ситуаций с и без светофорного регулирования пешеходных потоков можно сделать вывод о необходимости светофорного регулирования в условиях больших потоков пешеходов и транспорта. Пешеходные потоки на данном участке очень плотные и постоянные, что при отсутствии регулирования, приводит к задержке потока даже в случае перехода всего лишь одним человеком.

В последнем случае моделировалась ситуация, при которой пешеходные потоки не взаимодействуют с потоками транспорта, так как используются подземные переходы. Подобная реконструкция требует серьёзных финансовых затрат, однако полученные результаты (табл. 3, столбец 4) свидетельствуют о целесообразности подобного решения.



Таблица 3

Результаты микро моделирования VISSIM при фиксированном времени светофоров

Table 3

Results of VISSIM micromodeling at a fixed time of traffic lights

Направление	Время задержки, с		
	при фиксированном времени светофоров	с нерегулируемыми пешеходными потоками	при отсутствии пешеходов
1	2	3	4
Ул. Черняховского			
Направо	129,74	131,22	41,95
Прямо	132,31	133,20	45,64
Налево	135,20	136,34	46,01
Ул. 9 Апреля			
Направо	40,13	43,88	19,95
Прямо	43,76	45,71	22,36
Налево	45,54	49,45	25,54
Ул. Литовский вал			
Направо	39,05	40,10	20,08
Прямо	42,88	46,29	23,21
Налево	43,45	47,98	24,00
Ул. А. Невского			
Направо	15,09	16,75	18,60
Прямо	20,62	21,58	21,06
Налево	23,98	25,58	22,33
Среднее время задержки, с	86,64	91,27	42,03

Кольцевое пересечение обладает значительными преимуществами по сравнению с перекрёстком со светофорным регулированием, особенно в промежутках между часами пик. По результатам моде-

лирования кольцевого пересечения можно утверждать, что оно будет обладать максимальной пропускной способностью при отсутствии поблизости пешеходных потоков, пересекающих подходы к кольцу.

Заключение

Цель данного исследования состояла в рассмотрении кольцевого пересечения для оценки производительности при наличии устойчивых больших пешеходных потоков, пересекающих проезжую часть непосредственно перед кольцом.

Дополнительно была построена компьютерная модель, которая максимально приближена, в процессе микро моделирования, к текущей ситуации. Данные, использовавшиеся при построении модели, взяты из проектной документации и файлов видеонаблюдения. Визуальное наблюдение указывало на значительное влияние

светофорных фаз, которые формировались из-за больших пешеходных потоков. Модель без светофорного регулирования также показала, что пешеходы существенно влияют на производительность кольцевого пересечения. В данном исследовании не были выявлены критические уровни транспортных и пешеходных потоков, при которых происходит резкое уменьшение производительности пересечения. В процессе исследования программное обеспечение для микро моделирования позволило рассчитать задержки на участке улично-дорожной сети.



Библиографический список

1. Зедгенизов А.В., Лагереv Р.Ю., Левашев А.Г., Липницкий А.С., Михайлов А.Ю., Шаров М.И. Современные кольцевые пересечения. Иркутск: Иркутский-государственный технический университет, 2009. 106 с. Деп. в ВИНТИ. 24.12.2009. № 823.
2. Hatami H., Aghayan I. Traffic efficiency evaluation of elliptical roundabout compared with modern and turbo roundabouts considering traffic signal control // *Promet-Traffic & Transportation*. 2017. Vol. 29. № 1. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.7307/ptt.v29i1.2053>
3. Бойков В.Н., Субботин С.А. Анализ дорожно-транспортных происшествий с использованием ГИС IndorRoad // САПР и ГИС автомобильных дорог 2014. № 1 (2). С. 74–76. DOI: 10.17273/CADGIS.2014.1.16
4. Tollazzi T., Mauro R., Guerrieri M., Rencelj M. Comparative Analysis of Four New Alternative Types of Roundabouts: "Turbo", "Flower", "Target" and "Four-Flyover" Roundabout // *Periodica Polytechnica-Civil Engineering* 2016. Vol. 60. № 1 P. 51–60. <https://doi.org/10.3311/PPci.7468>
5. Левашев А.Г. Развитие градостроительных критериев оценки качества транспортного обслуживания населения // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2014. № 6 (11). С. 108–115.
6. Gallellia V., luelea T., Vaianaa R. Conversion of a semi-two lanes roundabout into a turbo-roundabout: a performance comparison // *Procedia Computer Science*. 2016. Vol. 83. P. 393–400
7. Крeтинин А.С. Оптимизация движения на транспортных узлах в городских условиях // *Инновационная наука*. 2016. № 1-2 (13). С. 60–64.
8. Кривых И.В., Мирза Н.С. Проектирование транспортных развязок в IndorCAD // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2014. № 1 (2). С. 36–41.
9. Zhaowei Qu., Yuzhou Duan, Xianmin Song, Yan Xing. Review and Outlook of Roundabout Capacity // *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*. 2014. Vol. 14. Iss. 5. P. 15–22.
10. Шевцова А.Г., Кущенко Л.Е., Захаров В.М. Обзор различных видов организации дорожного движения на пересечении // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2015. № 6-1. С. 39–44.
11. Nikitin N., Patskan V., Savina I. Efficiency Analysis of Roundabout with Traffic Signals // *Transportation Research Procedia*. 2017. Vol. 20. P. 443–449.
12. NCHRP Report 572. Roundabouts in the United States // *Transportation Research Board. National Research Council*. Washington, D.C. 2007, 125 p.
13. Roundabouts: An Informational Guide// *Federal Highway Administration*. Publication No FHWA–RD-00-67. 2000. 277 p.
14. Черненко А.О., Халипова Н.В., Лесникова И.Ю. К вопросу моделирования транспортных потоков с целью анализа загруженности дорог в городах // *Транспортные системы и технологии перевозок*. 2016. № 12. P. 90–98.

References

1. Zedgenizov A.V., Lagerev R.Yu., Levashev A.G., Lipnitskii A.S., Mikhailov A.Yu., Sharov M.I. Modern roundabouts. Irkutsk: Irkutsk state technical university, 2009. 106 p. Dep. v VINITI. 24.12.2009. № 823. (In Russ.)
2. Hatami H., Aghayan I. Traffic efficiency evaluation of elliptical roundabout compared with modern and turbo roundabouts considering traffic signal control. *Promet-Traffic & Transportation*. 2017, vol. 29. no. 1, pp. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.7307/ptt.v29i1.2053>
3. Boikov V.N., Subbotin S.A. Analysis of road accidents using GIS IndorRoad. *SAPR i GIS avtomobil'nykh dorog* [CAD and GIS for Roads]. 2014. № 1 (2). S. 74–76. DOI: 10.17273/CADGIS.2014.1.16 (In Russ.)
4. Tollazzi T., Mauro R., Guerrieri M., Rencelj M. Comparative Analysis of Four New Alternative Types of Roundabouts: "Turbo", "Flower", "Target" and "Four-Flyover" Roundabout. *Periodica Polytechnica-Civil Engineering*. 2016, vol. 60, no. 1. pp. 51–60. <https://doi.org/10.3311/PPci.7468>
5. Levashev A.G. Development of the criteria of quality evaluation in transport public service. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'* [Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real Estate]. 2014. no. 11. pp. 108–115. (In Russ.)
6. Gallellia V., luelea T., Vaianaa R. Conversion of a semi-two lanes roundabout into a turbo-roundabout: a performance comparison. *Procedia Computer Science*. 2016, vol. 83, pp. 393–400.
7. Kretinin A.S. Traffic optimization on transport hubs in urban conditions. *Innovatsionnaya nauka* [Innovation Science]. 2016, no. 1-2 (13). pp. 60–64. (In Russ.)
8. Krivykh I.V., Mirza N.S. Design of interchanges in IndorCAD. *SAPR i GIS avtomobil'nykh dorog* [CAD and GIS for roads]. 2014, no. 1 (2). pp. 36–41. (In Russ.)
9. Zhaowei Qu., Yuzhou Duan, Xianmin Song, Yan Xing. Review and Outlook of Roundabout Capacity. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*. 2014, vol. 14, iss. 5, pp. 15–22.
10. Shevtsova A.G., Kushchenko L.E., Zakharov V.M. An overview of different types of traffic organization at the intersection. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya Tula State



University. Technical Sciences]. 2015, no. 6-1, pp. 39–44. (In Russ.)

11. Nikitin N., Patskan V., Savina I. Efficiency Analysis of Roundabout with Traffic Signals. *Transportation Research Procedia*. 2017, vol. 20, pp. 443–449.

12. NCHRP Report 572. Roundabouts in the United States. Transportation Research Board. National Research Council. Washington: D.C. Publ., 2007, 125 p.

13. Roundabouts: An Informational Guide. Federal Highway Administration. Publication No FHWA–RD-00-67. 2000. 277 p.

14. Chernenko A.O., Khalipova N.V., Lesnikova I.Yu. Traffic load analysis based on traffic flows modeling. *Transportnye sistemy i tekhnologii peregvozok* [Transport Systems and Transportation Technologies]. 2016, no. 12, pp. 90–98. (In Russ.)

Критерии авторства

Никитин Н.А. имеет на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Nikitin N.A. have author's rights and bear 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.



К ВОПРОСУ ОБ ИСКУССТВЕННЫХ ДОРОЖНЫХ НЕРОВНОСТЯХ

© Д.И. Сосюк¹, В.В. Скutelник²

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

РЕЗЮМЕ: Рассмотрено положительное и отрицательное влияние установки искусственных дорожных неровностей на дорогах в населенных пунктах. В настоящее время искусственные дорожные неровности получили широкое распространение как элементы принудительного ограничения скорости транспортного потока на улично-дорожной сети с целью повышения безопасности дорожного движения. Их устанавливают в основном возле пешеходных переходов, в местах притяжения большого количества людей: школы, детские сады, больницы, магазины, рынки, торговые центры, а также во дворах и жилых зонах. Использовался метод наблюдений и статистики, в которой предоставлен обзор по искусственным дорожным неровностям, включающий историю, эксплуатацию, влияние на скорость транспортного потока, влияние на экологию и общее сравнение цен. Исследования, проведенные по искусственным дорожным неровностям, выявили зависимость стиля вождения автомобиля, негативного влияния искусственных дорожных неровностей на скорость транспортного потока и на экологические показатели. Из полученных данных можно сделать вывод, что искусственные дорожные неровности имеют большее количество минусов, чем плюсов. Применение их на дорожной сети населенных пунктов приводит: к повышенному выбросу отработанных газов и, следовательно, содержащих в них токсичных веществ; к более интенсивному износу шин и тормозных накладок транспортных средств; продукты износа долгое время могут оставаться во взвешенном состоянии. Кроме того, установка искусственных дорожных неровностей приводит к сокращению срока службы многих деталей и узлов автомобиля. Альтернативами им являются камеры с видеофиксацией, светофоры, оборудованные кнопкой, подземные и надземные пешеходные переходы.

Ключевые слова: искусственная дорожная неровность, лежащий полицейский, светофор, транспортный поток, пропускная способность, правила дорожного движения

Информация о статье: Дата поступления 09 сентября 2018 г.; дата принятия к печати 30 октября 2018 г.; дата онлайн-размещения 30 ноября 2018 г.

Для цитирования: Сосюк Д.И., Скutelник В.В. К вопросу об искусственных дорожных неровностях. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(11):241–250. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-241-250.

TO ARTIFICIAL ROAD BUMPS

Dmitry I. Sosyuk, Vitaly V. Skutelnik

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

ABSTRACT: The paper deals with the positive and negative effects of road bump installation on the roads within human settlements. The road bumps are widely used today as the elements of forced limitation of traffic speed in the road network in order to improve traffic safety. They are mainly installed close to pedestrian crossings, in the places attracting a large number of people; schools, kindergartens, hospitals, shops, markets, shopping malls, as well as in the yards and residential areas. The research uses the method of observations and statistics. The latter provides an overview of arti-

¹Сосюк Дмитрий Иванович, магистрант кафедры автомобильного транспорта, e-mail: dima.maff@gmail.com
Dmitry I. Sosyuk, Master's Degree student of the Department of Road Transport, e-mail: dima.maff@gmail.com

²Скutelник Виталий Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта, e-mail: scutvv@gmail.com
Vitaly V. Skutelnik, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Road Transport, e-mail: scutvv@gmail.com



cial road bumps including the history, operation, effect on traffic speed, environmental impact, and general price comparison. The study of artificial road bumps allowed to reveal the dependence of the vehicle driving style and negative effect of artificial road bumps on both the traffic speed and environmental indicators. The obtained data show that road bumps have more disadvantages than advantages. Their use in the road network of residential areas lead to the increased emissions of exhaust gases and toxic substances contained in them; to increased wear of tires and brake linings of vehicles, whereas the wear products can remain in suspension for a long time. Moreover, the installation of artificial road bumps reduces the service life of many vehicle parts and assemblies. The alternatives to road bumps are cameras with video recording, traffic lights equipped with a button as well as underground and aboveground pedestrian crossings.

Keywords: *artificial road roughness, speed bump, traffic lights, traffic flow, traffic capacity, traffic rules*

Information about the article: Received September 09, 2018; accepted for publication October 30, 2018; available online November 30, 2018.

For citation: Sosyuk D.I., Skutelnik V.V. To artificial road bumps. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(11):pp. 241–250. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-11-241-250.

Введение

Искусственная дорожная неровность (ИДН) является элементом принудительного снижения скорости транспортных средств, одна из мер успокоения дорожного движения [1]. К таким мерам можно отнести: знаки дорожного движения, светофоры, камеры с видеофиксацией, искусственные дорожные неровности и разметку на дорожном покрытии.

Впервые их стали применять в США в начале XX в. для принудительного ограничения скорости движения автомобилей на опасных участках дорог. Причиной ограничения скорости являлся домашний скот, без присмотра переходивший скоростную дорогу и попадавший под колеса автомобилей – так местные фермеры снижали вероятность потерь своих животных. Этот метод имел положительный результат в решении этой проблемы, позже ИДН стали применять для ограничения скорости на аварийных участках дороги, в местах скопления людей и т.д.

В Европе ИДН появились после первой мировой войны и также отличались разнообразными формами и размерами,

как и знаки, обозначающие их присутствие. Со временем это было закреплено, и появились прописанные требования к формам, размерам, местам установки и правилам применения ИДН.

В СССР, а позднее в РФ, также применялись «лежачие полицейские», изготавливаемые из бетона или асфальта [2]. При установке лежащих полицейских не соблюдались какие-либо правила, последствием этого были частые дорожно-транспортные происшествия (ДТП) и повышенный износ подвески. Также под постоянной нагрузкой такие неровности ломались и крошились – это что приводило к аварийным ситуациям при его переезде и создавало неудобства дорожным службам.

Из-за относительно малого количества автомобилей долгое время не было необходимости как-то «узаконить» их наличие и применение. Однако с ростом количества автомобилей, следовательно, и аварий, появилась необходимость создания искусственных дорожных неровностей и дорожных знаков, а также правил их применения [2].

* ГОСТ Р 52605-2006 Технические средства организации дорожного движения. Искусственные неровности. Утв. и введ. 11.12.2006 № 295-ст. Москва: Стандартинформ, 2007 / GOST R 52605-2006 Technical means of traffic management. Road bumps. Approved and introduced 11 December 2006 no. 295-st. Moscow: STANDARTINFORM, 2007
СНиП II-K.3-62 Улицы, дороги и площади населенных мест. Нормы проектирования. Введ. 01.07.1963. М.: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1963 / SNiP II-K. 3-62 Streets, roads and squares of populated areas. Design standards. Introduced 1 July 1963. Moscow: State publishing house of literature on construction, architecture and building materials, 1963.



В 2000-х гг. возникла острая необходимость в стандартах на размер и правила применения «лежачего полицейского», и в 2006 году вышел ГОСТ Р 52605-2006*.

В настоящее время разработаны и действуют государственные стандарты, которые четко устанавливают формы обозначения, геометрические параметры и места установки «лежачих полицейских» и сопутствующих дорожных знаков.

Принцип действия ИДН заключается в том, что при пересечении с высокой скоростью лежачего полицейского происходит сильное сотрясение подвески автомобиля. Чтобы не приближать срок ближайшего ремонта, водители вынуждены не превышать установленную дорожными знаками скорость [3]. Подобное поведение водителей положительно сказывается на безопасности движения, но такая организация движения имеет и свои недостатки. Сотрясения при наезде на неровность приводят к постепенному выходу из строя различных узлов автомобиля: стоек, шаровых шарниров, ступичных подшипников, наконечников рулевых тяг и др. Помимо износа подвески при резком замедлении истирается протектор шины, что влияет на способность автомобиля безопасно остановиться при возникновении опасной ситуации.

В настоящее время искусственную неровность устанавливают в жилых зонах, возле пешеходных переходов, в местах притяжения большого количества людей (школы, детские сады, больницы, магазины, рынки, торговые центры и т.д.) [4, 5]. Однако установка ИДН в подобных местах может негативно сказаться на пропускной способности автомобильного потока, что при нынешнем количестве автомобилей в крупных городах Российской Федерации отражается на экологии самого города. Раньше «лежачие полицейские» делали из бетона или асфальта, в настоящий же момент их производят из использованных шин и пластиковых несущих конструкций, что положительно влияет на освоение такого направления как «переработка» пластика и шин. Также современные версии могут быть оборудованы системой противообле-

денения, но эта функция значительно увеличивает стоимость ИДН. Также в зимнее время их рекомендуется демонтировать для эффективной работы снегоуборочной техники.

Установка ИДН имеет как плюсы [6], так и минусы, часто их устанавливают до и после пешеходного перехода для обеспечения безопасности в обоих направлениях, но это значительно увеличивает общие затраты. Также их могут устанавливать совместно с светофорами, что значительно повышает безопасность дорожного движения, при этом сильно снижается скорость транспортного потока. Снижение скорости транспортного потока негативно сказывается на экологии города, так как наибольшее количество выбросов автомобиль производит при интенсивном разгоне и торможении.

Несмотря на выполнение своей основной функции, ИДН имеют ряд серьезных недостатков, можно выделить несколько положительных и отрицательных сторон их применения:

1. Плюсы:

- принудительное ограничение скорости движения автомобиля в пределах 8–20 км/ч;
- обеспечение повышенной безопасности для пешеходов.

2. Минусы:

- снижение скорости транспортного потока;
- дискомфорт при передвижении на общественном и личном транспорте;
- повышенная загазованность и запыленность (в местах установки);
- возможность потери части сыпучего груза (грузовой транспорт);
- снижение ресурса подвески автомобилей;
- повышенный износ и повреждения шин автомобилей;
- уменьшение срока службы дорожного полотна, на котором установлена неровность;
- затрудненная уборка дорожного полотна (особенно в зимнее время года);
- объезд из-за отсутствия сегментов



ИДН.

Самой распространенной проблемой ИДН является снижение скорости транспортного потока в независимости от того, переходят пешеходы дорогу или нет, а также большое их количество: так на одном участке может находиться от 2-х и более искусственных неровностей, что негативно сказывается на психологическом состоянии водителя, повышая, тем самым, его раздражительность.

Стиль вождения водителя напрямую влияет на скорость транспортного потока [7, 8], безопасность движения и выбросы вредных веществ в атмосферу в целом. Часть водителей имеет активный стиль вождения, они интенсивно тормозят перед «лежачим полицейским» и так же интенсивно набирают скорость после его прохождения. Обычно это сопровождается повышенным нагревом и износом тормозных колодок, более высоким выделением в окружающую среду вредных выбросов и более интенсивным износом шин автомобиля.

Эффективность торможения зависит напрямую от надежности и исправности тормозной системы в целом. Основную нагрузку на себя берут тормозные колодки и диски автомобиля, при интенсивном торможении срок их возможной службы снижается почти в 2 раза, что приводит к аварийным ситуациям на дороге. Тормозная колодка состоит из 2-х частей: каркаса и фрикционной накладки, при частом торможении происходит их интенсивный износ, что приводит образованию пыли, крупные частицы которой оседают на дороге, а более мелкие могут долго оставаться во взвешенном состоянии.

То же самое происходит и с шинами автомобиля. При резком торможении между колесом и асфальтом создается высокое трение, что способствует замедлению автомобиля. Частицы от износа тормозных накладок и шин могут также оседать на дороге и с порывом ветра, подниматься на высоту уровня головы человека, что не исключает возможность попадания вредных веществ в организм [9].

Как правило, статистика ДТП на искусственных неровностях не ведется, но это не значит, что аварийных ситуаций на них не возникает: часто из-за сильного износа искусственной неровности её крепления могут выступать, при этом нанося повреждения шинам проезжающих автомобилей.

Чтобы определить интенсивность транспортного и пешеходного потоков за один рабочий день, были проведены исследования на участке автодороги по ул. Лермонтова в Свердловском районе г. Иркутска (рис 1.).

На этом участке автодороги расположен пешеходный переход перед остановками общественного транспорта в обе стороны, до и после которого установлены ИДН на расстоянии 10 м друг от друга. В общей сложности на 1 км дороги установлено 6 таких лежачих полицейских.

Общее количество легковых автомобилей превышает количество автобусов в 7 раз, жители города отдают свое предпочтение личному транспорту, что отрицательно сказывается не только на экологии города, но и на пропускной способности дорог (рис. 2).

Из полученных данных следует, что в утреннее и вечернее время (пиковые часы) количество легковых автомобилей и пешеходов достигает максимальных значений; то же можно сказать и про общественный транспорт, а грузовой транспорт в основном появляется в межпиковое время [10, 11].

Как правило количество пешеходов должно значительно изменяться в пиковые и межпиковые часы, однако на рис. 3 видно, что после обеда количество пешеходов постоянно повышалось. Обусловлено это тем, что в Свердловском районе имеется большое количество учебных заведений, а также мест большого скопления людей. Чаще всего это студенты, у которых время занятий заканчивается в 13:00, 15:00, 17:00.

На данном участке автомобильной дороги были произведены замеры скорости для каждого вида транспорта. Из получен-

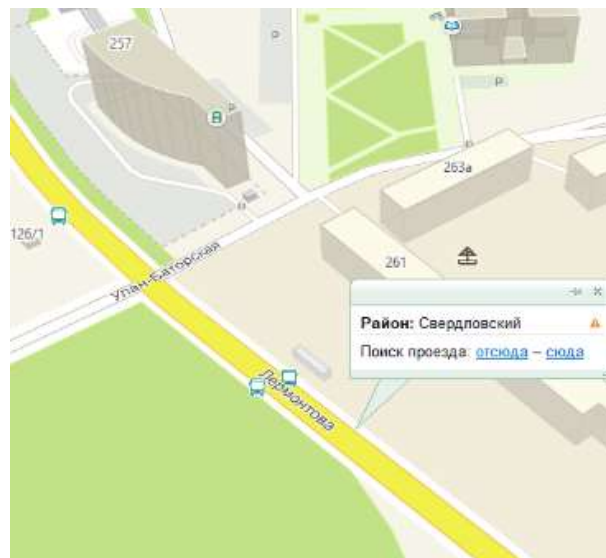


ных показателей следует, что средняя скорость при проезде через ИДН для легковых автомобилей составляет 12 км/ч, а для грузовых автомобилей и автобусов – 11 км/ч (рис. 4). Также произведены замеры скоростей: за 100 м до ИДН у легковых автомо-

билей она равна 35 км/ч, а скорость грузовых автомобилей и автобусов – 26–27 км/ч (рис. 5). Из полученных данных видно, что средняя скорость непосредственно перед проездом через искусственную неровность снижается 58–66%.



a



b

Рис. 1. Исследуемый участок автодороги:
a – внешний вид ИДН;
b – схема расположения ИДН
Fig. 1. The road section under study: a – image of a road bump;
b – location scheme of a road bump

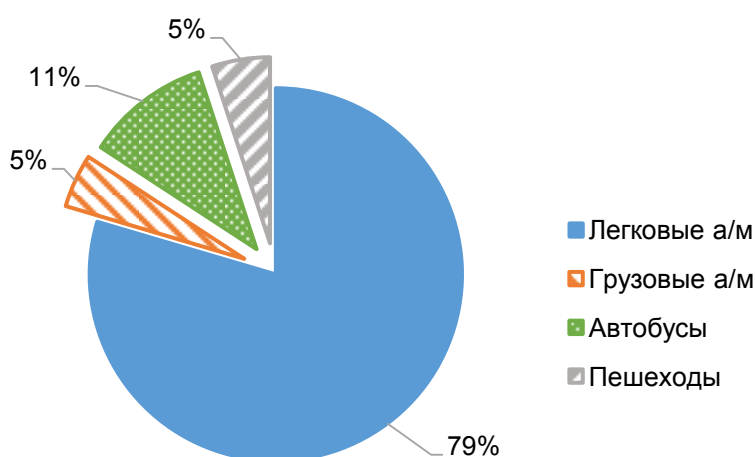


Рис. 2. Структура участников дорожного движения за 1 рабочий день
Fig. 2. Structure of road users per 1 working day

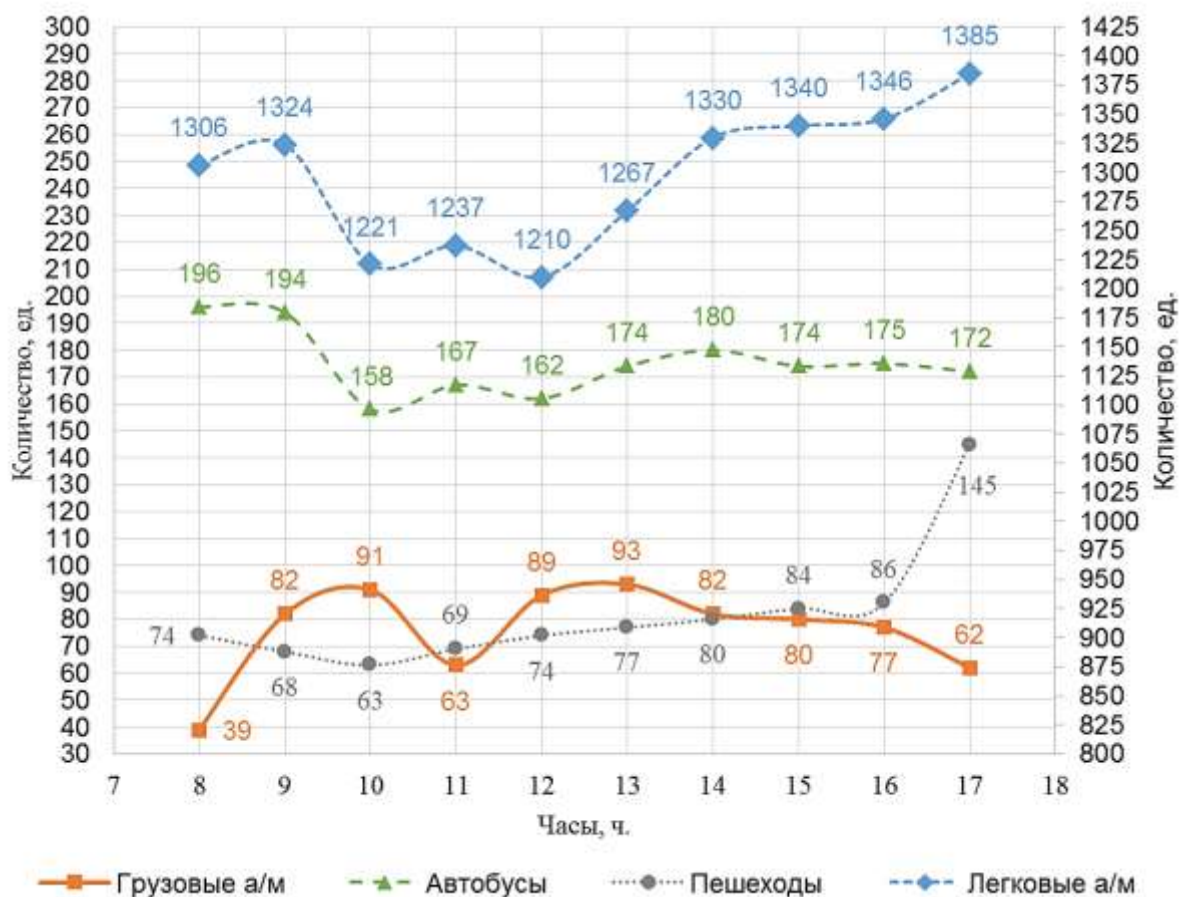


Рис. 3. Общее количество автомобилей и пешеходов
Fig. 3. Total number of vehicles and pedestrians

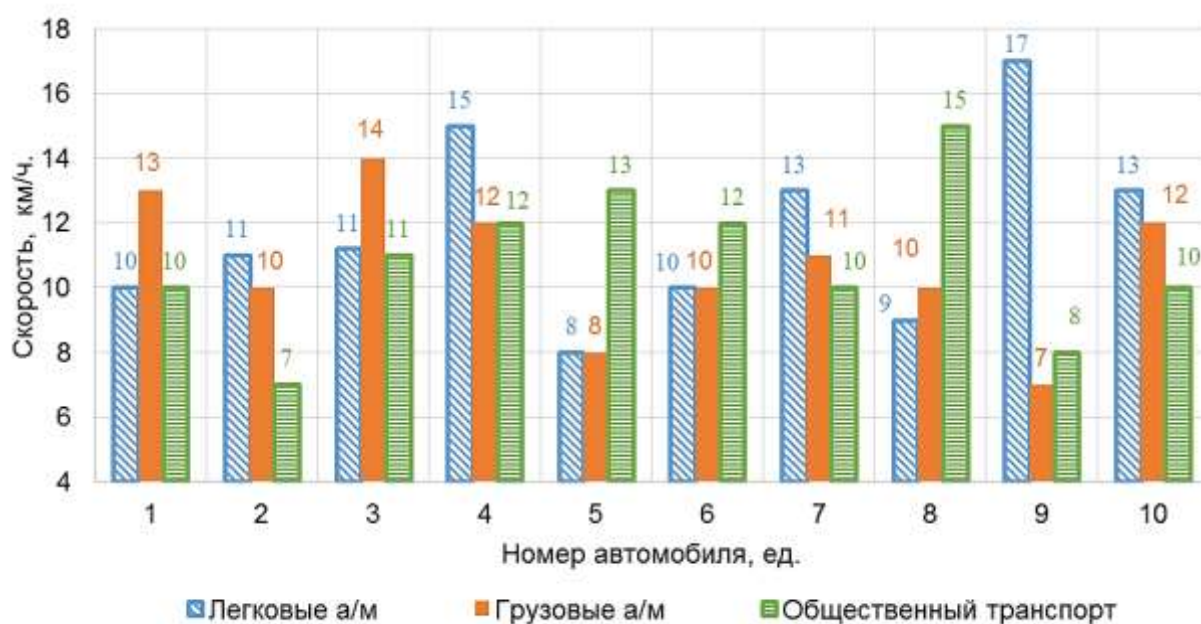


Рис. 4. Скорость автомобилей при проезде через искусственную дорожную неровность
Fig. 4. Speed of vehicles when driving over a road bump

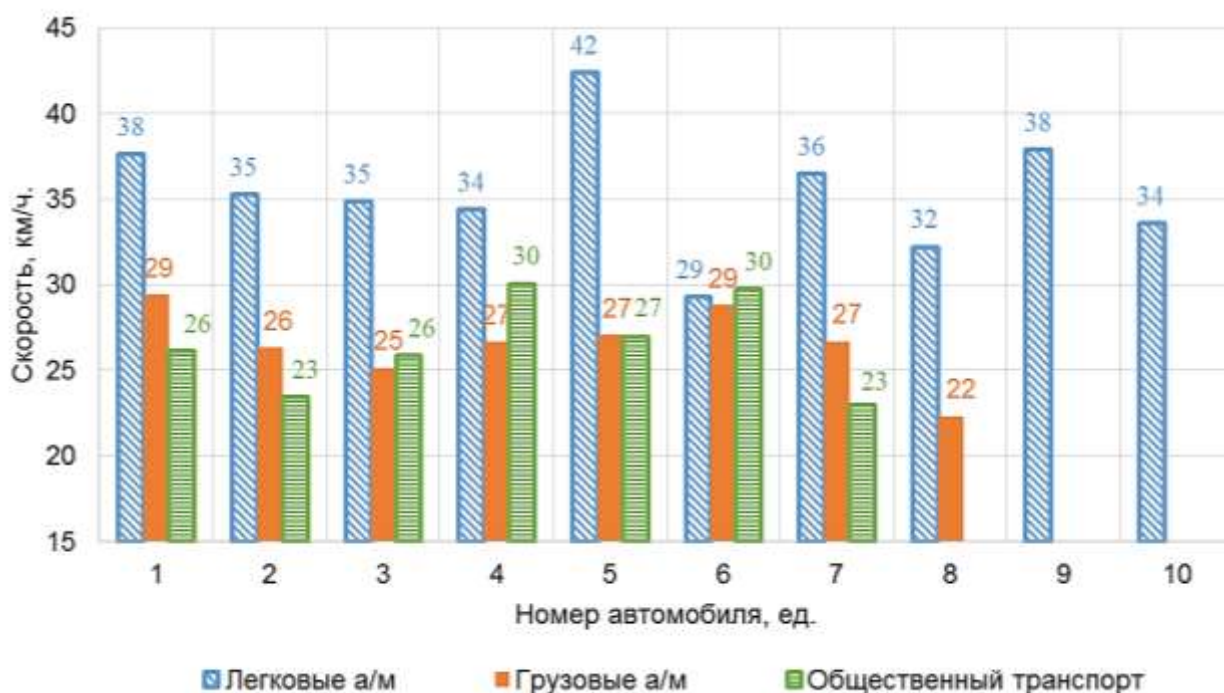


Рис. 5. Скорость автомобилей за 100 м до искусственной дорожной неровности
Fig. 5. Speed of vehicles 100 m before the road bump

Решением проблемы негативного влияния автомобилей на окружающую среду может являться установка светофора с кнопкой управления, либо с датчиком в зоне ожидания пешеходов. Данный светофор позволит уменьшить количество конфликтных ситуаций пешеходов и водителей транспортных средств: пешеход может активировать светофор, что позволит ему безопасно перейти дорогу. Когда пешеходный поток будет минимален, на данном участке дороги может гореть постоянный зеленый сигнал, что значительно увеличит пропускную способность участка и уменьшит выделяемые автомобилями вредные выбросы.

Установка камеры с видеофиксацией позволит контролировать скорость автомобилей. Так водители будут снижать скорость на участках дорог, где находится большое количество пешеходных переходов, что позволит безопасно контролировать весь процесс движения, своевременно реагируя на те или иные ситуации.

Еще одной альтернативой может служить обустройство подземного или надземного пешеходного перехода, который позволит полностью устранить пересечение пешеходного и транспортного потоков, но из-за стоимости и сроков их постройки возведение целесообразно только на высокоскоростных магистралях и дорогах с большим количеством полос.

Проанализировав стоимость искусственных дорожных неровностей (таблица), камер с видеофиксацией, светофора, подземного и надземного перехода, можно сделать вывод о доступности применения этих методов обеспечения безопасности.

Основным критерием, влияющим на стоимость искусственной дорожной неровности, является ширина дороги.

Так как на пешеходных переходах «лежачие полицейские» устанавливаются с обеих сторон, следовательно, стоимость ИДН повышается в два раза, что значительно повышает затраты на их приобретение.

Основным «конкурентом» в данном случае будет являться светофор.



Стоимость искусственных дорожных неровностей
The cost of artificial road bumps

Модель ИДН	Количество полос движения	Размеры сегмента, мм.	Длина ИДН, м.	Стоимость ИДН, руб.	Стоимость установки, руб.
500	2	500 x 250 x 50	7	17696	12600
500	4	500 x 250 x 50	13	32864	23400
900	4	900 x 250 x 50	13	58032	31200

Сейчас существует множество видов светофоров, обеспечивающих постоянный контроль и очередность над всеми участниками дорожного движения. Они оснащены яркими светодиодами, которые видно при любой погоде и в любое время суток, емкими аккумуляторами и солнечными батареями, что позволяет светофору работать с пониженным энергопотреблением или автономно от общей линии электропередач. Еще светофоры оборудуют специальными контроллерами и датчиками, которые можно запрограммировать на множество действий [12].

Стоимость самого светофора может составлять 10–50 тыс. руб. в зависимости от конструкции и дополнительных опций, однако из-за сложностей согласования со всеми службами, монтажа и подключения к общей системе, стоимость установки светофора может возрасти и составлять от нескольких сотен тысяч рублей до миллиона и более [13, 14]. Несмотря на высокую конечную стоимость, светофор является самым информативным средством обеспе-

чения безопасности и урегулирования дорожного движения в городах.

Еще одним эффективным способом мониторинга нарушений правил дорожного движения является установка камер с видеофиксацией. Такая камера может ежедневно фиксировать множество нарушений ПДД. Стоимость камеры видеофиксации зависит от количества ее опций. Для работы требуется не только камера, но и рубежи контроля, модули передачи данных, блок приема и конвертации данных и многое другое. Полный комплект оборудования может обойтись в 2–3 млн руб. [15].

Подземный и надземный пешеходный переход являются одними из самых дорогих методов безопасного пересечения дорожного полотна для пешеходов [12], стоимость только проектной документации может составлять от 3–9 млн руб. в зависимости от сложности перехода. Стоимость самой постройки может достигать нескольких десятков миллионов, а по времени возведения может составлять от 3 и более мес.

Выводы

Рассмотрев данные виды контроля безопасности дорожного движения, можно сделать вывод, что использование искусственных неровностей влечет за собой столько минусов, что не дает считать их использование эффективным. «Лежачим полицейским» приходят на смену средства снижения скорости, использование которых

не сопровождается неоправданно частым обращением в сервис для ремонта автомобиля, такие как фиксирующие камеры на опасных участках магистральных улиц, проектирование знаков с подсветкой, адаптивные светофоры и пешеходные переходы с подсветкой.

Библиографический список

1. Юшков В.С., Юшков Б.С. Повышение безопасности транспортных средств путем распознавания режима их движения по искусственным неровностям

// Строительные и дорожные машины. 2014. № 10. С. 25–27.

2. Искусственная дорожная неровность [Электрон-



ный ресурс] // Охрана труда в России. URL: http://www.ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/56/56526/ (23.12.2016)

3. Кухаренок Г.М., Капский Д.В., Бусел Б.У. Применение искусственных неровностей для повышения безопасности дорожного движения // Вестник Белорусско-Российского университета. 2011. № 1. С. 39–49.

4. Бурков Д.Г., Скutel'ник В.В. Влияние искусственной дорожной неровности на скорость транспортного потока и выброс токсичных веществ. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2012. 195 с.

5. Коржова А.В. Применение искусственных неровностей на городских улицах // Проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2016. № 1. С. 154–158.

6. Капский Д.В. Метод прогнозирования дорожно-транспортной аварийности по потенциальной опасности. М.: Новое знание, 2015. 327 с.

7. Медрес Е.Е., Голов Е.В., Бабенко Т.И. Факторы, влияющие на равномерность движения автомобильного транспорта в условиях насыщенных транспортных потоков // Транспортное дело России. 2017. № 2. С. 89–90.

8. Добромйров В.Н., Евтукоев С.С., Голов Е.В. Организация безопасного дорожного движения на пеше-

ходных переходах // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 6. С. 265–270.

9. Гудков В.А., Третьяков О.Б., Тарновский В.Н., Гудков Д.В. Экологическая безопасность шин [Электронный ресурс] // KURS.ZNATE. URL: <http://kurs.znate.ru/docs/index-113485.html?page=2> (07.03.2018).

10. Bakhirev I.A., Mikhailov A.Yu. Evaluation of Traffic Conditions in City streets // City Planning. 2015. № 4: С. 63–68.

11. Prelovskaya E., Levashev A. Modern Approach of Street Space Design: 12th International Conference "Organization and Traffic Safety Management in large cities" (SPbOTSIC-2016, 28-30 September 2016). St. Petersburg, Russia.

12. Торгово-производственная компания "МЕГАПРОМ" [Электронный ресурс]. URL: <http://www.tdmegaprom.ru/subgroup/transportnye-i-peshехodnye-svetofory-t-1-t-2-p-1-p-2.html> (21.04.2017).

13. Стоимость светофоров [Электронный ресурс]. URL: <http://iteb.spb.ru/products/price> (20.05.18).

14. Оптима Сервис [Электронный ресурс]. URL: <http://www.optimaservis.ru/> (23.02.2018).

15. Камеры с видеофиксацией [Электронный ресурс]. URL: <http://urlaw03.ru/business/article/biznes-na-kamerax-videofiksacii> (26.05.2018).

References

1. Yushkov V.S., Yushkov B.S. Improving vehicle safety by their movement mode recognition on bumps. Stroitel'nye i dorozhnye mashiny [Construction and Road Building Machinery]. 2014, no. 10, pp. 25–27. (In Russian)

2. Iskusstvennaya dorozhnaya nerovnost' [Road speed bumps] // Okhrana truda v Rossii [Labor safety in Russia]. Available at: http://www.ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/56/56526/ (accessed 23 December 2016)

3. Kukharenek G.M., Kapskii D.V., Busel B.U. The application of artificial irregularities for raising traffic safety. Vestnik Belorussko-Rossiiskogo Universiteta [Bulletin of the Belarusian-Russian University]. 2011, no. 1, pp. 39–49. (In Russian)

4. Burkov D.G., Skutel'nik V.V. Vliyanie iskusstvennoi dorozhnoi nerovnosti na skorost' transportnogo potoka i vybros toksichnykh veshchestv [Influence of road bumps on the traffic flow speed and toxic substance emission]. Irkutsk: Irkutsk national research technical University Publ., 2012. 195 p. (In Russian)

5. Korzhova A.V. The use of humps on city streets. Problemy razvitiya arkhitekturno-stroitel'nogo kompleksa [Development problems of the architectural and construction complex]. 2016, no. 1, pp. 154–158. (In Russian)

6. Kapskii D.V. Metod prognozirovaniya dorozhno-transportnoi avariinosti po potentsialnoi opasnosti

[Forecasting method of road and transport accident rate by potential danger]. Moscow: Novoe znanie Publ., 2015. 327 p. (In Russian)

7. Medres E.E., Golov E.V., Babenko T.I. The factors influencing uniformity of the movement of the motor transport in the conditions of saturated transport streams. Transportnoe delo Rossii [Transport Business of Russia] 2017, no 2, pp. 89–90. (In Russian)

8. Dobromirov V.N., Evtukov S.S., Golov E.V. Organization of safe traffic at pedestrian crossings. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of Civil Engineers]. 2017, no. 6, pp. 265–270. (In Russian)

9. Gudkov V.A., Tret'yakov O.B., Tarnovskii V.N., Gudkov D.V. Ekologicheskaya bezopasnost' shin [Environmental safety of tires]. Electronic resource // KURS.ZNATE. Available at: <http://kurs.znate.ru/docs/index-113485.html?page=2> (accessed 7 March 2018).

10. Bakhirev I.A., Mikhailov A.Yu. Evaluation of Traffic Conditions in City streets. City Planning. 2015, no. 4, pp. 63–68.

11. Prelovskaya E., Levashev A. Modern Approach of Street Space Design: 12th International Conference "Organization and Traffic Safety Management in large cities" (SPbOTSIC-2016, 28-30 September 2016). St. Petersburg, Russia.

12. Torgovo-proizvodstvennaya kompaniya "MEGAPROM" [MEGAPROM Trade and Production Company]. Available at:



<http://www.tdmegaprom.ru/subgroup/transportnye-i-peshehodnye-svetofory-t-1-t-2-p-1-p-2.html>
(accessed 21 April 2017).

13. Stoimost' svetoforov [The cost of traffic lights]. Available at: <http://iteb.spb.ru/products/price>
(accessed 20 May 2018).

14. Optima Servis [Optima Service]. Available at:

<http://www.optimaservis.su/>
(accessed 23 February 2018).

15. Kamery s videofiksatsiei [Cameras with video recording]. Electronic resource]. Available at: <http://urlaw03.ru/business/article/biznes-na-kamerax-videofiksacii> (accessed 26 May 2018).

Критерии авторства

Сосюк Д.И., Скutelник В.В. имеют равные авторские права и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Sosyuk D.I., Skutelnik V.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 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 предоставляется 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 **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 пт, крупный индекс – 7 пт, мелкий индекс – 5 пт, крупный символ – 18 пт, мелкий символ – 12 пт. 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 полутонов, 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 Р 7.05 2008.

Внимание! Публикация статьи является бесплатной.

Стоимость журнала – 500 руб. (без стоимости почтовых расходов).

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», библиотеке Oxford, Directory of Open Access Journals (DOAJ) рассылается в Российскую книжную палату, ВИНТИ РАН, каждой статье присваивается цифровой индификатор DOI.

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-215.

Телефон: **(3952) 40-57-56** – Привалова Галина Петровна, ответственный за выпуск,

(3952) 40-58-57 – редакторы.

Факс: **(3952) 405-100**, e-mail: pgp@istu.edu

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Научный журнал
№ 11 (142) 2018

Редактор И.Н. Акулова
Художественный редактор Е.В. Хохрин
Ответственный за выпуск Г.П. Привалова
Перевод на английский язык В.В. Батицкой
Верстка А.В. Куртовой

Выход в свет 30.11.2018 г. Формат 60х90/8.
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 32.
Тираж 500 экз. Заказ 275. Поз. плана 3н.

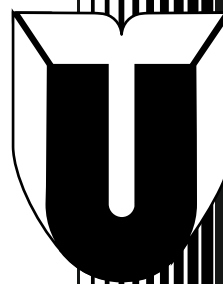
Издание распространяется **бесплатно**

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

