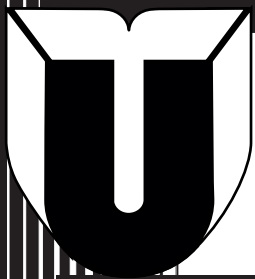


Том 22, № 12
2018

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, № 12

2018

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Том 22, № 12

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

PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Vol. 22, No. 12

2018

Publishers of Irkutsk National Research Technical University

Editorial board

KORNIKOV 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)

BOROVNIKOV 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 founder, publisher and editorial office:
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074
e-mail: pgp@istu.edu

СОДЕРЖАНИЕ

Персоналия

- Профессор Александр Иннокентьевич Промптов: ученый, педагог и гражданин..... 10

Машиностроение и машиноведение

- ❁ Бестужева О.В. Снижение временных затрат на капитальный ремонт мельницы в условиях эксплуатации..... 14
- ❁ Братан С.М., Харченко А.О., Владецкая Е.А. Обеспечение качества деталей при круглом шлифовании в условиях плавучих мастерских..... 21
- ❁ Ким В.А., Якубов Ч.Ф. Диссипативная структура контактно-фрикционного взаимодействия при резании металлов..... 35
- ❁ Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Силантьев С.А., Федонина С.О. Технологическое обеспечение качества и эксплуатационных свойств упрочнением волной деформации..... 46
- ❁ Кольцов В.П., Ле Чи Винь, Стародубцева Д.А. Структура формирования параметров шероховатости поверхности при реализации технологической последовательности «дробеударное формообразование – зачистка»..... 56
- ❁ Кудряшов Е.А., Смирнов И.М. Анализ факторов, вызывающих хрупкое разрушение сменных многогранных пластин при точении поверхностей сложного профиля..... 68
- ❁ Куликов М.Ю., Волков Д.В. Определение оптимальной геометрии дисковой фрезы для операций фрезоточения..... 75
- ❁ Лившиц А.В., Каргапольцев С.К., Филиппенко Н.Г. Энергоэффективное управление высоко-частотной обработкой полимерных материалов..... 86
- ❁ Мокрицкий Б.Я., Серебренникова А.Г. Результаты сравнительного исследования работоспособности режущих инструментов при обработке специализированных нержавеющей сталей..... 96
- ❁ Носов Н.В. Исследование структуры поверхности лопаток газотурбинного двигателя с помощью квазиоптимального корреляционного алгоритма..... 104
- ❁ Свинин В.М., Савилов А.В., Шутенков А.В., Панин М.А. Подавление автоколебаний при токарной обработке программной модуляцией скорости резания системы числового программного управления станка..... 115
- ❁ Янюшкин А.С., Секлетина Л.С., Гартфельдер В.А., Лобанов Д.В. Модель и расчет энергии адгезии контактного взаимодействия инструментального и обрабатываемого материалов..... 125

Информатика, вычислительная техника и управление

- ❁ Федосенков Д.Б., Симинова А.А., Кулаков С.М., Федосенков Б.А. Анализ свойств визуально-графического отображения информации о режимах работы дозирующего оборудования..... 135
- ❁ Фомин М.Б., Кузнецов Е.А., Шорохов С.Г. Формирование метаданных многомерных информационных систем на базе классификационных схем..... 145

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

СОДЕРЖАНИЕ



Энергетика



- Воропай Н.И., Уколова Е.В., Герасимов Д.О., Суслов К.В., Ломбарди П., Комарниcki П.** Исследование мультэнергетического объекта методами имитационного моделирования..... 157
- Константинов Г.Г., Слюнкин Н.П., Федосов Д.С.** Разработка и исследование гибридного автономного источника электроэнергии на базе фотоэлектрической солнечной электростанции и дизеля..... 169
- Петухов Р.А., Сизганова Е.Ю., Сизганов Н.В., Филатов А.Н.** Модель адаптивной системы управления потоком реактивной мощности на границе балансовой принадлежности предприятия и сетевой организации..... 185
- Пленков Э.Р.** Синхронизация векторов токов и напряжений при определении места повреждения на воздушных линиях электропередачи..... 202



Металлургия и материаловедение



- Гутема Е.М., Бажин В.Ю.** Влияние уровня смачиваемости карбидокремниевых частиц магнием в алюминиевых композиционных лигатурах на их механические свойства..... 211
- Чаманова М., Ахмедов Ш.А., Эшов Б.Б., Бадалов А.Б.** Моделирование закономерности изменения температуры и энтальпии плавления интерметаллидов систем алюминий – лантаниды, богатых алюминием..... 221



Транспорт



- Михайлов А.Ю., Попова Е.Л., Гайворонский И.Л.** Анализ методик расчета пропускной способности пересечений в одном уровне..... 231
- Рябов И.М., Чернышов К.В., Поздеев А.В., Мухучев Ш.М., Мухидинов Ю.М.** Разработка методики повышения безопасности автомобиля путем научно обоснованного выбора серии профиля шин при их замене..... 239

Благодарность

- Благодарность рецензентам..... 252

PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Vol. 22, No. 12

2018

CONTENTS

Personalia

- Professor Promptov Alexander Innokentievich: a scientist, educator and citizen.. 10

Mechanical Engineering and Machine Science

- ⊗ **Bestuzheva O.V.** Decreasing time costs of mill overhaul when in operation..... 14
- ⊗ **Bratan S.M., Kharchenko A.O., Vladetskaya E.A.** Part quality assurance at cylindrical grinding in floating workshop conditions..... 21
- ⊗ **Kim V.A., Yakubov C.F.** Dissipative structure of contact-friction interaction at metal cutting..... 35
- ⊗ **Kirichek A.V., Soloviev D.L., Silantiev S.A., Fedonina S.O.** Technological support of quality and operational properties by wave deformation hardening..... 46
- ⊗ **Koltsov V.P., Le Tri Vinh, Starodubtseva D.A.** Formation structure of surface roughness parameters at "shot peen forming – grinding" technological sequence implementation..... 56
- ⊗ **Kudryashov E.A., Smirnov I.M.** Analysis of factors causing brittle fracture of indexable inserts while turning complex profile surfaces..... 68
- ⊗ **Kulikov M.Yu., Volkov D.V.** Determining optimal geometry of the disc-type milling cutter for turn-milling operations..... 75
- ⊗ **Livshits A.V., Kargapol'tsev S.K., Filippenko N.G., Butorin D.V.** Energy efficient control of polymer material high frequency processing..... 86
- ⊗ **Mokritskiy B.Ya., Serebrennikova A.G.** Results of comparative study of cutting tool performance when machining specialized stainless steels..... 96
- ⊗ **Nosov N.V.** Study of gas turbine engine blade surface structure using quasioptimal correlation algorithm..... 104
- ⊗ **Svinin V.M., Saviolov A.V., Shutenkov A.V., Panin M.A.** Damping of self-oscillations at lathe turning by software modulation of CNC machine-tool cutting speed..... 115
- ⊗ **Yanyushkin A.S., Sekletina L.S., Gartfelder V.A., Lobanov D.V.** Model and calculation of adhesion energy of tool and processed material contact interaction..... 125

Information Science, Computer Engineering and Management

- ⊗ **Fedosenkov D.B., Simikova A.A., Kulakov S.M., Fedosenkov B.A.** Feature analysis of visual-graphic representations of information characterizing batching equipment operation modes..... 135
- ⊗ **Fomin M.B., Kuznetsov E.A., Shorokhov S.G.** Classification scheme-based generation of multidimensional information system metadata..... 145

PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

CONTENTS



Power Engineering



- 
Voropai N.I., Ukolova E.V., Gerasimov D.O., Suslov K.V., Lombardi P., Komarnicki P. Study of a multi-power facility by simulation modeling methods... 157
- 
Konstantinov G.G., Krivorotova V. V., Slyunkin N.P., Fedosov D.S. Development and study of hybrid stand-alone electric power source based on solar photovoltaic power station and diesel generator..... 169
- 
Petukhov R.A., Sizganova E.Yu., Sizganov N.V., Filatov A.N. Model of adaptive control system of reactive power flow at the balance affiliation boundary of an enterprise and a grid operator..... 185
- 
Plenkov E.R. Current and voltage phasor synchronization at fault localization in overhead power lines..... 202



Metallurgy and Materials Science



- 
Gutema E.M., Bazhin V.Yu. Effect of silicon carbide particles wetting ability by magnesium in aluminum composite ligatures on their mechanical properties... 211
- 
Chamanova M., Akhmedov Sh.A., Eshov B.B., Badalov A.B. Modeling variation regularity of melting temperature and enthalpy of intermetallic compounds of Aluminium – lanthanides systems, rich in aluminum..... 221



Transport

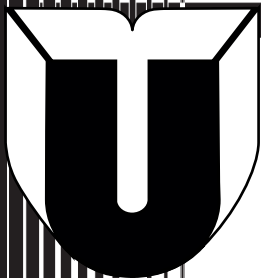


- 
Mikhailov A.Y., Popova E.L., Gaivoronskiy I.L. Analysis of calculation methods of traffic capacity of intersections at grade..... 239
- 
Novikov V.V., Pozdeev A.V., Chumakov D.A. Experimental investigation of the effect of some additional volume and a damping device on free damped oscillations of diaphragm air springs..... 231

Thanks

- Thanks to reviewers..... 252





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.

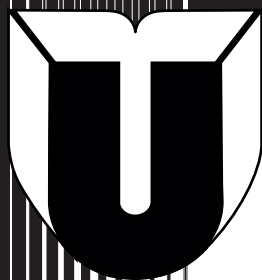
«Вестник ИрГТУ» включен в международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», в базу данных EBSCO, в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлен в электронной библиотеке «Cyberleninka», библиотеке Oxford, Directory of Open Access Journals (DOAJ) рассылается в Российскую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

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
- Power Engineering
- Metallurgy and Materials Science

Editorial Board



**ПРОФЕССОР АЛЕКСАНДР ИННОКЕНТЬЕВИЧ ПРОМПТОВ:
УЧЕНЫЙ, ПЕДАГОГ И ГРАЖДАНИН**

Профессору Промптову Александру Иннокентьевичу, заслуженному деятелю науки и техники Российской Федерации, одному из первых получивших это почетное звание в Иркутском политехническом институте, ныне Иркутском национальном исследовательском техническом университете, исполнилось в этом году 90 лет.

**PROFESSOR PROMPTOV ALEXANDER INNOKENTIEVICH:
A SCIENTIST, EDUCATOR AND CITIZEN**

Professor A.I. Promptov: a scientist, a teacher and a citizen Professor Promptov Alexander Innokentievich, the Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, one of the first to receive this honorary title at the Irkutsk Polytechnic Institute, now the Irkutsk National Research Technical University celebrates his 90th anniversary this year.



А.И. Промптов является родоначальником научной школы в области физики резания металлов и сопутствующих технологий. Труды Александра Иннокентьевича получили признание среди отечественных и зарубежных ученых и практиков. Справочники, подготовленные на основе исследований, выполненных под его руководством в 70–80 гг. прошлого века, и по сей день актуальны и используются специалистами-машиностроителями.

А.И. Промптов обладает бесценным даром и умением объединять людей для достижения поставленной цели. Это позволило ему воспитать целую плеяду последователей, среди них доктора технических наук, профессора – Кольцов Владимир Петрович, Макаров Ростислав Всеволодович, Замашиков Юрий Иванович, Каргопольцев Сергей Константинович, Пашков Андрей Евгеньевич, Свинин Валерий Михайлович и еще более 20 кандидатов наук.

Профессор А.И. Промптов является одним из основателей кафедр машиностроительного профиля в нашем университете. Благодаря его убежденности и логике при принятии решений, в иркутском техническом вузе были организованы кафедры металлорежущих станков и инструментов, самолетостроения, машин и аппаратов химических производств, роботов и робототехнических систем, оборудования и автоматизации машиностроения; организована подготовка специалистов в области технологии машиностроения и автоматизации машиностроительных производств; созданы и оснащены учебные и научно-исследовательские лаборатории.

Александр Иннокентьевич Промптов – коренной иркутянин, он родился 8 сентября 1928 г. в Иркутске, в семье хирургов. После окончания школы решил связать свою судьбу с профессией, далекой от медицины. В 1944 г. поступил в Иркутский горно-металлургический институт на специальность «Горная электромеханика», решив выбрать чисто горняцкую профессию, связанную с разработкой месторождений полезных ископаемых. В военные и послевоенные годы страна очень нуждалась в специалистах такого профиля. По

рассказам Александра Иннокентьевича, в институте, в студенческих группах вместе с бывшими школьниками учились и люди, испытывавшие ужасы войны и демобилизовавшиеся по ранению. Они были взрослее и опытнее. Уже в те годы Александр Промптов проявил незаурядные способности в освоении знаний и приобретении практических навыков. Некоторое время он был единственным в институте Сталинским стипендиатом. Такой стипендии удостаивались студенты, обучавшиеся на «отлично» и принимавшие участие в научной и общественной жизни.

В годы Великой Отечественной войны многие предприятия были эвакуированы из центральной части страны в ее восточные регионы. Развивались и созданные ранее в городах в довоенное время заводы и фабрики. В Иркутске в крупные предприятия превратились заводы тяжелого машиностроения – им. Куйбышева, авиационный, радиоприемников, карданных валов и многие другие, работавшие на Победу и восстановление разрушенной страны. В подобной ситуации оказались многие города Сибири и Дальнего Востока. Дефицит квалифицированных кадров ощущался во всех отраслях промышленности, особенно в машиностроении, как одной из основных отраслей экономики страны. По инициативе руководства завода тяжелого машиностроения Иркутской области в Иркутском горнометаллургическом институте в 1948 г. по решению Правительства страны начали подготовку инженеров по специальности «Технология машиностроения». Первый выпуск по плану должен был состояться уже в 1949 г. В ИГМИ было решено обучать новой профессии 16 будущих горных электромехаников, в это число попал и студент Александр Промптов. Обучение проходило по ускоренной программе на основе знаний, полученных студентами при подготовке по образовательной программе горных электромехаников. В подготовке будущих выпускников-машиностроителей приняли участие преподаватели Н.А. Гарбуз, В.М. Махнев, А.Л. Пискунов, работники предприятий, имевшие большой практический опыт работы. Об этих профессионалах Александр

Иннокентьевич всегда отзывается с глубоким уважением и теплотой.

Получив диплом о высшем образовании по специальности «Технология машиностроения», он стал одним из первых выпускников этой специальности в нашем университете. Обладая глубокими знаниями, приобретенными во время учебы, Александр Иннокентьевич после окончания института поступил в аспирантуру. В этот период он успешно совмещал научную деятельность с работой на кафедре электротехники. В 1954 г. защитил диссертацию с присвоением степени кандидата технических наук. А через год его назначили деканом вечернего факультета – третьего в институте наряду с существовавшими в то время – горным и металлургическим. Факультет был образован из подразделений института, которые свою деятельность вели в учебно-консультационных пунктах на территории завода тяжелого машиностроения и авиационного завода. Через семь лет Александр Иннокентьевич Промптов стал проректором по учебной работе. Находясь на этой должности, он внес огромный вклад в строительство института и развитие его инфраструктуры, преобразование института в научно-образовательный центр технической направленности. При участии Александра Иннокентьевича, работавшего под началом легендарного ректора нашего университета – Игошина Анатолия Андреевича, было построено и сдано в эксплуатацию девять учебных корпусов на левом берегу Ангары и четыре общежития Студгородка. Необычный проект одного из самых больших вузов за Уралом нашей огромной страны начал воплощаться в жизнь. В эти годы А.И. Промптову было поручено курировать процесс создания филиала Иркутского политехнического института в Братске, городе энергетиков и металлургов.

С 1963 г. А.И. Промптов совмещал обязанности проректора с работой заведующего кафедрой технологии машиностроения, металлорежущих станков и инструментов. После ее реорганизации в 1965 г. возглавил кафедру металлорежущих станков и инструментов. Как заведующий кафедрой, к исполнению своих обязанностей

он относился с огромной ответственностью и никому другому не порекомендовал их. Это касалось и формирования учебных планов, и организации учебного процесса, и распределения нагрузки, и обеспечения качества учебного процесса и, естественно, организации и проведения сотрудниками кафедры научных исследований. В эти годы наш вуз стремительно развивался: появлялись новые факультеты, увеличивалось количество специальностей, по которым в институте начали вести подготовку будущих инженеров, количество студентов, принимаемых на первый курс, также увеличивалось. На некоторых, особенно востребованных специальностях, насчитывалось до пяти академических групп по 25 студентов в каждой. Развивалась не только очная форма обучения, но и заочная, очно-заочная. Увеличивались объемы научно-исследовательских работ, при этом объемы заказов на их выполнение превышали плановые, что в некоторых случаях не позволяло заключать договоры, тематика которых не соответствовала приоритетным направлениям.

В 1983 г. Александр Иннокентьевич был назначен на должность проректора по науке. Сергей Борисович Леонов, ректор, руководитель огромного коллектива, отличавшийся прозорливостью и огромным потенциалом организатора, доверил этот самый сложный участок работы профессору Промптову. В этой должности Александр Иннокентьевич проработал до 1991 г. В Иркутском политехническом институте в эти годы были созданы и финансировались отраслевые лаборатории, проводились научные исследования, организовывались и действовали новые диссертационные советы, защищались докторские и кандидатские диссертации. Председателем одного из диссертационных советов, принимавшим к защите работы по двум научным специальностям, многие годы был профессор А.И. Промптов.

Какие бы должности профессор А.И. Промптов не занимал, он никогда не прерывал преподавательскую деятельность: читал студентам лекции по таким дисциплинам как «Теория резания», «Про-

ектирование металлорежущего инструмента», руководил курсовым и дипломным проектированием, принимал участие в работе государственных экзаменационных комиссий. При проведении занятий Александр Иннокентьевич всегда использовал реальные образцы современного инструмента. Многие помнят, как профессор шел на занятия со студентами по длинным коридорам университета со своим тяжелым, «волшебным» деревянным чемоданчиком, заполненным сверлами и фрезами, развертками, зенкерами и другими универсальными и экзотическими премудростями, используемыми в механообработке.

Обладая глубочайшими знаниями в области теории резания металлов, проектирования и применения металлорежущего инструмента, Александр Иннокентьевич старался передать эти знания и опыт молодым людям, избравшим профессию технолога-машиностроителя. Он умело вовлекал студентов в волшебный мир научных исследований. Многие из них связали свою жизнь с научно-педагогической деятельностью, с работой в научно-исследовательских институтах и лабораториях предприятий, стали изобретателями и рационализаторами. Александр Иннокентьевич и сегодня является консультантом и методистом для молодых ученых, а также своих коллег в вопросах, относящихся к теории механической обработки материалов, проведения фундаментальных, прикладных и экспериментальных исследований. Методические разработки А.И. Промптова, его монографии и сегодня не потеряли актуальности, и многие годы используются преподавателями и студентами при изучении азов технологии машиностроения, являясь основой при освоении дисциплин профессионального блока для будущих технологов и конструкторов.

Александр Иннокентьевич Промптов – талантливый ученый, преподаватель и грамотный руководитель, преданно служивший родному вузу более 50 лет, вклад которого в науку и образование невозможно переоценить. Профессор Промптов – профессионал, обладающий самыми лучшими качествами педагога: требователен, обладает широкой эрудицией, кристальной честностью и чутким отношением к окружающим. Отдельного внимания заслуживает отношение Александра Иннокентьевича к студентам. Даже к самым юным воспитанникам он обращался исключительно на «Вы».

Полностью поддерживаю мнение профессора А.Е. Пашкова: «Такие учителя, как Александр Иннокентьевич, встречаются один раз в жизни. Он служит для многих коллег примером энергичного, работоспособного человека с высочайшим уровнем интеллекта. Это строгий, не идущий на компромиссы, но одновременно, всегда справедливый руководитель и коллега».

Профессор Б.Б. Пономарев

В 1997 г. А.И. Промптов принял активное участие в организации и систематическом издании в ИРНИТУ научного журнала «Вестник Иркутского государственного технического университета» и до 2015 г. был бессменным членом редколлегии издания. В связи с этим именно на страницах данного журнала сегодня публикуется подборка статей его учеников, последователей и коллег по многолетним исследованиям в области физики резания металлов и сопутствующих технологий.

Редколлегия



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.926

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-12-14-20>

СНИЖЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ ЗАТРАТ НА КАПИТАЛЬНЫЙ РЕМОНТ МЕЛЬНИЦЫ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

© О.В. Бестужева¹

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
308015, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Победы, 85.

РЕЗЮМЕ: В строительной промышленности для измельчения сырья применяют шаровые мельницы. При эксплуатации опорные узлы оборудования цапфы приобретают различные поверхностные повреждения – дефекты формы. Для восстановления цилиндричности рабочей поверхности цапфы применяют приставной станок, который позволяет производить обработку на месте эксплуатации. Произведены экспериментальные исследования, доказывающие эффективность технологии восстановления цапфы. Рассчитано время на обработку цапфы в условиях эксплуатации. Доказано сокращение времени простоя мельницы во время капитального ремонта на 48 ч. Снижение временных затрат на капитальный ремонт шаровой мельницы осуществляется с применением технологии восстановления цапфы приставным станком в условиях эксплуатации. Прodelана работа при помощи аналитических и экспериментальных методов исследования. Разработан график капитального ремонта шаровой мельницы и утвержден на предприятии. Время простоя шаровой мельницы во время капитального ремонта оборудования снизилось на 48 ч. в сравнении со временем капитального ремонта мельницы до внедрения разработанного способа восстановления цапфы мельницы.

Ключевые слова: снижение временных затрат, капитальный ремонт, шаровые мельницы, восстановление цапфы, приставной станок, условия эксплуатации.

Информация о статье: Дата поступления 17 октября 2018 г.; дата принятия к печати 16 ноября 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2018 г.

Для цитирования: Бестужева О.В. Снижение временных затрат на капитальный ремонт мельницы в условиях эксплуатации. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(12):14–20. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-14-20

DECREASING TIME COSTS OF MILL OVERHAUL WHEN IN OPERATION

Olga V. Bestuzheva

Belgorod National Research University,
85, Pobeda St., Belgorod 308015, Russian Federation

ABSTRACT: Construction industry uses ball mills for raw material grinding. When in operation mounting groups of axles receive various surface damages – shape defects. Roundness of the axle working surface is restored with the use of the auxiliary machine-tool that enables on-site machining. Conducted experimental studies have proved the effectiveness of the axle recovery technology. The time required for axle processing under operation conditions has been calculated. It is proved that mill downtime during the equipment overhaul will reduce by 48 hours. The time spent on the ball mill overhaul is decreased through the use of the technology of axle restoration by an auxiliary machine-tool in operating conditions. The study uses analytical and experimental research methods. The schedule of the ball mill overhaul is developed and approved at the enterprise. The downtime of the ball mill during equipment overhaul has decreased by 48 hours in comparison with the time of ball mill overhaul before the introduction of the developed method of mill axle restoration.

Keywords: time cost reduction, overhaul, ball mills, axle repair, auxiliary machine-tool, operation conditions

¹Бестужева Ольга Васильевна, старший преподаватель кафедры прикладной информатики и информационных технологий, e-mail: bestuzheva@bsu.edu.ru

Olga V. Bestuzheva, Senior Lecturer of the Department of Applied Informatics and Information Technologies, e-mail: bestuzheva@bsu.edu.ru



Information about the article: Received October 17, 2018; accepted for publication November 16, 2018; available online December 28, 2018.

For citation: O.V. Bestuzheva Decreasing time costs of mill overhaul when in operation. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018; 22(12):pp. 14–20. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-14-20

Введение

В промышленности для измельчения сырья строительных материалов применяют помольное оборудование вращающегося типа. Шаровые мельницы в процессе эксплуатации приобретают дефекты однородного типа – это износ цапф опорных узлов, подшипников, трещины корпуса [1]. Последние часто устраняют в эксплуатирующей организации, а восстановить рабочую цилиндрическую поверхность цапфы в условиях эксплуатации возможно только с применением необходимого оборудования [2].

Демонтаж цельнолитой цапфы с крышкой и ее транспортировка на промыш-

ленное предприятие для ремонта приводят к длительным простоям оборудования [3]. В некоторых случаях необходимый ремонт входных и выходных цапф производят ручными машинками, после обработки осуществляют наплавку и далее обработанную поверхность зачищают [4, 5]. Данная технология не обеспечивает круглость цилиндрической поверхности цапфы, в результате чего появляется дисбаланс [6].

График ремонта шаровой мельницы $\varnothing 3,2 \times 15$ м, представленный на рис. 1, доказывает длительный срок простоя мельницы в период капитального ремонта – 384 ч., из

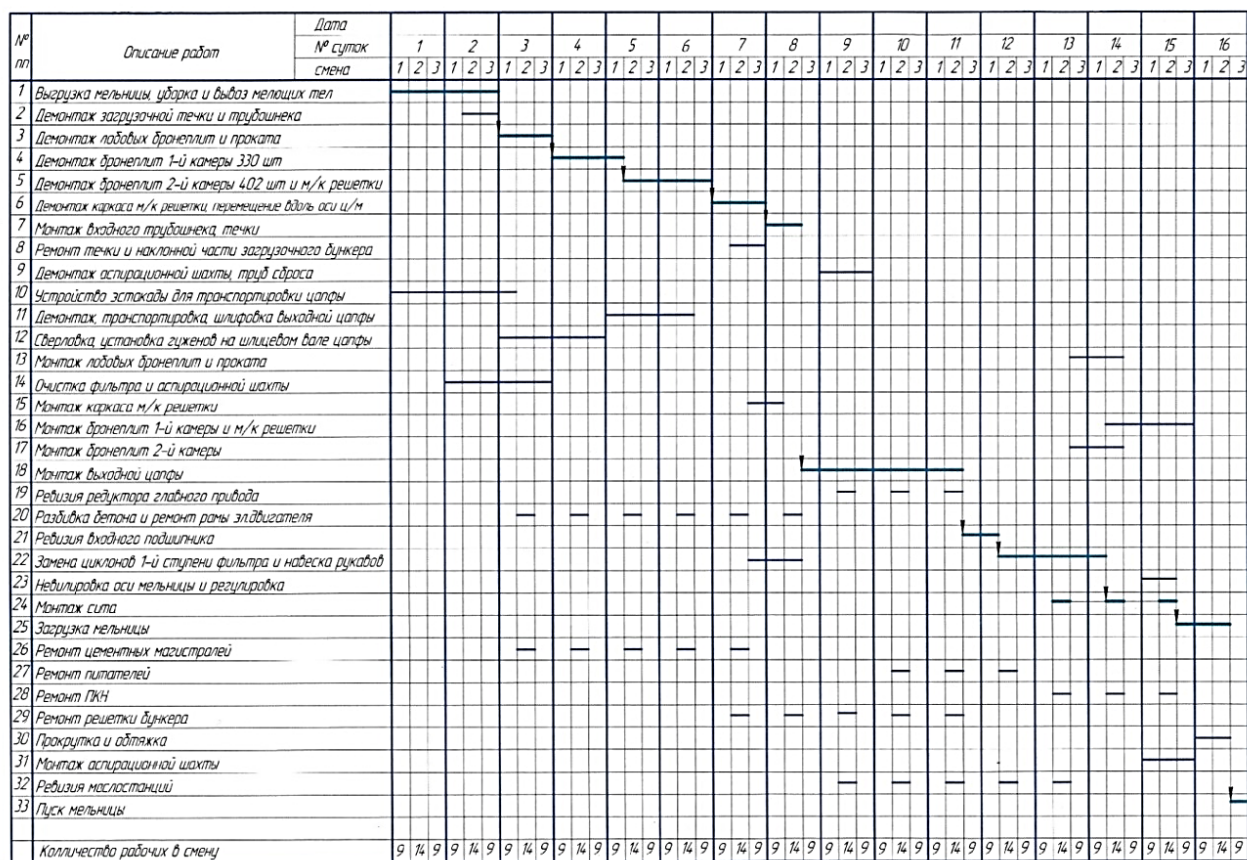


Рис. 1. График капитального ремонта шаровой мельницы без применения приставного станка

Fig. 1. Schedule of ball mill overhaul without the use of an auxiliary machine-tool



которых на восстановление изношенной цапфы отводится 112 ч. Потеря выпускаемого цемента за это время составляет 5 600 т цемента².

Сокращение времени для восстановления цапфы возможно при ее обработке приставным станком на месте эксплуатации [7].

Способ восстановления цапфы мельницы в условиях предприятия

Разработан способ восстановления цапфы мельницы, который позволяет производить обработку на месте эксплуатации с применением приставного станка, изготовленный и в дальнейшем использованный как промышленный образец [8]. Конструкция приставного станка представлена на рис. 2.

Установка цапфы производится буртами на ролики, расположенные на плунжере, благодаря гидроцилиндрам фиксируется ее определенное положение. Обработка поверхности цапфы осуществляется при вращении за счет вспомогательного привода. Точность и качество обработанной поверхности зависит от неизменного поло-

жения оси цапфы относительно ротационного резца, расположенного на стойке. Достигается высокая точность следующим образом [9]: в случае дефекта на поверхности цапфы в виде выступа, проходя по одному из роликов, добавляется усилие, которое воздействует на плунжер, опуская его вниз и выдавливая масло к гидроцилиндрам и гидроаккумулятору. В результате чего на остальных роликах появляется дополнительное усилие, которое удерживает от перемещения цапфы. При этом во время обработки сохраняется неизменное положение ротационного резца относительно оси цапфы.

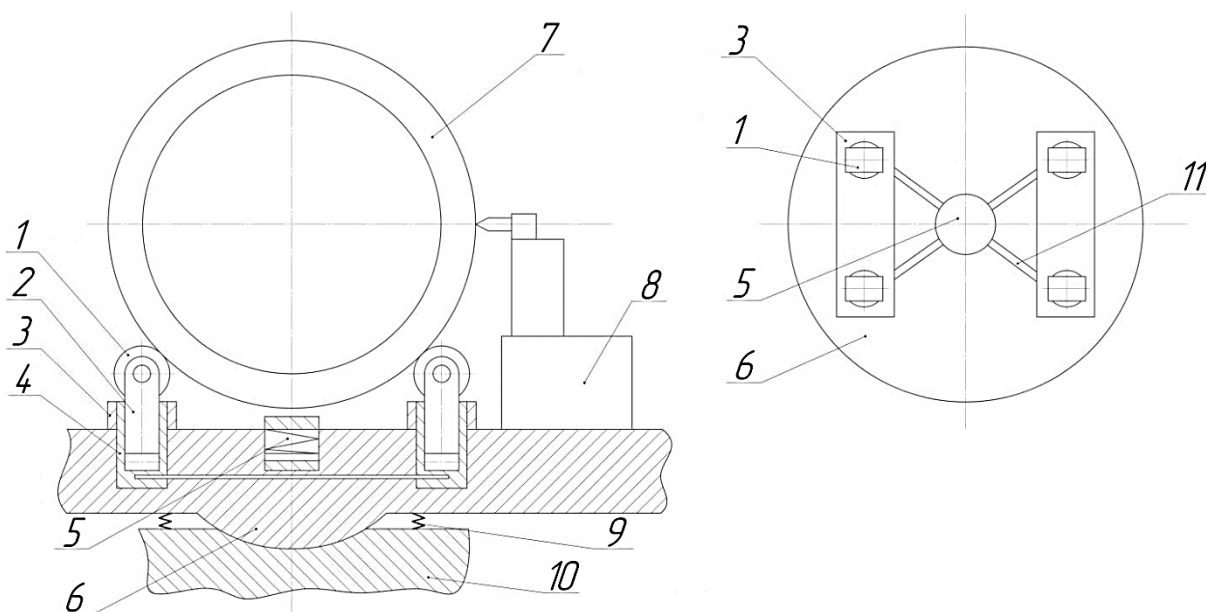


Рис. 2. Конструкция станка для обработки цапф: 1 – ролики, 2 – подвижные плунжеры, 3 – опора, 4 – гидроцилиндры, 5 – гидроаккумулятор, 6 – подвижный корпус, 7 – бурты цапфы, 8 – стойка с режущим инструментом, 9 – пружины, 10 – сферическая опора, 11 – маслоканалы
Fig. 2. Design of the machine for machining of axles: 1 – rollers, 2 – movable plungers, 3 – support, 4 – hydraulic cylinders, 5 – hydraulic accumulator, 6 – movable housing, 7 – axle rims, 8 – stand with a cutting tool, 9 – springs, 10 – spherical support, 11 – oil channels

²Федеральные единичные расценки на капитальный ремонт оборудования. ФЕРмр-2001. Общие положения. Приложения. М.: ФГУ ФЦЦС, 2009. 12 с. / Federal unit costs for equipment overhaul. FERmr-2001. General provisions. Appendix. М.: FSI Federal Center for Pricing in the Construction and Building Materials Industry, 2009. 12p.



В случае дефекта на поверхности в виде углубления уменьшается нагрузка на ролик. Плунжер перемещается вверх за счет поступления масла из гидроаккумулятора в гидроцилиндр ролика, обеспечивая необходимую нагрузку на ролик. Пружины, установленные по периметру опоры, устраняют колебания корпуса и обеспечивают неизменное положение оси вращения цапфы относительно суппорта, исключая поворот сферического основания.

На предприятии цементной промышленности проведены экспериментальные испытания с применением разработанного приставного станка при восстановлении цапфы во время капитального ремонта мельницы [10, 11]. Восстановление поверхности вращения разгрузочной цапфы с применением разработанного приставного станка производилось на цементной мельнице Ø3,2x15 м на ЗАО «Белгородский цемент (ЕВРОЦЕМЕНТгрупп)». Получены результаты промышленных испытаний, приведенные в таблице.

Расчет времени, затраченного на обработку при восстановлении цилиндричности разгрузочной цапфы мельницы, с применением приставного станка, в условиях эксплуатации производится традиционным способом [12]. При этом исходные данные расчета времени обработки для мельницы Ø3,2x15 м определены следующие:

- длина обработки $L = 920$ мм;
- диаметр обработанной поверхности $d = 1400$ мм;
- частота вращения цапфы $n = 2,5$ об/мин;
- глубина резания $t = 2$ мм;
- продольная подача на один оборот мельницы $S = 1$ мм/об [13].

Расчет основного технологического времени, затраченного на выполнение операции, определяется по формуле [14]:

$$T_{\text{осн}} = \frac{L}{n \cdot S} i,$$

где L – длина обработки, мм; n – частота вращения цапфы, об/мин; S – продольная подача на один оборот мельницы, мм; i – число проходов:

$$T_{\text{осн}} = \frac{920}{2,5 \cdot 2} \cdot 1 = 184 \text{ мин.}$$

Расчет вспомогательного времени для выполнения приемов, обеспечивающих основную работу, состоит из составляющих технологических операций при обработке поверхности вращения цапфы мельницы:

- время установки цапфы на опорный узел разработанного приставного станка;
- время включения/выключения вспомогательного привода;
- время установки ротационного резца относительно оси цапфы;
- время измерений основных параметров поверхности цапфы;
- время контроля обработанной поверхности цапфы.

Следовательно, вспомогательное время определяется как:

$$T_{\text{в}} = t_{\text{уст}} + t_{\text{вспом.пр.}} + t_{\text{инстр}} + t_{\text{изм.}} + t_{\text{контр.}} = 63 \text{ мин.}$$

Исходя из этого, оперативное время на обработку:

$$T_{\text{оп}} = 184 + 63 = 247 \text{ мин.}$$

Полученные результаты эксперимента Obtained results of the experiment

Размер цапфы, мм	№ сечения				
	1	2	3	4	5
$1400_{-0,41}^{+0,21}$	$1396_{-0,23}$	$1396_{-0,25}$	$1396_{-0,26}$	$1396_{-0,28}$	$1396_{-0,28}$



Для определения времени на обработку цапфы шаровой мельницы:

$$T_{\text{ш}} = T_{\text{оп}} \left(1 + \frac{a_{\text{обс}} + a_{\text{о.л.н.}}}{100} \right),$$

где $a_{\text{обс}}$ – время обслуживания рабочего места, $a_{\text{обс}} = 0,03 T_{\text{оп}}$; $a_{\text{о.л.н.}}$ – время на личные надобности и отдых, $a_{\text{о.л.н.}} = 0,04 T_{\text{оп}}$:

$$\begin{aligned} T_{\text{ш}} &= T_{\text{оп}} \left(1 + \frac{a_{\text{обс}} + a_{\text{о.л.н.}}}{100} \right) = \\ &= 247 \cdot \left(1 + \frac{3+4}{100} \right) = 265 \text{ мин.} \end{aligned}$$

Определение времени, затрачиваемого на обработку цапфы в условиях эксплуатации с применением приставного станка позволяет сделать вывод о том, что

восстановление цапфы при капитальном ремонте мельницы производится в одну смену [15].

Разработан график капитального ремонта шаровой мельницы Ø3,2x15 м и утвержден на ЗАО «Белгородский цемент (ЕВРОЦЕМЕНТгрупп)» (рис. 3). Время простоя шаровой мельницы во время капитального ремонта оборудования снизилось на 48 ч. в сравнении со временем капитального ремонта мельницы до внедрения разработанного способа восстановления цапфы мельницы (рис. 1).

Способ обработки рабочих поверхностей вращения цапфы мельницы позволяет проводить технологический процесс восстановления без демонтажа цапф на месте эксплуатации мельницы при помощи приставного станка [16, 17].

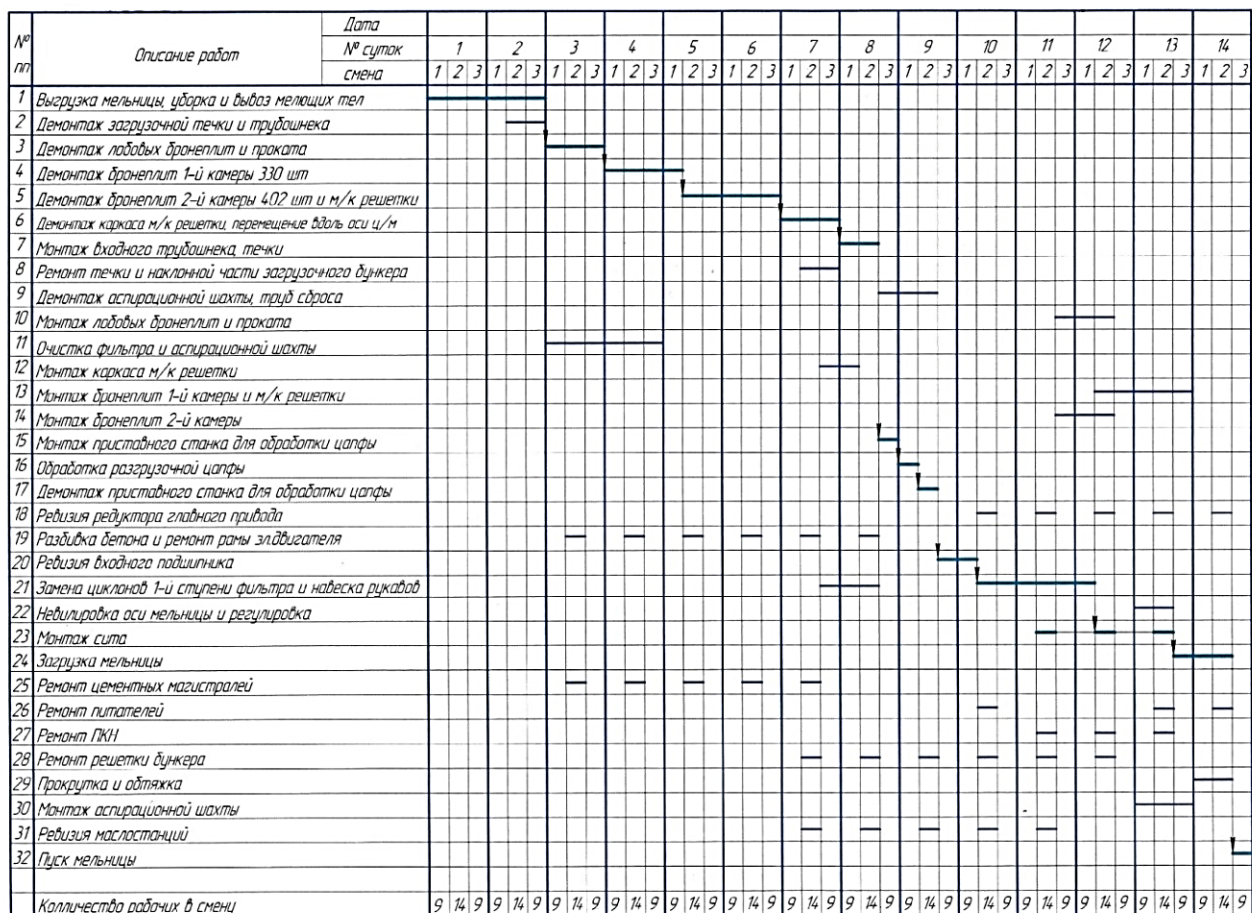


Рис. 3. График капитального ремонта шаровой мельницы с применением приставного станка
Fig. 3. Schedule of ball mill overhaul with the use of an auxiliary machine-tool



Заключение

Промышленные испытания, проведенные на предприятии, доказывают, что данный способ восстановления цапфы мельницы с применением приставного станка в условиях эксплуатации обеспечи-

вает требуемую точность поверхности цапфы. Данный способ восстановления цапфы позволяет сократить простой мельницы во время капитального ремонта на 48 ч.

Библиографический список

1. Маркова О.В., Федоренко М.А. Исследование вибраций в системах вращающихся крупногабаритных мельничных агрегатов // Международная научно-практическая конференция «Наука и технологии: шаг в будущее»: сб. статей Междунар. науч.-практ. конф. (г. Прага, Чехия, 15 ноября 2014 г.). Чехия, 2014. С. 25–29.
2. Ревенко Н.Ф., Семенов В.В., Схиртладзе А.Г. Экономика ремонта и обслуживания оборудования предприятий. М.: ООО «ТНТ», 2012. 456 с.
3. Рудик Ф.Я., Юдаев Н.В., Буйлов В.Н. Монтаж, эксплуатация и ремонт оборудования перерабатывающих предприятий. М.: ГИОРД, 2008. 352 с.
4. Долгополов Б.П., Доценко Г.Н., Зорин В.А. [и др.] Технология машиностроения, производство и ремонт подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин. М.: Академия, 2010. 576 с.
5. Иванов Н.А., Матерухин К.В. Организация процесса технического обслуживания и ремонта оборудования для обеспечения равномерной работы предприятия строительной индустрии // Научное обозрение. 2015. № 13. С. 414–417.
6. Малышева А.А., Санина Т.М. К вопросу ремонта шаровых мельниц // Юность и знания – гарантия успеха: сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. конф. (г. Курск, 17–18 декабря 2014 г.). Курск, 2014. С. 219–222.
7. Бестужева О.В., Федоренко М.А., Бондаренко Ю.А. Экспериментальное исследование восстановления поверхности вращения крупногабаритных деталей промышленного оборудования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 11. С. 122–127.
8. 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.
9. Бестужева О.В., Богданов В.С., Бондаренко Ю.А. Станок для обработки цапф помольных мельниц // Наука и инновации в современных условиях: сб. статей Междунар. науч.-практ. конф. (г. Екатеринбург, 18 декабря 2016 г.). Екатеринбург, 2016. С. 28–30.
10. Акулович Л.М., Шелег В.К. Основы автоматизированного проектирования технологических процессов в машиностроении. М.: Инфра-М, 2016. 488 с.
11. Управление качеством продукции машиностроения. М.: Машиностроение, 2010. 416 с.
12. Режимы резания металлов: справочник. М.: Машиностроение, 1972. 408 с.
13. Справочник технолога-машиностроителя. М.: Машиностроение, 1986. 493 с.
14. Морозов И.М., Гузев И.И. Техническое нормирование операций механической обработки деталей. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2003. 167 с.
15. Mamedov E.E. Qualimetric quality assessment of construction equipment maintenance. Components of Scientific and Technological Progress. 2016. № 2 (28). С. 6–8.
16. Fedorenko M.A., Markova O.V. The study of vibrations in rotating systems, large-sized milling units // Nauka and studia. 2015. No. 11. С. 84–87.
17. Федоренко М.А., Бондаренко Ю.А., Погонин А.А. Восстановление цилиндрической формы при различных видах износа крупногабаритных вращающихся деталей // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 9. С. 130–136.

References

1. Markova O.V., Fedorenko M.A. *Issledovanie vibracij v sistemah vra-shchayushchihsya krupnogabaritnyh mel'nichnyh agregatov* [Vibration study in the systems of large-size milling units]. *Sbornik statej mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii "Nauka i tekhnologii: shag v budushchee"* [Collection of articles of the International scientific and practical Conference "Science and Technologies: a step into the future", Prague, Czech Republic, 15 November 2014]. Czech Republic, 2014, pp. 25–29.
2. Revenko N.F., Semenov V.V., Skhirtladze A.G. *Ekonomika remonta i ob-sluzhivaniya oborudovaniya predpriyatij* [Economy of repair and maintenance of enterprise equipment]. Moscow: «TNT» LLC, 2012, 456 p. (In Russian)
3. Rudik F.Ya., Yudaev N.V., Bujlov V.N. *Montazh, ekspluatatsiya i remont oborudovaniya pererabatyvayushchih predpriyatij* [Installation, operation and repair of processing enterprise equipment]. Moscow: GIORД Publ., 2008, 352 p. (In Russian)
4. Dolgoplov B.P., Docenko G.N., Zorin V.A. [et al.] *Tekhnologiya mashinostroeniya, proizvodstvo i remont pod'emno-transportnyh, stroitel'nyh i dorozhnyh mashin* [Technology of mechanical engineering, production and



repair of lifting and transport, construction and road machinery]. Moscow: Akademiya Publ., 2010, 576 p. (In Russian)

5. Ivanov N.A., Materuhin K.V. Organization of the process of technical maintenance and repairs of the equipment for ensuring the faultless operation of a construction industry enterprise. *Nauchnoe obozrenie* [Science review], 2015, no. 13, pp. 414–417. (In Russian)

6. Malysheva A.A., Sanina T.M. *K voprosu remonta sharovykh mel'nic* [To the question of ball mill repair]. *Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii "Yunost' i znaniya – garantiya uspekha"* [Collection of scientific articles of International scientific and technical conference "Youth and Knowledge – a guarantee of success", Kursk, 17–18 December 2014]. Kursk, 2014, pp. 219–222. (In Russian)

7. 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 tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova* [Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov], 2016, no. 11, pp. 122–127. (In Russian)

8. Bestuzheva O.V., Bondarenko Yu.A., Fedorenko M.A., Lipchanskaya Yu.G. *Stanok dlya obrabotki capf pomol'nykh mel'nic* [Machine-tool for processing grinding mill axles]. Patent RF, no. 166615, 2016.

9. Bestuzheva O.V., Bogdanov V.S., Bondarenko Yu.A. *Stanok dlya obrabotki capf pomol'nykh mel'nic* [Machine-tool for processing grinding mill axles]. *Sbornik statej mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Nauka i innovacii v sovremennykh usloviyakh"* [Collection of articles of international scientific and practical conference "Science and Innovations in Modern Conditions", Ekaterinburg, 18 December 2016]. Ekaterinburg, 2016,

pp. 28–30. (In Russian)

10. Akulovich L.M., Sheleg V.K. *Osnovy avtomatizirovannogo proektirovaniya tekhnologicheskikh processov v mashinostroenii* [Fundamentals of computer-aided design of technological processes in mechanical engineering]. Moscow: Infra-M Publ., 2016, 488 p. (In Russian)

11. *Upravlenie kachestvom produkcii mashinostroeniya* [Quality management of mechanical engineering products]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2010, 416 p. (In Russian)

12. *Rezhimy rezaniya metallov: spravochnik*. [Metal cutting modes: a reference book]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1972, 408 p. (In Russian)

13. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitel'ya* [Handbook of technologists and mechanical engineers]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1986, 493 p. (In Russian)

14. Morozov I.M., Guzeev I.I. *Tekhnicheskoe normirovanie operacij mekhanicheskoy obrabotki detalej* [Technical rate setting of machining operations]. Chelyabinsk: YuUrGU Publ., 2003, 167 p. (In Russian)

15. Mamedov E.E. Qualimetric quality assessment of construction equipment maintenance. *Components of Scientific and Technological Progress*. 2016, no. 2 (28), pp. 6–8.

16. Fedorenko M.A., Markova O.V. The study of vibrations in rotating systems, large-sized milling units. *Nauka and studia*. 2015, no. 11, pp. 84–87.

17. Fedorenko M.A., Bondarenko Yu.A., Pogonin A.A. *Vosstanovlenie cilin-dricheskoy formy pri razlichnykh vidakh iznosa krupnogabaritnykh vrashchayushchisya detalej* [Restoration of cylindrical shape under different wear types of large-size rotating parts]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova* [Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov], 2017, no. 9, pp. 130–136. (In Russian)

Критерии авторства

Бестужева О.В. самостоятельно провела исследование, проанализировала полученные результаты и подготовила рукопись. Несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Bestuzheva O.V. has conducted the study, analyzed the obtained results and prepared the manuscript for publication. She bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.9-219.1-752

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-12-21-34>

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ ПРИ КРУГЛОМ ШЛИФОВАНИИ В УСЛОВИЯХ ПЛАВУЧИХ МАСТЕРСКИХ

© С.М. Братан¹, А.О. Харченко², Е.А. Владецкая³

Севастопольский государственный университет,
299053, Российская Федерация, г. Севастополь, ул. Университетская, 33.

РЕЗЮМЕ: В данной работе рассмотрены результаты лабораторных исследований процесса шлифовальной обработки с учетом оценки качества поверхностей шеек валов, при возмущающих вибрационных воздействиях на оборудование внешних сил, являющихся следствием морского волнения, а также соседнего работающего оборудования в условиях плавучей мастерской. Целью является выработка практических рекомендаций по повышению качества шлифования деталей в условиях плавучих мастерских на основе результатов испытаний новых виброизолирующих устройств. Исследования базируются на основе моделирования взаимодействия инструмента и обрабатываемой заготовки в условиях плавучих мастерских как динамической системы со сложными стационарными и нестационарными вибрационными воздействиями, а также ударными воздействиями от внешнего оборудования и длительного морского волнения через плавучее основание и поверхность палубы. Определены изменения погрешности формы обрабатываемых деталей, шероховатости обрабатываемой поверхности, волнистости поверхностей шеек валов по базовому и достигнутому вариантам с учетом использования новых конструкций эффективных виброизолирующих опор и устройств. Полученные зависимости $\Delta = f(h3\%)$ показывают, что разность величины отклонений, формы поверхностей шеек валов ($\Delta_{max}-\Delta_{min}$), обработанных по базовому варианту больше, чем по достигнутому варианту с виброизолирующими опорами, соответственно, в среднем в 2,3 раза. Зависимости $Ra = f(h3\%)$ отклонений шероховатости для Ra_{max} подтверждают повышение качества при использовании новых виброизолирующих опор в среднем в 1,25 раза. Показатели волнистости $W = f(h3\%)$ для W_{max} и W_z поверхностей шеек валов от внешних воздействий и состояний круглошлифовального станка при этом снижаются в среднем в 1,39 раза. Подтверждена целесообразность использования новой виброзащитной системы станка для решения задач обеспечения динамической стабилизации процесса шлифования на основе создания конструкций эффективных виброизолирующих опор и устройств, упрощающих возможность монтажа и демонтажа технологического оборудования и способствующих повышению качества обработки деталей за счет снижения погрешностей их формы путем уменьшения внешних колебательных воздействий.

Ключевые слова: плавучая мастерская, шлифовальный станок, процесс шлифовальной обработки, погрешность формы, шероховатость поверхности, волнистость, виброизолирующая опора

Информация о статье: Дата поступления 22 октября 2018 г.; дата принятия к печати 23 ноября 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2018 г.

Для цитирования: Братан С.М., Харченко А.О., Владецкая Е.А. Обеспечение качества деталей при круглом шлифовании в условиях плавучих мастерских. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(12):21–34. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-21-34

¹Братан Сергей Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения, e-mail: serg.bratan@gmail.com

Sergey M. Bratan, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Mechanical Engineering Technology, e-mail: serg.bratan@gmail.com

²Харченко Александр Олегович, кандидат технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения, e-mail: khao@list.ru

Alexander O. Kharchenko, Cand. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, e-mail: khao@list.ru

³Владецкая Екатерина Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения, e-mail: vladetska@rambler.ru

Ekaterina A. Vladetskaya, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, e-mail: vladetska@rambler.ru



PART QUALITY ASSURANCE AT CYLINDRICAL GRINDING IN FLOATING WORKSHOP CONDITIONS

Sergey M. Bratan, Alexander O. Kharchenko, Ekaterina A. Vladetskaya

Sevastopol State University,
33, Universitetskaya St., Sevastopol 299053, Russian Federation

ABSTRACT: The paper considers the results of laboratory studies of the grinding process taking into account the quality assessment of the shaft neck surfaces under disturbing vibration effects of external forces on equipment. The external forces result from sea waves and neighboring operating equipment in the conditions of a floating workshop. The purpose of the study is development of practical recommendations for improving the quality of part grinding in the conditions of floating workshops based on the test results of new vibration insulating devices. The studies are based on tool and work-piece interaction simulation in the conditions of floating workshops as a dynamic system with complex stationary and non-stationary vibration effects, as well as shock effects from external equipment and lasting sea confusion through the floating platform and deck surface. Variations of the shape error of the processed parts, roughness of the machined surface, waviness of the shaft neck surfaces are determined according to the basic and achieved variants taking into account the use of new designs of effective vibration insulating mounts and devices. The obtained dependences $\Delta = f(h3\%)$ show that the difference in the deviation value of the shaft neck surface shape ($\Delta_{max}-\Delta_{min}$) processed by the basic variant is larger than when processed by the achieved variant with vibration insulating mounts, respectively, by an average of 2.3 times. The dependences $Ra = f(h3\%)$ of roughness deviations for Ra_{max} confirm the improvement in quality when using new antivibration mounts by an average of 1.25 times. The waviness indices $W = f(h3\%)$ for W_{max} and W_z of shaft neck surfaces dependent on external influences and states of a cylinder grinding machine decrease by an average of 1.39 times. The study has proved the feasibility of using a new machine-tool vibroprotection system for solving the problems of ensuring dynamic stabilization of the grinding process based on the creation of designs of effective vibration insulating supports and devices that simplify the possibility of mounting and dismounting of technological equipment and improving the machining quality of parts by reducing their shape errors through decrease of external vibrational influences.

Keywords: floating workshop, grinding machine, grinding process, shape error, surface roughness, waviness, antivibration support

Information about the article: Received October 22, 2018; accepted for publication November 23, 2018; available online December 28, 2018.

For citation: Bratan S.M., Kharchenko A.O., Vladetskaya E.A. Part quality assurance at cylindrical grinding in floating workshop conditions. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018; 22(12):pp. 21–34. (In Russ.). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-21-34

Введение

Наличие плавучих мастерских характерно для промышленности приморских городов. На их палубах размещены производственные участки, в том числе и механообрабатывающие с широким перечнем станочного оборудования, включая шлифовальные станки. Особенностью эксплуатации указанного оборудования является наличие вибраций, вызванных воздействием на него различных источников, снижающих точность и повышающих шероховатость обрабатываемых поверхностей в ходе технологического процесса [1–10].

Обеспечение качества обработки деталей в условиях плавучих мастерских непосредственно связано с необходимостью уменьшения вынужденных колебаний

станка, передаваемых через поверхность палубы от внешних источников, в том числе и от воздействий внешней среды, в частности волнений водной поверхности.

На участках плавучих мастерских станки устанавливаются на фундаменте, который не обеспечивает достаточной виброизоляции вследствие значительных внешних колебательных воздействий. Указанные воздействия до настоящего времени являются малоизученными, так как их влияние на качество финишной обработки, усложненной колебательными процессами разного уровня, не исследовалось.

В работах [11, 12] рассмотрена динамическая система со сложными стационарными и нестационарными вибрационными



воздействиями, а также ударными воздействиями от внешнего оборудования и с учетом вибраций от морского волнения, передающихся через плавучее основание и поверхность палубы на технологическую систему.

На основе системного подхода предложена структура операции, сформулированы основные положения и методы анализа процесса; определены входные, выходные переменные и параметры состояния каждой из подсистем.

Исследованию процессов шлифования шеек валов с целью определения параметров качества обрабатываемых поверхностей, получаемых при различных уровнях внешних воздействий в производственных условиях (рис. 1) и на экспериментальном стенде (рис. 2) в лаборатории посвящены

работы [13, 14]. На основе морфологического анализа и синтеза структур виброизолирующих устройств построена морфологическая матрица, рассмотрены признаки и характеристики подсистем и элементов, выявлены связи между ними. Синтезированы варианты структур виброизолирующего устройства с учетом существенных признаков и технических требований, определяющих свойства системы. Выполнена структурно-компоновочная оптимизация виброизолирующих устройств. Параметрический синтез, теоретические и экспериментальные исследования реальных конструкций виброизолирующих устройств привели к созданию нового виброизолирующего устройства (рис. 3) станка плавучей мастерской на базе опоры с резинометаллическим и гидравлическим демпферами.

Цель исследования

Цель – выработка практических рекомендаций по повышению качества шлифования деталей в условиях плавучих мастер-

ских на основе результатов испытаний новых виброизолирующих устройств в условиях, аналогичных условиям плавучей мастерской.

Материал и методы исследования

Для определения влияния внешних воздействий на качество обработки при шлифовании использовали лабораторное оборудование (рис. 2) в составе экспериментального стенда, включающего круглошлифовальный станок BUA 16, оснащенный комплексом контрольно-измерительной аппаратуры, а также компрессором 1 (FINI Tiger 245), размещаемым на разном удалении ($B_{k1}, \dots, B_{ki}$) от станка 2, создающим при работе на разных режимах внешние вибрационные воздействия на технологическую систему станка ($fk_1, \dots, fki$), имитирующие внешние возмущения через поверхность пола и фундамент на станину станка, соответствующие воздействиям на станки в ПМ внешней среды (морского волнения) и работающего соседнего оборудования, вызывая вибрации и виброперемещения с амплитудами A_x, A_y, A_z , соответственно, в направ-

лениях его осей координат. Для определения параметров вибраций и амплитуды виброперемещений использовали виброметр 3 «Вибротест-МГ4.01». Проведенный этап имитационного моделирования позволил определить основные условия, при которых возможно проведение шлифовальной обработки на лабораторном оборудовании с получением показателей качества, соответствующих тем или иным условиям внешних воздействий (уровню волнения, работе внешнего оборудования) на круглое шлифование в плавучей мастерской [6, 15–19].

По разработанной методике и при заданных условиях проводили на круглошлифовальном станке обработку поверхностей шеек валов ($d = 26,00^{+0,050}_{-0,025}$ мм) для партий деталей, имитируя для каждой из партий различные уровни волнений и одновременно наличие или отсутствие работаю-



щего внешнего оборудования. Для проведения испытаний на экспериментальном стенде станок установили на виброизолирующие опоры новой конструкции (рис. 4 а, б), а остальное технологическое и контрольно-измерительное оборудование имитировало в лабораторных условиях разные воздействия от морского волнения и состояний станка.

Результаты сравнительных испытаний по показателям вибрационных воздей-

ствий на круглошлифовальный станок при установке на фундамент (базовый вариант) или на виброизолирующие опоры (достигнутый вариант) получены в лабораторных условиях, соответствующих условиям плавучей мастерской. Зависимости частот механических колебаний ($f_{kx}, f_{ky}, f'_{ox}, f'_{oy}$) от состояний круглошлифовального станка и уровня волнения $h_{3\%}$ проиллюстрированы графиками на рис. 5.



Рис. 1. Общий вид рейдовой плавучей мастерской и круглошлифовальный станок на ее механообрабатывающем участке
Fig. 1. General view of the raid floating workshop and a cylindrical grinding machine in workshop machining area

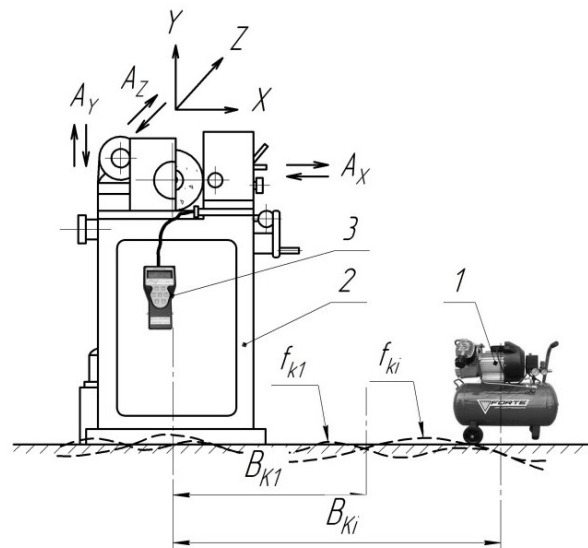


Рис. 2. Схема экспериментального стенда: 1 – компрессор FINI Tiger 245; 2 – станок BUA 16; 3 – виброметр «Вибротест-МГ4.01»
Fig. 2. Scheme of an experimental test bench: 1 – FINI Tiger 245 compressor; 2 – BUA machine-tool 16; 3 – "Vibrotest MG4.01" vibrometer

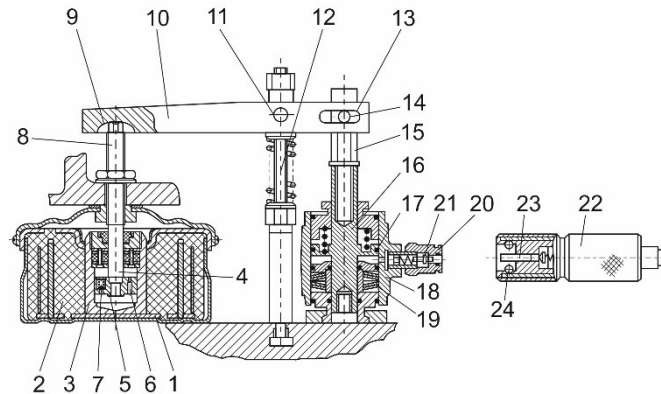


Рис. 3. Общий вид новой конструкции виброизолирующего устройства: 1 – основание; 2 – резиновый элемент; 3 – цилиндр; 4 – шток; 5 – поршень; 6 – калиброванное отверстие; 7 – клапан сжатия; 8 – регулировочный винт; 9 – сферическая поверхность лунки; 10 – прихват; 11 – ось; 12 – стойка; 13 – продольный паз; 14 – ось; 15 – опора; 16 – опорный шток; 17 – поршень; 18 – гидроцилиндр; 19 – пружинный аккумулятор; 20 – малая полумуфта; 21 – клапан; 22 – большая полумуфта; 23 – клапанный штырь; 24 – шарики

Fig. 3. General view of a new design of the vibration insulating device: 1 – bed; 2 – rubber element; 3 – cylinder; 4 – sliding cylinder; 5 – piston; 6 – calibrated hole; 7 – compression valve; 8 – adjusting screw; 9 – spherical surface of the hole; 10 – sticking; 11 – axis; 12 – mounting rack; 13 – longitudinal groove; 14 – axis; 15 – support; 16 – support shaft; 17 – piston; 18 – hydraulic cylinder; 19 – spring battery; 20 – small coupling half; 21 – valve; 22 – big coupling half; 23 – valve pin; 24 – balls



a



b

**Рис. 4. Круглошлифовальный станок BUA 16 (a) на виброизолирующих опорах (b) новой конструкции
Fig. 4 Cylindrical grinding machine BUA 16 (a) equipped with antivibration mounts (b) of a new design**

Результаты исследования и их обсуждение

Снижение частоты механических колебаний (рис. 5 а) f_{0y} в нижней части станины в вертикальном направлении (вдоль оси Y) в среднем от 1,4 раза (при значительном волнении и неработающем станке) до 2,5 раз при значительном волнении и работающем станке. Виброперемещения S_{0x} в нижней части станины в поперечном направлении (вдоль оси X) снижаются в среднем от 2,14 раза (при значительном волнении и работающем станке) до 3,74

раза при значительном волнении и неработающем станке. Виброперемещения S_{0y} в нижней части станины в продольном направлении (вдоль оси Y) снижаются в среднем от 1,1 раза (при слабом волнении и неработающем станке) до 1,8 раза – при значительном волнении и работающем станке.

Анализ показателей при установке станка на виброизолирующие опоры новой конструкции показывает снижение частоты



механических колебаний f''_{ox} в зоне направляющих станка в поперечном направлении (вдоль оси X) в среднем от 1,8 раза (при значительном и сильном волнении как работающего станка, так и одновременно с ним соседнего оборудования и вентиляции) до 2,1 раза при слабом волнении (всех трех состояний станка) и работающем станке при значительном волнении.

Снижение частоты механических колебаний f'_{oy} в зоне направляющих станка в вертикальном направлении (вдоль оси Y) составляет в среднем от 1,5 раза (при значительном волнении и неработающем станке) до 1,8 раза при слабом волнении и неработающем станке.

Виброперемещения (рис. 5 б) S'_x в зоне направляющих станка в поперечном направлении (вдоль оси X) снижаются в среднем от 2,3 раза (при сильном волнении и работающем станке одновременно с соседним оборудованием и вентиляцией) до 3,8 раза при слабом волнении и неработающем станке. Виброперемещения S'_y в зоне направляющих станка в продольном направлении (вдоль оси Y) снижаются в среднем от 1,7 раза (при сильном волнении и работающем станке одновременно с соседним оборудованием и вентиляцией) до

2,9 раза при значительном волнении и работающем станке.

При выполнении круглошлифовальной обработки поверхностей шеек валов получены результаты проверки качества обработанных при этом поверхностей (таблица).

Графики $\Delta = f(h_{3\%})$ на рис. 6, а показывают, что разность величины отклонений формы поверхностей шеек валов ($\Delta_{max} - \Delta_{min}$), обработанных по базовому варианту больше, чем по достигнутому варианту с виброизолирующими опорами, соответственно, в среднем – в 2,3 раза при работе круглошлифовального станка и неработающем внешнем оборудовании (от 1,9 – при сильном волнении, до 3 – при слабом) и в 1,82 раза – при работающем одновременно плоскошлифовальном станке и вентиляции (от 1,76 – при сильном волнении, до 1,86 – при слабом).

Также графики (рис. 6 б) $R_a = f(h_{3\%})$ отклонений шероховатости для $R_{a\max}$ подтверждают повышение качества при использовании новых виброизолирующих опор в среднем в 1,25 раза (как при работе без внешнего оборудования, так и при работающем одновременно плоскошлифовальном станке и вентиляции, причем для всех

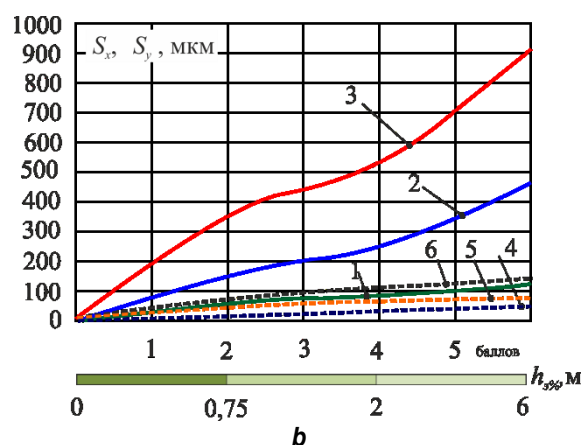
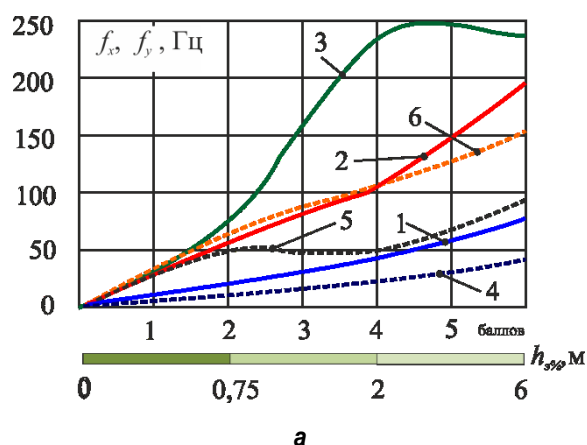


Рис. 5. Графики зависимостей частоты колебаний (f_x, f_y) в зоне измерения станина-фундамент (а) и амплитуды виброперемещения (S'_x, S'_y) на направляющих стола станка, (б) при различных состояниях круглошлифовального станка (1, 4 – отключен; 2, 5 – работает; 3, 6 – работает одновременно с плоскошлифовальным станком и вентиляцией) от уровня волнения

Fig. 5. Dependency graphs of oscillation frequency (f_x, f_y) in the measurement area of frame-foundation (a) and vibration displacement amplitudes (S'_x, S'_y) on machine-tool bench slideways, (b) under various states of a cylindrical grinder (1, 4 – disabled; 2, 5 – in operation; 3, 6 – operates together with a flat surface grinding machine and ventilation) on the excitement level



уровней волнения повышение качества по показателю шероховатости примерно одинаковое – от 1,22 до 1,28 раза). Изменения показателей для $R_{a \min}$ при этом несут существенны, хотя также достигнутый вариант дает уменьшение шероховатости в среднем от 1,03 раза (при работе круглошлифовального станка и неработающем внешнем оборудовании) до 1,08 раза (при работающем одновременно с плоскошлифовальным станком и вентиляцией).

Графики зависимостей $W = f(h_{3\%})$ показателей волнистости (рис. 7 а) для $W_{\max}$ и W_z поверхностей шеек валов от внешних воздействий и состояний круглошлифовального станка, а также пример полученной профилограммы по базовому варианту (b) и

с использованием новых виброизолирующих опор (с) показывают, что уменьшение волнистости $W_{\max}$ составляет в среднем от 1,39 раза (при работе круглошлифовального станка и неработающем внешнем оборудовании) до 1,75 раза (при работающем круглошлифовальном станке одновременно с плоскошлифовальным станком и вентиляцией).

Аналогично по параметру W_z уменьшение волнистости при использовании новых виброизолирующих опор составляет в среднем, соответственно, 1,35 раза для обработки при отсутствии работы внешнего оборудования и 1,32 раза при работающем круглошлифовальном станке одновременно с плоскошлифовальным станком и вентиляцией.

Сравнение результатов качества поверхностей шеек валов, обработанных по базовому и достигнутому вариантам
Comparison of quality results of shaft neck surfaces machined by the base and achieved variant

Биение опорных шеек – Δ , мкм (базовый/достигнутый)			Шероховатость поверхности – R_a , мкм (базовый/ достигнутый)		
max	min	Дисперсия σ^2 , мкм ²	max	min	Дисперсия σ^2 , мкм ²
Слабое волнение					
0,025/0,016	0,010/0,011	6,2x10-6/0,7x10-6	0,63/0,50	0,41/0,32	1,3x10-3/0,9x10-3
0,048/0,029	0,009/0,008	4,2x10-5/1,2x10-5	0,80/0,63	0,51/0,42	2,3x10-3/1,2x10-3
Значительное волнение					
0,094/0,052	0,018/0,015	15,9x10-5/3,8x10-5	1,00/0,82	0,46/0,54	8,1x10-3/2,2x10-3
0,123/0,079	0,008/0,017	3,7x10-6/1,1x10-6	1,25/1,02	0,50/0,48	15,6x10-3/8,1x10-3
Сильное волнение					
0,124/0,069	0,020/0,014	2,9x10-6/8,4x10-5	1,6/1,25	0,50/0,52	3,3x10-2/1,5x10-2
0,162/0,097	0,023/0,018	5,4x10-4/1,7x10-4	2,0/1,58	0,63/0,62	5,2x10-2/2,6x10-2
Показатели волнистости					
Слабое волнение					
Wmax, мкм		Wz, мкм	Sw, мкм		Lw, мкм
5,6/5,1		4,8/4,2	192/169		960/845
7,2/5,8		5,3/3,9	265/211		1457,5/1170
Значительное волнение					
6,9/5,7		5,4/4,2	297/264		1782/1420
10,2/6,1		5,8/5,0	916/870		4580/4350
Сильное волнение					
15,4/7,8		9,9/6,1	574/526		3920/2530
23,8/10,2		10,6/7,4	1328/1170		6640/5850



Сравнение полученной профилограммы по базовому варианту обработки с установленным на фундамент круглошлифовальным станком (рис. 7 *b*) с достигнутым вариантом при использовании новых виброизолирующих опор (с) наглядно иллюстрирует преимущества разработанных в данной работе мероприятий и методики по синтезу рациональных вариантов виброизолирующих устройств.

Таким образом, виброизолирующие опоры (рис. 3 *b*) по патенту № UA 36389 [18] в процессе проведенных испытаний подтвердили достижение поставленной цели – повышение качества шлифования при работе в условиях плавучей мастерской. Однако в представленных для испытаний образцах опор для использования их в плавучей мастерской необходимы некоторые элементы крепления, так как находящееся на палубах плавучих мастерских технологическое оборудование подвергается опасности смещения из-за отрыва основания опоры от поверхности палубы. Для этого их необходимо надежно фиксировать с помощью рычажной системы на стойке и оснащать гидроцилиндром с пружинным аккумулятором. Такие адаптированные к условиям плавучих мастерских виброизолирующие устройства, патент № UA 51621 [19], созданные на базе испытанных в лабораторных условиях опор, обеспечивают повышение качества шлифовальной обработки деталей за счет снижения погрешностей их формы, уменьшения шероховатости и волнистости путем снижения уровней внешних и внутренних колебаний, гашению которых способствуют виброизолирующие опоры и пружинные аккумуляторы в гидроцилиндрах. Кроме того, возможна дальнейшая модернизация указанных устройств с целью создания систем автоматической виброзащиты и виброизоляции шлифовальных и других прецизионных станков, способных по сигналам от вибродатчиков менять демпфирующие свойства виброопор в процессе механической обработки деталей в условиях плавучих мастерских [16].

Металлорежущий станок устанавливают на общей поверхности палубы механо-

обрабатывающего участка плавучей мастерской на четырех виброизолирующих опорах 1 [15, 16], выполненных в виде основания с резиновым элементом и установленным в осевом отверстии цилиндром с рабочей жидкостью, поршнем со штоком 2, размещенным и зафиксированным в отверстиях станины 3 станка 4 (рис. 8). В процессе воздействия на станину станка 4 колебаний от внешних источников через поверхность палубы передаются колебательные воздействия через опору 1 и цилиндр со штоком 2, обеспечивая гашение колебаний, то есть механическое и гидравлическое демпфирование. Для предотвращения сдвига и перекоса станка верхнюю часть штока 2 поджимают прижимом 5, размещенным на оси 6 стойки 7. Задней частью прижим 5 взаимодействует со штоком 8 антивибрационного гидроцилиндра 9, закрепленного на поверхности 10 палубы вместе со стойкой 7. Нижняя полость антивибрационного гидроцилиндра 9 связана с гидронасосом 11, работающим от асинхронного электродвигателя 12. Однако внешние воздействия не являются постоянными как по частоте, так и по амплитуде. Для исключения вредного влияния этих колебаний на процесс обработки, в частности для снижения волнистости, при шлифовании деталей установленные на направляющих станины 3 вибродатчики 13 преобразуют вибрации в электрические сигналы, которые через АЦП передаются на вход программируемого логического контроллера ArduinoUNO. Указанный контроллер через ЦАП и усилитель, а также ЧП Altivar, регулируя частоту вращения электродвигателя 12 и насоса 11, соответственно, увеличивает или уменьшает давление в противоштоковой полости антивибрационного гидроцилиндра 9, тем самым увеличивая или уменьшая жесткость виброизолирующей опоры воздействием через прижим 5 на шток 2. Контроллер ArduinoUNO настраивается таким образом, что при появлении на выходе вибродатчиков 13 низкочастотных высокоамплитудных вибраций, выходящих за пределы расчетных (нормальных), генерируются соответствующие сигналы на выходе контроллера,

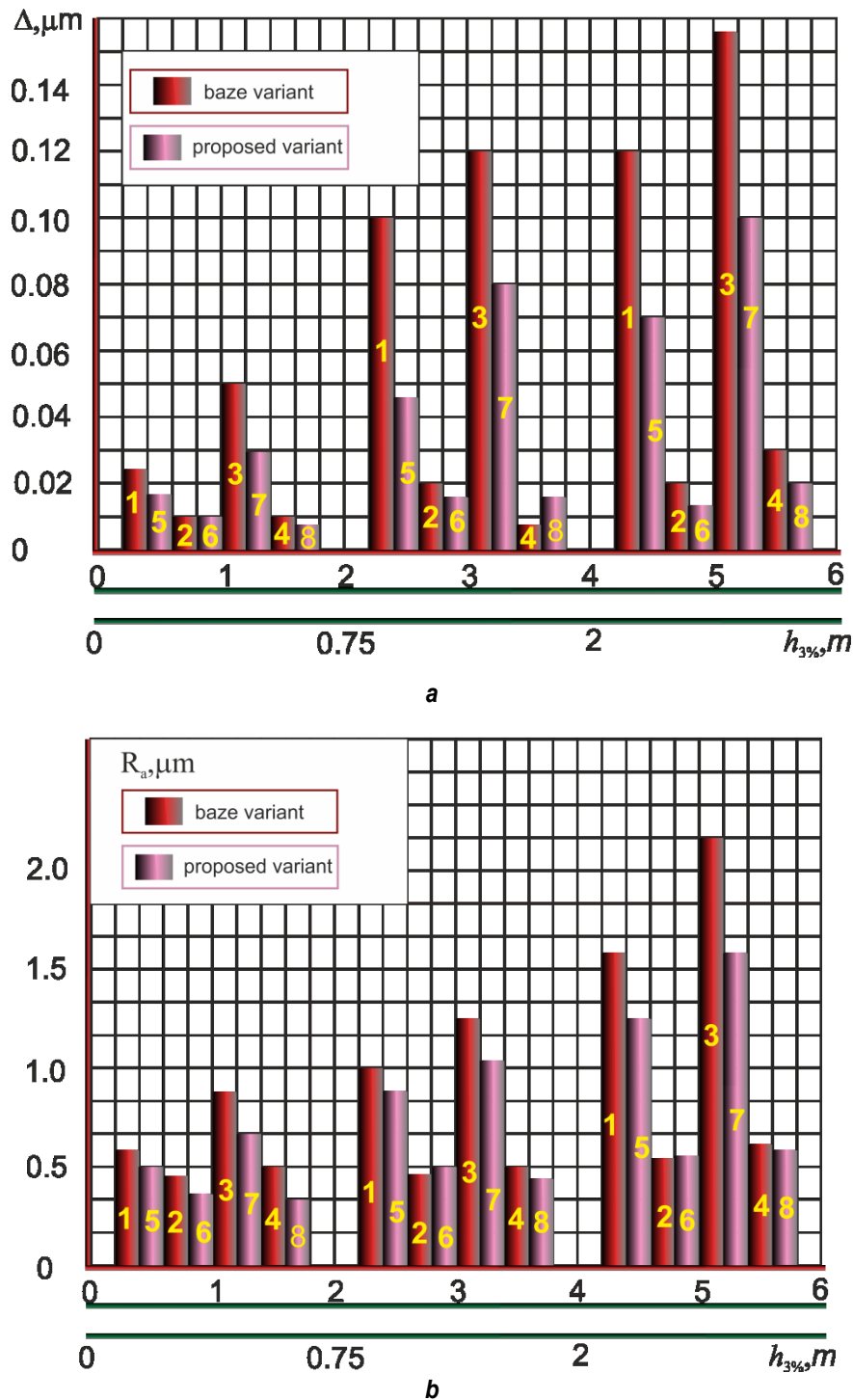


Рис. 6. Графики зависимостей отклонений формы $\Delta = f(h_{3\%})$ для Δ_{max} (1, 3 – базовый, 5, 7 – достигнутый вариант) и Δ_{min} (2, 4 – базовый, 6, 8 – достигнутый вариант) (а), а также шероховатости $R_a = f(h_{3\%})$ для $R_{a\ max}$ (1, 3 – базовый, 5, 7 – достигнутый вариант) и $R_{a\ min}$ (2, 4 – базовый, 6, 8 – достигнутый вариант) (б) поверхностей шеек валов от внешних воздействий и состояний круглошлифовального станка (1, 2, 5, 6 – работает; 3, 4, 7, 8 – работает с плоскошлифовальным станком и вентиляцией)

Fig. 6. Dependency graphs of shape deviations $\Delta = f(h_{3\%})$ for Δ_{max} (1, 3 – basic, 5, 7 – achieved variant) and Δ_{min} (2, 4 – basic, 6, 8 – achieved variant) (a), and roughness $R_a = f(h_{3\%})$ for $R_{a\ max}$ (1, 3 – basic, 5, 7 – achieved variant) and $R_{a\ min}$ (2, 4 – basic, 6, 8 – achieved variant) (b) of shaft neck surface on external influences and states of a cylinder grinding machine (1, 2, 5, 6 – in operation; 3, 4, 7, 8 – operates together with a flat surface grinding machine and ventilation)

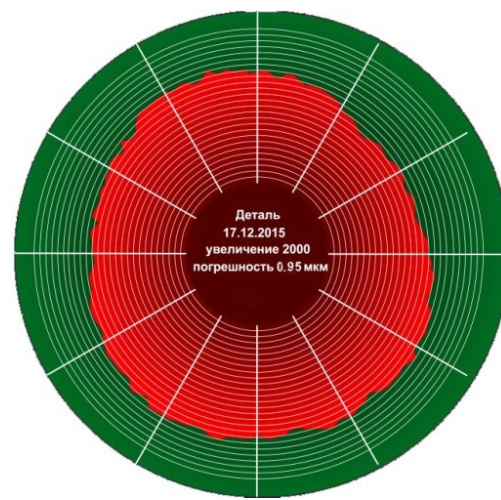
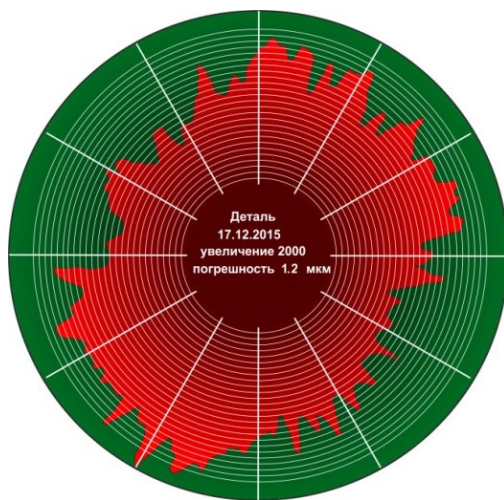
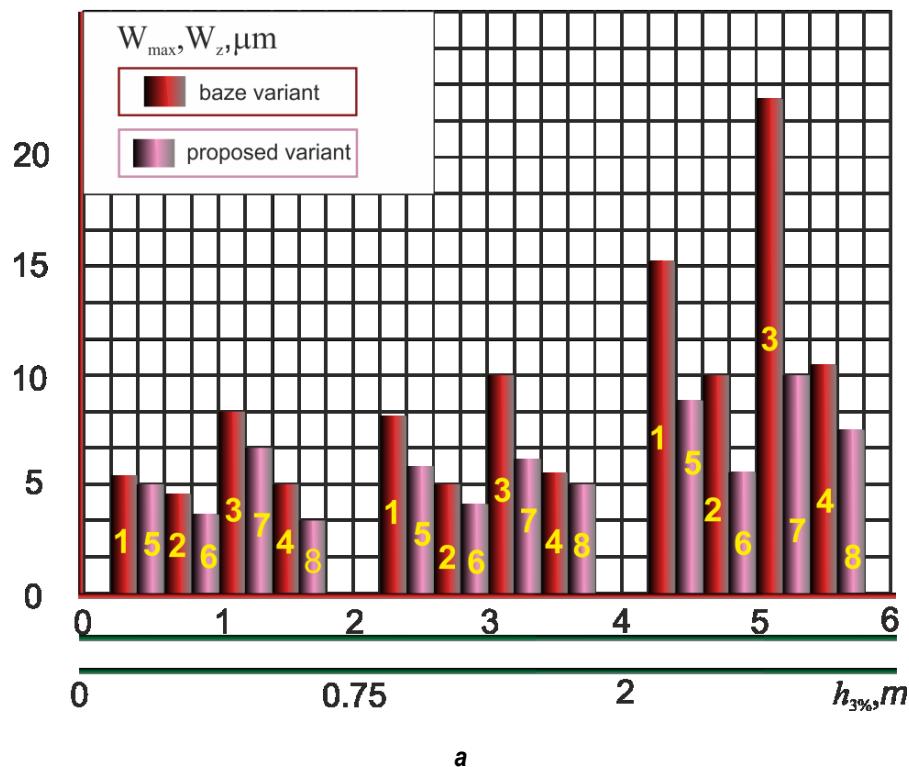


Рис. 7. Графики зависимостей показателей волнистости $W = f(h_{3\%})$ для W_{max} (1, 3 – базовый, 5, 7 – достигнутый вариант) и W_z (2, 4 – базовый, 6, 8 – достигнутый вариант) (а) поверхностей шеек валов от внешних воздействий и состояний круглошлифовального станка (1, 2, 5, 6 – работает; 3, 4, 7, 8 – работает одновременно с плоскошлифовальным станком и вентиляцией), а также пример полученной круглограммы по базовому варианту (b) и с использованием новых виброизолирующих опор (c)

Fig. 7. Dependency graphs of waviness indices $W = f(h_{3\%})$ for W_{max} (1, 3 – basic, 5, 7 – achieved variant) and W_z (2, 4 – basic, 6, 8 – achieved variant) (a) of shaft neck surface on external influences and states of a cylindrical grinding machine (1, 2, 5, 6 – in operation; 3, 4, 7, 8 – operates simultaneously with a cylindrical grinder and ventilation), and an example of the obtained circular diagram by the basic variant (b) and with the use of new antivibration mounts (c)

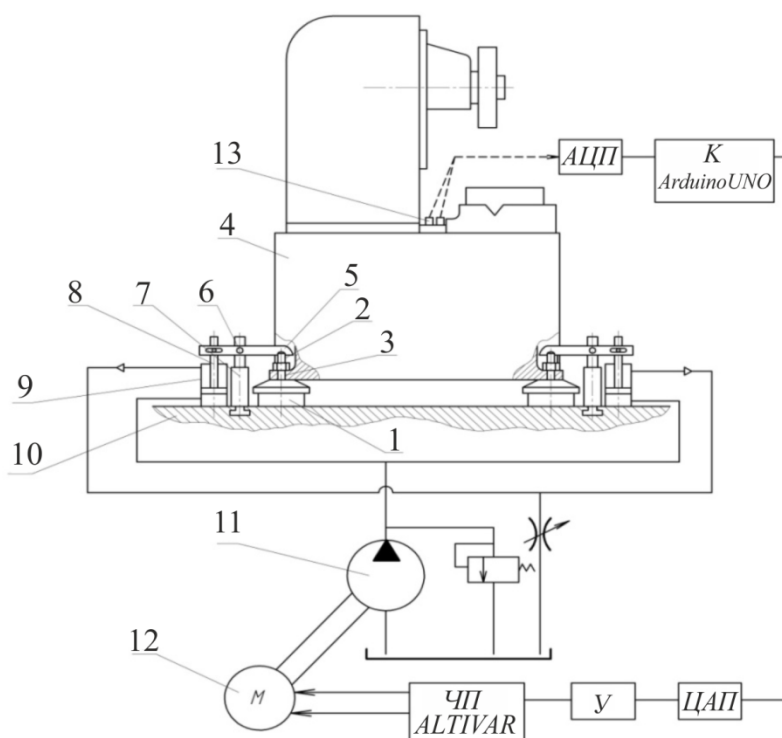


Рис. 8. Схема устройства автоматической виброзащиты станка, работающего в условиях плавучей мастерской (патент RU 158629U1)

Fig. 8. Diagram of the automated vibroprotection device of a machine-tool operating in the conditions of a floating workshop (patent RU 158629U1)

позволяющие повысить жесткость виброопоры путем увеличения давления рабочей жидкости в антивибрационном гидроцилиндре 9 за счет увеличения давления в напорном трубопроводе от насоса 11 с электродвигателем 12 и ЧП Altivar.

Такое устройство [17] позволяет: обеспечить автоматическое управление демпфированием виброизолирующей опоры станка при внешних воздействиях, в том числе и от колебаний водной поверхности;

повысить динамические качества станка и надежность его виброзащиты при работе в условиях плавучих мастерских; обеспечить возможность регулировки управляющих воздействий на жесткость виброизолирующих опор в широком диапазоне путем использования современной платформы ArduinoUNO, имеющей 14 цифровых входов и 6 выходов, кварцевый генератор, разъем USB, силовой разъем, разъем ICSP и устройство перезагрузки.

Выводы

Изложенный подход позволил экспериментально исследовать влияние на качество деталей при шлифовальной обработке морского волнения, воздействующего на плавучее основание мастерской, выявил целесообразность использования новой виброзащитной системы станка для решения задач обеспечения динамической стабилизации процесса шлифования [10, 11] и

создания конструкций эффективных виброизолирующих опор и устройств. Предложенные конструкции виброизолирующих опор и устройств упрощают возможность монтажа и демонтажа технологического оборудования, способствуют повышению качества обработки деталей за счет снижения погрешностей их формы путем уменьшения внеш-



них колебательных воздействий. Полученные результаты являются основой для дальнейших экспериментальных исследований параметров и характеристик технологической системы круглошлифовального станка в условиях плавучей мастерской [15, 16]. Предлагаемое устройство автоматической виброзащиты [17] позволяет повысить качество обработки деталей за счет снижения погрешностей их формы, уменьшения шероховатости и волнистости поверхности путем уменьшения вибрационных воздействий, гашению которых способствует ви-

роизолирующая механогидравлическая опора с автоматическим регулированием жесткости в зависимости от сигналов с вибродатчиков, размещенных на незначительном удалении от рабочей зоны станка.

Кроме предложенных выше мероприятий в условиях плавучих мастерских возможно применение высокоточных станков с ЧПУ, оснащенных системами адаптивного управления, построенных на основе разработки новых моделей оптимальных систем со стохастическим регулятором процесса.

Библиографический список

1. Солер Я.И., Хоанг Н.А. Влияние глубины резания на высотные шероховатости инструментов из стали У10А при плоском шлифовании кругами из кубического нитрида бора // Авиационное машиностроение и транспорт Сибири: сб. ст. IX Всерос. науч.-практ. конф. Иркутского национального исследовательского технического университета (г. Иркутск, 12–15 апреля 2017 г.). Иркутск, 2017. С. 250–254.
2. Soler Y.I., Van Le N., Dinh Si M. MATEC Web of Conferences Ser. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2017. P. 01076.
3. Солер Я.И., Нгуен В.К., Хоанг Н.А. Прогнозирование режимов чистового шлифования быстрорежущих пластин переменной податливости при многопараметрической оптимизации шероховатости // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. № 4 (685). С. 35–46.
4. Bratan S., Roshchupkin S., Novikov P. Modeling the Grinding Wheel Working Surface State, Procedia Engineering. 2017. Vol. 206. P. 1419–1425.
5. Bratan S., Roshchupkin S., Revenko D. Probabilistic Approach for Modeling Electroerosion Removal of Grinding Wheel Bond, Procedia Engineering. 2017. Vol. 206. P. 1426–1431.
6. Bratan S., Roshchupkin S., Kolesov A., Bogutsky B. Identification of removal parameters at combined grinding of conductive ceramic materials, MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 129. P. 01079.
7. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Архипов П.В. Напряженно-деформированное состояние твердосплавных режущих элементов при алмазном затачивании // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2015. № 3-1 (33-1). С. 85–91.
8. Лобанов Д.В., Мулюхин Н.В. Методика прогнозирования поврежденности твердого сплава при затачивании инструмента для обработки неметаллических композитов // Актуальные проблемы в машиностроении. 2018. Т. 5. № 1-2. С. 78–84.
9. Владецкий Е.А., Братан С.М., Харченко А.О., Владецкий Д.О. Обеспечение качества шлифовальной обработки путем уменьшения внешних возмущений в условиях плавучей мастерской // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2015. № 6 (314). С. 88–103.
10. Владецкий Е.А. Разработка формирующего фильтра, моделирующего динамику морского волнения плавучей ремонтной мастерской // Вісник СевНТУ. Вип.150: Машиноприладобудування та транспорт; зб. наук. пр. Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2014. С. 36–40.
11. Харченко А.О., Братан С.М., Владецкий Е.А. Повышение точности процесса круглого шлифования путем эффективной виброизоляции станка // International Scientific Conference on engineering design and research of automotive vehicles and machines «SAKON'08» (Rzeszow – Przecław, Polska, 24–27 Wrzesein, 2008). Rzeszow – Przecław, 2008. P. 47–58.
12. Харченко А.О., Владецкий Е.А., Долгин В., Братан С.М. Реакция динамической системы на произвольный сигнал на примере станка в условиях плавучей мастерской // Monografie «Maszyny i procesy produkcyjne» (Машины и производственные процессы). Lublin, Polska: Politechnika Lubelska, 2015. С. 86–98.
13. Братан С.М., Владецкий Е.А. Исследование надежности виброизолирующего устройства шлифовального станка // Научные технологии в машиностроении. Брянск: ФГБОУ ВО «БГТУ», 2016. № 9 (63). С. 10–15.
14. Владецкий Е.А. Моделирование вибрационных воздействий от внешних источников при шлифовании деталей в лабораторных условиях // Вестник современных технологий: сб. науч. трудов. Севастополь, 2016. Вып. 4. С. 25–34.
15. Братан С.М., Владецкий Е.А., Владецкий Д.О., Харченко А.О. Повышение качества деталей при шлифовании в условиях плавучих мастерских. М.: ИНФРА-М, 2018. 154 с.
16. Патент № 158629, Российская Федерация, МПК В23Q1/25, В23Q1/44, F16F9/14. Устройство автоматической виброзащиты металлорежущего станка /



Е.А. Владецкая, А.О. Харченко, С.М. Братан и др.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет». № 2015125213/02; заявл. 25.06.2015; опубл. 20.01.2016. Бюл. № 2.

17. Пат. № 36389, Украина. Віброізолююча опора металорізального верстата / Братан С.М., Харченко

О.О., Рапачкий Ю.Л., Владецька К.О.; опубл. 27.10.2008.

18. Параметрический синтез оптимальных виброизолирующих устройств [Электронный ресурс]. URL: https://studref.com/404967/tehnika/parametricheskij_sintez_optimalnyh_vibroizoliruyuschih_ustroystv (дата обращения: 12.06.2018)

References

1. Soler Ya.I., Hoang N.A. *Vliyanie glubiny rezaniya na vysotnye sheroховatosti instrumentov iz stali U10A pri ploskom shlifovanii krugami iz kubicheskogo nitrída bora* [The effect of cutting depth on vertical roughness of tools from U10A steel under flat grinding by cubic boron nitride wheels]. *Sbornik statej IX Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii. Irkutskij nacional'nyj issledovatel'skij tekhnicheskij universitet "Aviamashinostroenie i transport Sibiri"* [Collection of articles of IX All-Russian scientific and practical conference. Irkutsk National Research Technical University "Aircraft Engineering and Transport in Siberia", Irkutsk, 12–15 April 2017]. Irkutsk, 2017, pp. 250–254. (In Russian)
2. Soler Y.I., Van Le N., Dinh Si M. MATEC Web of Conferences Ser. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2017, 01076 p.
3. Soler Ya.I., Nguen V.K., Hoang N.A. Predicting finishing grinding conditions for high-speed cutting plates of variable compliance using multiparametric optimization of roughness. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2017, no. 4 (685), pp. 35–46. (In Russian)
4. Bratan S., Roshchupkin S., Novikov P. Modeling the Grinding Wheel Working Surface State, *Procedia Engineering*, 2017, vol. 206, pp. 1419–1425.
5. Bratan S., Roshchupkin S., Revenko D. Probabilistic Approach for Modeling Electro erosion Removal of Grinding Wheel Bond, *Procedia Engineering*, 2017, vol. 206, pp. 1426–1431.
6. Bratan S., Roshchupkin S., Kolesov A., Bogutsky B. Identification of removal parameters at combined grinding of conductive ceramic materials, *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 129, p. 01079.
7. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S., Arhipov P.V. Deflected mode of hard-alloy cutting elements at diamond sharpening. *Vektor nauki Tol'yatinskogo gosudarstvennogo universiteta* [Vector of Science of the Togliatti state University], 2015, no. 3-1 (33-1), pp. 85–91. (In Russian)
8. Lobanov D.V., Mulyuhin N.V. Prediction method of hard alloy damage when sharpening tool for processing non-metallic composites. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii* [Actual problems in Machine-Building], 2018, vol. 5, no. 1-2, pp. 78–84. (In Russian)
9. Vladeckaya E.A., Bratan S.M., Harchenko A.O., Vladeckij D.O. Grinding process quality assurance on board of floating workshop by reducing impacts of external disturbances. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and Applied Problems of Technics and Technology], 2015, no. 6 (314), pp. 88–103. (In Russian)
10. Vladeckaya E.A. Development of shaping filter, simulating dynamics of sea waves on floating repair shop. *Visnik SevNTU. Mashinopriladobuduvannya ta transport; zb. nauk. pr. Sevastopol': SevNTU Publ.*, 2014, pp. 36–40.
11. Harchenko A.O., Bratan S.M., Vladeckaya E.A. Povyshenie tochnosti processa kruglogo shlifovaniya putem effektivnoj vibrozol'yacii stanka [Improving precision of round grinding by means of effective vibration insulation of a machine-tool]. *International Scientific Conference on engineering design and research of automotive vehicles and machines "SAKON'08"* (Rzeszow – Przecław, Polska, 24–27 Wrzesein, 2008). Rzeszow – Przecław, 2008, pp. 47–58.
12. Harchenko A.O., Vladeckaya E.A., Dolgin V., Bratan S.M. *Reakciya dinamicheskoy sistemy na proizvol'nyj signal na primere stanka v usloviyah plavuchej masterskoj* [Dynamical system response to an arbitrary signal on example of a machine-tool in floating workshop conditions]. *Monografie «Maszyzny i procesy produkcyjne»* (Mashiny i proizvodstvennyye processy). Lublin, Polska: Politechnika Lubelska, 2015, pp. 86–98.
13. Bratan S.M., Vladeckaya E.A. Investigation of vibroisolating device reliability in grinding machine. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering]. Bryansk: FGBOU VO «BGTU», 2016, no. 9 (63), pp. 10–15.
14. Vladeckaya E.A. *Modelirovanie vibratsionnyh vozdeystvij ot vneshnih istochnikov pri shlifovanii detalej v laboratornyh usloviyah* [Modeling vibration exposure from external sources when grinding the details under laboratory conditions]. *Vestnik sovremennyh tekhnologii* [Bulletin of Modern technologies: collection of scientific papers], 2016, Issue. 4, pp. 25–34.
15. Bratan S.M., Vladeckaya E.A., Vladeckij D.O., Harchenko A.O. *Povyshenie kachestva detalej pri shlifovanii v usloviyah plavuchih masterskih* [Improving part quality when grinding in floating workshops]. Moscow: INFRA-M Publ., 2018, 154 p. (In Russian)
16. Vladeckaya E.A., Harchenko A.O., Bratan S.M. *Ustrojstvo avtomaticheskoy vibrozashchity metalorezhushchego stanka* [Automated vibration protection device of a metal-cutting machine-tool]. Patent RF, no. 158629, 2016.
17. Bratan S.M., Harchenko O.O., Rapac'kij Yu.L., Vladeck'ka K.O. *Vibroizoluyucha opora metalorizal'nogo verstata* [Vibration isolating support pf a metal-cutting



machine-tool]. Patent RF, no. 36389, 2008.

18. *Parametricheskij sintez optimal'nyh vibroizoliruyushchih ustrojstv* [Parametric synthesis of optimal vibration

isolating devices]. Available at: https://studref.com/404967/tehnika/parametricheskij_sintez_optimalnyh_vibroizoliruyushchih_ustrojstv (accessed 12 June 2018).

Критерии авторства

Братан С.М., Харченко А.О., Владецкая Е.А. рассмотрели результаты лабораторных исследований процесса шлифовальной обработки, совместно подготовили рукопись и несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Bratan S.M., Kharchenko A.O., Vladetskaya E.A. considered the results of grinding process laboratory studies, jointly prepared the manuscript for publication and bear the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.91

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-12-35-45>

ДИССИПАТИВНАЯ СТРУКТУРА КОНТАКТНО-ФРИКЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ

© В.А. Ким¹, Ч.Ф. Якубов²

¹Комсомольский-на-Амуре государственный университет,
681013, Российская Федерация, г. Комсомольск-на-Амуре, пр-т Ленина, 27.

²Крымский индустриально-педагогический университет,
295013, Российская Федерация, Республика Крым, г. Симферополь, пер. Учебный, 8.

РЕЗЮМЕ: Рассмотрено строение диссипативной структуры контактного взаимодействия при резании металлов и механизм ее функционирования. Исследования проводились при точении стали 45, нержавеющей стали 12X18H10T и титанового сплава BT22 резцами из быстрорежущей инструментальной стали Р6М5. Морфология поверхностного слоя режущего клина инструмента изучалась с помощью растрового электронного микроскопа. Усадка стружки определялась весовым методом. Деформационное состояние зоны стружкообразования анализировалось по микроструктуре корней стружки. Цифровые изображения микроструктур анализировались с помощью компьютерной металлографии. Диссипативная структура контактно-фрикционного взаимодействия состоит из островковых и сплошных наростов, плотно сцепленных с поверхностью режущего клина, упрочненного подповерхностного слоя и адсорбционных пленок на наружной поверхности наростов. Основные свойства диссипативной структуры определяются законами неравновесной термодинамики, а их функционирование связано с трансформацией энергии контактного взаимодействия в тепло и рассеивания ее в окружающей среде, а также минимизации влияния энергетического воздействия деформационного процесса стружкообразования на состояние режущего клина. В период установившегося процесса контактного взаимодействия или квазистационарного состояния основные диссипативные процессы реализуются за счет фрикционного взаимодействия между наружной поверхностью наростов и сходящей стружкой. Активность диссипативного процесса определяется коэффициентом трения, который принимает различные значения в зависимости от структурного состояния поверхностного слоя нароста и наличия на нем адсорбционной пленки. Чем полнее процесс диссипации, тем меньше энергии затрачивается на изнашивание режущего клина и выше стойкость режущего инструмента. Смазочно-охлаждающая технологическая среда при резании активно влияет на состояние диссипативной структуры за счет образования устойчивых адсорбционных пленок, понижающих коэффициент трения между сходящей стружкой и режущим инструментом. Снижение коэффициента трения приводит к уменьшению контактных напряжений, а это вызывает изменение напряженно-деформированного состояния всей деформационной области стружкообразования. Предложена архитектура диссипативной структуры контактно-фрикционного взаимодействия при резании металлов и механизм ее функционирования. В период квазистационарного протекания резания диссипация в зоне вторичных пластических деформаций реализуется за счет разных режимов фрикционных процессов между сходящей стружкой и наружными поверхностями наростов. Влияя на характер фрикционного процесса, можно управлять стойкостью режущего инструмента и качеством механической обработки.

Ключевые слова: *неравновесный процесс, диссипативная структура, пластическая деформация, коэффициент трения, режущий инструмент, нарост, стойкость*

Информация о статье: Дата поступления 17 октября 2018 г.; дата принятия к печати 23 ноября 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2018 г.

¹Ким Владимир Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры материаловедения и технологии новых материалов, e-mail: sinerg@mail.ru

Vladimir A. Kim, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Materials Science and Technology of New Materials, e-mail: sinerg@mail.ru

²Якубов Чингиз Февзиевич, кандидат технических наук, доцент, ректор Крымского индустриально-педагогического университета, e-mail: scepu@mail.ru

Chingiz F. Yakubov, Cand. Sci.(Eng.), Associate Professor, Rector of the Crimean Industrial-Pedagogical University, e-mail: scepu@mail.ru



Для цитирования: Ким В.А., Якубов Ч.Ф. Диссипативная структура контактно-фрикционного взаимодействия при резании металлов. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(12):35–45. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-35-45

DISSIPATIVE STRUCTURE OF CONTACT-FRICTION INTERACTION AT METAL CUTTING

Vladimir A. Kim, Chingiz F. Yakubov

Komsomolsk-on-Amur State University,
27 Lenin pr., Komsomolsk-on-Amur 681013, Russian Federation
Crimean Industrial and Pedagogical University,
8, Uchebny per., Simferopol 295013, Republic of Crimea, Russian Federation

ABSTRACT: The article considers the dissipative structure of contact interaction at cutting metals and its operation mechanism. Researches were carried out at turning steel 45, stainless steel 12X18H10T and a titanium alloy VT22 by the cutters made of high speed tool steel P6M5. The morphology of the tool cutting wedge surface layer was studied by means of a raster electronic microscope. Chip shrinkage was determined by the weight method. The deformation state of the chip formation zone was analyzed by the microstructure of chip roots. Digital images of microstructures were analyzed by means of a computer metallography. The dissipative structure of contact and friction interaction consists of the island-shape and continuous growths densely linked to the cutting wedge surface, strengthened subsurface layer and adsorption films on the external surface of growths. The main properties of the dissipative structure are determined by the laws of non-equilibrium thermodynamics as their functioning is connected with the conversion of contact interaction energy into heat and its dispersal in environment. Another property is minimization of the power effect of the deformation process of chip formation on cutting wedge condition. Under the steady-state process of contact interaction, or during a quasi-steady state, the main dissipative processes are implemented due to frictional interaction between the external surface of the growths and the coming off chip. The intensity of the dissipative process is determined by the friction coefficient which accepts various values depending on the structural condition of the growth surface layer and presence of the adsorption film on it. The more complete the dissipation process, the less energy is spent for cutting wedge wear, and the higher is cutting tool durability. Lubricant cooling technological environment actively influences the state of the dissipative structure at cutting due to the formation of steady adsorption films lowering the friction coefficient between the coming-off chip and the cutting tool. Decrease in the coefficient of friction results in the reduction of contact stresses. The latter causes the changes in the stress-strain state condition of the whole deformation area of chip formation. The authors have proposed the architectonics of the dissipative structure of the contact-friction interaction under metal cutting and its operation mechanism. During the quasistationary period of cutting the dissipation in the zone of secondary plastic deformations is implemented due to the different modes of frictional processes between the coming off chip and external surfaces of growths. Influencing the nature of the frictional process, it is possible to control the durability of the cutting tool and quality of machining.

Keywords: non-equilibrium process, dissipative structure, plastic deformation, friction coefficient, cutting tool, growth, durability

Information about the article: Received October 17, 2018; accepted for publication November 23, 2018; available online December 28, 2018.

For citation: Kim V.A., Yakubov C.F. Dissipative structure of contact-friction interaction at metal cutting. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018; 22(12):pp. 35–45. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-35-45

Введение

Механическая обработка представляет процесс формообразования, включающая высокоскоростную пластическую деформацию и разрушение обрабатываемого материала, контактно-фрикционное взаимодействие и изнашивание асимметричного режущего клина. Процессы, сопутствующие резанию металлов, протекают в неравно-

весных условиях на фоне высоких температур и их градиентов, скоростей нагрева и охлаждения, а сама зона резания представляет многофакторную динамическую систему, развивающуюся по синергетическому алгоритму, который связан с образованием, развитием и функционированием диссипативных структур [1–6].



Под диссипативными структурами понимают совокупность микроструктурных образований, обладающих элементами «искусственного интеллекта», с помощью которых в неравновесных деформационных системах поглощенная внутренняя энергия трансформируется в тепловые источники и другие диссипативные потоки, а также минимизируются влияния внешних возмущений различной природы [4, 6, 7]. Основные свойства диссипативных структур определяются законами неравновесной термодинамики, но конкретный механизм их функционирования носит индивидуальный характер в зависимости от природы неравновесного процесса, и не всегда является очевидным [7–9].

Характер функционирования диссипативных структур определяет кинетику раз-

вития системы в целом. Начальный период или период приработки необходимо рассматривать как стадию образования диссипативной структуры, а установившийся период как стадию сформированной и функционирующей диссипативной структуры [3, 4, 10].

Раскрытие физического строения и механизма функционирования диссипативных структур при резании металлов позволяет прогнозировать характер развития неравновесного процесса, раскрывает новые алгоритмы управления качеством механической обработки и работоспособности режущего инструмента.

В статье рассмотрено строение диссипативной структуры контактного взаимодействия при резании металлов и механизмы ее функционирования.

Методика исследования

Исследования проводились при точении различных конструкционных материалов (стали 45, нержавеющей стали 12Х18Н10Т и титанового сплава ВТ22) резцами из быстрорежущей инструментальной стали Р6М5 на полуставных режимах резания. Морфология поверхностного слоя режущего клина инструмента изучалась с помощью растрового электронного микроскопа S3400-N (Hitachi). Усадка стружки

определялась весовым методом. Структурное и деформационное состояние зоны стружкообразования анализировалось по микроструктуре корней стружки, полученных с помощью «падающего» резца [15]. Сама микроструктура фиксировалась металлографическим микроскопом Nikon 200А при увеличении 400 крат, полученные цифровые изображения обрабатывались программой Image.Pro.Plus.5.1 (США).

Строение диссипативной структуры контактно-фрикционного взаимодействия при резании

Результатом контактно-фрикционного взаимодействия и взаимного массопереноса обрабатываемого материала и режущего клина при резании является образование наростов. Сплошность наростов и прочность их сцепления с поверхностью режущего клина определяется их местоположением на рабочих поверхностях инструмента. Чем ближе к режущей кромке, тем выше сплошность и прочность сцепления наростов. Наросты являются основной составляющей диссипативной структуры, возникающей и функционирующей в зоне контактно-фрикционного взаимодействия при

резании металлов.

На рис. 1 и 2 приведены некоторые виды сплошных и островковых наростов на передних поверхностях токарных резцов при точении сталей 45 и 12Х18Н10Т. Аналогичные виды наростов были получены при точении титанового сплава ВТ22. Сплошной нарост состоит из островковых и отличается более высокой сплошностью и степенью пластической деформации, поэтому в ее структуре более вероятно наличие аморфных фаз. Островковые наросты характеризуются дальним порядком, связанной с их ориентацией в направлении скользящей

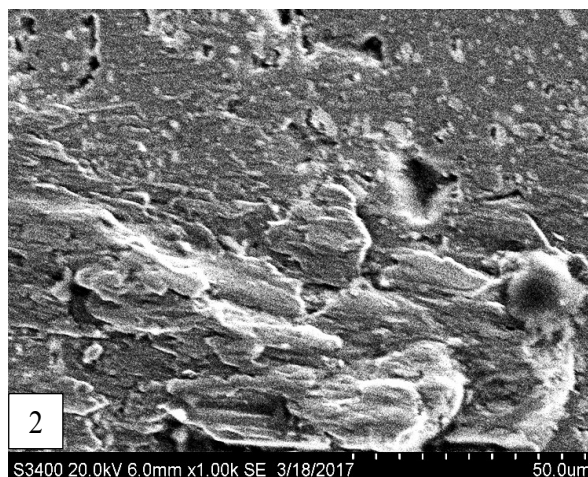
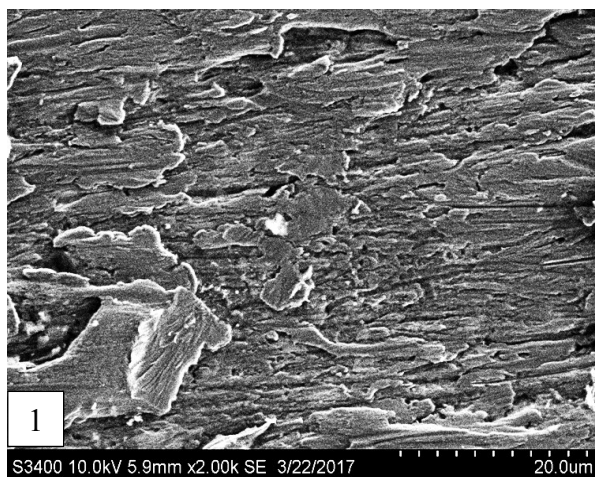


Рис. 1. Островковые наросты на передней поверхности быстрорежущего резца при точении 12X18H10T (1) и стали 45 (2)

Fig. 1. Island growths on the front surface of the high-speed cutter when turning 12X18H10T (1) and steel 45 (2)

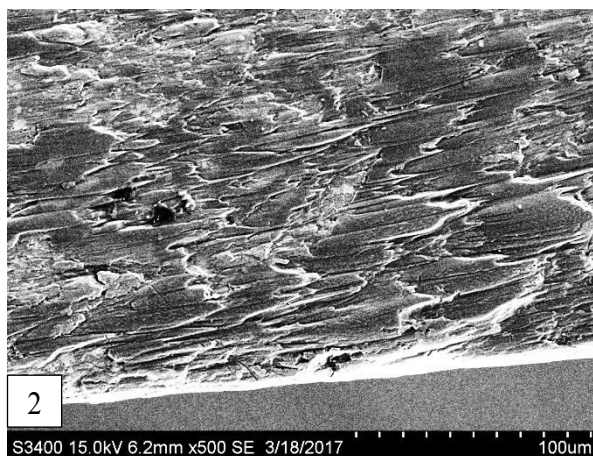
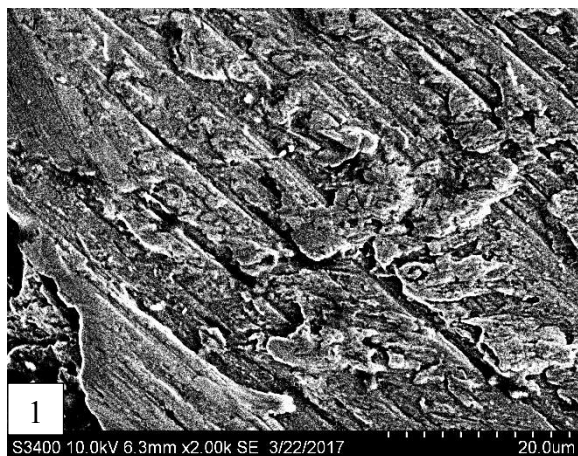


Рис. 2. Сплошные наросты на передней поверхности быстрорежущего резца при точении 12X18H10T (1) и стали 45 (2)

Fig. 2. Solid growths on the front surface of the high-speed cutter when turning 12X18H10T (1) and steel 45 (2)

стружки. Такая упорядоченность сохраняется и в морфологии сплошного нароста.

На изображении островковых и сплошных наростов, получаемых с помощью растрового электронного микроскопа, наблюдаются светлые участки, представляющие микрзоны с высоким электростатическим зарядом. Можно предположить, что это вероятнее всего участки со стабильными адсорбционными пленками и аморфной фазой, обладающие относительно высокими диэлектрическими свойствами.

На рис. 3 схематично представлено строение диссипативной структуры процесса контактного взаимодействия при резании металлов, объясняющее некоторые

механизмы ее функционирования. На рабочих передних поверхностях режущего клина 1 располагаются островковые и сплошные наросты, прочность сцепления которых с подложкой зависит от их местоположения относительно режущей кромки. Чем ближе нарост к режущей кромке, тем выше прочность сцепления.

Наросты представляют высоко деформированные образования преимущественно из обрабатываемого материала, имеющего наноструктурную организацию, насыщенную продуктами разложения технологической среды и химическими элементами инструментального материала [12].

Наружная поверхность отдельных островковых наростов покрыта устойчивой адсорбционной пленкой 3, а на поверхности сплошного и некоторых островковых наростов она может отсутствовать. По вершинам наростов скользит стружка 4. В отдельных полостях между впадинами островковых наростов и стружкой могут находиться небольшие объемы смазочно-охлаждающей технологической среды (СОТС) и продукты внешней технологической среды 5. Под наростами располагается подповерхностный слой режущего инструмента с измененной структурой 6, модифицированный в результате пластической деформации и теплового воздействия, которые могут инициировать деформационное упрочнения и диффузионный перенос элементов из глубинных слоев или внешней технологической среды в поверхностные слои.

На диссипативную структуру действует поток тепловой и механической энергии высокой плотности, передаваемый через скользящую стружку. Контактное взаимодействие протекает в неравновесных условиях, при этом внешние динамические возмущения определяются процессом стружкообразования, а динамические реакции на эти возмущения генерируются самой

диссипативной структурой. Динамика процесса предполагает, что все скоростные, силовые и тепловые параметры системы контактного взаимодействия являются нелинейными стохастическими функциями времени и обобщенной координаты состояния системы [4, 6].

Тепловой поток, идущий от зоны стружкообразования, пронизывает систему контактно-фрикционного взаимодействия и рассеивается во внешней среде. Он влияет на механические и деформационные свойства контактных слоев режущего инструмента, устойчивость адсорбционной пленки на наружных поверхностях островковых наростов, коэффициент трения между скользящей стружкой и режущим инструментом, а также на прочность сцепления нароста с передней рабочей поверхностью режущего клина.

Система контактно-фрикционного взаимодействия является динамической, в которой постоянно происходят какие-нибудь изменения, например, срыв некоторых островковых наростов, отдельных участков или целиком сплошного нароста. Отрыв нароста сопровождается локальным разрушением инструментального материала, а интенсивность этого процесса определяет изнашива-

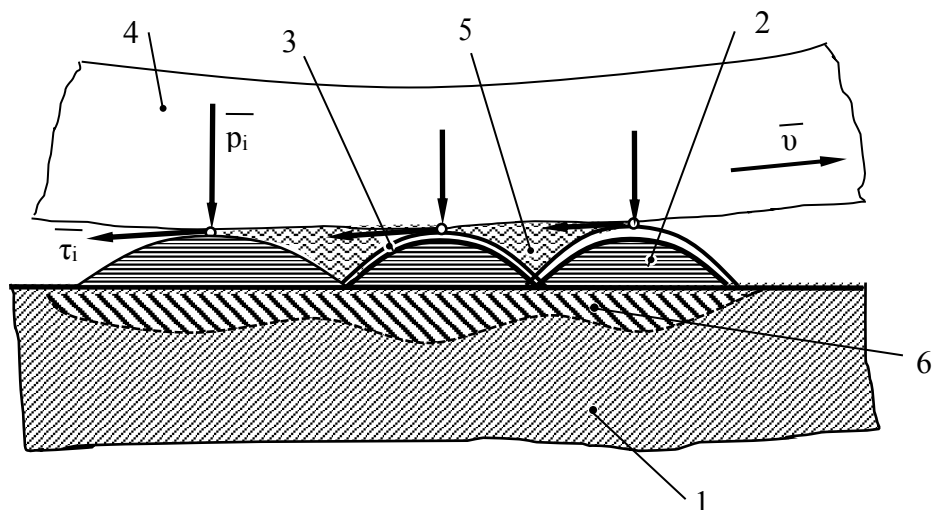


Рис. 3. Структура диссипативной структуры контактного процесса при резании металлов:
1 – передняя поверхность режущего клина; 2 – островковые наросты; 3 – адсорбционная пленка;
4 – стружка; 5 – смазочно-охлаждающая технологическая среда; 6 – упрочненный слой

Fig. 3. Structure of the dissipative structure of the contact process when cutting metals: 1 – front surface of the cutting wedge; 2 – island growths; 3 – adsorption film; 4 – chips; 5 – cooling lubricant; 6 – hardened layer



ние режущего инструмента. Отрыву нароста предшествует нарушение сплошности адсорбционной пленки на его наружной поверхности и появление «сухого» металлического контакта. Это приводит к образованию прочной адгезионной связи между наростом и скользящей стружкой. Если прочность такой связи выше прочности адгезионного сцепления между наростом и поверхностью

режущего клина, то происходит просто отрыв нароста без разрушения рабочей поверхности инструмента. Если адгезионная связь между наростом и инструментом достаточно высокая, то разрушение происходит либо по самому наросту, либо на глубинном уровне поверхностного слоя инструмента, который представляет элементарный акт изнашивания.

Функционирование диссипативной структуры контактного взаимодействия

Диссипативная структура функционирует таким образом, чтобы максимально снизить влияние внешних возмущений, путем реализации принципа наименьшего действия [4, 7]. Алгоритм снижения внешних воздействий включает минимизацию коэффициента трения между наростом и стружкой, образование прочной адгезионной связи между наростом и поверхностью режущего клина, максимальное упрочнение подповерхностного слоя инструмента и повышение удельной работы изнашивания. Рассмотрим более подробно каждый из перечисленных механизмов.

Устойчивость адсорбционной пленки зависит от температурно-силовых условий контактного процесса. С повышением температуры и контактных напряжений антифрикционная функция адсорбционной пленки снижается. Устойчивая адсорбционная пленка может существовать только в области дискретного контакта и при наличии в СОТС поверхностно-активных присадок [13, 14]. При отсутствии адсорбционной пленки наружная поверхность нароста может обеспечивать низкий коэффициент трения за счет сильно деформированной аморфной фазы. Следовательно, одним из условий нормального функционирования диссипативной структуры является обеспечение минимального коэффициента трения между наростом и скользящей стружкой, т.е.

$$\alpha_1 f_1(t) + \alpha_2 f_2(t) + \alpha_3 f_3(t) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $f_1(t)$ – коэффициент сухого трения между

наростом и скользящей стружкой; $f_2(t)$ – коэффициент трения между наростом и стружкой при наличии адсорбционной пленки; $f_2(t)$ – коэффициент трения между наростом и стружкой при наличии аморфной фазы; α_1 , α_2 и α_3 – весовые коэффициенты, учитывающие соотношения площадей контактных участков с разными режимами внешнего трения.

Снижение коэффициента трения приводит к изменению тензора напряжений в зоне стружкообразования, а это меняет напряженно-деформированное состояние во всей области первичных деформаций стружкообразования [15]. Такая взаимозависимая связь представляет один из вариантов проявления алгоритма принципа наименьшего действия в процессах резания металлов.

Прочность адгезионной связи между металлическими материалами определяется их атомарным, химическим и электронным родством, которое можно представить в формализованном виде как диаграммы Даркена-Гурри, построенной в координатах «атомарный радиус – электроотрицательность». Прочность адгезионной связи выше между теми элементами, которые ближе располагаются на диаграмме Даркена-Гурри [16].

Прочность адгезионной связи можно повысить за счет увеличения поверхностных дефектов кристаллического строения, концентрирующих вокруг себя упругую внутреннюю энергию. При сближении двух поверхностей и их взаимной пластической деформации часть энергии, аккумулированной



поверхностным концентратором напряжения, выделяется в виде теплового импульса, облегчая процесс образования прочных металлических или молекулярных связей между контактирующими поверхностями. Это приводит к образованию прочной адгезионной связи. Следовательно, прочность адгезионной связи можно повысить за счет увеличения плотности поверхностных дефектов кристаллического строения, образующих концентраторы напряжений разных масштабных уровней. Эффективным способом повышения таких концентраторов напряжений является наведение поверхностных дислокаций путем поверхностного пластического деформирования. В контактно-фрикционной зоне между стружкой и инструментом пластическая деформация является естественным и доминирующим процессом.

Упрочнение подповерхностного слоя режущего керна и повышение удельной работы изнашивания представляют единый процесс, связанный с повышением химического потенциала поверхностной микроструктуры. Учитывая деформационный характер контактно-фрикционного взаимодействия при резании, основным механизмом упрочнения поверхностного слоя режущего клина будет деформационное упрочнение за счет генерации плотности дислокаций.

Итак, прочность адгезионных связей между наростом и поверхностью режущего клина, упрочнение его поверхностных слоев и повышение удельной работы изнашивания режущего инструмента определяется плотностью дефектов кристаллического строения трущихся поверхностей. Доминирующую роль в этих механизмах играют дислокации.

Уравнение энергетического баланса контактно-фрикционного процесса в энергетических потоках можно представить

$$p(\alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2 + \alpha_3 f_3) v = Q + a_{адз} F_u + \Delta \mu V_{упр} + a_{изн} \Delta M, \quad (2)$$

где p – среднее нормальное напряжение в контакте; $a_{адз}$ – удельная энергия образова-

ния адгезионной связи; F_u – истинная площадь контакта; $\Delta \mu$ – приращение химического потенциала при деформационном упрочнении контактных слоев инструмента; $a_{изн}$ – удельная работа изнашивания; ΔM – потеря массы, отнесенной к единичной площади контакта режущего клина при изнашивании; $V_{упр}$ – объем упрочненного поверхностного слоя инструмента; Q – поток тепла, выделившийся при контактно-фрикционном взаимодействии.

Тепловой поток Q учитывает только ту энергию, которая выделилась непосредственно в процессе контактно-фрикционного взаимодействия в зоне вторичной пластической деформации, т.е. не учитывает тепло, идущее из зоны стружкообразования.

Поток тепла Q можно представить через скорость производства энтропии

$$Q = T \frac{dS}{dt}. \quad (3)$$

Выделим отдельно все компоненты уравнения баланса (2), зависящие от свободной энергии Φ , поглощенной при контактно-фрикционном взаимодействии:

$$\Phi = a_{адз} F_u + a_{изн} \Delta M + \Delta \mu V_{упр}. \quad (4)$$

Тогда уравнение баланса примет вид

$$p \cdot (\alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2 + \alpha_3 f_3) \cdot v = Q + \Phi. \quad (5)$$

Диссипативная структура по определению должна обеспечивать

$$\Phi \rightarrow \max \quad (6)$$

или

$$d\Phi = 0. \quad (7)$$

Тогда (4) можно представить

$$\Phi = p \cdot (\alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2 + \alpha_3 f_3) \times v - \frac{dS}{dt} T \rightarrow \max. \quad (8)$$



С учетом условия (7) уравнение (8) в раскрытом виде представляет

$$\begin{aligned} dp(\alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2 + \alpha_3 f_3) v + \\ + p v \cdot d(\alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2 + \alpha_3 f_3) + \\ + p(\alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2 + \alpha_3 f_3) \cdot dv = . \end{aligned} \quad (9)$$

$$= \frac{d^2 S}{dt^2} T + \frac{dS}{dt} dT.$$

Неравновесная система контактно-фрикционного взаимодействия в своем развитии стремится к условию устойчивого динамического равновесия, когда нормальное давление в контакте, скорость скольжения стружки и температура в зоне резания стабилизируются, изменяясь в определенном узком диапазоне. Другими словами, в установившемся периоде процесса система резания находится в квазиустойчивом состоянии. В первом приближении нормальное давление, скорость скольжения стружки и температуру можно считать постоянными. С учетом этого, уравнение (9) примет вид

$$p v \cdot d(\alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2 + \alpha_3 f_3) = \frac{d^2 S}{dt^2} T. \quad (10)$$

Из (10) следует, что производство энтропии в контактно установившемся процессе происходит преимущественно в зоне фрикционного взаимодействия стружки с поверхностными слоями наростов или режущего клина. Все остальные механизмы диссипации включаются периодически на небольшой период времени при пиковых возмущениях контактно-фрикционного процесса. При этом скорость производства энтропии будет определяться интегральной величиной воздействия коэффициентов трения. Математически это можно представить:

$$p v \cdot (\alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2 + \alpha_3 f_3) \cdot t = \frac{dS}{dt} T. \quad (11)$$

Весовые коэффициенты определяются относительной площадью контакта стружки с передней поверхностью режущего

клина, покрытой наростами и разной степенью развития адсорбционной пленки или ее отсутствия. Их численное значение можно определить:

$$\alpha_1 = \frac{l_1}{l_k}; \quad \alpha_2 = \frac{l_2}{l_k}; \quad \alpha_3 = \frac{l_3}{l_k}, \quad (12)$$

где l_1, l_2, l_3 – длина контакта, покрытая наростами без адсорбционной пленки, с адсорбционной пленкой и с аморфной поверхностной фазой соответственно; l_k – длина контакта, покрытая наростами.

Наибольшее значение имеет весовой коэффициент, относящийся к «сухому» контакту, среднее значение имеет место при контакте с аморфной фазой и минимальное значение у коэффициента с устойчивой адсорбционной пленкой. Соотношение весовых коэффициентов сильно зависит от состава технологической среды, скорости резания температуры в зоне контактного процесса. С повышением скорости резания доля «аморфного» и «сухого» контакта возрастает. При наличии в СОТС высокой концентрации термически устойчивых поверхностно-активных веществ увеличивается роль контакта, покрытого адсорбционной пленкой. Расположение различных контактных участков в зоне вторичных пластических деформаций показано на рис. 4.

Процессы контактно-фрикционного взаимодействия оказывают непосредственное влияние на стружкообразование через угол действия, который определяется

$$\omega = \arctg(\alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2 + \alpha_3 f_3) - \gamma. \quad (13)$$

Угол действия оказывает влияние на мощность резания [1]

$$A_p = R v \cdot \cos \omega. \quad (14)$$

где R – равнодействующая сила резания.

Влияние диссипативного процесса на равнодействующую силу резания можно представить следующей зависимостью:

$$R = N_{nep} \sqrt{1 - (\alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2 + \alpha_3 f_3)^2}, \quad (15)$$

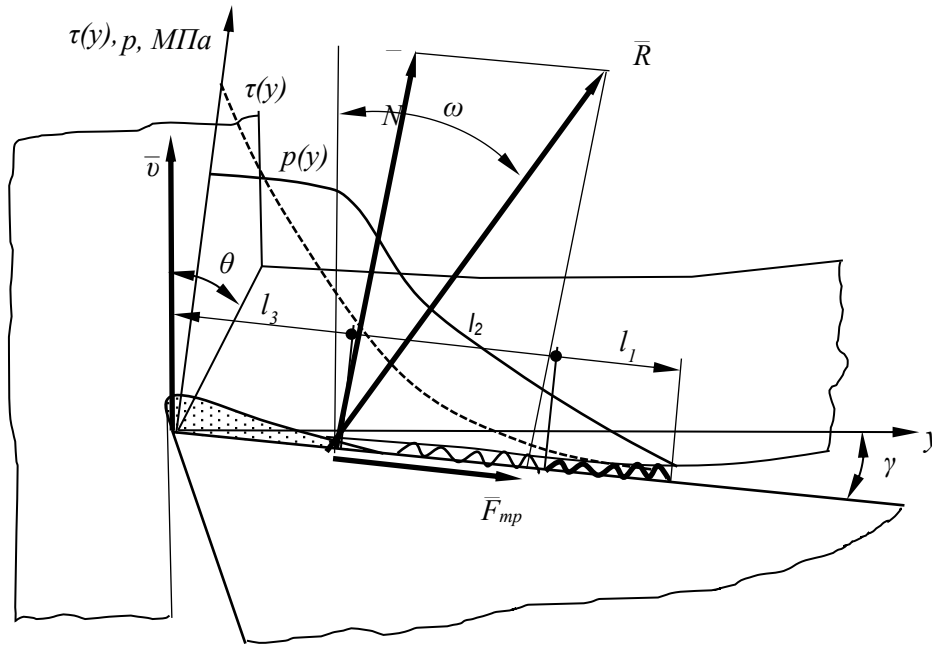


Рис. 4. Схема контактно-фрикционных участков в зоне вторичных пластических деформаций
Fig. 4. Diagram of contact and friction areas in the zone of secondary plastic deformation

где $N_{пер}$ – нормальная нагрузка на передней поверхности режущего клина.

Нормальная нагрузка на передней поверхности режущего клина определяется эпюрой распределения нормальных контактных напряжений

$$N_{пер} = \int_0^{l_k} p(l) dl. \quad (16)$$

Тогда работа резания будет равна

$$A_p = N_{пер} v \sqrt{1 - (\alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2 + \alpha_3 f_3)^2} \times \cos[\arctg(\alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2 + \alpha_3 f_3) - \gamma] \quad (17)$$

Наличие тесной связи между процессами, происходящими в зонах первичной и вторичной пластической деформации, подтверждается зависимостью между количественными микроструктурными показателями стружкообразования и условиями контактно-фрикционного взаимодействия при резании металлов [15].

Заключение

1. Диссипативная структура, образующая и функционирующая в контактом процессе, состоит из островковых и сплошных наростов, адсорбционной пленки на их наружных поверхностях и упрочненного подповерхностного слоя режущего клина.

2. В период устойчивого (квазистационарного) протекания процесса резания

диссипация в зоне вторичных пластических деформаций реализуется за счет разных режимов фрикционных процессов между сходящей стружкой и наружными поверхностями наростов. Влияя на характер фрикционного процесса, можно управлять стойкостью режущего инструмента и качеством механической обработки.

Библиографический список

1. Бобров В.Ф., Грановский Г.И., Зорев Н.Н. Развитие науки о резании металлов. М.: Машиностроение, 1967. 416 с.

2. Воронцов А.Л., Султан-Заде Н.М., Албагачиев А.Ю. Разработка новой теории резания. 1. Введение // Вестник машиностроения. 2008. № 1. С. 57–67.



3. Заковоротный В.Л., Фан Динь Тунг, Быкадор В.С. Самоорганизация и бифуркация динамической системы обработки металлов резанием // Известия высших учебных заведений. Прикладная неравновесная динамика. 2014. Т. 22. № 3. С. 26–39.
4. Ким В.А. Самоорганизация в процессах упрочнения, трения и изнашивания режущего инструмента. Владивосток: Дальнаука, 2001. 203 с.
5. Ким В.А., Якубов Ф.Я., Схиртладзе А.Г. Мезомеханика процессов контактного взаимодействия при трении и резании металлов. Старый Оскол: ООО «Тонкие наукоемкие технологии», 2017. 244 с.
6. Мигранов М.Ш., Шустер Л.Ш. Особенности термодинамических процессов на контактных поверхностях режущего инструмента // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 4-3. С. 1126–1129.
7. Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксогоев А.А. Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука, 1994. 383 с.
8. Федоров С.В. Основы трибоэродинамики и физико-химические предпосылки теории совместимости. Калининград: Калининградский государственный технический университет, 2003. 415 с.
9. Федоров С.В., Ассенова Э. Синергетический принцип самоорганизации при трении // Вестник науки и образования Северо-Запада России, 2017. Т. 3. № 3. С. 21–41.

10. Кремнева Л.В., Снегирева К.К., Ершова И.В. Методика расчета коэффициента диссипации энергии при резании материалов // Вестник МГТУ «Станкин», 2014. № 4 (31). С. 119–122.
11. Кабалдин Ю.Г., Олейников А.И., Бурков А.А. Синергетический подход к анализу динамических процессов в металлорежущих станках // СТИН, 2003. № 1-2. С. 3–6.
12. Ким В.А., Каримов Ш.А. Проявление физической мезомеханики при контактном взаимодействии и изнашивании // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2014. № II-1(18). С. 79–85.
13. Якубов Ч.Ф. Упрочняющее действие СОТС при обработке металлов резанием. – Симферополь: ОАО «Симферопольская городская типография», 2008. 156 с.
14. Верхотуров А.Д., Якубов Ф.Я., Ким В.А., Коневцов Л.А., Якубов Ч.Ф. Роль воздуха в контактных процессах резания металлов // Ученые записки КНАГТУ. 2014. № III-1 (19). С. 65–72.
15. Отряскина Т.А., Ким В.А., Сариллов М.Ю. Структурно-количественные соотношения процесса стружкообразования // Фундаментальные исследования. 2014. № 6-5. С. 932–936.
16. Хирионен Дж. Ионная имплантация / пер. с англ. М.: Металлургия, 1985. 302 с.

References

1. Bobrov V.F., Granovskij G.I., Zorev N.N. *Razvitie nauki o rezanii metallov* [Development of science on metal cutting]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1967, 416 p. (In Russian)
2. Voroncov A.L., Sultan-Zade N.M., Albagachiev A.Yu. Development of a new theory of cutting. 1. Introduction. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of Mechanical Engineering], 2008, no. 1, pp. 57–67. (In Russian)
3. Zakovorotnyj V.L., Fan Din' Tung, Bykador V.S. Self-organization and bifurcations of dynamical metal cutting system. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Prikladnaya neravnovesnaya dinamika* [Proceedings of higher educational institutions. Applied non-equilibrium dynamics], 2014, vol. 22, no. 3, pp. 26–39. (In Russian)
4. Kim V.A. *Samoorganizaciya v processah uprochneniya, treniya i iznashivaniya rezhushchego instrumenta* [Self-organization in the processes of hardening, friction and wear of the cutting tool]. Vladivostok: Dal'nauka Publ., 2001, 203 p. (In Russian)
5. Kim V.A., Yakubov F.Ya., Skhirtladze A.G. *Mezomehanika processov kontaktnogo vzaimodejstviya pri trenii i rezanii metallov* [Mesomechanics of contact interaction processes under metal friction and cutting]. Staryj Oskol: «Fine High-End Technologies» LLC Publ., 2017, 244 p. (In Russian)
6. Migranov M.Sh., Shuster L.Sh. Thermodynamic process on contact surfaces of cutting tools. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk* [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian

- Academy of Sciences], 2011, vol. 13, no. 4-3, pp. 1126–1129. (In Russian)
7. Ivanova V.S., Balankin A.S., Bunin I.Zh., Oksogoev A.A. *Sinergetika i fraktaly v materialovedenii* [Synergetics and fractals in materials science]. Moscow: Nauka Publ., 1994, 383 p. (In Russian)
8. Fedorov S.V. *Osnovy triboerodinamiki i fiziko-himicheskie predposylki teorii sovmestimosti* [Bases of triboengineering and physico-chemical preconditions of the compatibility theory]. Kaliningrad: Kaliningrad state technical university Publ., 2003, 415 p. (In Russian)
9. Fedorov S.V., Assenova E. Synergy principle of self-organization at friction. *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii* [Journal of Science and Education of North-West Russia], 2017, vol. 3, no. 3, pp. 21–41. (In Russian)
10. Kremneva L.V., Snegireva K.K., Ershova I.V. Methods of calculating the energy dissipation coefficient when cutting materials. *Vestnik MGTU "Stankin"* [Vestnik MSTU "Stankin"], 2014, no. 4 (31), pp. 119–122. (In Russian)
11. Kabaldin Yu.G., Olejnikov A.I., Burkov A.A. Synergetic approach to the analysis of dynamic processes in machine tools. STIN, 2003, no. 1-2, pp. 3–6. (In Russian)
12. Kim V.A., Karimov Sh. A. Manifestation of physical mesomechanics in contact interaction and wear. *Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta* [Scientific notes of the Crimean Engineering Pedagogical University], 2014, no. II-1(18),



pp. 79–85. (In Russian)

13. Yakubov Ch.F. *Uprochnyayushchee dejstvie SOTS pri obrabotke metallov rezaniem* [Strengthening action of coolants under metal cutting]. Simferopol': Simferopol city printing house JSC Publ., 2008, 156 p. (In Russian)

14. Verhoturov A.D., Yakubov F.Ya., Kim V.A., Konevcov L.A., Yakubov Ch.F. Role of air in the contact process of cutting metals. *Uchenye zapiski KnAGTU* [Scholarly

notes of Komsomolsk-na-Amure State Technical University], 2014, no. III-1 (19), pp. 65–72. (In Russian)

15. Otryaskina T.A., Kim V.A., Sarilov M.Yu. Structural-quantitative parities of process cut formation. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research], 2014, no. 6-5, pp. 932–936. (In Russian)

16. Hirionen Dzh. Ion implantation, 1985. 302 p. (Russ. ed.: Ionnaya implantaciya. Moscow, Metallurgiya Publ., 1985, 302 p.).

Критерии авторства

Ким В.А. обосновал и предложил строение диссипативной структуры контактного взаимодействия при резании металлов, выполнил термодинамический анализ контактного процесса. Якубов Ч.Ф. выполнил микроструктурные исследования и показал связь между диссипативной структурой и зоной первичных пластических деформаций стружкообразования. Авторы в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Kim V.A. substantiated and proposed the composition of a dissipative structure of contact interaction under metal cutting, performed a thermodynamic analysis of the contact process. Yakubov Ch.F. performed a microstructural study and showed the relationship between the dissipative structure and the area of primary plastic deformations of chip formation. The authors 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 621.787.6.004

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-12-46-55>

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ УПРОЧНЕНИЕМ ВОЛНОЙ ДЕФОРМАЦИИ

© А.В. Киричек¹, Д.Л. Соловьев², С.А. Силантьев³, С.О. Федонина⁴

^{1,4}Брянский государственный технический университет,
241035, Российская Федерация, г. Брянск, б-р 50 лет Октября, 7.

^{2,3}Владимирский государственный университет,
602264, Российская Федерация, г. Муром, ул. Орловская, 23.

РЕЗЮМЕ: В данной работе проведены исследования повышения качества и эксплуатационных свойств деталей машин. При этом необходимо учитывать, что в процессе эксплуатации изделий всегда наиболее нагружен поверхностный слой. В настоящее время интенсивно развиваются методы и технические средства инженерии поверхности, позволяющие кардинально изменять свойства, структуру и фазовый состав поверхностного слоя. Описывается способ, использующий для упрочнения поток ударных импульсов – волну деформации, получивший название «статико-импульсная обработка». Отличительной особенностью упрочнения волной деформации является возможность адаптации формы ударных импульсов к физико-механическим свойствам нагружаемого материала, приведенной кривизне инструмента и нагружаемой поверхности с целью максимального использования кинетической энергии удара бойка по волноводу для упругопластического деформирования материала. В результате упрочнения волной деформации может быть создан глубокий упрочненный слой, достигающий 6–10 мм, а также степень упрочнения до 250 %. Высокая (акустическая) скорость распространения волны деформации в материале, возможность управления интенсивностью и длительностью силового воздействия на фрагменты поверхностного слоя позволяют отнести данный способ обработки к способам интенсивной пластической деформации. При упрочнении волной деформации установлено наличие наноструктурных зон – аналогичных, полученных интенсивной пластической деформацией, размеры которых изменяются от 30 до 90 нм. Кинематика способа позволяет регулировать равномерность упрочненного поверхностного слоя. В результате проведенных исследований установлено: гетерогенно упрочненная структура, полученная упрочнением волной деформации, обеспечивает повышение долговечности при действии контактных усталостных нагрузок до 7 раз.

Ключевые слова: упрочнение, поверхностное пластическое деформирование, шероховатость, ударный импульс, волна деформации, твердость, поверхностный слой, равномерность упрочнения

Информация о статье: Дата поступления 18 октября 2018 г.; дата принятия к печати 20 ноября 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2018 г.

Для цитирования: Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Силантьев С.А., Федонина С.О. Технологическое обеспечение качества и эксплуатационных свойств упрочнением волной деформации. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(12):46–55. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-46-55

¹Киричек Андрей Викторович, доктор технических наук, доцент, профессор, проректор по перспективному развитию, e-mail: avk@tu-bryansk.ru

Andrey V. Kirichek, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor, Vice-Rector for Prospective Development, e-mail: avk@tu-bryansk.ru

²Соловьев Дмитрий Львович, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения, e-mail: murstin@yandex.ru

Dmitry L. Soloviev, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, e-mail: murstin@yandex.ru

³Силантьев Сергей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения, e-mail: ppdsio@yandex.ru

Sergey A. Silantiev, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, e-mail: ppdsio@yandex.ru

⁴Федонина Светлана Олеговна, магистр, e-mail: avk@tu-bryansk.ru
Svetlana O. Fedonina, Master of sciences, e-mail: avk@tu-bryansk.ru



TECHNOLOGICAL SUPPORT OF QUALITY AND OPERATIONAL PROPERTIES BY WAVE DEFORMATION HARDENING

A.V. Kirichek, D.L. Soloviev, S.A. Silantiev, S.O. Fedonina

Bryansk State Technical University,
7, 50 let Oktyabrya Blvd., Bryansk 241035, Russian Federation
Vladimir State University,
23, Orlovskaya St., Murom, 602264, Russian Federation

ABSTRACT: The article deals with improving the quality and operation characteristics of machine parts. It should be noted that surface layer is always the most loaded when the product is in operation. Today, the methods and technical means of surface engineering are developing intensively. They allow radical change in the properties, structure and phase composition of the surface layer. Description is also given to a method that uses the flow of shock pulses – a deformation wave – for hardening. This method is called static-pulse processing. The feature of wave deformation hardening is the possibility of adapting the shock pulse shape to the physico-mechanical properties of the loaded material, reduced curvature of the tool and loaded surface for maximum use of the kinetic energy of the striker impact on the waveguide for elastic-plastic deformation of the material. Wave deformation hardening can result in the formation of a deep hardened layer up to 6-10 mm thickness with the hardening degree up to 250%. High (acoustic) velocity of deformation wave propagation in the material, the ability to control the intensity and duration of the impact on the surface layer fragments allow to relate this treatment method to the methods of intensive plastic deformation. It has been found out that deformation wave hardening is characterized by the presence of nanostructured zones similar to the ones obtained by intensive plastic deformation, the dimensions of which vary from 30 to 90 nm. The kinematics of the method allows to adjust the uniformity of the hardened surface layer. The conducted studies have shown that a heterogeneously hardened structure obtained by wave deformation hardening increases durability under the action of contact fatigue loads up to 7 times. Cinematic mode allows you to adjust the evenness of hardened surface layer. The studies found heterogeneously hardened structure obtained hardening wave deformation, provides increased durability under contact fatigue loads up to 7 times.

Keywords: *hardening, surface plastic deformation, roughness, shock impulse, deformation wave, hardness, surface layer, hardening uniformity*

Information about the article: Received October 18, 2018; accepted for publication November 20, 2018; available online December 28, 2018.

For citation: Kirichek A.V., Soloviev D.L., Silantiev S.A., Fedonina S.O. Technological support of quality and operational properties by wave deformation hardening. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018; 22(12):pp. 46–55. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-46-55

Введение

Реальный ресурс работы машин и механизмов в значительной степени определяется долговечностью наиболее нагруженных ответственных деталей, при изготовлении которых необходимо особое внимание уделять упрочняющей обработке.

Упрочнение поверхностным пластическим деформированием (ППД) позволяет создавать наклепанный поверхностный слой, обладающий высокой твердостью и сжимающими остаточными напряжениями, благоприятно влияющими при действии на деталь циклических нагрузок. Важной особенностью способов ППД также является то, что они не требуют больших энергозатрат и применения сложного технологиче-

ского оборудования [1–3].

Параметры наклепанного слоя после ППД во многом определяет нагрузка, осуществляющая пластическое деформирование, которая может быть как статической, так и ударной. Использование ударной нагрузки энергетически более выгодно, чем статической. Однако ударные способы ППД не так широко применяются как статические. Это во многом связано с тем, что управлять ударами при упругопластическом деформировании гораздо сложнее, чем статической нагрузкой и при одинаковой кинетической энергии удара, энергия, расходуемая на пластическую деформацию, может быть разной. Поэтому часто достаточно трудно



предсказать результаты упрочнения, полученные ударной нагрузкой, особенно при необходимости формировать большую глубину и степень упрочнения. Причиной этому является то, что при ударных способах ППД не учитывалась длительность ударного импульса, определяющая время, отведенное на упругопластическое деформирование, а также изменение силы удара во время ее действия на материал (форма ударного импульса), определяющее характер пластического течения материала, отсутствовали механизмы для их регулирования.

Использование нагружения управляемыми ударными импульсами дает возможность для более точного регулирования эпюр микротвердости и остаточных напряжений на значительной глубине упрочненного поверхностного слоя. При этом более рационально расходуется энергия удара, повышается КПД процесса.

Форму ударных импульсов, возникающих при ударе, определяет геометрия ударных систем (рис. 1), (табл. 1) [4]. Так при ударе шаром формируется треугольный импульс с высокой амплитудой, небольшой длительности и малой энергией. При ударе торцом цилиндрического стержня (бойком) – импульс трапецеидальной формы меньшей амплитуды, но большей длительности и большей энергии. При ударе бойка через предварительно статически поджатое к

нагружаемой поверхности промежуточное звено (волновод) – пролонгированный импульс, содержащий головную и хвостовую части. Оценка количества энергии, передаваемой ударными импульсами, показала, что при ударе шаром передается 12 % от кинетической энергии удара, при ударе бойком – 26 %, а при ударе бойком через волновод – 38 %.

Для того чтобы использовать при упрочнении ППД поток ударных импульсов – волну деформации, разработан способ статико-импульсной обработки (СИО). При СИО в ударной системе боек-волновод генерируются плоские акустические волны, которые характеризуются законом изменения сил (амплитуды волны деформации) во времени, максимальным значением сил, временем и периодичностью действия сил (длительность и скважность импульса) и энергией волны деформации. Эти характеристики зависят от параметров ударной системы, геометрических размеров и свойств материала бойка и волновода, скорости удара бойка по волноводу. Статическое поджатие волновода с инструментом к нагружаемой поверхности создает условия для предотвращения преждевременного разрыва контакта после удара, обеспечивая рекуперацию отраженных волн деформации [4–6].

Цель исследования

Разработка технологии деформационного упрочнения управляемыми ударными волнами, обеспечивающей качество и

высокие эксплуатационные характеристики поверхностного слоя.

Материал и методы исследования

Отличительной особенностью упрочнения волной деформации является возможность адаптации формы ударных импульсов к физико-механическим свойствам нагружаемого материала, приведенной кривизне инструмента и нагружаемой поверхности, с целью максимального использования кинетической энергии удара бойка по волноводу для упругопластического дефор-

мирования материала. Для этого используется характеристика динамического сопротивления материала, внедрение в него инструмента в виде зависимости «сила – внедрение», которая для материалов, обладающих упругопластическими свойствами, может быть представлена в виде ломаной линии с монотонно убывающим углом наклона отрезков к оси абсцисс. Каждый упрочняе-



мый материал с учетом скорости нагружения имеет свою зависимость «сила – внедрение» с характерным углом наклона отрезков. Адаптация формы ударных импульсов к свойствам деформируемого материала и условиям нагружения, использование хвостовой части импульсов позволяют увеличивать количество энергии, переданной упрочняемому материалу, и создавать глубокий упрочненный слой. Увеличение количества управляемых технологических факторов упрочнения ударными волнами деформации обеспечивает высокую управляемость и гибкость процесса, широкие возможности варьирования параметрами качества поверхностного слоя. Высокая (акустическая) скорость распространения волны деформации в материале, возможность управления интенсивностью и длительностью силового воздействия на фрагменты поверхностного слоя позволяют отнести данный способ обработки к способам интенсивной пластической деформации [7, 8].

Конструктивными параметрами упрочнения волной деформации являются генератор ударных импульсов, а также технологическая оснастка, реализующая процесс обработки.

Генератор импульсов характеризуется конструктивными элементами, в первую очередь размерами бойковой части, которая определяется в зависимости от формы и размеров бойка. Движение бойка (разгон-взвод) будет определяться настройками параметрами генератора импульсов. Скорость разгона и масса бойка определяют энергию удара, а частота переключения режима разгон-взвод определяет частоту ударов.

Технологическая оснастка включает в себя оборудование, на котором устанавливается генератор импульсов и которое реализует движение подачи, а также механизмы, осуществляющие предварительную статическую нагрузку. В качестве такого оборудования могут использоваться различные металлорежущие (токарные, фрезерные, строгальные), накатные или специальные станки. Предварительная статиче-

ская нагрузка может осуществляться различными устройствами и механизмами, например, гидроприводом, электромеханическим приводом и т.д. Для получения больших энергий ударных импульсов (до 100–300 Дж) используются ударные устройства с гидравлическим приводом, которые обладают высоким КПД, достигающим 50–80 % и при этом относительно малыми габаритными размерами. При обработке малогабаритных деталей, когда для упрочнения достаточно энергии ударных импульсов, не превышающей 10–50 Дж, используются отбойные электропневмолоты, предназначенные для строительных работ (разрушение твердых, слежавшихся и мерзлых грунтов, для ломки бетонных покрытий, асфальта и кирпичной кладки). Достоинством использования для упрочнения ППД таких устройств является изначально заложенное в конструкции – независимое регулирование энергии и частоты ударов, малые габаритные размеры, относительно (гидропневмолотов) низкая стоимость, относительно (пневмопневмолотов) высокий КПД (40–50 %), отсутствие необходимости использования дополнительных устройств энергоснабжения привода, таких, например, как маслостанция для гидропневмолотов, или компрессор для пневмопневмолотов.

Конструктивными параметрами определяются возможности упрочнения волной деформации: размеры и форма упрочняемых деталей, точность обработки.

Конструктивно-технологическими параметрами упрочнения волной деформации являются форма и размеры деформирующего инструмента, а также новые для ППД параметры – форма и размеры элементов ударной системы.

Ударной системой для упрочнения, как указывалось выше, являются боек и волновод гладкой цилиндрической формы, что позволяет генерировать в ударной системе прямоугольные единичные импульсы, амплитуда которых определяет силу удара. Удар через волновод позволяет использовать для нагружения отраженные волны деформации, которые в виде хвостовой части



импульса оказывают дополнительное деформирующее воздействие на очаг деформации. Использование хвостовой части позволяет пролонгировать ударный импульс, повышая эффективность его использования при упругопластическом деформировании. Распространение отраженных волн деформации по ударной системе зависит от акустических свойств материала ее элементов и их геометрических соотношений. Следовательно, при условии, что боек и волновод изготовлены из одного материала, управлять формой головной и хвостовой части ударного импульса можно за счет геометрических соотношений бойка и волновода: длин и площадей поперечных сечений. Для формирования пролонгированных ударных импульсов, передающих наибольшее количество энергии упрочняемому материалу, рекомендованы следующие соотношения по геометрическим параметрам бойка и волновода: $d_1/d_2 = 1-3$; $L_1/L_2 = 3-5$; $L_2/d_2 > 3$, где d_1 , d_2 и L_1 , L_2 – соответственно, диаметр и длина бойка и волновода.

Инструмент при упрочнении волной деформации крепится либо на свободном торце волновода, либо сам торец волновода заправляется под нужную форму и играет роль инструмента. В первом случае в процессе упрочнения инструмент при подаче относительно заготовки совершает обкатывающее движение по поверхности детали, во втором – скользящее. По форме применяемый инструмент может быть сферический (шары) и роликовый (стержневые, дисковые, профильные ролики). В зависимости от одновременно формируемых очагов деформации – одноконтный и многоконтный. Инструмент является звеном, через которое ударный импульс сообщается нагружаемому металлу, поэтому форма и размеры инструмента определяют степень искажения формы проходящего через него ударного импульса. Также геометрические параметры инструмента будут оказывать влияние на характеристику «сила-внедрение», выражаемую через коэффициент сопротивления внедрению. Кроме того, форма и размеры инструмента

будут влиять на конфигурацию и размеры единичных пластических отпечатков.

Основными технологическими параметрами СИО являются энергия и частота ударов, предварительное статическое поджатие инструмента к упрочняемой поверхности, скорость подачи.

Сила статической составляющей нагрузки при СИО должна обеспечивать полезное использование энергии отраженных волн деформации при внедрении инструмента. Ее величина должна быть не менее 10 % от динамической составляющей.

Энергия ударных импульсов является одним из основных параметров, определяющих величину пластической деформации. При ППД кинетическая энергия удара определяется скоростью удара и массой бойка, обычно расходуется на упругопластическую деформацию, процесс сухого трения во время взаимного скольжения инструмента и пятна контакта, а также на волновую энергию. Управление волновой энергией осуществляется формой и размерами бойка и волновода.

Частота ударных импульсов регулирует скважность и кратность деформирующего воздействия. Скважность определяется отношением периода следования импульсов одной последовательности к их длительности. Скважность связывает длительность ударных импульсов с частотой ударов и является важной характеристикой импульсных систем. Высокая скважность характерна для ударных устройств с высокой частотой и малой длительностью ударных импульсов, низкая – с низкой частотой и большой длительностью импульсов.

Подача, вместе с частотой ударов и геометрическими параметрами отпечатков, определяет кратность динамического нагружения. Для повышения КПД процесса необходимо максимально увеличивать ударную мощность генератора импульсов, поэтому обычно стараются производить обработку с максимально возможной частотой, обеспечивающей необходимую энергию ударов, тогда регулирование кратности осуществляется за счет изменения подачи.



Перечисленные параметры упрочнения волной деформации должны рассматриваться как единая система, регулирующая показатели качества поверхностного слоя. Для получения требуемых результатов упрочнения были установлены возможности их регулирования.

Изменение конструктивных параметров упрочнения волной деформации, т.е. конструкции генератора импульсов и технологической оснастки слишком трудоемко, и поэтому должно производиться крайне редко. Таким образом, регулирование показателей качества на стадии подготовки производства может осуществляться за счет конструктивно-технологических параметров, непосредственно при обработке за счет технологических параметров. Следовательно, упрочненный поверхностный слой формируется в результате действия ударной нагрузки, которая сообщается в очаг деформации с некоторой кратностью. Кратность динамического нагружения очага деформации определяется размерами единичных отпечатков, а также технологическими параметрами: частотой ударов и подачи. Изменяя кратность динамического нагружения можно регулировать перекрытие отпечатков и, соответственно, равномерность упрочнения.

Обобщенной характеристикой, связывающей размеры отпечатка с кратностью деформирующего воздействия, является

коэффициент перекрытия пластических отпечатков: $K = 1 - s / (\delta f 60)$ (где s – скорость подачи заготовки относительно инструмента, мм/мин; δ – характерный размер отпечатка, измеряемый в направлении подачи, мм; f – частота ударов, Гц). Если $K = 0$, то край одного отпечатка граничит с краем другого; если $0 < K < 1$, то отпечатки перекрываются; при $K = 1$ происходит многократное вдавливание инструмента в одно и то же место.

На основании проведенного анализа чередования твердых и мягких участков упрочненной структуры, полученной ударными волнами деформации с различным коэффициентом перекрытия, установлено что [9–13]:

- явно выраженная гетерогенно упрочненная структура обеспечивается в диапазоне значений коэффициента перекрытия отпечатков $0 \leq K \leq 0,5$;
- с увеличением коэффициента перекрытия шаг чередования твердых и вязких участков уменьшается; более крупные твердые участки гетерогенной структуры расположены ближе к поверхности и при коэффициенте перекрытия $0,5 < K \leq 0,9$ могут сливаться друг с другом;
- при увеличении энергии ударных волн деформации, воздействующих на материал с одинаковым шагом смещения, размеры твердых участков увеличиваются.

Результаты исследований и их обсуждение

Упрочнение волной деформации применялось для различных деталей и материалов. При этом глубина и степень упрочнения, например, для стали 45 достигала, соответственно, 5–6 мм и 90 %, а для стали 110Г13Л – 8–10 мм и 250 %, что связано с ее высокой склонностью к пластическому деформированию. Очень важным параметром структуры после упрочнения волной деформации, оказывающим большое влияние на эксплуатационные характеристики, является равномерность упрочнения.

Исследованиями, проведенными на долговечность при действии контактных

циклических нагрузок плоских образцов из стали 45 после упрочнения волной деформации с различным коэффициентом перекрытия, установлено, что наибольшее (до 7 раз) увеличение сопротивления действию контактных циклических нагрузок зафиксировано на образцах с гетерогенно упрочненной структурой, полученной при $0,35 < K < 0,45$, при этом в 1,5–2,5 раза снижено количество выкрашиваний, уменьшился размер выкрашиваний, наибольшее выкрашивание, обнаруженное на упрочненной поверхности, было в 10–15 раз меньше, чем на неупрочненной, а наименьшее –



меньше в 1,5–2 раза, средний размер выкрашиваний снизился в 2–3 раза.

Проведенные исследования структуры металлических образцов, упрочненных волнами деформации, выявили наличие наноструктурных зон аналогичных, полученных интенсивной пластической деформацией, размеры которых изменяются от 30 до 90 нм [14, 15]. Причем равномерность чередования наноструктурных зон может регулироваться энергией ударных волн деформации, размерами и геометрией пятна контакта инструмента и деформируемой поверхности, а также кратностью и величиной смещения возникающих очагов деформации.

Упрочнение волной деформации рекомендуется, в первую очередь, для упрочнения тяжело нагруженных деталей, имеющих глубину несущего слоя до 6–8 мм и более.

В результате упрочнения опытной партии сердечников крестовины Р65 типа 1/11 железнодорожных стрелочных переводов микротвердость наиболее изнашиваемой части клина и усовиков сердечников повысилась в 2,5 раза (с 260 до 640 HV), а глубина упрочненного слоя составила 8–9 мм. Это позволило снизить износ поверхности катания клина и усовиков сердечника, и до 3 раз увеличить срок его службы относительно установленных норм [4].

При статико-импульсном накатывании ходовых резьб установлено, что, по сравнению с традиционными методами пластического деформирования, обеспечивается в 1,7–2,7 раза большая глубина упрочненного слоя, что позволило повысить контактную выносливость резьбы в 1,7 раза по сравнению с накатанной и в 3,1 раза по сравнению со шлифованной [4].

Упрочнение волной деформации использовалось для отверстий с диаметром менее 120 мм. Упрочнение осуществлялось по схеме прошивания, когда инструмент – дорн – проходит вдоль упрочняемого отверстия под действием комбинированной толкающей статической и ударной нагрузки.

При этом ударная нагрузка преимущественно определяла параметры наклепанного слоя. В качестве инструментов для СИО отверстий применялись шары от подшипников, а также дорны с кольцами, используемые для классического дорнования.

Установлено, что степень и глубина упрочнения увеличивается с увеличением натяга, толщины стенки втулки и уменьшением диаметра упрочняемого отверстия и, соответственно, используемого диаметра инструмента. При толщине стенки до 20 мм и натягах, начиная от 0,5 мм, происходит упрочнение на всю толщину стенки. С уменьшением диаметра упрочняемого отверстия и, соответственно, использованием инструмента меньшего диаметра уменьшается площадь контакта инструмента и упрочняемой поверхности, повышается давление в очаге деформации, что приводит к увеличению степени и глубины упрочнения.

Установлено, что в зависимости от режимов упрочнения волной деформации отверстий шероховатость упрочненной поверхности может составлять $R_a = 0,5–0,08$ мкм, при исходной – $R_a = 5–6,5$ мкм. С увеличением диаметра инструмента происходит уменьшение давления на нагружаемую поверхность, что приводит к улучшению условий прохождения инструмента через обрабатываемое отверстие. Увеличение давления снижает шероховатость, при этом поверхность приобретает профиль с периодически повторяющимся шагом, что положительно сказывается на работоспособности упрочненных таким образом гильз цилиндров и резиновых уплотнителей поршней, работающих с осевым перемещением.

Способы подвода энергии удара в очаг деформации представлены на рисунке.

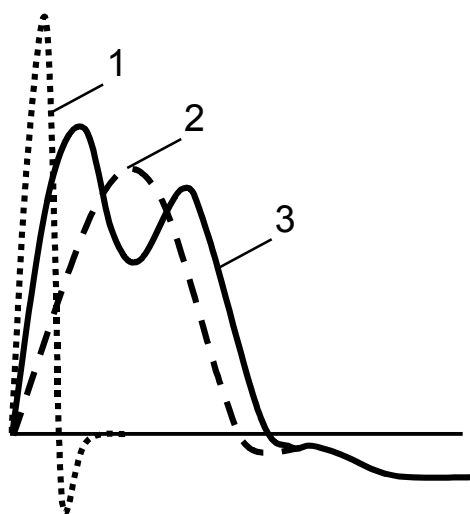
Проведена оценка скорости упрочнения отверстий волной деформации, которая в зависимости от натяга и диаметра инструментов составила не менее 2,76 м/мин, что более чем в два раза выше, чем при дорновании с большими натягами для тех же условий.



Способы подвода энергии удара в очаг деформации
Methods of pulse energy input in the deformation zone

Способ	Ударом		Ударом бойка по торцу волновода
	шара	бойка	
Схема способа			
Номер импульса	1	2	3

Примечание. P_u – импульсная нагрузка; $P_{ст}$ – статическая нагрузка; L_1 , L_2 – длина бойка и волновода; d_1 , d_2 – диаметр поперечного сечения бойка и волновода.



Зависимость формы импульса, генерируемого в очаге деформации, от вида ударной системы
Dependence of the shape of pulse generated in the deformation zone on the shock system type

Заключение

Установлено, что упрочнение волной деформации является эффективным способом, позволяющим обеспечивать параметры качества поверхностного слоя, необходимые для повышения эксплуатационных свойств различных деталей машин. В ре-

зультате его применения может быть получена глубина упрочненного поверхностного слоя, достигающая 6–10 мм, и степень упрочнения до 250 %, гетерогенно упрочненная структура, обеспечивающая повышение долговечности при действии контактных усталостных нагрузок до 7 раз.

Библиографический список

1. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.
2. Лебедев В.А., Соколов В.Д., Давыдова И.В. Прогнозирование физико-механических характеристик качества поверхностного слоя, модифицированного ППД // Упрочняющие технологии и покрытия. 2018. № 2 (158). С. 54–58.
3. Лебедев В.А., Штынь С.Ю., Гомцяня Г.С. Оценка предельно-эффективной упрочняемости деталей ди-

- намическими методами ППД // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. 2015. Т. 1. С. 355–358.
4. Киричек А.В., Соловьев Д.Л., Лазуткин А.Г. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием. Библиотека технолога. М.: Машиностроение, 2004. 288 с.
5. Kirichek A.V. and Soloviev D.L. Strain hardening of metal parts with use of impulse wave // IOP Conf. Series:



Materials Science and Engineering. 2016. No. 124. 012159.

6. Яшин А.В., Кандрушин В.А., Мурындин И.О., Головкин М.А. Оценка адекватности моделирования процесса деформационного упрочнения методом конечных элементов // Научный потенциал молодежи – будущее России. VI Всерос. науч. Зворыкинские чтения: сб. тез. докл. (г. Муром, 25 апреля 2014 г.). Муром, 2014. С. 546–549.

7. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение структура, свойства. М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. 398 с.

8. Valiev R.Z., Zhilyaev A.P., Langdon T.G., Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications, by John Wiley & Sons, Inc., 2014. 456 p.

9. Kirichek A.V., Soloviev D.L., Altuhov A.Yu. Production of Quasicomposite Surface Layer of a Metal Material by Shock Wave Strain Hardening // Journal of Nano and Electronic Physics. 2014. Vol. 6. No. 3. 03070.

10. Баринов С.В., Яшин А.В. Формирование гетерогенной структуры деформационным упрочнением статико-импульсной обработкой // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2014. № 4 (306). С. 86–89.

11. Баринов С.В., Медведев М.Н. Расчет требуемой глубины упрочнения для типовых деталей машин //

Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России: сб. тез. докладов II Всерос. межвуз. науч. конф. (г. Муром, 5 февраля 2010 г.). Муром, 2010. С. 266–267.

12. Баринов С.В. Моделирование создания и испытаний гетерогенно упрочненного поверхностного слоя // Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России. V Всерос. науч. Зворыкинские чтения: сб. тез. докл. Всерос. межвуз. науч. конф. (г. Муром, 1 февраля 2013 г.). Муром, 2013. С. 649.

13. Баринов С.В. Повышение долговечности деталей машин созданием гетерогенной структуры деформационным упрочнением // Наука и образование в развитии промышленной, социальной и экономической сфер регионов России. VI Всерос. научные Зворыкинские чтения: сб. тез. докл. (г. Муром, 14 февраля 2014 г.). Муром, 2014. С. 379–380.

14. Kirichek A.V., Soloviev D.L. Nanostructure Changes in Iron-Carbon Alloys as a Result of Impulse Deformation Wave Action // Journal of Nano and Electronic Physics. 2013. Vol. 5. No. 4. 04009.

15. Altukhov A.Y., Kirichek A.V., Ageev E.V., Soloviev D.L. Nanostructuring and heterogeneous hardening of tool materials from high-speed steel powder (Conference Paper) // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. 2017. Vol. 17. Issue 61. P. 263–270.

References

1. Odincov L.G. *Uprochnenie i otdelka detalej poverhnostnym plasticheskim deformirovaniem: Spravochnik* [Hardening and finishing of parts by surface plastic deformation: reference book]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1987, 328 p. (In Russian)

2. Lebedev V.A., Sokolov V.D., Davydova I.V. Prediction of physical and mechanical characteristics of quality of surface layer modified by surface plastic deformation. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Strengthening Technologies and Coatings], 2018, no. 2 (158), pp. 54–58. (In Russian)

3. Lebedev V.A., Shtyn' S.Yu., Gomcyan G.S. Estimation of maximum effective hardening of parts by dynamic methods of surface plastic deformation. *Aerokosmicheskaya tekhnika, vysokie tekhnologii i innovacii* [Aerospace Engineering, High Technologies and Innovations], 2015, vol. 1, pp. 355–358. (In Russian)

4. Kirichek A.V., Solov'ev D.L., Lazutkin A.G. *Tekhnologiya i oborudovanie statiko-impul'snoj obrabotki poverhnostnym plasticheskim deformirovaniem. Biblioteka tekhnologa* [Technology and equipment of static-pulse treatment by surface plastic deformation. Technologist's library]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2004, 288 p. (In Russian)

5. Kirichek A.V. and Soloviev D.L. Strain hardening of metal parts with use of impulse wave. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016, no. 124, 012159.

6. Yashin A.V., Kandrushin V.A., Muryndin I.O., Golovkin M.A. *Ocenka adekvatnosti modelirovaniya processa deformacionnogo uprochneniya metodom konechnykh elementov* [Evaluating modeling adequacy of deformation hardening by the finite element method]. *Sbornik tezisov dokladov "Nauchnyy potencial molodezhi – budushchee Rossii" VI Vserossijskie nauchnye Zvorykinskie chteniya* [Collection of report abstracts "Scientific potential of youth is the future of Russia". VI All-Russian scientific Zvorykin's readings:]. Murom, 2014, pp. 546–549. (In Russian)

7. Valiev R.Z., Aleksandrov I.V. *Ob'emnye nanostrukturnye metallicheskie materialy: poluchenie struktura, svoystva* [Bulk nanostructured metallic materials: production, structure, properties]. Moscow: Akademkniga Publ., 2007, 398 p. (In Russian)

8. Valiev R.Z., Zhilyaev A.P., Langdon T.G., Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications, by John Wiley & Sons, Inc., 2014. 456 p.

9. Kirichek A.V., Soloviev D.L., Altuhov A.Yu. Production of Quasicomposite Surface Layer of a Metal Material by Shock Wave Strain Hardening. *Journal of Nano and Electronic Physics*. 2014, vol. 6, no. 3, 03070.

10. Barinov S.V., Yashin A.V. Formation heterogeneous structure deformation statistics hardening pulse processing. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology], 2014, no. 4 (306), pp. 86–89. (In Russian)



11. Barinov S.V., Medvedev M.N. *Raschet trebuemoj glubiny uprochneniya dlya tipovyh detalej mashin* [Calculation of the required hardening depth for typical machine parts]. *Sbornik tezisev dokladov II Vserossiyskoj mezhvuzovskoj nauchnoj konferencii "Nauka i obrazovanie v razvitii promyshlennoj, social'noj i ekonomicheskoy sfer regionov Rossii"* [Collection of report abstracts of II All-Russian inter-university scientific conference "Science and education in the development of the industrial, social and economic spheres of Russian regions", Murom, 5 February 2010]. Murom, 2010, pp. 266–267. (In Russian)
12. Barinov S.V. *Modelirovanie sozdaniya i ispytaniy geterogenno uprochnennogo poverhnostnogo sloya* [Modeling of development and testing of heterogeneous hardened surface layer]. *Sbornik tezisev dokladov Vserossiyskoj mezhvuzovskoj nauchnoj konferencii "Nauka i obrazovanie v razvitii promyshlennoj, social'noj i ekonomicheskoy sfer regionov Rossii. V Vserossiyskie nauchnye Zvorykinskie chteniya"* [Collection of report abstracts of All-Russian inter-university scientific conference "Science and education in the development of the industrial, social and economic spheres of Russian regions", V All-Russian scientific Zvorykin's readings:

- Murom, 1 February 2013]. Murom, 2013, p. 649. (In Russian)
13. Barinov S.V. *Povyshenie dolgovechnosti detalej mashin sozdaniem geterogennoj struktury deformacionnym uprochneniem* [Increasing machine part durability by creating a heterogeneous structure via deformation hardening]. *Sbornik tezisev dokladov "Nauka i obrazovanie v razvitii promyshlennoj, social'noj i ekonomicheskoy sfer regionov Rossii. VI Vserossiyskie nauchnye Zvorykinskie chteniya"* [Collection of report abstracts "Science and education in the development of the industrial, social and economic spheres of Russian regions", VI All-Russian scientific Zvorykin's readings: Murom, 14 February 2014]. Murom, 2014, pp. 379–380. (In Russian)
14. Kirichek A.V., Soloviev D.L. Nanostructure Changes in Iron-Carbon Alloys as a Result of Impulse Deformation Wave Action. *Journal of Nano and Electronic Physics*. 2013, vol. 5, no. 4, 04009.
15. Altukhov A.Y., Kirichek A.V., Ageev E.V., Soloviev D.L. Nanostructuring and heterogeneous hardening of tool materials from high-speed steel powder (Conference Paper). *International Multidisciplinary Scientific Geo Conference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. 2017, vol. 17, Issue 61, pp. 263–270.

Критерии авторства

Киричек А.В. разработал способ упрочнения волной деформации, провел исследования наноструктурных зон аналогичных, полученных интенсивной пластической деформацией, статико-импульсного накатывания ходовых резьб, исследования на долговечность при действии контактных циклических нагрузок после упрочнения волной деформации, проанализировал полученные результаты. Соловьев Д.Л. разработал способ упрочнения волной деформации, провел исследования влияния параметров ударной системы на форму ударных импульсов и проанализировал полученные результаты. Силантьев С.А. провел исследования упрочнения отверстий волной деформации, сердечников крестовин железнодорожных стрелочных переводов и проанализировал полученные результаты. Федонина С.О. провела исследования наноструктурных зон аналогичных, полученных интенсивной пластической деформацией, полученных упрочнением волной деформации. Авторы в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authorship criteria

Kirichek A.V. has developed a wave deformation hardening method. He studied nanostructural zones similar to those received by intensive plastic deformation of static-pulse power screw thread rolling, researched durability under the action of contact cyclic loads after hardening by wave deformation and analyzed the obtained results. Soloviev D.L. has developed the wave deformation hardening method, studied the influence of pulse system parameters onto the shape of shock pulses and analyzed the results. Silantiev S.A. has studied wave deformation hardening of holes, frog cores of railway turnouts and analyzed the obtained results. Fedonina S.O. has studied nanostructural zones similar to those received by intensive plastic deformation produced by wave deformation hardening. The authors 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 621.98.042

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-12-56-67>

СТРУКТУРА ФОРМИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ «ДРОБЕУДАРНОЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЕ – ЗАЧИСТКА»

© В.П. Кольцов¹, Ле Чи Винь², Д.А. Стародубцева³

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

РЕЗЮМЕ: При формообразовании длинномерных панелей и обшивок широко используется дробеударная обработка. Вследствие дробеударного воздействия на обрабатываемой поверхности образуется специфическая микрогеометрия, характерной особенностью которой являются многочисленные отпечатки дроби различного диаметра и глубины. Наличие этих отпечатков вызывает ухудшение параметров шероховатости поверхности, поэтому после дробеударной обработки обязательна операция зачистки поверхности лепестковым кругом для частичного удаления следов воздействия дроби. Величина назначаемого припуска на зачистку зависит от требований к качеству поверхности детали. При этом глубина оставляемых отпечатков дроби определяется требованиями к шероховатости поверхности детали. После выполнения зачистки дробью обработанной поверхности образуется новый микрорельеф как совокупность микронеровностей от предыдущих видов обработки в виде оставшихся отпечатков дробеударного воздействия и следов обработки лепестковым кругом. Разработана математическая модель формирования параметров шероховатости поверхности при реализации технологической последовательности «дробеударное формообразование – зачистка». В работе приведено аналитическое описание процесса формирования шероховатости поверхности образцов в ходе дробеударного формообразования с последующей зачисткой лепестковым кругом на основе анализа микрогеометрии поверхности. Разработаны математические модели формирования параметров шероховатости поверхности при дробеударной обработке и последующей зачистке.

Ключевые слова: дробеударное формообразование, степень покрытия, зачистка лепестковым кругом, отпечатки дроби, оптический метод трехмерного сканирования, шероховатость поверхности после дробеударной обработки

Информация о статье: Дата поступления 29 октября 2018 г.; дата принятия к печати 30 ноября 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2018 г.

Для цитирования: Кольцов В.П., Ле Чи Винь, Стародубцева Д.А. Структура формирования параметров шероховатости поверхности при реализации технологической последовательности «дробеударное формообразование – зачистка». *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(12):56–67. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-56-67

¹Кольцов Владимир Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, e-mail: kolcov@istu.edu
Vladimir P. Koltsov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Technology and Equipment of Machine-Building Production, e-mail: kolcov@istu.

²Ле Чи Винь, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, e-mail: vinh_istu@mail.ru
Le Tri Vinh, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Technology and Equipment of Machine-Building Production, e-mail: vinh_istu@mail.

³Стародубцева Дарья Александровна, младший научный сотрудник кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, e-mail: d.star-irk@yandex.ru
Daria A. Starodubtseva, Junior Researcher of the Department of Technology and Equipment of Machine-Building Production, e-mail: d.star-irk@yandex.



FORMATION STRUCTURE OF SURFACE ROUGHNESS PARAMETERS AT “SHOT PEEN FORMING – GRINDING” TECHNOLOGICAL SEQUENCE IMPLEMENTATION

Vladimir P. Koltsov, Le Tri Vinh, Daria A. Starodubtseva

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

ABSTRACT: Shot peening is widely used in long panel and sheath formation. Shot peening forms a specific microgeometry on the processed surface, a characteristic feature of which is numerous shot indentations of various diameters and depths. The presence of these indentations worsens surface roughness parameters. Therefore, the operation of surface grinding with flap wheels is obligatory after shot peening for partial removal of the effects of shot peening. The size of the assigned allowance for grinding depends on the quality requirements for part surface. The depth of shot indentations is determined by the requirements for part surface roughness. After grinding of a shot peened surface, a new microrelief is formed as a combination of micro-roughnesses from previous types of processing in the form of remaining shot indentations and traces of flap wheel grinding. A mathematical model of surface roughness parameter formation in the implementation of the technological sequence of “shot peen forming – grinding” has been developed. The paper presents an analytical description of the sample surface roughness formation process under shot peening and subsequent grinding with a flap wheel, which is based on the analysis of surface microgeometry. Mathematical models of surface roughness parameter formation under shot peening and subsequent grinding have been developed.

Keywords: shot peen forming, coverage degree, grinding with a flap wheel, shot indentations, optical method of three-dimensional scanning, surface roughness after shot peening

Information about the article: Received October 29, 2018; accepted for publication November 30, 2018; available online December 28, 2018.

For citation: Koltsov V.P., Le Tri Vinh, Starodubtseva D.A. Formation structure of surface roughness parameters at “shot peen forming – grinding” technological sequence implementation. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018; 22(12):pp. 56–67. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-56-67

Введение

Для получения сложных криволинейных форм поверхностей панелей и обшивок, а также операций упрочнения широко применяется дробеударная обработка. Зачистка абразивным лепестковым кругом является обязательной частью технологического процесса формообразования длинномерных крупногабаритных поверхностей типа «панель» и «обшивка» и проводится с целью улучшения качества исходной поверхности после дробеударного формообразования [1–3].

При воздействии потока дроби на поверхности обрабатываемой детали от ударов дробинок формируется специфический профиль шероховатости поверхности, характеризующийся многочисленными отпечатками дроби различного диаметра и глубины [4–7]. Распределение таких отпечатков на обрабатываемой поверхности носит хаотичный (случайный) характер. При этом глубина большей части отпечатков от ударов дроби по величине заметно превышает уровень микронеровностей от предыдущей обработки.

Операцией, предшествующей дробеударной обработке, является механическая (чаще фрезерование), имеющая свои особенности и параметры шероховатости поверхности. В результате на микрорельеф поверхности, образованный предшествующей операцией, накладываются следы дробеударной обработки, формируя при этом новую микрогеометрию поверхности. Таким образом, на микрорельеф, образованный, например, механической обработкой с систематическим (детерминированным) характером, накладываются элементы случайного процесса в виде хаотично расположенных различной глубины отпечатков дроби. Фактическое суммирование этих процессов образует новый микрорельеф поверхности детали, также имеющий свойства случайного процесса. Наличие совокупности отпечатков, величина которых превышает исходный уровень микронеровностей поверхности, увеличивает значения показателей



шероховатости поверхности детали. Вследствие сложности математического описания процесса формирования шероховатости поверхности, при реализации технологической последовательности, дробеударное формообразование – зачистка лепестковым кругом, исследование структуры формирования параметров шероховатости и разработка математических моделей является весьма актуальной задачей.

Кроме того, при измерении параметров шероховатости трехмерной топографии поверхности, имеющей свойства случайного процесса, возникает необходимость определения базовой площади участка поверхности, гарантирующего получение достоверных результатов. Предыдущие исследования авторов работы [5] установили наличие зависимости площади базового участка от степени покрытия. Очевидно, что при определении шероховатости поверхности в пределах базовой площади после дробеударной обработки становится актуальным и определение площади базовой поверхности для имеющейся степени покрытия.

Структура параметров шероховатости при дробеударной обработке

Величина степени покрытия при дробеударной обработке теоретически может изменяться от 0 до 100%. Для операции дробеударного формообразования (ДУФ) степень покрытия, как правило, лежит в пределах до 30–40%, а для упрочнения приближается к 100% [1, 8, 9].

При измерении параметров шероховатости трехмерной микротопографии поверхности, имеющей свойства случайного процесса, возникает необходимость определения базовой площади участка поверхности, гарантирующего получение достоверных результатов. При этом величина базовой площади участка зависит от плотности случайных выбросов, или степени покрытия поверхности отпечатками дроби [10, 11].

Не вызывает сомнений, что при любом значении степени покрытия процесс формирования шероховатости поверхности после дробеударной обработки носит случайный характер. При этом на изменение величин параметров шероховатости оказывает существенное влияние количество и глубина отпечатков дроби на контролируемом участке поверхности. Измерение параметров шероховатости на площади менее базовой дает разброс получаемых значений в ту или иную сторону. При приближении площади контролируемого участка к базовой, показатели шероховатости стабилизируются по величине, и при дальнейшем увеличении контролируемой площади становятся постоянными.

На рис. 1 представлена схема условного профиля отпечатка дроби на предварительно фрезерованной поверхности.

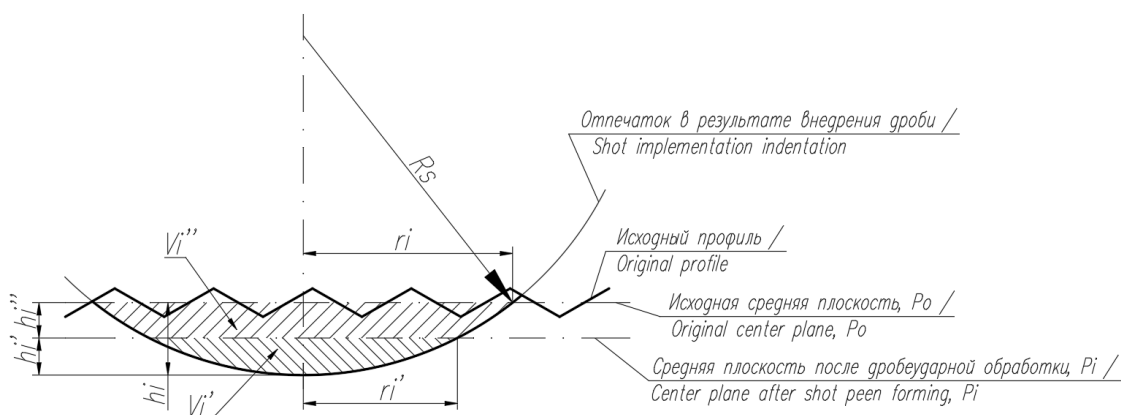


Рис. 1. Схема исходного микропрофиля поверхности после механической обработки и условный профиль отпечатка дроби

Fig. 1. Diagram of the original surface microprofile after machining and a conditional profile of shot indentation



Рис. 1 имеет следующие обозначения: R_s – диаметр дроби; P_0 – исходная средняя плоскость (например, после механической обработки); P_i – средняя плоскость после дробеударной обработки; r_i – радиус i -го отпечатка дроби в плане на исходной средней плоскости P_0 ; r_i' – радиус i -го отпечатка дроби в плане на средней плоскости P_i ; h_i – глубина i -го отпечатка дроби от исходной средней плоскости P_0 ; h_i'' – расстояние от исходной средней плоскости P_0 до средней плоскости после дробеударной обработки P_i ; h_i' – глубина i -го отпечатка дроби до средней плоскости P_i ; V_i'' – объем усеченной части i -го отпечатка лунки между средними плоскостями P_0 и P_i ; V_i' – объем i -го отпечатка лунки под средней плоскостью P_i .

По определению [12], базовая поверхность расположена относительно профиля поверхности детали и служит для оценки параметров шероховатости. Очевидно и то, что она является частью номинальной поверхности детали, которая в свою очередь является поверхностью детали, заданной без учета допускаемых отклонений (неровностей).

Для определения параметров шероховатости по базовой площади поверхности необходимо нахождение средней плоскости P_i после дробеударной обработки. Согласно методам определения средней плоскости при трехмерной микротопографии, поверхности и определения параметров шероховатости деталей на базовой площади [12], где базовая площадь принимается в виде квадрата со стороной, равной базовой длине, средняя плоскость – это плоскость, объем материала над и объем пустот под которой в пределах данной базовой площади равны. Поскольку в результате дробеударного воздействия на поверхности детали образуются отпечатки, глубина большинства которых, как правило, превышает величину исходных микронеровностей поверхности предыдущей обработки, естественно предположить, что средняя плоскость после ДУФ должна находиться ниже исходной средней плоскости фрезерованной поверхности.

Если P_0 – средняя плоскость исходной поверхности (до ДУФ), например, после механической обработки, а шероховатость подобной поверхности достаточно равномерна относительно своей средней плоскости, то условно можно считать, что под P_0 образуется сплошное тело, поскольку общий объем материала над P_0 компенсирует общий объем пустот под P_0 .

Назовем F_b базовой площадью, тогда общий объем материала относительно средней плоскости P_i примет следующий вид:

$$\sum \text{объем пустот под } P_i = \sum \text{объем материала над } P_i, \quad (1)$$

значит, объем i -го отпечатка дроби под средней плоскостью P_i вычисляется по следующей формуле:

$$\sum_{i=1}^n V_i' = F_b \cdot h_i'' - \sum_{i=1}^n V_i'', \quad (2)$$

при этом объем усеченной части i -го отпечатка дроби между средними плоскостями P_0 и P_i определяется выражением:

$$\sum_{i=1}^n V_i'' = \sum_{i=1}^n V_i - \sum_{i=1}^n V_i', \quad (3)$$

где V_i – общий объем i -го отпечатка.

Преобразовав выражение (2) с учетом (3), получаем:

⁴ГОСТ 25142-82 СТ СЭВ 1156-78. Шероховатость поверхности. Термины и определения. Введ. 1982–02–18. М.: Изд-во стандартов, 1982. / GOST 25142-82 ST SEV 1156-78. Surface Roughness. Terms and Definitions. Introduced 18 February 1982. M.: Publishing house of standards, 1982.



$$\sum_{i=1}^n V_i' = F_b \cdot h_i'' - \left(\sum_{i=1}^n V_i - \sum_{i=1}^n V_i' \right); \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n V_i = F_b \cdot h_i''. \quad (5)$$

Расстояние h_i'' от исходной средней плоскости P_0 до средней плоскости после дробеударной обработки P_i определяется следующим образом:

$$h_i'' = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{F_b}. \quad (6)$$

Поскольку форма отпечатка дробы близка к сферической [5], тогда объем каждого i -го отпечатка дробы принимается как объем сегмента шара с высотой h_i , соответственно, расстояние h_i'' определится выражением:

$$h_i'' = \frac{1}{F_b} \cdot \sum_{i=1}^n \pi \cdot h_i^2 \cdot \left(R_s - \frac{1}{3} h_i \right). \quad (7)$$

Как известно [12], среднее арифметическое отклонение профиля в пределах базовой площади в общем виде можно определить по формуле:

$$Sa = \frac{1}{F} \iint |\eta(x, y)| dx dy, \quad (8)$$

где Sa – среднее арифметическое отклонение профиля в пределах базовой площади; F_b – базовая площадь; x, y – координаты на поверхности отчета; $\eta(x, y)$ – функция отклонения неровностей от средней плоскости, при этом в данном случае – $\iint |\eta(x, y)| dx dy$ описывает общий объем материала над и пустот под средней плоскостью.

Шероховатость обработанной дробью поверхности детали носит неопределенный характер, поэтому трудно найти единую функцию отклонения неровностей от средней плоскости. В этом случае целесообразно разбить среднюю плоскость на m участков, на каждом из которых отклонение профиля поверхности подчиняется какой-то функции $F(u_j)$. Тогда объем материала j -го участка определяется зависимостью [12]:

$$V(u_j) = \int_0^u F(u_j) du_j, \quad (9)$$

где $V(u_j)$ – объем области, ограниченный полем $H(x, y)$ (поверхность) и плоскостью, параллельной координатной плоскости (x, y) на расстоянии u от нее.

Если взять найденную выше среднюю плоскость в качестве плоскости (x, y) , и u , изменяющуюся от 0 до u_{max} (максимальное значение каждого выступа или впадины профиля поверхности в пределах базовой площади), то общий объем материала или пустот над или под найденной средней плоскостью P_i определяется следующим видом:



$$\sum_{j=1}^m V(u_j) = \sum_{j=1}^m \int_0^u F(u_j) du_j, \quad (10)$$

где m – количество участков в пределах базовой площади.

Поскольку общий объем материала над средней плоскостью равен общему объему пустот под ней, то среднее арифметическое отклонение профиля от средней плоскости в пределах базовой площади можно представить в следующем виде:

$$Sa = \frac{1}{F} \iint |\eta(x, y)| dx dy = \frac{1}{F_b} \cdot \sum_{j=1}^m \int_0^u F(u_j) du_j = \frac{2}{F_b} \cdot \sum_{i=1}^n V_i'. \quad (11)$$

С учетом формулы (3) и формы лунки отпечатка дробин, близкой к сферической, получаем следующее:

$$Sa = \frac{2}{F_b} \cdot \sum_{i=1}^n V_i' = \frac{2}{F_b} \cdot \sum_{i=1}^n \pi \cdot (h_i')^2 \cdot \left(R_s - \frac{1}{3} h_i' \right) = \frac{2\pi}{F_b} \cdot \sum_{i=1}^n (h_i - h_i'')^2 \cdot \left(R_s - \frac{1}{3} (h_i - h_i'') \right). \quad (12)$$

Полученная зависимость определяет величину Sa после ДУФ без учета исходной шероховатости поверхности.

С учетом исходной шероховатости поверхности, общее среднее арифметическое отклонение профиля дробеобработанной поверхности может быть определено по следующей формуле:

$$Sa_t = 0,5 Sa_m + \frac{2\pi}{F_b} \cdot \sum_{i=1}^n (h_i - h_i'')^2 \cdot \left(R_s - \frac{1}{3} (h_i - h_i'') \right), \quad (13)$$

где Sa_m – среднее арифметическое отклонение профиля в пределах базовой площади исходной поверхности.

Для проверки адекватности математической модели по определению среднего арифметического отклонения профиля поверхности в пределах базовой площади при помощи оптического профилометра модели Bruker Contour GT были проведены измерения глубины отпечатков дробин на 4-х различных по площади участках: 7×7, 10×10, 15×15 и 20×20 мм. Измерения были выполнены от одной точки с постепенным ростом длины и ширины сканированного участка от 7 до 20 мм.

По измеренным значениям глубин отпечатков по формуле (7) были рассчитаны расстояния положения средней плоскости P_i от исходной средней плоскости и определены средние арифметические отклонения Sa_t (13). Также проведены сравнения расчетных значений Sa_t для каждого сканированного участка с аналогичным значением, полученным при помощи оптического профилометра. Результаты измерений и расчетов представлены в таблице.

Из анализа данных таблицы следует, что на минимальном, выбранном нами сканированном участке 7×7 мм шероховатость поверхности после обработки дробью значительно выше, чем на остальных. Поскольку процесс формирования шероховатости при ДУФ является случайным, то с увеличением площади сканирования и приближением ее к базовой, он становится все более стационарным, что приводит к стабилизации значений шероховатости. В рассматриваемом случае при данной степени покрытия базовой площадью поверхности может считаться участок 15×15 мм. При увеличении размеров участка сканирования вероятное отклонение шероховатости будет изменяться в сторону уменьшения, но объем измерений резко возрастает вследствие увеличения количества отпечатков.



Результаты измерений и расчетов
Results of measurements and calculations

Размер сканируемого участка, (мм x мм)	Кол-во отпечатков, (шт.)	Исходное значение шероховатости Ra_m , мкм (после фрезерования)	Измеренное среднее значение Ra на сканированном участке, (мкм)	Среднее измеренное значение глубины отпечатков дроби, (мкм)	Расстояние h_i'' , (мкм)	Расчетное значение Sa_i , (мкм)	Отклонение расчетного значения Sa_i от измеренного Ra (%)
7 × 7	39	0,40	2,880	13,895	1,96	3,69	21,9
10 × 10	57	0,41	2,704	17,835	1,65	3,15	14,1
15 × 15	120	0,406	2,743	18,368	1,70	3,25	15,6
20 × 20	189	0,402	2,884	18,841	1,62	3,14	8,1

Примечание. При расчетах Sa_i в качестве Sa_m принято значение исходного среднего Ra_m на всей сканированной площади. Так как для фрезерованной поверхности, благодаря достаточной однородности и равномерности микрорельефа, среднее арифметическое отклонение профиля в пределах базовой длины и базовой площади практически не отличается.

Среднеарифметическое отклонение профиля при реализации технологической последовательности дробеударное формообразование – зачистка

При зачистке детали после дробеударного формообразования с ее поверхности удаляется слой материала, толщина которого зависит от высоты параметров исходной шероховатости.

Применительно к структуре поверхности после дробеударного формообразования припуск a определяет глубина отпечатка (рис. 2), [3].

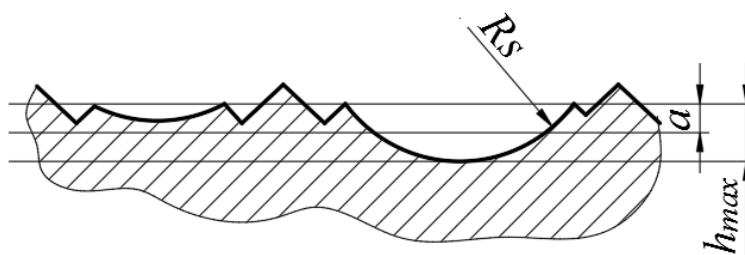


Рис. 2. Схематичное изображение поверхности детали, обработанной дробью, где h_{max} – максимальная глубина отпечатка дроби; a – припуск, удаляемый при зачистке
Fig. 2. Schematic diagram of the part surface treated by shot peening, where h_{max} – maximum depth of shot indentation; a – allowance removed at grinding

Максимальное значение глубины отпечатка дроби h_{max} на исследуемом участке поверхности на стадии зачистки должно быть уменьшено на величину припуска a в соответствии с требованиями конструкторской документации и допуском на деталь. В этом случае полное удаление следов ударов дроби совершенно необязательно, в результате чего после зачистки остается еще некоторое количество отпечатков дроби. Таким образом, шероховатость поверхности зачищаемых деталей, как до зачистки, так и после в значительной степени определяют следы дробеударной обработки.

Согласно [10], исходная средняя плоскость, формируемая при механической обработке,



после дробеударного воздействия смещается на некоторую величину вниз. При снятии материала припуска последующей зачисткой происходит повторное смещение средней плоскости, то есть средняя плоскость профиля после зачистки находится ниже средней плоскости профиля после дробеударной обработки.

На рис. 3 представлена условная графическая схема расположения основных параметров профиля поверхности после механической обработки, дробеударного формообразования и зачистки. При этом основные параметры шероховатости поверхности после зачистки определяются на основании расположения средней плоскости P_k [13, 14].

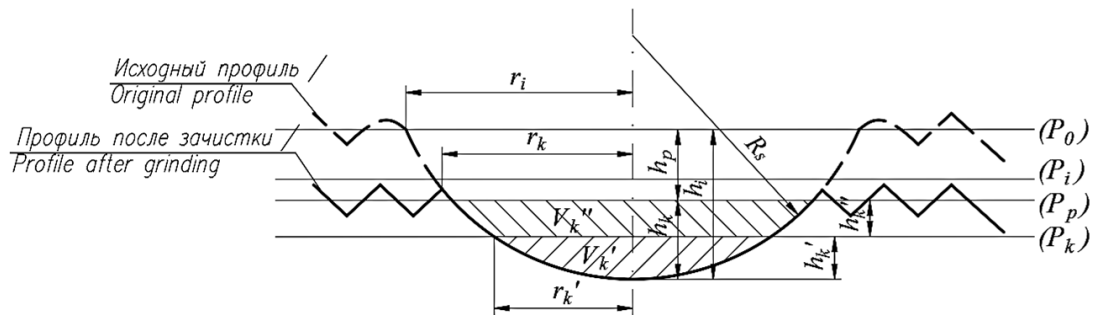


Рис. 3. Схема профиля обрабатываемой поверхности
после фрезерования, дробеударного формообразования – зачистки

Fig. 3. Diagram of the machined surface profile after milling, shot peening and grinding with flap wheels

На рис. 3 дополнительно внесены следующие обозначения: R_s – радиус дробы; P_0 – средняя плоскость после фрезерования; P_i – средняя плоскость после дробеударного формообразования; P_p – средняя плоскость после зачистки без учета дробеударного формообразования; P_k – средняя плоскость после зачистки; h_i – глубина k -го отпечатка; h_p – припуск, удаляемый при зачистке; h_k – глубина отпечатка после зачистки; h_k' – глубина отпечатка от средней плоскости после зачистки с учетом дробеударного формообразования; h_k'' – расстояние между средней плоскостью после зачистки без учета ДУФ (P_p) и средней плоскостью после зачистки (P_k); r_i – радиус отпечатка в плане на средней плоскости после фрезерования (P_0); r_k – радиус отпечатка в плане на средней плоскости P_p ; r_k' – радиус отпечатка в плане на средней плоскости P_k ; V_k' – объем пустоты отпечатка после зачистки под средней плоскостью P_k ; V_k'' – объем пустоты отпечатка после зачистки над средней плоскостью P_k .

Если после выполнения зачистки остается некоторое количество отпечатков, то аналогично методу определения средней плоскости после дробеударного формообразования, конечное положение средней плоскости после зачистки определяется следующей формулой:

$$h_k'' = \frac{\sum_{k=1}^t V_k}{F_b} = \frac{1}{F_b} \cdot \sum_{k=1}^t \pi \cdot h_k^2 \cdot \left(R_s - \frac{1}{3} h_k \right), \quad (14)$$

где t – количество оставшихся после зачистки отпечатков дробы, величина которых превышает уровень исходного микрорельефа; V_k – объем пустот k -го отпечатка под средней плоскостью, P_p .

При этом объем пустот k -го отпечатка под средней плоскостью, P_p определится выражением:

$$\sum_{k=1}^t V_k = \sum_{k=1}^t V_k' + \sum_{k=1}^t V_k''. \quad (15)$$



Глубина отпечатка после зачистки дробью обработанной поверхности вычисляется следующим образом:

$$h_k = h_i - h_p. \quad (16)$$

Тогда, преобразовав выражение (14) с учетом (16), получим следующее:

$$h_k'' = \frac{1}{F_b} \cdot \sum_{k=1}^t \pi \cdot (h_i - h_p)^2 \cdot \left(R_s - \frac{1}{3} (h_i - h_p) \right). \quad (17)$$

Среднее арифметическое отклонение профиля в пределах базовой площади после дробеударного формообразования-зачистки без учета исходной шероховатости поверхности определяются по формуле:

$$h_k'' = \frac{1}{F_b} \cdot \sum_{k=1}^t \pi \cdot (h_i - h_p)^2 \cdot \left(R_s - \frac{1}{3} (h_i - h_p) \right) = \frac{2\pi}{F_b} \cdot \sum_{k=1}^t (h_i - h_p - h_k'')^2 \cdot \left(R_s - \frac{1}{3} (h_i - h_p - h_k'') \right). \quad (18)$$

Итоговая формула для расчета среднего арифметического отклонения профиля в пределах базовой площади после дробеударного формообразования-зачистки с учетом исходной шероховатости может определяться следующим образом:

$$Sa_{об} = 0,5S_{a\ зач} + \frac{2\pi}{F_b} \cdot \sum_{k=1}^t (h_i - h_p - h_k'')^2 \cdot \left(R_s - \frac{1}{3} (h_i - h_p - h_k'') \right), \quad (19)$$

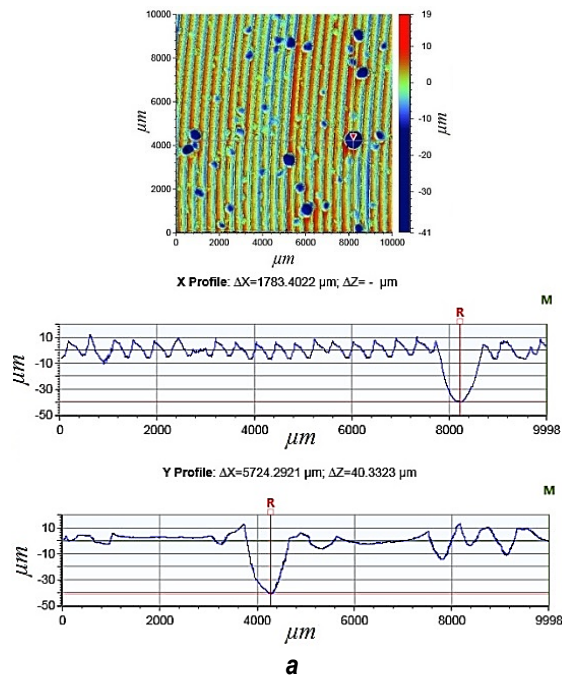
где $S_{a\ зач}$ – среднее арифметическое отклонение профиля в пределах базовой площади после зачистки без учета ДУФ.

Формула (19) справедлива при условии наличия достаточного количества оставшихся отпечатков дроби. В противном случае, когда величина припуска близка к значению глубин наибольших отпечатков дроби, оставшиеся отпечатки дроби не оказывают значительного влияния на формирование шероховатости обрабатываемой поверхности после зачистки. Следовательно, формирование шероховатости поверхности при зачистке можно рассматривать как процесс формирования шероховатости при традиционной обработке лепестковым кругом.

Для наглядности на рис. 4 а представлен участок в плане сканированной поверхности образца после ДУФ, а также профиль поверхности во взаимно перпендикулярных плоскостях, проходящих через один из наибольших отпечатков дроби на исследуемом участке, на рис. 4 б – результаты измерения.

По результатам контроля параметров шероховатости образца среднее значение в пределах площади исследуемого участка Ra составило 3,981 мкм, при этом Rp , характеризующее величину наивысших вершин профиля 18,711 мкм, Rv – глубочайшая впадина профиля (по абсолютному значению) 41,249 мкм.

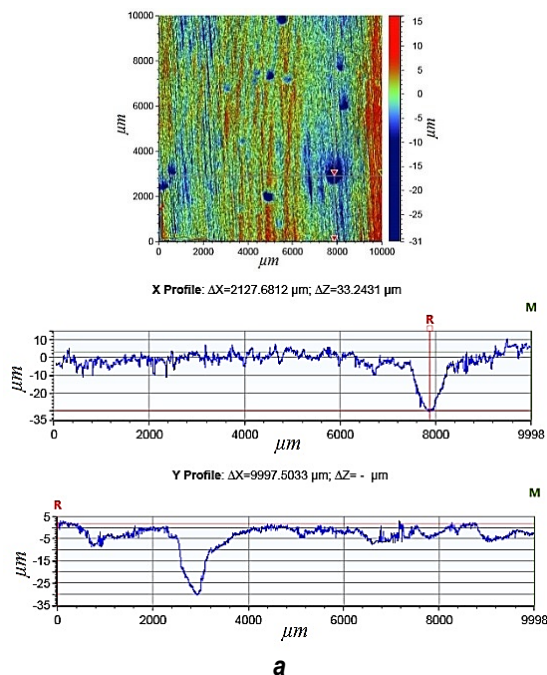
В результате зачистки лепестковым кругом с обрабатываемой поверхности детали был удален необходимый слой металла. На рис. 5 представлен результат сканирования участка 10×10 мм зачищенной поверхности ранее представленного образца, так что участок сканирования при дробеударном формообразовании совпал с участком сканирования при зачистке. На рис. 5 так же показан профиль поверхности во взаимно перпендикулярных плоскостях, проходящих через тот же отпечаток дроби.



Analytical Results		
Label	Value	Units
Average	27.869	nm
Data Points	31084769.28	
Percent Data Points	99.87	%
Ra	3.981	μm
Rp	18.711	μm
Rq	5.074	μm
Rt	59.959	μm
Rv	-41.249	μm

Рис. 4. Результат сканирования участка поверхности образца после дробеударного формообразования: а – профиль поверхности во взаимно перпендикулярных плоскостях, б – результат измерения

Fig. 4. Scan results of a sample surface after shot peen forming: a – surface profile in mutually perpendicular planes, b – measurement result



Analytical Results		
Label	Value	Units
Average	0.16	μm
Data Points	7550472.192	
Percent Data Points	99.77	%
Ra	2.633	μm
Rp	16.295	μm
Rq	3.54	μm
Rt	46.879	μm
Rv	-30.584	μm

Рис. 5. Результат сканирования участка поверхности образца после дробеударного формообразования – зачистки: а – профиль поверхности во взаимно перпендикулярных плоскостях, б – результат измерения

Fig. 5. Scan results of a sample surface after shot peen forming and subsequent grinding with flap wheels: a – surface profile in mutually perpendicular planes, b – measurement result

После выполнения зачистки среднее значение в пределах площади исследуемого участка R_a составило 2,633 мкм, R_p 16,295 мкм, R_v уменьшилась до 30,584 мкм (по абсолютному значению).



По результатам анализа топографии поверхности (рис. 4 и 5) можно заключить, что даже при таком незначительном снятии припуска лепестковым кругом на обрабатываемой поверхности детали образуется новый микрорельеф поверхности как совокупность микронеровностей, сформированных последовательными этапами обработки – механической, дробеударной и зачисткой. То есть после зачистки остается еще некоторое количество крупных отпечатков дробы, которые непосредственно участвуют в формировании шероховатости поверхности обрабатываемой детали. Стоит отметить, что среднее значение параметра Sa в пределах площади исследуемого участка при зачистке не превысило допустимого при обработке панелей и обшивок (значения $Ra\ 3,2$).

Библиографический список

1. Пашков А.Е. Технологические связи в процессе изготовления длинномерных листовых деталей. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2005. 138 с.
2. Пашков А.Е. О создании комплексной технологии формообразования крупногабаритных панелей // Высокоэффективные технологии проектирования, конструкторско-технологической подготовки и изготовления самолетов Всероссийский (с международным участием) научно-практический семинар (г. Иркутск, 9–11 ноября 2011 г.). Иркутск, 2011. С. 103–110.
3. Кольцов В.П., Стародубцева Д.А., Чапышев А.П. К определению величины припуска при зачистке поверхности панелей и обшивок лепестковым кругом после дробеударного формообразования // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2017. Т. 73. № 1. С. 25–30.
4. Чапышев А.П. Статистическое описание поверхности после дробеударного формообразования // Перспективные технологии получения и обработки материалов: материалы Регион. науч.-техн. конф. (г. Иркутск, 25–26 сентября, 2004 г.). Иркутск, 2004. С. 42–46.
5. Кольцов В.П., Ле Чи Винь, Стародубцева Д.А. К определению степени покрытия после дробеударной обработки // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 11 (130). С. 45–52. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-11-45-52>
6. Пашков А.Е., Чапышев А.П. Учет влияния структуры зоны обработки при дробеударном формообразовании // Технологическая механика материалов: межвузовский сб. науч. тр. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2003. С. 22–27.
7. Матлин М.М., Мосейко В.В. Вероятностная оценка параметров процесса дробеобработки // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2005. № 2. С. 35–38.
8. Дияк А.Ю. Перспективные методы определения степени покрытия при обработке дробью // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 7 (90). С. 12–17.
9. Дияк А.Ю. Определение степени покрытия автоматизированным методом // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 12 (107). С. 19–25.
10. Кольцов В.П., Ле Чи Винь, Стародубцева Д.А. Математическая модель формирования среднеарифметического отклонения профиля поверхности при дробеударной обработке // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 2 (133). С. 26–33. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-2-26-33>
11. Koltsov V.P., Le Tri Vinh, Starodubtseva D.A. Surface roughness formation during shot peen forming // Materials Science and Engineering (The XI International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems. MEACS. 2017. Vol. 327. P. 042125.
12. Хусу А.П., Витенберг Ю.Р., Пальмов В.А. Шероховатость поверхностей: теоретико-вероятностный подход. М.: Наука, 1975. 344 с.
13. Starodubtseva D.A., Le Tri Vinh, Koltsov V.P. Formation of the surface roughness during grinding with flap wheels after shot peening // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018) MATEC Web Conf. Vol. 224. P. 01070.
14. Koltsov V.P., Starodubtseva D.A., Le Tri Vinh, Phung Xuan Son Step-by-step surface roughness formation during shot peening and subsequent grinding with flap wheels // International Conference on AviaMechanical Engineering and Transport (AviaENT 2018). Advances in Engineering Research. Vol. 158. P. 386–390.

References

1. Pashkov A.E. Tekhnologicheskie svyazi v processe izgotovleniya dlinnomernykh listovykh detalej [Technological relationships under long sheet metal part manufacturing]. Irkutsk: Irkutsk State Technical University Publ., 2005, 138 p. (In Russian)
2. Pashkov A.E. O sozdanii kompleksnoy tekhnologii formoobrazovaniya krupnogabaritnykh panelej [On the creation of a complex forming method for large panels]. Vysokoeffektivnye tekhnologii proektirovaniya, konstruktorsko-tekhnologicheskoy podgotovki i izgotovleniya samoletov Vserossiyskiy (s mezhdunarodnym uchastiem) nauchno-prakticheskij seminar [Highly efficient technologies of design, technological preparation and production of aircrafts. All-Russian (with international



- participation) scientific and practical seminar, Irkutsk, 9–11 November 2011]. Irkutsk, 2011, pp. 103–110. (In Russian)
3. Kol'cov V.P., Starodubceva D.A., Chapyshev A.P. To determination of a tolerance value at grinding sheath surfaces by flap wheels after shot peen forming. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva* [Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva], 2017, vol. 73, no. 1, pp. 25–30. (In Russian)
4. Chapyshev A.P. *Statisticheskoye opisaniye poverkhnosti posle drobeudarnogo formoobrazovaniya* [Statistical description of surface after shot peening]. *Materialy regional'noj nauchno-tekhnicheskoy konferencii "Perspektivnye tekhnologii polucheniya i obrabotki materialov"* [Materials of the regional scientific and technical conference "Promising technologies of material production and processing"], Irkutsk, 25–26 September, 2004]. Irkutsk, 2004, pp. 42–46. (In Russian)
5. Kol'cov V.P., Le Chi Vin', Starodubceva D.A. To the problem of shot peening coverage degree determination. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2017, vol. 21, no. 11 (130), pp. 45–52. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-11-45-52>.
6. Pashkov A.E., Chapyshev A.P. *Uchet vliyaniya struktury zony obrabotki pri drobeudarnom formoobrazovanii* [Accounting of machining zone structure effect under shot peening forming]. *Tekhnologicheskaya mekhanika materialov: mezhvuzovskiy sb. nauch. tr.* [Technological mechanics of materials: interuniversity collection of scientific works]. Irkutsk: Irkutsk State Technical University Publ., 2003, pp. 22–27. (In Russian)
7. Matlin M.M., Mosejko V.V. Probabilistic estimation of shot peening process parameters. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Izvestia VSTU], 2005, no. 2, pp. 35–38. (In Russian)
8. Diyak A.Yu. Promising methods to determine surface coverage under shot peening. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2014, no. 7 (90), pp. 12–17. (In Russian)
9. Diyak A.Yu. Shot coverage degree estimation by a computer-aided method. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2015, no. 12 (107), pp. 19–25. (In Russian)
10. Kol'cov V.P., Le Chi Vin', Starodubceva D.A. Mathematical model of surface profile arithmetic mean deviation formation at shot peen forming. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2018, vol. 22, no. 2 (133), pp. 26–33. (In Russian) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-2-26-33>
11. Koltsov V.P., Le Tri Vinh, Starodubtseva D.A. Surface roughness formation during shot peen forming. *Materials Science and Engineering (The XI International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems. MEACS, 2017, vol. 327, 042125 p.*
12. Husu A.P., Vitenberg Yu.R., Pal'mov V.A. *Sherohovatost' poverkhnostej: teoretiko-veroyatnostnyj podhod* [Surface roughness: theoretical and probabilistic approach]. Moscow: Nauka Publ., 1975, 344 p.
13. Starodubtseva D.A., Le Tri Vinh, Koltsov V.P. Formation of the surface roughness during grinding with flap wheels after shot peening. *International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018) MATEC Web Conf.*, vol. 224, 01070 p.
14. Koltsov V.P., Starodubtseva D.A., Le Tri Vinh, Phung Xuan Son Step-by-step surface roughness formation during shot peening and subsequent grinding with flap wheels. *International Conference on AviaMechanical Engineering and Transport. AviaENT. Advances in Engineering Research.* 2018, vol. 158, pp. 386–390.

Критерии авторства

Кольцов В.П., Ле Чи Винь, Стародубцева Д.А. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Koltsov V.P., Le Tri Vinh, Starodubtseva D.A. 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 621.9

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-12-68-74>

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЫЗЫВАЮЩИХ ХРУПКОЕ РАЗРУШЕНИЕ СМЕННЫХ МНОГОГРАННЫХ ПЛАСТИН ПРИ ТОЧЕНИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ СЛОЖНОГО ПРОФИЛЯ

© Е.А. Кудряшов¹, И.М. Смирнов²

Юго-Западный государственный университет,
305040, Российская Федерация, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

РЕЗЮМЕ: Выполнено аналитическое исследование работоспособности сменной многогранной пластины проходного резца на операции точения детали класса тела вращения. Цель работы заключается в изучении факторов, способствующих разрушению режущего элемента сменной многогранной пластины, вызванных ударными нагрузками при точении поверхностей сложного профиля. Сформулированы модели функциональной связи между сменной многогранной пластиной и обрабатываемой поверхностью заготовки, рекомендованы меры по устранению причин возникновения нарушений целостности режущего элемента сменной многогранной пластины. Исследовано влияние механизма удара на работоспособность сменной многогранной пластины. Предложены рекомендации, способствующие сохранению высокопроизводительной работы инструмента при обработке точением конструктивно сложных поверхностей с элементами разрыва. При точении поверхностей сложного профиля необходимо определить количество циклов вероятной работоспособности режущего элемента и сравнить его с ресурсным значением стойкости инструментального материала. Наличие причинных связей вероятностных нарушений целостности конструкции сменной многогранной пластины позволяет принять рекомендованные меры для их устранения.

Ключевые слова: тело вращения, поверхность сложного профиля, режущий элемент, сменная многогранная пластина, прерывистое точение, работоспособность

Информация о статье: Дата поступления 29 октября 2018 г.; дата принятия к печати 30 ноября 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2018 г.

Для цитирования: Кудряшов Е.А., Смирнов И.М. Анализ факторов, вызывающих хрупкое разрушение сменных многогранных пластин при точении поверхностей сложного профиля. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(12):68–74. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-68-74

ANALYSIS OF FACTORS CAUSING BRITTLE FRACTURE OF INDEXABLE INSERTS WHILE TURNING COMPLEX PROFILE SURFACES

Evgeny A. Kudryashov, Igor M. Smirnov

Southwest State University,
94, 50 Let Oktyabrya St., Kursk 305040, Russian Federation

SUMMARY: The article deals with an analytical study of the performance of a straight turning tool indexable insert when turning rotational parts. The purpose of the article is to study the factors contributing to the breakage of the indexable insert cutting element caused by impact loads when turning complex profile surfaces. The authors formulated the models of the

¹Кудряшов Евгений Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры машиностроительных технологий и оборудования, e-mail: kea-swsu@mail.ru

Evgeny A. Kudryashov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Machine-Building Technologies and Equipment, e-mail: kea-swsu@mail.ru

²Смирнов Игорь Михайлович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры машиностроительных технологий и оборудования, e-mail: pochta@aoniii.ru

Igor M. Smirnov, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Machine-Building Technologies and Equipment, e-mail: pochta@aoniii.ru



functional relationship between the indexable insert and the machined surface of the workpiece and developed the recommendations for eliminating the causes of indexable insert disintegration. The study is also given to the influence of the mechanism of impact on indexable insert performance. Recommendations are proposed directed at preserving highly efficient operation of a cutting tool when turning complex surfaces with interrupted elements. When turning complex profile surfaces, it is necessary to determine the number of cycles of the probable performance of the cutting element and compare it with the resource value of the cutting tool material durability. The availability of causal relationships of probabilistic failures of the structural integrity of the indexable insert design allows to accept the recommended measures in order to eliminate the faults.

Keywords: *rotational part, complex profile surface, cutting element, indexable insert, intermittent turning, performance*

Information about the article: Received October 29, 2018; accepted for publication November 30, 2018; available online December 28, 2018.

For citation: Kudryashov E.A., Smirnov I.M. Analysis of factors causing brittle fracture of indexable inserts while turning complex profile surfaces. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018; 22(12):pp. 68–74. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-68-74

Введение

Опыт эксплуатации режущего инструмента на операции точения поверхностей сложного профиля свидетельствует о хрупком разрушении режущих кромок сменной многогранной пластины (СМП) в виде сколов и выкрашиваний [1, 2]. Как правило, низкую работоспособность лезвийных инструментальных материалов объясняют цикличностью как механических, так и тепловых нагрузок вследствие прерывистости процесса точения поверхностей с элементами разрыва (пазы, шпонки, второстепенные отверстия и т.п.), а характер разрушения режущего элемента – низким сопротивлением инструментального материала, растягивающим напряжением, возникающим в процессе резания [3].

Следовательно, знание факторов, влияющих на возникновение и количественный уровень растягивающих напряжений, позволит предложить действенные меры, направленные как на конструктивное совершенствование режущего элемента, так и на принятие технологических решений, способствующих высокой эффективности рассматриваемых процессов.

На обрабатываемой поверхности, в зависимости от служебного назначения детали, может располагаться n элементов ее разрыва, конструктивная форма которых, а также их количество, расположение и сочетания определяются особенностями работы детали в узле и механизме в целом. В силу

многофакторности рассматриваемых особенностей процессов и конструкций, при фактической неопределенности форм, размеров и расположения элементов разрыва на обрабатываемой поверхности детали, нет возможности использования известных в металлообработке линейных и плоских рабочих схем. Поэтому цель работы, заключающаяся в изучении факторов, вызывающих хрупкое разрушение СМП при точении поверхностей сложного профиля, может быть достигнута с помощью моделей, устанавливающих функциональную связь между инструментом и обрабатываемой поверхностью заготовки.

Рассмотрим это предположение на базе точения конструктивно сложных поверхностей (поз. 1–5, рис. 1) детали Ротор, образованных сочетанием поверхностей вращения диаметром от 25 до 124 мм (см. поз. А и Б, рис. 1 а, 1 б) с элементами их разрыва, в том числе: отдельные и собранные в группы отверстия разных размеров (поз. 1, рис. 1 а, 1 б); спиральная поверхность (поз. 2, рис. 1 а, 1 б); пазы разной конфигурации, размеров и расположения (поз. 3, рис. 1 а, 1 б); шлицевая поверхность (поз. 4, рис. 1 а, 1 б); выборка (поз. 5, рис. 1 а, 1 б).

Опыт эксплуатации проходных токарных резцов, оснащенных СМП из современных инструментальных материалов, предлагает решения, способствующие сохранению работоспособности инструмента.

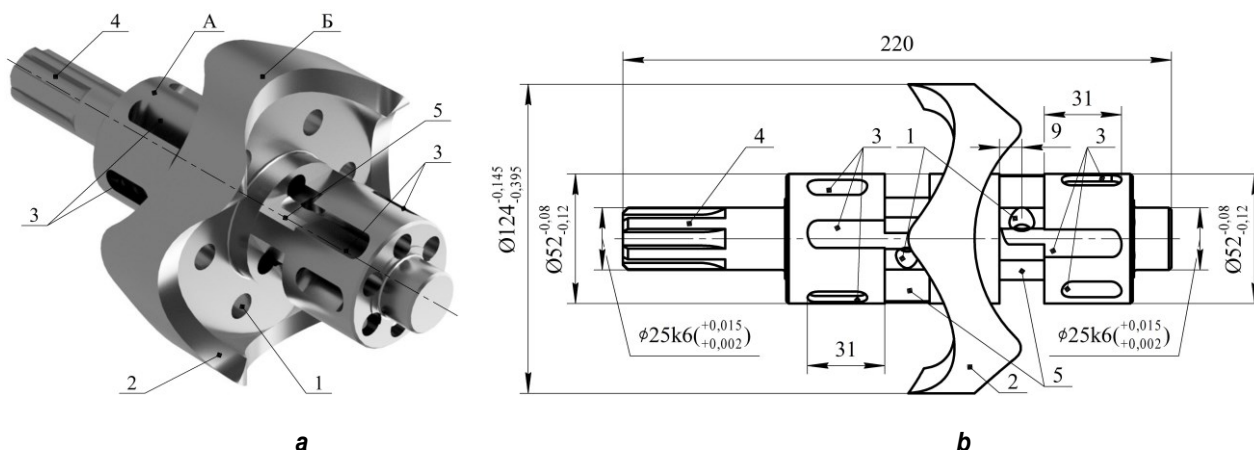


Рис. 1. Деталь Ротор, сталь 45
Fig. 1. Part Rotor, steel 1045

Исключение негативных проявлений механизма удара на работоспособность сменной многогранной пластины

Точение поверхностей сложного профиля сопровождается многочисленными соударениями режущей пластины с элементами разрыва обрабатываемой поверхности. В технической литературе по вопросу влияния механизма удара на работоспособность инструмента высказываются разные мнения [4–6]. В основном они связаны с тем, что имеющийся экспериментальный материал не позволяет получить на него исчерпывающий ответ, но дает возможность для анализа и оценки влияния исследуемых факторов на состояние работоспособности инструмента. Представим, что конструктору удалось создать такую форму детали, у которой на обрабатываемой поверхности находится ровно столько элементов разрыва, что их количество, расположение и площадь имеют симметричный характер. Следовательно, можно предположить, что при точении подобной поверхности с количеством элементов разрыва от 1 до n должно иметь место состояние уравниваемости аналогично точению гладкой поверхности, но в более сложном сочетании сила резания (от P_1 до P_n) и упругости (от T_1 до T_n). Фактически любое изменение количества, формы и расположения элементов разрыва, несмотря на постоянство их площади, не позволяет сохранить прежнюю

траекторию резца, что в последствие приводит к изменению по разным законам силы резания и силы упругости, которые уже не могут быть уравновешены новыми значениями этих сил.

Поэтому при точении прерывистой поверхности, вследствие дисбаланса сил и ударных нагрузок, в инструментальном материале передней поверхности режущего элемента формируются высокие локальные напряжения, приводящие к образованию скрытого микронарушения – трещины поверхностного слоя [7]. Развитие трещины приводит к образованию сетки трещин, скалыванию с режущих кромок частиц инструментального материала, формированию очага разрушения.

Для изучения действия механизма удара на процесс трещинообразования в инструментальном материале использованы методы механики разрушения и, в частности, понятие коэффициента интенсивности напряжений K_1 , кгс/мм² [8, 9].

Напряженное состояние передней поверхности режущего элемента формируется растягивающим напряжением σ_y в направлении O_y , перпендикулярном к возникшей на ней трещине, рис. 2.

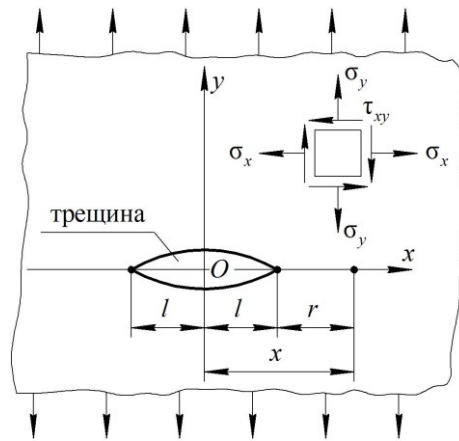


Рис. 2. Фрагмент напряженного состояния передней поверхности режущего элемента
Fig. 2. Fragment of the stressed state of the cutting element front surface

Данное состояние характеризуется коэффициентом интенсивности напряжений в инструментальном материале:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi \cdot l} = \sigma_y \sqrt{2\pi \cdot r} < K_{Ic}, \quad (1)$$

где σ – растягивающее напряжение; $2l$ – длина трещины; $x = l + r$ – расстояние от начала координат до текущей точки на оси O_x ; r – расстояние от вершины трещины до этой же текущей точки; K_{Ic} – предельно допустимая интенсивность напряжений в инструментальном материале в условиях плоского деформируемого состояния.

Используя зависимость (1), можно за период развития трещины на передней поверхности режущего элемента, от ее начальной длины l_0 до конечной l_p , соответствующей границе разрушения, определить допустимое количество циклов N точения поверхности сложного профиля (врезание, резание, выход, холостой пробег инструмента). При этом скорость развития усталостной трещины определяется:

$$dl/dN = C(\Delta K_{Ip})^n = C_1(\Delta \sigma)^4 \cdot l^2, \quad (2)$$

где $K_{Ip} = K_{Ip \max} - K_{Ip \min}$ – размах колебания коэффициента интенсивности напряжений; $C_1 = C\pi^2 \cdot C_4^2$, где C_4 – коэффициент, принимающий значения от $2/\pi$ для тре-

щины дискообразной формы с радиусом равным l , до 1,12 для поверхностной трещины глубиной h .

В результате интегрирования получено:

$$\int_{l_0}^{l_p} \frac{dl}{l^2} = C_1(\Delta \sigma)^4 \int_0^{N_p} dN, \quad (3)$$

где N_p – количество циклов за период работы проходного резца от момента возникновения первой микроскопической трещины усталости до окончательного разрушения конструкции режущего элемента, что является живучестью режущего элемента СМП.

Зависимости (1–3), не учитывают работу инструмента до появления первой микротрещины и формирования локальной зоны, поэтому в классическую математическую зависимость С.Д. Ирвина и П.С. Пэриса [10] внесены дополнения, позволившие получить реальные значения работоспособности режущего элемента за период стойкости инструментального материала.

$$N_p = \left[\sum_{i=1}^n (L_p/L) \cdot 100 + \frac{1}{C_1(\Delta \sigma)^4} \right] \cdot \left(\frac{1}{l_0} - \frac{1}{l_p} \right), \quad (4)$$

где $1 \dots n$ – количество элементов разрыва на обрабатываемой поверхности; L_p – протяженность элементов разрыва; L – общая протяженность обрабатываемой поверхности.

Выбор рациональной формы сменной многогранной пластины

При выборе формы СМП необходимо руководствоваться следующим методическим подходом: для условий точения, когда определяющими являются прочностные характеристики инструмента, предпочтение следует отдать пластинам с большим углом при вершине ε , а при условиях точения, требующих высоких точностных характеристик инструмента, следует выбирать пластины с меньшим углом ε [1, 11].

Обобщение известных форм СМП позволило систематизировать по критериям прочности и точности позиционирования имеющееся конструктивное разнообразие, рис. 3.

При оценке прочности режущей части инструмента следует иметь в виду, что в конструкции СМП имеется несколько участков с высокой вероятностью разрушения. К

области резкого изменения формы упругого тела, в котором возникают повышенные напряжения с ограниченной зоной распределения, относится передняя поверхность режущего элемента и его вершина. Поскольку напряжения в месте концентрации не выравниваются, вершина режущего элемента является наиболее опасной зоной [12]. В этой области формируется максимальный уровень растягивающих напряжений, способных нарушить целостность режущего элемента. Экспериментальное изучение причин возникновения и характера нарушения целостности режущей части инструмента, сравнение полученных результатов с данными литературных источников позволяют предложить действенные меры по устранению причинных связей в наиболее опасных сечениях режущего элемента СМП [13, 14], см. таблицу.

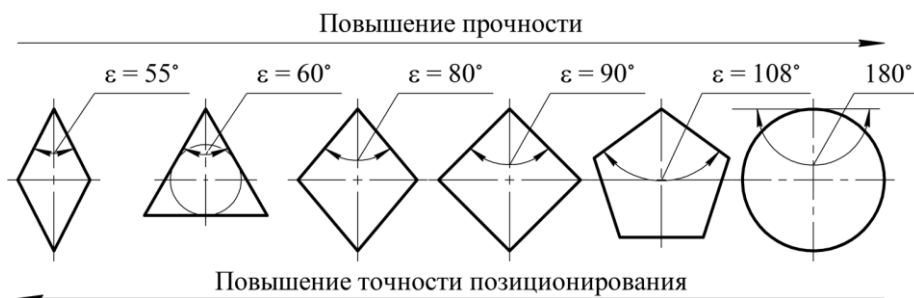


Рис. 3. Классификация конструктивных форм СМП
Fig. 3. Classification of indexable insert designs

Результаты экспериментального исследования причин возникновения и характера нарушений целостности режущего элемента СМП

Results of the experimental study of the causes and nature of indexable insert integrity damage

СМП	Характер нарушения	Причина возникновения	Устранение нарушений
Вершина режущего элемента	Локальное	Приработка режущего элемента	Придать вершине режущего элемента радиусную форму, $r = 0,3 \dots 0,5$ мм
Передняя поверхность режущего элемента	Микротрещины, сетка трещин, микросколы на границах элементов разрыва обрабатываемой поверхности	Усталостное разрушение инструментального материала режущего элемента	Придать передней поверхности циклоидальный профиль; обеспечить врезание в точку на расстоянии от вершины режущего элемента $(2 \dots 2,5)t$
Задняя поверхность режущего элемента	Потеря размерной стойкости режущего элемента при достижении износа по задней поверхности $h_3 = 0,40$ мм	Превышение критерия работоспособности режущего элемента при $h_3 > 0,40$ мм	Восстановить переточкой работоспособность режущего элемента СМП



На практике для снижения уровня напряжений применяют режущий элемент с округленной до 0,5...0,7 мм режущей кромкой. Вследствие быстрого роста величины составляющей силы P_y и увеличения ω –

угла действия силы резания, за счет перераспределения напряжений из опасной зоны на более прочную часть передней поверхности, повышается работоспособность инструмента [12, 15, 16].

Выводы

Для сохранения работоспособности проходного резца в условиях прерывистого точения заданной партии деталей сложного профиля, образованного элементами разрыва обрабатываемой поверхности, следует:

1) расчетным путем определить необходимое количество циклов работы режу-

щего элемента СМП и сопоставить полученный результат с ресурсным значением стойкости инструментального материала;

2) устранить в наиболее опасных сечениях режущего элемента причинные связи вероятностных нарушений конструкции СМП, а в случае появления таковых принять рекомендованные меры.

Библиографический список

1. Артамонов Е.В., Помигалова Т.Е., Утешев М.Х. Расчет и проектирование сменных режущих пластин и сборных инструментов. Тюмень: Изд-во Тюменского государственного нефтегазового университета, 2011. 151 с.
2. Петрусенко Л.А., Антонюк В.С. Анализ разрушения твердосплавного инструмента при врезании // Висока технологія в машинобудуванні. 2017. № 1 (27). С. 116–124.
3. Кудряшов Е.А., Смирнов И.М., Яцун Е.И. Выбор инструментального обеспечения процессов чистовой обработки конструктивно сложных поверхностей деталей // Научные технологии в машиностроении. 2014. № 12 (42). С. 10–14.
4. Петрусенко Л.А., Антонюк В.С. Расчет напряжений, возникающих в опасной зоне лезвийной части режущего инструмента // Вісник національного технічного університету України. Серія: машинобудування. 2016. № 77. С. 147–156.
5. Хандожко А.В., Тимошенко А.А., Петрусенко Л.А. Анализ факторов, вызывающих хрупкое разрушение твердосплавного режущего инструмента // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. 2016. № 38. С. 175–183.
6. Кудряшов Е.А. Точение конструктивно сложных поверхностей деталей инструментом из композита // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2012. № 2 (55). С. 50–55.
7. Фридман Я.Б., Гордеева Т.А., Зайцев А.М. Стресс и анализ изломов металлов. М.: Машгиз, 1960. 128 с.
8. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. М.: Машиностроение, 1977. 232 с.

9. Александров Е.В., Соколинский В.Б. Прикладная теория и расчеты ударных систем. М.: Наука, 1969. 314 с.
10. Пэрис П.С., Ирвин С.Д. Анализ напряженного состояния около трещин. В кн.: Прикладные вопросы вязкости разрушения. М.: Мир, 1968. С. 64–142.
11. Брусов С.И., Добровольский Г.И., Дубров Д.Ю. Повышение эффективности обработки резанием. М.: Спектр, 2012. 302 с.
12. Кудряшов Е.А., Смирнов И. М. Применение метода управления режущей частью инструмента для повышения эффективности процесса прерывистого резания // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2013. № 4. С. 23–29.
13. Кудряшов Е.А., Никонов А.М. Обработка деталей из разнородных конструкционных материалов инструментом из композитов // СТИН. 2008. № 12. С. 26–28.
14. Кудряшов Е.А., Смирнов И.М. К выбору рационального способа восстановления работоспособности изношенных поверхностей деталей // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2014. № 1. С. 8–13.
15. Grzesik W., Żak K., Chudy R. Influence of tool nose radius on the cutting performance and surface finish during hard turning with CBN cutting tools // Journal of Machine Engineering. 2017. Vol. 17. No. 2. pp. 56–64.
16. Кудряшов Е.А., Смирнов И.М., Яцун Е.И. Применение группового метода ремонта деталей класса «тела вращения» инструментом из композита // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2017. № 4. С. 7–10.



References

1. Artamonov E.V., Pomigalova T.E., Uteshev M.H. *Raschet i proektirovanie smennykh rezhushchikh plastin i sbornyykh instrumentov* [Calculation and design of replaceable inserts and indexable cutting tools]. Tyumen: Tyumen State Oil and Gas university Publ., 2011, 151 p. (In Russian)
2. Petrusenko L.A., Antonyuk V.S. Analysis of carbide tool destruction when plung cutting]. *Высокі технології в машинобудуванні* [High technologies in mechanical engineering], 2017, no. 1 (27), pp. 116–124. (In Russian)
3. Kudryashov E.A., Smirnov I.M., Yatsun E.I. Selection of tooling backup of finishing processes of highly engineered surfaces of parts. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroyeni* [Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering], 2014, no. 12 (42), pp. 10–14. (In Russian)
4. Petrusenko L. A., Antonyuk V. S. Calculation of stress, which resulting in a hazard zone of blade part of the cutting tool. *Вісник національного технічного університету України. Серія: машинобудування*, 2016, no. 77, pp. 147–156.
5. Handozhko A.V., Timoshchenko A.A., Petrusenko L.A. Analysis of factors causing carbide cutting tool brittle breakage. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем*, 2016, no. 38, pp. 175–183.
6. Kudryashov E.A. Turning structurally complex surfaces of the parts of a composite tool. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* [Metal Working and Material Science], 2012, no. 2 (55), pp. 50–55. (In Russian)
7. Fridman YA.B., Gordeeva T.A., Zajcev A.M. *Stroyeni i analiz izlomov metallov* [Structure and analysis of metal fractures]. Moscow: Mashgiz Publ., 1960, 128 p. (In Russian)
8. Kogaev V.P. *Raschety na prochnost' pri napryazheniyah, peremennykh vo vremeni* [Strength calculations at time-varying stresses]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1977, 232 p. (In Russian)
9. Aleksandrov E.V., Sokolinskij V.B. *Prikladnaya teoriya i raschety udarnykh sistem* [Applied theory and calculations of shock systems]. Moscow: Nauka Publ., 1969, 314 p. (In Russian)
10. Pehris P. S., Irvin S. D. *Analiz napryazhennogo sostoyaniya okolo treshchin* [Stress state analysis near cracks]. In book: *Prikladnye voprosy vyazkosti razrusheniya* [Applied issues of fracture toughness]. Moscow: Mir Publ., 1968, pp. 64–142. (In Russian)
11. Kirichek A.V., Dobrovolskiy G.I., Dubrov D.Yu. *Povyshenie effektivnosti obrabotki rezaniem* [Improving cutting efficiency]. Moscow: Spektr Publ., 2012, 302 p. (In Russian)
12. Kudryashov E.A., Smirnov I.M. Application of a method of management by cutting part of the tool for increase of efficiency of process of faltering cutting. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* [Proceedings of the South-West State University. Series Technics and Technologies], 2013, no. 4, pp. 23–29. (In Russian)
13. Kudryashov E.A., Nikonov A.M. Machining of parts from heterogeneous construction materials by composite cutting tools. *STIN* [STIN], 2008, no. 12, pp. 26–28. (In Russian)
14. Kudryashov E.A., Smirnov I.M. The repair organization and renewing workability of machine details. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* [Proceedings of the South-West State University. Series Technics and Technologies], 2014, no. 1, pp. 8–13. (In Russian)
15. Grzesik W., Żak K., Chudy R. Influence of tool nose radius on the cutting performance and surface finish during hard turning with CBN cutting tools. *Journal of Machine Engineering*, 2017, vol. 17, no. 2, pp. 56–64.
16. Kudryashov E.A., Smirnov I. M., Yatsun E.I. Batch method application of "rotary body" class part repair with composite tool. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya*. [Repair. Reconditioning. Modernization], 2017, no. 4, pp. 7–10. (In Russian)

Критерии авторства

Кудряшов Е.А., Смирнов И.М. совместно подготовили рукопись и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authorship criteria

Kudryashov E.A., Smirnov I.M. together prepared the manuscript 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 621.9

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-12-75-85>

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ ДИСКОВОЙ ФРЕЗЫ ДЛЯ ОПЕРАЦИЙ ФРЕЗОТОЧЕНИЯ

© М.Ю. Куликов¹, Д.В. Волков²

¹Институт конструкторско-технологической информатики Российской Академии Наук,
127055, Российская Федерация, г. Москва, пер. Вадковский, 18/1а.

²Российский университет транспорта (МИИТ),
127994, Российская Федерация, г. Москва, ул. Образцова, 9/9.

РЕЗЮМЕ: В данной работе показано преимущество обработки методом фрезоточения и проведен расчет основных геометрических параметров дисковой фрезы с наклонной режущей кромкой. Проведено теоретическое исследование, компьютерное моделирование. Проведенные теоретические исследования и компьютерное моделирование показали возможность использования разработанного метода расчета рабочей части режущего инструмента. А также переднего и заднего углов в фактической плоскости при известных величинах: диаметра и ширины фрезы, угла наклона режущей кромки и толщины режущей пластины. Расчетные данные полностью совпадают с моделируемыми. Предложенный метод позволяет рассчитывать радиус кривизны режущей кромки, расположенной под различными значениями угла наклона к оси вращения, инструмента, предназначенного для обработки наружных и внутренних цилиндрических поверхностей методом фрезоточения.

Ключевые слова: дисковая фреза, резание металлов, режущий инструмент, режущая кромка, фрезоточение

Информация о статье: Дата поступления 22 октября 2018 г.; дата принятия к печати 23 ноября 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2018 г.

Для цитирования: Куликов М.Ю., Волков Д.В. Определение оптимальной геометрии дисковой фрезы для операций фрезоточения. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(12):75–85. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-75-85

DETERMINING OPTIMAL GEOMETRY OF THE DISC-TYPE MILLING CUTTER FOR TURN-MILLING OPERATIONS

M.Yu. Kulikov, D.V. Volkov

Institute of Design and Technological Informatics of the Russian Academy of Sciences,
18/1a, Vadkovskiy per., Moscow 127055, Russian Federation

Russian University of Transport,
9/9. Obratsov St., Moscow 127994, Russian Federation

ABSTRACT: The paper demonstrates the advantage of machining by the turn-milling method and provides the calculation of the basic geometric parameters of a disk-type milling cutter with an inclined cutting edge. A theoretical study and computer simulation are performed. The conducted theoretical studies and computer simulation have shown the possibility to use the developed method of calculating the effective part of the cutting tool as well as the front and rear angles in the actual plane under the specified values of the cutter diameter and width, the inclination angle of the cutting edge and the thickness of the cutting insert. The calculated and simulated data completely coincide. The proposed method allows to calculate the curvature radius of the cutting edge located at different values of the angle of inclination to the rotation axis, and a tool designed for machining external and internal cylindrical surfaces by the turn-milling method.

Keywords: disk-type milling cutter, metal cutting, cutting tool, cutting edge, turn-milling

¹Куликов Михаил Юрьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией, e-mail: muk.56@mail.ru

Mikhail Yu. Kulikov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Laboratory, e-mail: muk.56@mail.ru

²Волков Дмитрий Валентинович, заведующий лабораторией кафедры технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава, e-mail: dvvolkov@list.ru

Dmitry V. Volkov, Head of the Laboratory of the Department of Technology of Transport Engineering and Rolling Stock Repair, e-mail: dvvolkov@list.ru



Information about the article: Received October 22, 2018; accepted for publication November 23, 2018; available online December 28, 2018.

For citation: Kulikov M.Yu., Volkov D.V. Determining optimal geometry of the disc-type milling cutter for turn-milling operations. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018; 22(12):pp. 75–85. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-75-85

Введение

Постоянно растущие требования к качеству и срокам обработки деталей побуждают изучать и разрабатывать новые способы обработки деталей. Несмотря на наличие используемых в производстве способов обработки металлов резанием, таких как безвершинное резание, ротационное точение, особое внимание уделяется изучению и проведению апробации использования метода фрезоточения [1–5].

Использование указанного метода позволяет сократить основное время, затрачиваемое на обработку детали, за счет более высоких скоростей резания. Несмотря на вышеуказанные преимущества, в настоящее время имеется весьма небольшой опыт практического использования данного метода при механической обработке резанием, что обусловлено сложностью имеющихся методов расчета геометрической формы режущего инструмента для последующего проектирования опытного образца [6, 7].

подавляющее большинство наружных поверхностей тел вращения обрабатываются однолезвийным режущим инструментом – призматическими вершинными резцами. Вследствие того, что обработка заготовки ведется вершиной резца, этот метод имеет ряд ограничений по скорости резания, производительности и формообразованию поверхности.

Отличительной особенностью фрезоточения является периодичность смены рабочих и холостых циклов каждого из зубьев фрезы. За время рабочего цикла затрачивается энергия, пропорциональная толщине срезаемого слоя и силе трения между поверхностями лезвия, сходящей стружкой и поверхностью резания. Примерно 95% затраченной энергии превращается в теплоту, которая нагревает срезаемую стружку, обрабатываемую заготовку вблизи зоны резания, лезвие инструмента и частично отводится в окружающую среду. Наиболее высокое значение температуры наблюдается на поверхности лезвия. В связи с периодической сменой рабочего и холостого циклов развитие тепловых явлений при фрезоточении имеет несколько другой характер, чем при традиционном точении. За время рабочего цикла лезвие каждого зуба фрезы успевает нагреться, но до более низких значений температуры, чем при точении вершинными резцами. За время последующего холостого цикла лезвие зуба фрезы охлаждается, а накопленная за рабочий цикл теплота отводится в окружающую среду и в корпус фрезы. Даже с учетом роста температуры в период рабочего цикла значение температуры недостаточно велико, чтобы существенно повысить интенсивность изнашивания фрез [8].

Основная часть

В процессе теоретического исследования был проведен анализ схем обработки тел вращения фрезами. Целью этого анализа было изучение известных способов обработки и объединение их в прогрессивный метод для обработки тел вращения.

Способ обработки, когда сочетаются два вращательных движения по часовой

стрелке с взаимно параллельными осями, известен уже давно, но малоизучен и на практике применяется крайне редко. В качестве инструмента используют дисковые фрезы с прямолинейными режущими пластинами или вставными зубьями. Известны также фрезы с винтовыми пластинками из твердого сплава. Номенклатура пластин



строго регламентирована. Непременным условием для возможности использования одной и той же пластинки для разных диаметров является соблюдение постоянства и равенства шага винтового зуба инструмента шагу винтовой пластинки.

Фрезы с режущими пластинами, расположенными под некоторым углом λ , обладают рядом преимуществ, по сравнению с прямозубыми фрезами. Режущие пластины под углом отводят стружку в сторону, благодаря чему она не попадает под следующую режущую пластину, тем самым предохраняя режущую кромку от излишнего износа. Плавность работы способствует уменьшению вибраций фрезы и улучшению чистоты обрабатываемой поверхности. Угол наклона оказывает большое влияние на направление отвода стружки, равномерность фрезерования, производительность и стойкость фрезы. Фрезы с большим углом наклона режущих пластин обладают целым рядом преимуществ, и в особенности в отношении более легкого резания, лучшего отвода стружки из зоны резания, большей производительности и стойкости. При резании происходит постоянная смена пятна контакта режущей пластины и заготовки вдоль главной режущей кромки, что обеспечивает равномерный износ, снижает температуру резания и увеличивает стойкость режущей пластины [9, 10].

При обработке цилиндрической поверхности форма главной режущей кромки

дисковой фрезы с прямолинейными режущими пластинами является прямой, так как элементом касания двух цилиндров (дисков) с параллельными осями является прямая, которая полностью совпадает с профилем обрабатываемой поверхности заготовки. На рис. 1 представлена схема профиля главной режущей кромки при обработке фрезоточением с взаимно параллельными осями. Отрезок АБ можно представить как главную режущую кромку прямолинейной режущей пластины. Любая точка отрезка АБ равноудалена от оси вращения на величину радиуса фрезы и принадлежит цилиндрической поверхности диска.

При повороте отрезка АБ на некоторый угол λ точки А и Б проецируются, соответственно, на точки A_1 и B_1 , которые не принадлежат цилиндрической поверхности диска. Соответственно, только одна точка середины отрезка АБ будет удалена от оси вращения на величину радиуса. При проекции отрезка A_1B_1 на цилиндрическую поверхность диска получается криволинейный элемент A_2B_2 , у которого все точки равноудалены от оси вращения диска.

Также известно, что существует три случая сечения поверхности цилиндра (диска) проецирующей плоскостью, показанные на рис. 2:

Если секущая плоскость перпендикулярна оси вращения цилиндра, то сечением будет окружность (рис. 2 а).

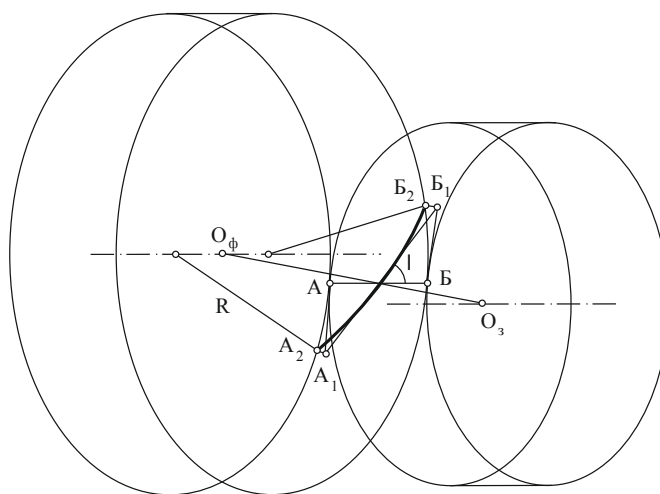


Рис. 1. Схема профиля главной режущей кромки
Fig. 1. Diagram of the main cutting edge profile



Если секущая плоскость не перпендикулярна и не параллельна оси цилиндра, то сечением будет эллипс (рис. 2 б).

Если секущая плоскость содержит ось вращения цилиндра или параллельна ей, то сечением будет прямоугольник (рис. 2 с).

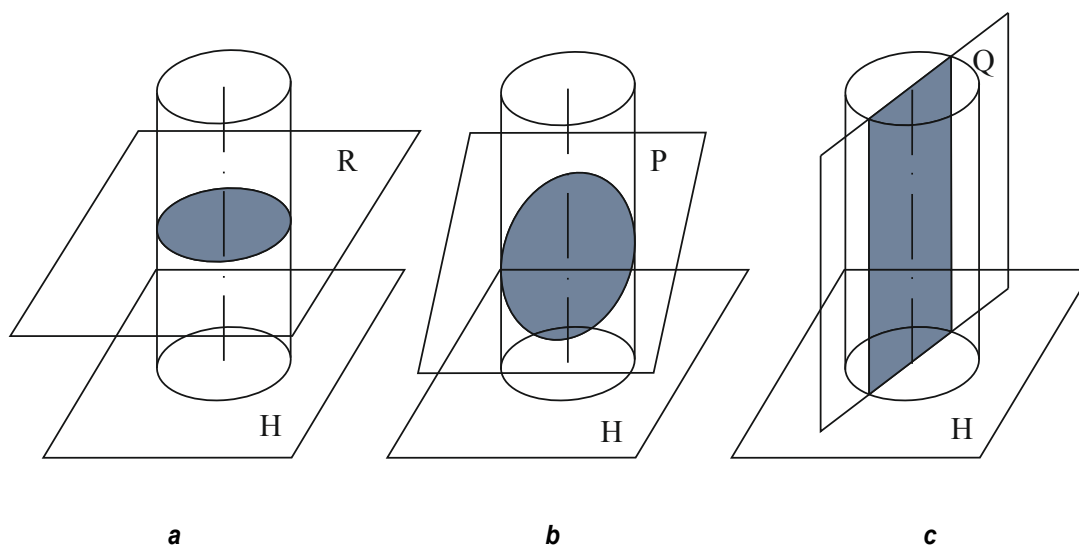


Рис. 2. Случаи сечения поверхности цилиндра плоскостью:
а – окружность, б – эллипс, с – прямоугольник
Fig. 2. Cases of cylinder surface section by a plane:
a – circle, b – ellipse, c – rectangle

Особый интерес представляет случай, когда секущая плоскость пересекает торцевую поверхность цилиндра (плоскость P_1 на рис. 3). Здесь часть эллипса может быть ошибочно принята за часть параболы или гиперболы.

Нужно знать, что ни парабола, ни гипербола не могут быть получены как сечение поверхности кругового цилиндра плоскостью.

Установлено, что для осуществления

эффективного формообразования при фрезеровании главная режущая кромка режущей пластины должна быть выполнена криволинейной. Известно, что пересечением диска и плоскости под некоторым углом является эллипс. Для определения величины радиуса кривизны главной режущей кромки режущей пластины использовалась аналитическая геометрия и материалы проф. С.С. Четверикова [11, 12].

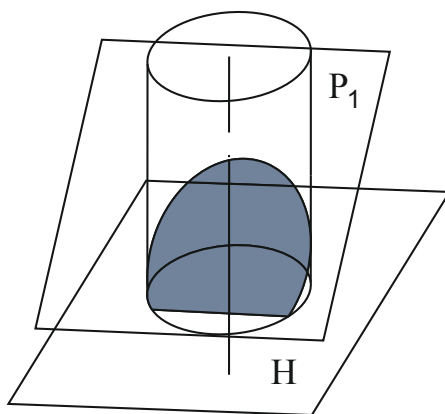


Рис. 3. Пересечение торцевой поверхности
Fig. 3. Intersection of the end surface

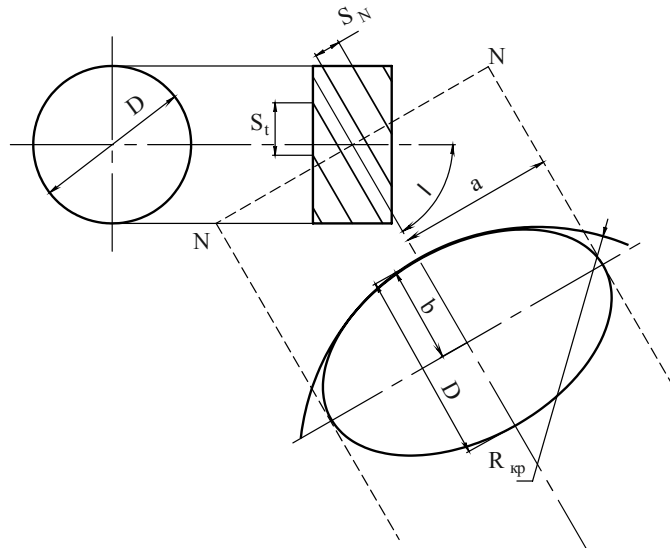


Рис. 4. Расчет радиуса кривизны эллипса
Fig. 4. Calculation of the ellipse curvature radius

На рис. 4 видим, что радиус кривизны главной режущей кромки режущей пластины равен радиусу кривизны эллипса, и показан в сечении нормали (плоскость NN') к плоскости режущей пластины. Поэтому, чтобы расчет радиуса был в плоскости режущей пластины, будем записывать угол наклона кромки режущей пластины λ как $(90^\circ - \lambda)$.

Известно, что радиус кривизны эллипса

$$R_i = \frac{a^2}{b}, \quad (1)$$

где a – большая полуось эллипса, которая рассчитывается как угол между большой осью эллипса и направлением диаметра. D – диаметр фрезы

$$a = \left(\frac{D}{2}\right) / \cos(90 - \lambda); \quad (2)$$

b – малая полуось эллипса, остается без изменений:

$$b = \frac{D}{2}. \quad (3)$$

Подставляя величины a и b в формулу эллипса, получим

$$R_i = \frac{\frac{D^2}{(2 \cdot \cos(90 - \lambda))^2}}{D/2}. \quad (4)$$

И после преобразований получаем окончательное уравнение:

$$R_i = \frac{D}{2 \cdot \cos^2(90 - \lambda)}. \quad (5)$$

А так как $\cos^2(90 - \lambda) = \sin^2 \lambda$, то уравнение:

$$R_i = \frac{D}{2 \cdot \sin^2 \lambda} \quad (6)$$

также тождественно верно и расчет радиуса кривизны главной режущей кромки можно производить по одному из уравнений (5) или (6).

На рис. 5 показана схема проектирования рабочей части инструмента.

То, что центр радиуса кривизны сегмента находится на перпендикуляре хорды сегмента, совпадающим с биссектрисой угла сегмента, проходящим через ось вращения диска, является обязательным условием при проектировании профиля режущей кромки.

При конструировании инструмента и оценке его работоспособности важным является вопрос выбора системы отсчета геометрических параметров режущей части.

При проектировании и расчете данного вида фрез передний γ и задний α углы режущей пластины связаны с углом наклона режущей пластины λ .



При прямоугольном резании ($\lambda = 0$) передний и задний углы в процессе резания принято измерять в плоскости, перпендикулярной режущей кромке. В этом случае эта плоскость проходит через вектор скорости перпендикулярно поверхности резания и соответствует направлению движения стружки по передней поверхности.

При косоугольном резании ($\lambda \neq 0$) передний и задний углы могут измеряться в двух сечениях.

Различают фактический передний угол γ_ϕ , измеряемый в перпендикулярном сечении оси вращения фрезы, и нормальный передний угол γ_n , измеряемый в сечении нормали к направлению главной режущей кромки. С увеличением угла наклона режущей пластины λ разница между фактическим передним углом γ_ϕ и передним углом в нормальном сечении γ_n резко возрастает [13].

Ведущие специалисты в области резания металлов считают, что определение передних и задних углов в одной секущей плоскости создает определенные практические преимущества, но с научной точки зрения представляется необоснованным. Изменение системы обозначения геометрических параметров фрезы незначительно упро-

щает технологию ее производства. Тем не менее, наиболее логичной системой обозначения с точки зрения механики резания является система, основанная на рассмотрении переднего угла резания в нормальной плоскости. Это позволяет провести анализ поперечного сечения режущей пластины при проектировании режущего инструмента и, в случае необходимости, увеличить геометрические параметры с целью предотвращения поломки и выхода инструмента из строя [14, 15].

Считается, что задний угол следует измерять в поверхности движения или касательной к ней плоскости. Это позволяет определить траектории относительных перемещений всех или части точек задней поверхности и проанализировать возможность совершать инструментом беспрепятственное рабочее движение.

Изменение величин переднего и заднего углов в фактическом и нормальном сечении представлено на рис. 6.

Определение величины переднего угла в нормальном сечении можно вычислить по формуле:

$$\operatorname{tg} \gamma_n = \operatorname{tg} \gamma_\phi \cos \lambda. \quad (6)$$

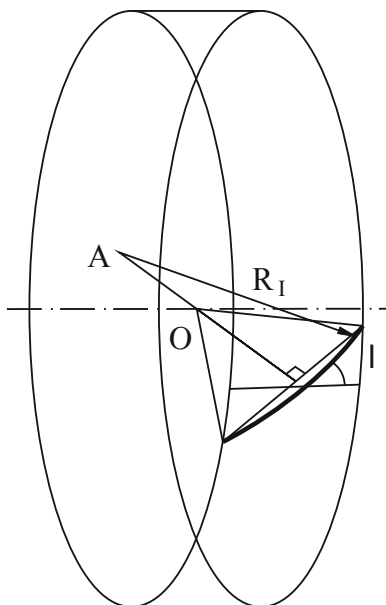


Рис. 5. Схема проектирования
Fig. 5. Design diagram

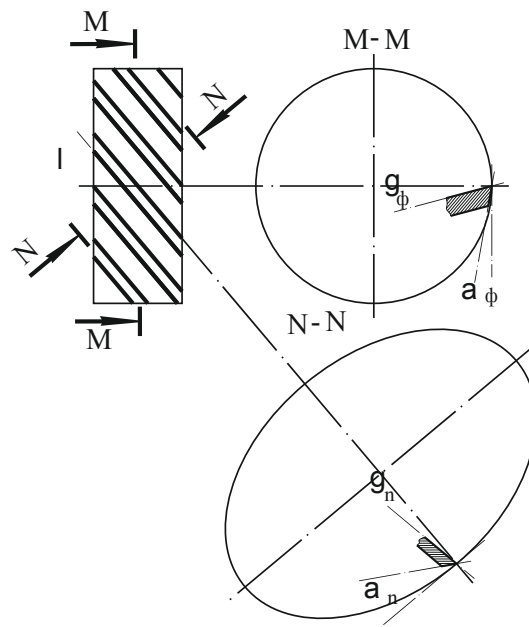


Рис. 6. Передний и задний углы
в фактическом и нормальном сечениях
Fig. 6. Front and rear angles in actual
and normal sections

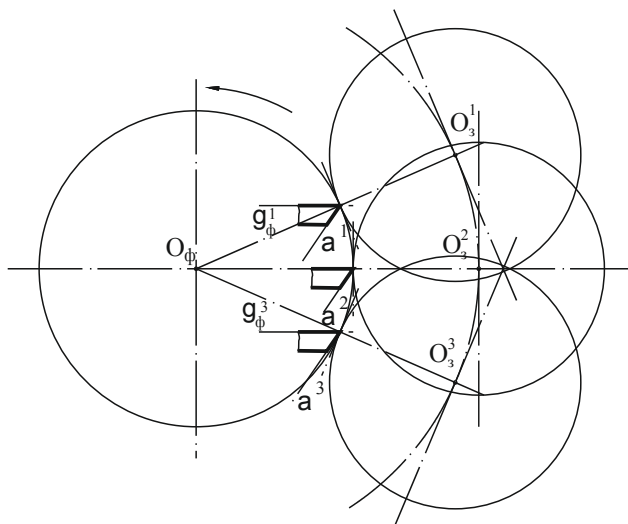


Рис. 7. Схема изменения переднего и заднего углов при фрезоточении
Fig. 7. Diagram of front and rear angle variation at turn-milling

При обработке фрезами с наклонной режущей кромкой, при значении переднего угла $\gamma = 0$ в нормальной плоскости, врезание в материал заготовки происходит с отрицательным значением фактического переднего угла режущей пластины. А выход режущей пластины из заготовки происходит с положительным значением фактического переднего угла, при том, что сами величины углов одинаковы и зависят от величины угла наклона режущей пластины λ и ширины профиля фрезы. Чем больше величина угла наклона режущей пластины λ и ширина профиля фрезы, тем больше и величина перед-

него угла с двумя значениями – от отрицательного до положительного.

На рис. 7 представлена схема изменения величины переднего и заднего углов в процессе обработки.

Для снижения значения заднего угла, в целях предотвращения возможной поломки режущей пластины, необходимо задать отрицательный передний угол, что позволит уменьшить задний угол и тем самым увеличить прочность режущей пластины. Необходимо учесть, что при изменении величины переднего угла изменится и радиус кривизны режущей кромки режущей пластины.

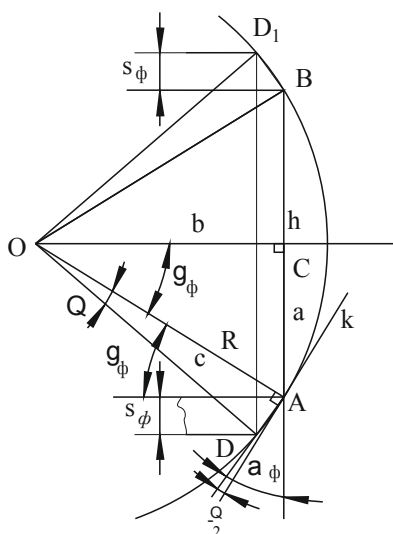


Рис. 8. Схема расчета углов в фактической плоскости
Fig. 8. Computation diagram of angles in the actual plane



Для расчета величины заднего угла режущей пластины α необходимо определить величину переднего угла режущей пластины γ_ϕ в фактической плоскости. Поэтому, после предварительного расчета радиуса кривизны, при известных величинах: диаметра фрезы D , ее ширины l и угла наклона режущих пластин λ , следует рассчитать размер режущей пластины по величине хорды сегмента h в фактической плоскости фрезы и найти величину переднего угла. На рис. 8 представлена схема построения и расчетов величины переднего угла γ_ϕ . Величину хорды сегмента (AB) можно вычислить по формуле:

$$h = \operatorname{tg}(\lambda) * l, \quad (7)$$

где l – ширина фрезы, λ – угол наклона режущей пластины.

Так как передний угол режущей пластины γ_ϕ является противолежащим углом AOC , то они равны по величине. Для определения величины угла AOC воспользуемся «теоремой синусов», в частности ее расширенным вариантом:

$$\frac{a}{\sin \alpha} = \frac{b}{\sin \beta} = \frac{c}{\sin \gamma} = 2R, \quad (8)$$

где a, b, c – стороны треугольника, $\sin \alpha, \sin \beta, \sin \gamma$ – соответственно, противолежащие им углы, а R – радиус описанной окружности. Тогда величина угла

$$AOB = 2 \arcsin \frac{h}{2R}. \quad (9)$$

При проектировании режущего инструмента с большими значениями угла наклона λ режущей пластины формула вычисления величины переднего угла γ_ϕ в проекции фактической плоскости после подстановки значений будет иметь вид:

$$\gamma_\phi = \arcsin \frac{(\operatorname{tg}(\lambda) * l) / 2}{R}. \quad (10)$$

По теореме «Об угле между касательной и хордой» угол измеряется половиной, заключенной внутри этого угла дуги.

Поэтому на величину заднего фактического угла будет влиять не только угол наклона, но и толщина режущей пластины в фактической плоскости. В связи с этим задний угол не может быть спроектирован меньше, чем сумма величин углов AOC и половина угла AOD (θ):

$$\alpha_\phi = \gamma_\phi + \frac{\theta}{2}. \quad (11)$$

Для вычисления значения угла (AOD) θ необходимо рассчитать толщину режущей пластины в фактической плоскости при известной величине толщины режущей пластины s в нормальной плоскости по следующей формуле:

$$s_\phi = \frac{s}{\cos \lambda}. \quad (12)$$

Значения угла θ можно вычислить путем вычитания значения угла AOC из величины угла DOC , значение которого равно половине значения угла DOD_1 . Чтобы получить значение угла DOD_1 , применив формулу «теоремы синусов», нужно узнать величину хорды DD_1 , которая равна сумме значений: величине хорды $AB(h)$ и двойному значению толщины режущей пластины в фактической плоскости s_ϕ :

$$DD_1 = \tan(\lambda) * l + \frac{2s}{\cos \lambda}. \quad (13)$$

При полученном значении величины DD_1 можно рассчитать значение угла DOD_1 по формуле:

$$DOD_1 = 2 \arcsin \frac{h + 2s_\phi}{2R}. \quad (14)$$

Разница величин углов DOC и AOC будет равна величине угла θ :

$$\theta = \arcsin \frac{(\operatorname{tg}(\lambda) * l) / 2 + s_\phi}{R} - \arcsin \frac{(\operatorname{tg}(\lambda) * l) / 2}{R}. \quad (15)$$

После подстановки значений в формулу (11) величину заднего угла можно вычислить по формуле:

$$\alpha_\phi = \arcsin \frac{(\operatorname{tg}(\lambda) * l) / 2}{R} + \frac{\theta}{2}. \quad (16)$$



Таким образом, очевидно, что с увеличением угла наклона режущей кромки увеличиваются и значения переднего и заднего углов. Это приводит к снижению значения угла заострения и снижению прочности режущей пластины в целом.

На основании изученных материалов и выведенных формул расчета геометрических параметров режущего инструмента была спроектирована дисковая фреза с наклонной режущей кромкой для обработки наружных поверхностей тел вращения. Данный расчет был проверен при 3d проектировании в программе Solid Works. Были спроектированы дисковые и цилиндрические

фрезы разного диаметра с разными значениями угла наклона режущей пластины. Расчетные данные полностью совпали с моделируемыми на данном участке диска.

На рис. 9 показан перспективный вид спроектированной модели дисковой фрезы. В корпусе фрезы 1, под углом к оси вращения, выполнены гнезда для установки режущих пластин 2, количество которых регламентировано размерными параметрами и способом крепления в корпусе инструмента. При проектировании, как один из вариантов для надежной фиксации, режущие пластины закрепляют распорным трапециевидальным прижимом 3, двумя распорными установочными винтами 4 с внутренним шестигранником.

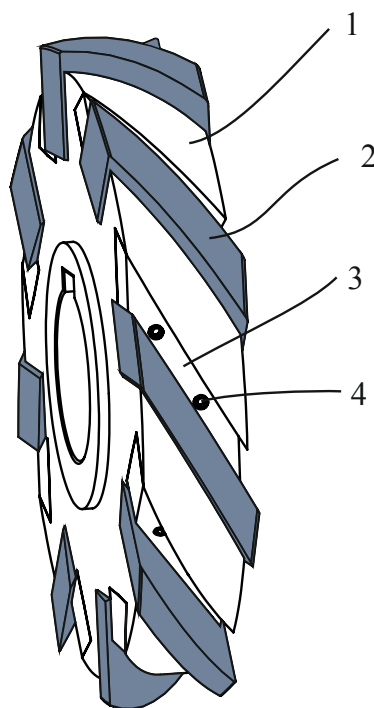


Рис. 9. Модель дисковой фрезы
Fig. 9. Model of a disc-type milling cutter

Заключение

Установлено, что при установке режущих пластин под некоторым углом λ к оси вращения фрезы, форма главной режущей кромки меняется на криволинейную. Это объясняется тем, что при фрезоточении все точки главной режущей кромки должны быть равноудалены от оси вращения инструмента и равны радиусу фрезы. При увеличении угла наклона режущей пластины с

прямолинейной режущей кромкой это условие не соблюдается. С увеличением угла наклона режущей пластины радиус кривизны главной режущей кромки режущей пластины уменьшается.

Предложенный метод позволяет рассчитывать радиус кривизны режущей кромки, расположенной под различными значениями угла наклона к оси вращения,



инструмента, предназначенного для обработки наружных и внутренних цилиндрических поверхностей методом фрезоточения.

С увеличением угла наклона режущей пластины возрастает осевая сила резания, которая в зависимости от правого или левого направления наклона может действовать по направлению к шпинделю или от шпинделя. Однако осевую силу можно компенсировать установкой двух дисковых фрез с одинаковыми значениями углов с правым и левым направлением наклона режущих пластин.

Также при моделировании было установлено, что для получения качественной поверхности с минимальными отклонениями по форме необходимо проводить обработку данной фрезой в три этапа (черновая, получистовая и чистовая) путем снижения скорости вращения фрезы. Причем последний чистовой этап проводить на минимальных скоростях вращения фрезы одной режущей пластиной, что позволяет полностью снять огранку с обрабатываемой детали.

Библиографический список

1. Филиппов А.В. Косоугольное точение брезущими резаками // Актуальные проблемы в машиностроении: сб. науч. тр. I Междунар. науч.-практ. конф. Новосибирск, 2014. Вып. 1. С. 236–241.
2. Бобров В.Ф., Иерусалимов Д.Е. Резание металлов самовращающимися резаками. М.: Машиностроение, 1972. 110 с.
3. Ящерицын П.И., Борисенко А.В., Дривотин И.Г., Лебедев В.Я. Ротационное резание материалов. Минск: Наука и техника, 1987. 229 с.
4. Коновалов Е.Г., Сидоренко В.А., Соусь А.В. Прогрессивные схемы ротационного резания металлов. Минск. «Наука и техника». 1972. 272 с.
5. Индаков Н.С., Бинчуров А.С. Особенности геометрии многогранных резцов для ротационного точения // Вестник машиностроения. 2013. № 11. С. 38–40.
6. Indakov N.S., Binchurov A.S. Turning by multifaceted cutters // Russian Engineering Research. 2014. Vol. 34. No. 1. P. 52–54. DOI: 10.3103/S1068798X14010080
7. Indakov N.S., Binchurov A.S. Geometry of Multifaceted Rotary Cutters // Russian Engineering Research. 2014. Vol. 34. No. 2. P. 79–82. DOI: 10.3103/S1068798X14020051

8. Куликов М.Ю., Волков Д.В., Скляр В.М. Разработка рациональной формы режущей кромки инструмента для фрезоточения. Металлообработка. 2018. № 3 (105). С. 9–12.
9. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов. М.: Высш. Шк. 1985. 304 с.
10. Кожевников Д.В., Гречишников В.А., Кирсанов С.В., Григорьев С.Н., Схиртладзе А.Г. Режущий инструмент. М.: Машиностроение, 2014. 520 с.
11. Четвериков С.С. Металлорежущие инструменты. М: Машгиз, 1941. 515 с.
12. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. М.: Аст. Астрель, 2006. 991 с.
13. Этин А.О. Кинематический анализ методов обработки металлов резанием. М.: Машиностроение, 1964. 326 с.
14. Семенченко И.И., Матюшин В.М., Сахаров Г.Н. Проектирование металлорежущих инструментов. М.: Машгиз, 1963. 952 с.
15. Ящерицын П.И., Еременко М.Л., Жигалко Н.И. Основы резания материалов и режущий инструмент. Минск: Высш. Шк. 1981. 560 с.

References

1. Filippov A.V. *Kosougol'noe tochenie breyushchimi rezcami* [Oblique turning by shaving cutters]. *Aktual'nye problemy v mashinostroenii: sbornik nauchnykh trudov I Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Actual problems in mechanical engineering: a collection of scientific papers of the I International Scientific and Practical Conference]. Novosibirsk, 2014, Issue. 1, pp. 236–241. (In Russian)
2. Bobrov V.F., Ierusalimov D.E. *Rezanie metallov samovrashchayushchimisya rezcami* [Metal cutting by self-rotating cutters]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1972, 110 p. (In Russian)
3. Yashchericyn P.I., Borisenko A.V., Drivotin I.G., Lebedev V.Ya. *Rotatsionnoe rezanie materialov* [Rotational cutting of materials]. Minsk: Nauka i tekhnika Publ., 1987, 229 p. (In Russian)

4. Konovalov E.G., Sidorenko V.A., Sous' A.B. *Progresivnye skhemy rotatsionnogo rezaniya metallov* [Advanced schemes of rotary metal cutting]. Minsk. Nauka i tekhnika Publ., 1972, 272 p. (In Russian)
5. Indakov N.S., Binchurov A.S. Geometrical features of multisurface cutters for rotary cutting. *Vestnik mashinostroyeniya* [Russian Engineering Research], 2013, no. 11, pp. 38–40. (In Russian)
6. Indakov N.S., Binchurov A.S. Turning by multifaceted cutters. Russian Engineering Research. 2014, vol. 34, no. 1, pp. 52–54. DOI: 10.3103/S1068798X14010080
7. Indakov N.S., Binchurov A.S. Geometry of Multifaceted Rotary Cutters. Russian Engineering Research. 2014, vol. 34, no. 2, pp. 79–82. DOI: 10.3103/S1068798X14020051



8. Kulikov M.Yu., Volkov D.V., Sklyarov V.M. The elaboration of a rational tool tip form for turn-milling. *Metalloobrabotka* [Metalworking], 2018, no. 3 (105), pp. 9–12. (In Russian)
9. Granovskij G.I., Granovskij V.G. *Rezanie metallov* [Metal cutting]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ., 1985, 304 p. (In Russian)
10. Kozhevnikov D.V., Grechishnikov V.A., Kirsanov S.V., Grigor'ev S.N., Skhirtladze A.G. *Rezhushchij instrument* [Cutting tools]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2014, 520 p. (In Russian)
11. Chetverikov S.S. *Metallorazhushchie instrumenty* [Metal-cutting tools]. Moscow: Mashgiz Publ., 1941, 515 p. (In Russian)
12. Vygodskij M.Ya. *Spravochnik po vysshej matematike*

Критерии авторства

Куликовым М.Ю. проведена научная работа по анализу полученных результатов и обобщение выводов по итогам исследования. Волковым Д.В. выполнено проектирование инструмента, компьютерное моделирование, математические расчеты геометрических параметров инструмента. Авторы в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

- [Reference book of higher mathematics]. Moscow: Ast. Astrel' Publ., 2006, 991 p. (In Russian)
13. Etin A.O. *Kinematicheskij analiz metodov obrabotki metallov rezaniem* [Kinematic analysis of metal cutting methods]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1964. 326 c. (In Russian)
 14. Semenchenko I.I., Matyushin V.M., Saharov G.N. *Proektirovanie metallorazhushchih instrumentov* [Designing of metal-cutting tools]. Moscow: Mashgiz Publ., 1963, 952 p. (In Russian)
 15. Yashchercyn P.I., Eremenko M.L., Zhigalko N.I. *Osnovy rezaniya materialov i rezhushchij instrument* [Basics of material cutting and cutting tools]. Minsk: Vysshaya Shkola Publ., 1981, 560 p. (In Russian)

Authorship criteria

Kulikov M.Yu. has conducted a scientific research including the analysis of the obtained results and summarizing the conclusions of the study. Volkov D.V. has designed the tool, performed computer modeling, mathematical calculations of geometric parameters of the tool. The authors 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 621.365

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-12-86-95>

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ОБРАБОТКОЙ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

© А.В. Лившиц¹, С.К. Каргапольцев², Н.Г. Филиппенко³, Д.В. Буторин⁴

Иркутский государственный университет путей сообщения,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

РЕЗЮМЕ: Рассмотрено формирование общих подходов к обеспечению энергоэффективности, повышение производительности технологических процессов высокочастотной электротермии полимеров. Исследования проводились на основе физикохимии полимерных материалов, термодинамики, электротехники и основ проектирования автоматизированных систем. Экспериментальные исследования осуществлялись с использованием методов контроля тепловых деформаций и полей. Представлена функциональная схема автоматизированных систем управления технологических процессов высокочастотной электротермии, определены задачи, решаемые при реализации управления частными технологическими процессами высокочастотной электротермии (сушка и сварка полимерных деталей) и циклограммы процессов управления ими. Представлены принципы и общие подходы к организации управления процессами высокочастотного нагрева полимеров, сформированные исходя из необходимости построения универсальных автоматизированных систем управления технологическими процессами, обеспечения энергоэффективности, высокой производительности технологических процессов высокочастотной обработки полимеров. В соответствии с этими подходами показано, что переход к обработке в области максимально возможных напряжений рабочего конденсатора электротермического оборудования U_p дает возможность достичь экономии 30–40% энергетических затрат и 70% экономии во времени обработки.

Ключевые слова: полимеры, фазовые превращения, термическая обработка, высокочастотная обработка, автоматизированная система управления, электротермия

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Российского агентства железнодорожного транспорта в рамках темы научного исследования ФГБОУ ВО Иркутского государственного университета путей сообщения с государственным финансированием «Исследование динамики ВЧ-электротермического воздействия на полимерные и композитные материалы разной степени поляриности».

Информация о статье: Дата поступления 18 октября 2018 г.; дата принятия к печати 20 ноября 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2018 г.

Для цитирования: Лившиц А.В., Каргапольцев С.К., Филиппенко Н.Г., Буторин Д.В. Энергоэффективное управление высокочастотной обработкой полимерных материалов. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(12):86–95. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-86-95

¹Лившиц Александр Валерьевич, доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе, e-mail: livnet@list.ru

Alexander V. Livshits, Dr., Sci. (Eng.), Professor, Vice-rector for Research, e-mail: livnet@list.ru

²Каргапольцев Сергей Константинович, доктор технических наук, профессор, ректор, e-mail: rector@irgups.ru

Sergey K. Kargapol'tsev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector, e-mail: rector@irgups.ru

³Филиппенко Николай Григорьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации производственных процессов, e-mail: pentagon@mail.ru

Nikolay G. Filippenko, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, of the Department of Automation of Manufacturing Processes, e-mail: pentagon@mail.ru

⁴Буторин Денис Витальевич, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры автоматизации производственных процессов, e-mail: den_butorin@mail.ru

Denis V. Butorin, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Department of Automation of Manufacturing Processes, e-mail: den_butorin@mail.ru



ENERGY EFFICIENT CONTROL OF POLYMER MATERIAL HIGH FREQUENCY PROCESSING

Aleksandr V. Livshits, Sergey K. Kargapol'tsev, Nikolay G. Filippenko, Denis V. Butorin

Irkutsk State Transport University,
15, Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russian Federation

ABSTRACT: The article deals with the formation of general approaches for energy efficiency provision and improvement of the performance of technological processes of polymer high-frequency electrothermy. The research was carried out on the basis of physics and chemistry of polymer materials, thermodynamics, electrical engineering and fundamentals of automated system design. Experimental studies involved the use of the control methods of heat deformations and fields. A functional diagram of automated control systems of technological processes of high-frequency electrothermy is presented. The tasks are identified that are solved at control implementation by individual technological processes of high frequency electrothermy (drying and welding of polymer parts). Control process cyclograms are specified. The principles and general approaches to the control organization of high-frequency heating of polymers are determined. They have been formed on the basis of the need to build a universal automated control system of technological processes and provision of energy efficiency, high performance of technological processes of high-frequency processing of polymers. According to the discussed approaches, it is shown that the transition to processing in the area of the maximum possible voltages of the operating capacitor of the electrothermal equipment U_p provides the possibility to save up to 30-40% of energy costs and 70% of processing time.

Keywords: polymers, change of phase, heat treatment, high-frequency processing, automated control system, electrothermy

Acknowledgements: The work has been performed with the support of the Russian Agency of railway transport within the framework of the research topic of the Irkutsk state Transport University with the state funding *Studying dynamics of high-frequency electro-thermal effect on polymer and composite materials of different polarity degree*.

Information about the article: Received October 18, 2018; accepted for publication November 20, 2018; available online December 28, 2018.

For citation: Livshits A.V., Kargapol'tsev S.K., Filippenko N.G., Butorin D.V. Energy efficient control of polymer material high frequency processing. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018; 22(12):pp. 86–95. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-86-95

Введение

Современное состояние экономики РФ и анализ направлений научного, технологического развития страны диктует необходимость существенного улучшения качества выпускаемой продукции, повышения эффективности производства на основе его интенсификации, широкого внедрения средств автоматизации, в том числе автоматизированных систем управления технологическими процессами. Решение подобных задач невозможно без опоры на последние достижения в области современных ма-

териалов и эффективных технологий их обработки. Так, в промышленности все большее применение находят полимерные материалы, которые в самых разнообразных областях промышленности приходят на смену цветным металлам, нержавеющей стали и другим конструкционным материалам. Но, несмотря на серьезные достижения в материаловедении и технологиях полимеров и композитов, проблем, связанных с их обработкой, хранением и эксплуатацией остается много.

Исследования в области высокочастотной электротермии

Сегодня к прогрессивным технологическим процессам обработки полимерных деталей можно отнести энерго-, ресурсо-

сберегающие технологии обработки полимеров методами высокочастотной (ВЧ) электротермии [1, 2].

В Иркутском государственном университете путей сообщения проводятся исследования в области электрофизики полимеров, их высокочастотной обработки с использованием автоматизированной системы научных исследований [3–7], автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП). На рис. 1 представлена функциональная схема АСУ технологических процессов высокочастотной электротермии, включающая устрой-

ства управления по анодному току ($УУ_1$), динамике возникновения частичных разрядов (ЧР) ($УУ_2$), задающее устройство, обеспечивающее реализацию процесса акклиматизации материала (ЗУ), датчики тока, регистрации ЧР и температуры поверхности объекта (ЧЭ_{1,2,3}); шаговый двигатель поворота настроечного конденсатора (ИУ). С использованием представленной АСУ ТП производится формирование, отладка алгоритмов управления процессами высокочастотной электротермии полимеров и композитов.

Технологические процессы высокочастотной электротермии и управление ими

Необходимо отметить, что по результатам научных исследований, приведенных в работах [4, 5, 8–10], построение алгоритмов управления высокочастотной электротермией строится на основе выявления начальных моментов разнообразных релаксационных переходов полимеров в процессе их нагрева. Это справедливо и для процесса высокочастотной сушки, и для процесса сварки полимерных образцов, и многих других технологических процессов обработки. При сварке необходимо обеспечить наличие расплава в месте контакта соединяемых деталей, при ВЧ-сушке обеспе-

чить максимальное энергетическое воздействие температуры ВЧ-обработки.

Представленная ранее АСУ ТП позволяет реализовывать различные технологические процессы и значительно расширяет применимость высокочастотного оборудования. При этом авторские алгоритмы функционирования АСУ строятся с учетом обеспечения энергоэффективности и повышения производительности процессов обработки. Рассмотрим технологические процессы электротермии (сварка, сушка полимеров) и задачи, решаемые в процессе их реализации.

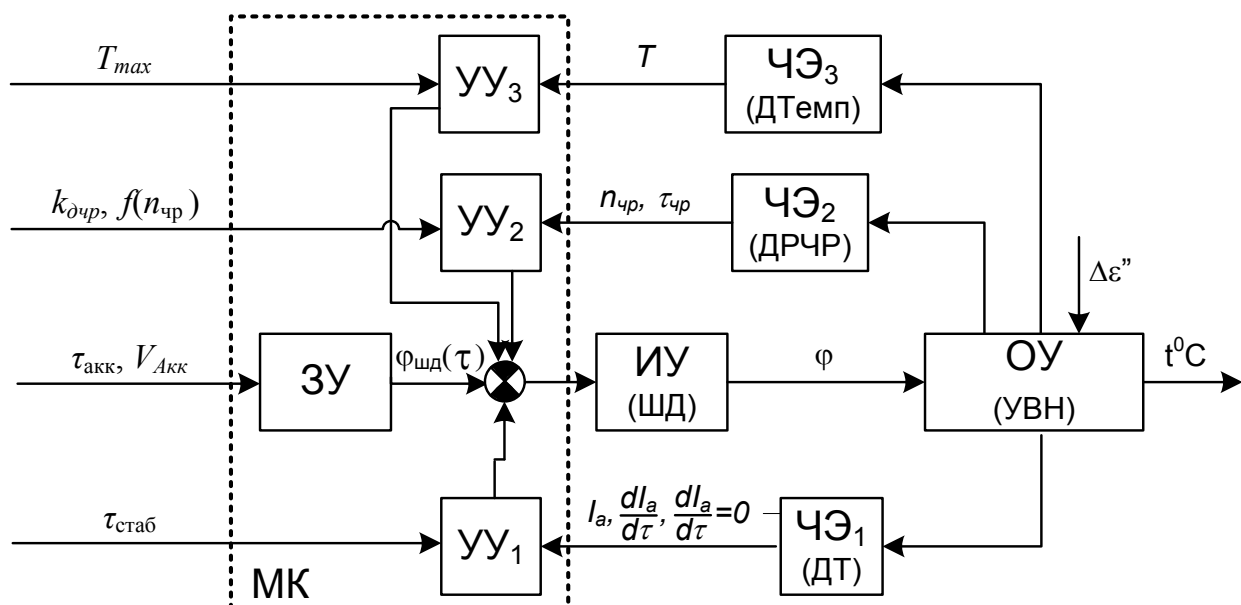


Рис. 1. Функциональная схема АСУ ТП высокочастотной электротермии
Fig. 1. Functional diagram of the automated control system of technological processes
of high-frequency electrothermy



В процессе сварки необходимо:

1. Организовать при скорости изменения напряжения рабочего конденсатора $V_{акк} = const$ выход на близкую к максимальной мощность обработки. Это необходимо для реализации «акклиматизации» полимера, вывода процесса высокочастотной обработки в режим максимально возможного электротермического воздействия и дальнейшего поддержания этого режима. Контролируемые параметры этапа – время акклиматизации $\tau_{акк}$, скорость $V_{акк}$. При этом необходимо обеспечить возможность изменения длительности акклиматизации.

2. Начать процесс регистрации ЧР по завершению «акклиматизации», проводить оценку их количества $k_{дчр}$, времени межрядных интервалов $\tau_{чр}$ для решения задачи распознавания предпробойных состояний и ликвидации пробоев.

3. Организовать процесс уменьшения мощности электротермического воздействия при превышении частоты появления ЧР выше некоторого критического значения. Если не удастся вывести технологическую

систему из развивающегося предпробойного состояния, необходимо организовать аварийное отключение оборудования. Контролируемые параметры этапов 2, 3 – скорость изменения анодного тока $dl_a/d\tau$, частота возникновения ЧР $\tau_{чр}$.

4. Выполнить выход на максимальную мощность, не допустить возникновения пробоя.

5. Обеспечить достижение анодного тока I_a значения первого максимума I_{aMAX} .

6. Обеспечить достижение анодного тока I_a значения первого минимума I_{aMIN} , соответствующего температуре плавления.

7. Завершить процесс электротермического нагрева при достижении температуры сварки.

8. Выдержать свариваемые образцы под давлением для повышения качества сварки. Контролируемый параметр – время выдержки под давлением τ_d .

В соответствии с вышеизложенным, циклограмма этапов реализации технологического процесса сварки термопластичных полимерных деталей представлена на рис. 2.

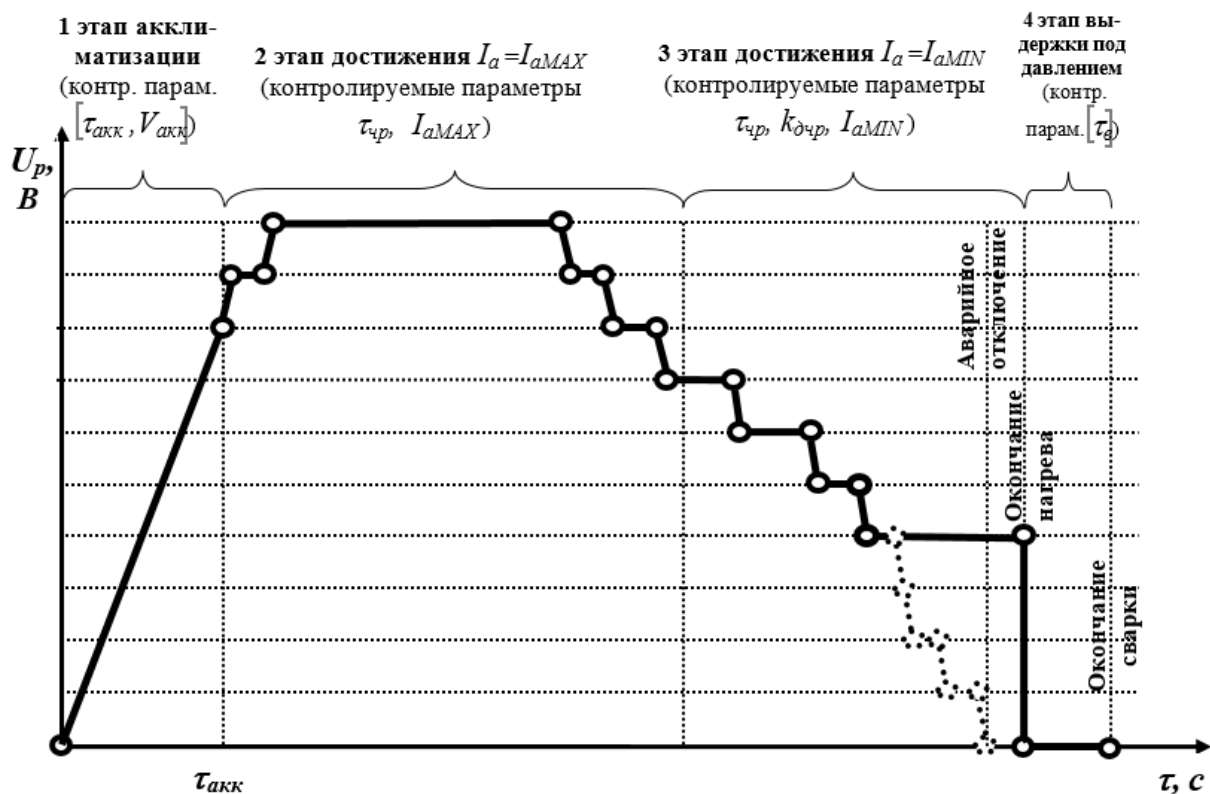


Рис. 2. Циклограмма процесса управления электротермической сваркой
Fig. 2. Cyclogram of the control process of electro-thermal welding

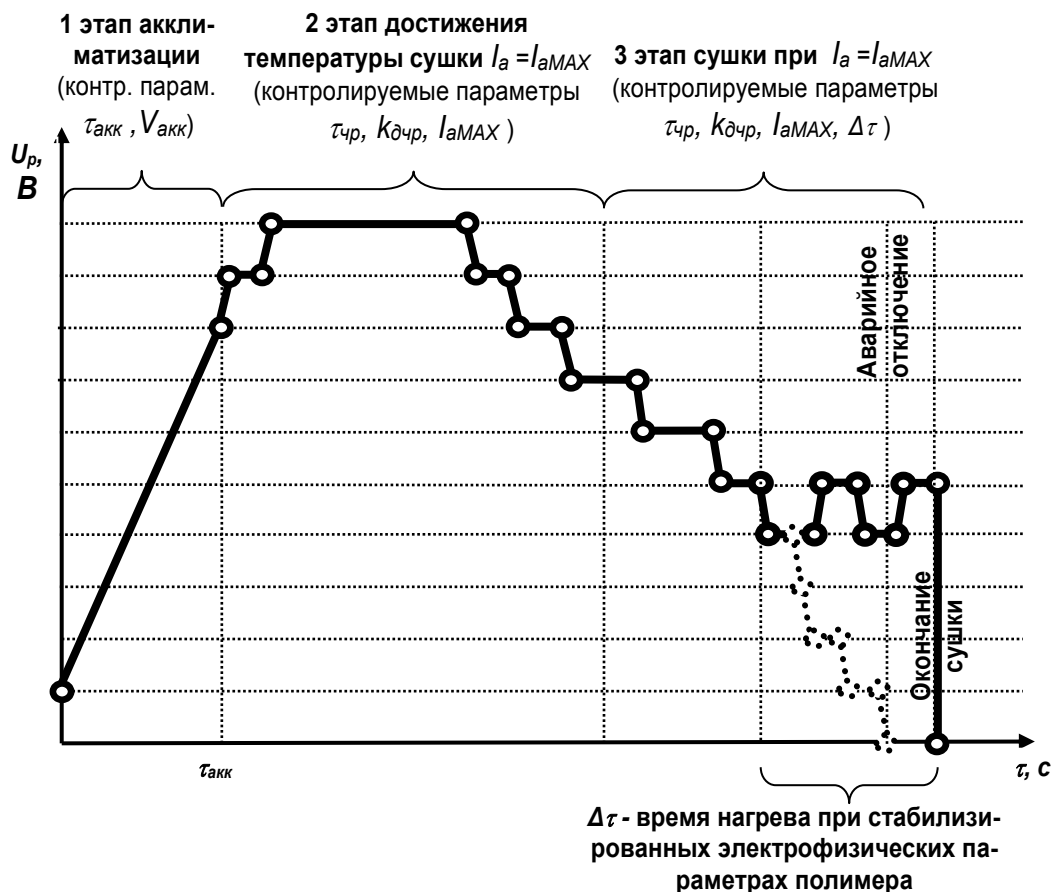


Рис. 3. Циклограмма процесса управления электротермической сушкой
Fig. 3. Cyclogram of the control process of electro-thermal drying

Сушка:

1–5 – этапы процесса сушки – соответствуют процессу электротермической сварки.

6 – при мощности воздействия $P \approx \text{const}$, контролировать фазовое состояние, отслеживая динамику изменения анодного тока. Итак, при уменьшении анодного тока необходимо снижать мощность электротермического нагрева. При увеличении анодного тока и переходе его через максимальное (экстремальное) значение, увеличивать мощность с переходом к этапу.

5 – при стабилизации значений анодного тока в первом максимуме (в пределах 3%, что говорит об отсутствии влаги) завершить электротермическую обработку. Контролируемые параметры – скорость изменения анодного тока $dI_a/d\tau$, интенсивность возникновения частичных разрядов $\tau_{чр}$, время нагрева полимера при стабилизированных электрофизических параметрах полимера $\Delta\tau$.

Циклограмма процесса управления электротермической сушкой полимеров имеет вид, представленный на рис. 3.

Энергоэффективность и производительность технологических процессов высокочастотной электротермии

При построении алгоритмов управления частными технологическими процессами вышеуказанные этапы необходимо реализовывать исходя из условия обеспечения энергоэффективности технологического

процесса и принципа их универсальности. Алгоритмы работы АСУ ТП должны быть применимы к любому типу технологического оборудования, широкой номенклатуре обрабатываемых полярных полимеров.



Длительность технологического процесса при сварке, сушке не является величиной постоянной для каждого материала, может изменяться, например, в зависимости от качества поверхностного слоя обрабатываемого образца (при так называемой «акклиматизации» полимерного образца) и напряжения в момент возникновения и развития предпробойного состояния.

Необходимо отметить, что процессы высокочастотного электротермического нагрева обладают свойством безинерционности нагрева, важнейшим свойством с точки зрения обеспечения их энергоэффективности, в соответствии с которым при выключении оборудования прекращается и функционирование «внутреннего источника тепла».

Минимизацию энергопотребления в процессе обработки возможно обеспечить следующими путями: минимизировать энергопотери самого технологического оборудования и уменьшить тепловые потери, происходящие при контакте с окружающей средой, термоизолирующими прокладками и металлическими электродами.

Минимизация энергопотерь при эксплуатации оборудования достигается организацией его работы на номинальных (максимальных) режимах работы. Для этого необходимо, во-первых, обеспечить быстрый выход установки на максимальный мощный режим с учетом опасности развития электрического пробоя; во-вторых, обеспечить минимально возможное расстояние между электродами (обкладками конденсатора) при помощи конструирования специализированной оснастки, обеспечения оптимальной толщины термоизоляторов.

Энергопотери при нагреве полимера за счет существующего контакта с окружающей средой уменьшаются сокращением времени обработки. Данный факт хорошо согласуется с организацией функционирования оборудования на максимальных режимах.

Уменьшение энергопотерь при нагреве полимерных образцов за счет теплопередачи при их контакте с поверхно-

стями металлических электродов или термоизоляторов достигается заменой схемы классической обработки с одним термоизолятором на обработку уже с двумя термоизоляторами [11, 12]. Здесь необходимо отметить, что благодаря значительным глубинам проникновения высокочастотных электромагнитных волн и малому уровню диэлектрических потерь термоизолирующего картона энергопотерями на диэлектрический нагрев картона можно пренебречь.

Дополнительно можно отметить, что использованием технологической схемы с двумя термоизоляторами и минимизация, таким образом, энергопотерь целесообразны при построении алгоритмов управления процессами сушки. Однако для обеспечения качества сварного соединения различных по толщине деталей (либо сушке) существенно несимметричных изделий целесообразно для решения задачи смещения и локализации зоны максимального нагрева (зона расплава) вернуться к обработке с одним термоизолятором и повышенными энергопотерями на контактный разогрев электрода.

Для подтверждения выбранной стратегии повышения энергоэффективности электротермической обработки полимеров на примере ВЧ обработки полихлорвинила (ПВХ), был исследован вопрос энергопотребления процесса с использованием аппаратной и программной частей автоматизированной системы научных исследований высокочастотной обработки [3, 6, 13], созданной авторами.

Зависимости времени разогрева полимерных образцов до начала плавления от мощности P_H диэлектрических потерь при различных значениях напряжения рабочего конденсатора U_p , характеризующих степень энергетического воздействия, представлена на рис. 4. Легко заметить, что графики показывают резкое уменьшение времени разогрева образцов до состояния плавления при работе в области максимального энергетического воздействия, что соответствует принятой стратегии минимизации энергопотребления. При этом энергопотребление требует дополнительных исследований.

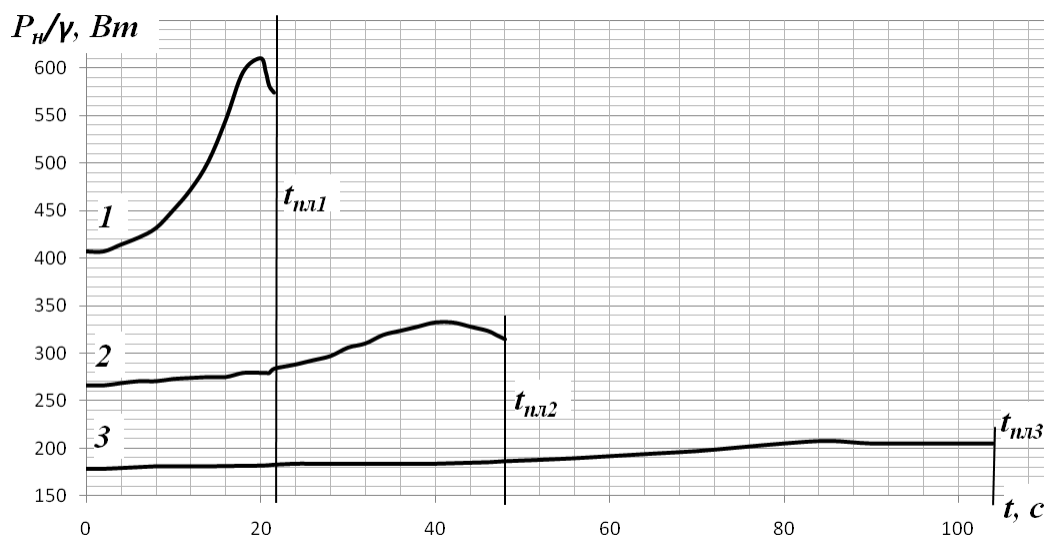


Рис. 4. Зависимость времени разогрева t образца ПВХ (36x36x4 мм) до состояния плавления от мощности диэлектрических потерь P_n при различных значениях напряжения рабочего конденсатора U_p : 1 – $U_p = 4000$ В, 2 – $U_p = 2460$ В, 3 – $U_p = 1510$ В

Fig. 4. Dependence of the PVC sample (36x36x4 mm) heating time t to the melting state on the power of dielectric losses P_n at various values of the operating capacitor voltage U_p : 1– $U_p = 4000$ V, 2– $U_p = 2460$ V, 3– $U_p = 1510$ V

Проведем оценку энергетических затрат выполненного нагрева образцов ПВХ с использованием зависимости 1. На рис. 5

представлены результаты интегрирования. Рис. 6 позволяет оценить время достижения

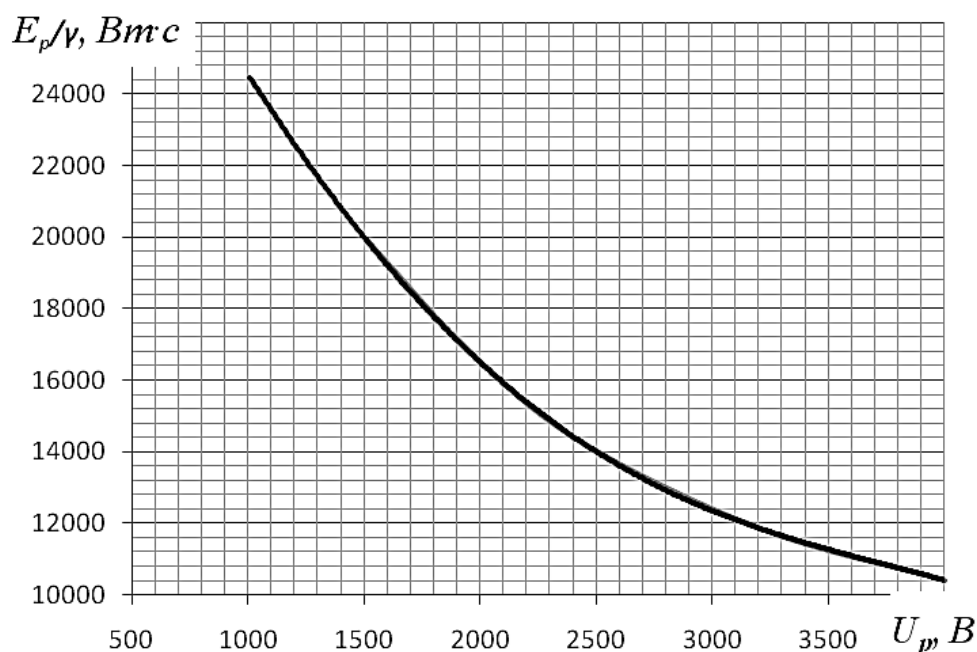


Рис. 5. Зависимость энергии диэлектрического нагрева, необходимой для нагрева ПВХ до температуры плавления (образцы ПВХ 36x36x4 мм), от напряжения на рабочем конденсаторе U_p

Fig. 5. Dependence of the dielectric heating energy required for PVC heating to the melting point (PVC samples of 36x36x4 mm) on the operating capacitor voltage U_p

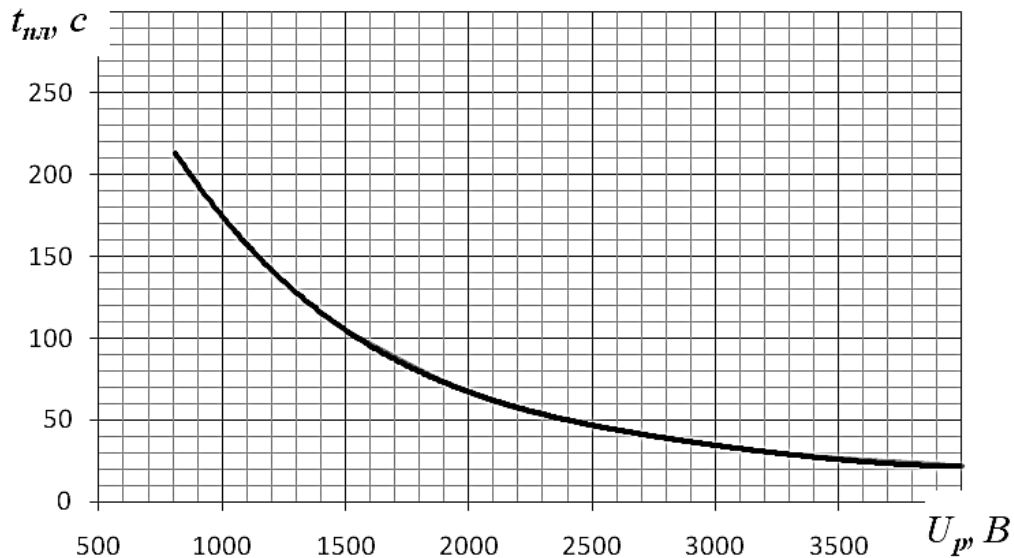


Рис. 6. Зависимость времени t достижения температуры плавления образцов ПВХ (36x36x4 мм) от напряжения на рабочем конденсаторе U_p
Fig. 6. Dependence of the time t of reaching the melting temperature of PVC samples (36x36x4 mm) on the operating capacitor voltage

состояния плавления при различных напряжениях U_p

$$E_p = \int_0^{t_{н.з}} P_n dt. \quad (1)$$

Анализ опыта использования высокочастотного оборудования в полиграфической промышленности показывает, что при ручном регулировании режимов высокочастотной электротермии (без использования АСУ ТП) оператор работает с энергетическим воздействием на полимер ниже среднего уровня паспортных значений U_p ВЧ-оборудования. Основным критерием эффективности обработки в этом случае является сохранение работоспособности

оснастки и уменьшение процента брака по причине возникновения электрического пробоя. Но при этом экспериментальные данные показывают, что (на примере обработки ПВХ) 10% увеличение U_p от средних значений дает ~15–17% сокращения времени обработки и ~5–10% уменьшения энергопотребления процесса обработки. Экспериментальные данные показывают, что переход к обработке в области максимально возможных U_p при обеспечении защиты процесса от пробойных явлений дает возможность достичь экономии 30–40% энергетических затрат и порядка 70% экономии во времени обработки. Конечно, это возможно только при решении задач автоматизации управления процессом электротермии.

Заключение

Представленные в данной статье принципы организации управления процессами высокочастотного нагрева полимеров являются универсальными, значительно расширяющими перечень производств, где возможно эффективное применение электротермии [1, 13, 14]. Использование авто-

матизированного управления процессами обеспечивает возможность работать с максимальным энергетическим воздействием на материал. Использование переменного количества теплоизоляторов в составе технологической системы позволяет управлять локализацией.



Библиографический список

1. Филиппенко Н.Г., Буторин Д.В., Каргапольцев С.К., Лившиц А.В. Физико-технические процессы в технологических операциях термической, механической, высокочастотной и ультразвуковой обработки полимерных и композитных конструкционных материалов. Иркутск: Изд-во Иркутского государственного университета путей сообщения. 2017. 254 с.
2. Лившиц А.В. Управление технологическими процессами высокочастотной электротермии полимеров // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2015. № 3. С. 120–126.
3. Livshits A.V., Filippenko N.G., Homenko A.P., Kargapoltsev S.K., Gozbenko V.E., Dambaev Z.G. Mathematical modeling of the processes of the high-frequency heating of thermoplasts and quality improvement of welded polymeric items. JP Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. Pushpa Publishing House, Allahabad, India <http://www.pphmj.com> <http://dx.doi.org/10.17654/HM014020219>. 2017. Vol. 14. No. 2. P. 219–226.
4. Филиппенко Н.Г., Буторин Д.В., Лившиц А.В. Определение фазовых и релаксационных переходов в полимерных материалах // Автоматизация. Современные технологии. 2017. Т. 71. № 4. С. 171–175.
5. Буторин Д.В., Лившиц А.В., Филиппенко Н.Г. Комплексированный метод автоматизированного высокочастотного контроля фазовых превращений в полимерных материалах // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2016. № 10. С. 10–18.
6. Лившиц А.В. Автоматизированная система научных исследований высокочастотной электротермии // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2015. № 4. С. 54–60.
7. Popov M.S., Livshits A.V., Filippenko N.G., Popov S.I., Popov A.S. The Automated Experimental Study of the Combined Treatment of Polymeric Materials. Proceedings of the 6th International Symposium on Innovation and Sustainability of Modern Railway, ISMR 2018. Irkutsk: Irkutsk state University of railway engineering Publ., 2018. P. 496–500.
8. Филиппенко Н.Г., Буторин Д.В., Лившиц А.В., Попов М.С., Гозбенко В.Е. Автоматизация измерения температуры полимерного материала при высокочастотном электротермическом нагреве // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 1 (53). С. 96–103.
9. Буторин Д.В., Лившиц А.В., Филиппенко Н.Г. Автоматизация процесса контроля фазовых и релаксационных превращений в полимерных материалах // Информационные системы и технологии. 2017. № 1 (99). С. 44–53.
10. Буторин Д.В., Филиппенко Н.Г., Филатова С.Н., Каргапольцев С.К. Автоматизация контроля структурных превращений в полимерных материалах при электротермической обработке // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 1 (49). С. 117–125.
11. Лившиц А.В. Несимметричные термоизоляторы при высокочастотной электротермии полимеров // Наука и образование. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 5 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://technomagelpub.elpub.ru/jour/article/view/592/594> (25.06.2018)
12. Лившиц А.В. Влияние термоизоляторов на нагрев полимеров при высокочастотной электротермии // Инженерный вестник Дона. 2014. № 2 (29). С. 21.
13. Butorin D.V., Bychkovsky V.S., Filippenko N.G., Livshits A.V., Kargapoltsev S.K. Investigations of Mechanical, Physical and Technical Processes in Oil-filling of products Made of Polymeric and Composite Materials. Proceedings of the 6th International Symposium on Innovation and Sustainability of Modern Railway, ISMR 2018. Irkutsk: Irkutsk state University of railway engineering Publ., 2018. P. 447–452.
14. Bychkovsky V.S., Filippenko N.G., Popov S.I., Livshits A.V., Kargapoltsev S.K. The Creation of Self-lubricating Polymeric Materials for the Products with Friction Units in Machinery Production Equipment. Proceedings of the 6th International Symposium on Innovation and Sustainability of Modern Railway, ISMR 2018. Irkutsk: Irkutsk state University of railway engineering Publ., 2018. P. 506–511.

References

1. Butorin D.V., Kargapoltsev S.K., Livshic A.V. *Fiziko-tekhnicheskie processy v tekhnologicheskikh operatsiyah termicheskoy, mekhanicheskoy, vysokochastotnoj i ultrazvukovoy obrabotki polimernykh i kompozitnykh konstruktsionnykh materialov* [Physical and technical processes in technological operations of thermal, mechanical, high-frequency and ultrasonic treatment of polymeric and composite structural materials]. Irkutsk: Irkutsk state University of railway engineering Publ., 2017. 256 p.
2. Livshic A.V. Management of technological processes of high-frequency electrothermy of polymers. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii* [Engineering and Automation Problems]. Moscow: NIAT Publ., 2015, no. 3, pp. 120–126.
3. Livshits A.V., Filippenko N.G., Homenko A.P., Kargapoltsev S.K., Gozbenko V.E., Dambaev Z.G. Mathematical modeling of the processes of the high-frequency heating of thermoplasts and quality improvement of welded polymeric items. JP Journal of Heat and Mass Transfer © 2017 Pushpa Publishing House, Allahabad, India <http://www.pphmj.com> <http://dx.doi.org/10.17654/HM014020219>. 2017. Vol. 14. No. 2. P. 219–226.
4. Filippenko N.G., Butorin D.V., Livshic A.V. Determination of phase and relaxation transitions in polymer materials. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii* [Automation. Modern technology], 2017, vol. 71, no. 4, pp. 171–175. (In Russian)



5. Butorin D.V., Livshic A.V., Filippenko N.G. Complex method of automated high-frequency control of phase transformations in polymeric materials. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Instruments and Systems. Monitoring, Control and Diagnostics], 2016, no. 10, pp. 10–18. (In Russian)
6. Livshic A.V. The automated system of scientific researches of high-frequency electrothermy. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizacii* [Engineering and Automation Problems], 2015, no. 4, pp. 54–60. (In Russian)
7. Popov, M.S., Livshits A.V., Filippenko N.G., Popov S.I., Popov A.S. The Automated Experimental Study of the Combined Treatment of Polymeric Materials. Proceedings of the 6th International Symposium on Innovation and Sustainability of Modern Railway, ISMR 2018. Irkutsk: Irkutsk state University of railway engineering Publ., 2018, pp. 496–500. (In Russian)
8. Filippenko N.G., Butorin D.V., Livshic A.V., Popov M.S., Gozbenko V.E. Way of direct measurement of temperature of polymeric material at high-frequency electrothermal heating. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2017, no. 1 (53), pp. 96–103. (In Russian)
9. Butorin D.V., Livshic A.V., Filippenko N.G. Automation process control of phase and relaxation transformations in polymer materials. *Informacionnye sistemy i tekhnologii* [Information Systems and Technologies], 2017, no. 1 (99), pp. 44–53. (In Russian)
10. Butorin D.V., Filippenko N.G., Filatova S.N., Kar-

- gapoltcev S.K. Automation of control of structural transformation in polymeric materials at heat treatment. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2016, no. 1 (49), pp. 117–125. (In Russian)
11. Livshic A.V. Unbalanced heat isolation in high-frequency electrothermics of polymers. *Nauka i obrazovanie* [Science and Education], 2014, no. 5. URL: <http://technomagelpub.elpub.ru/jour/article/view/592/594> (25 June 2018).
12. Livshic A.V. Effect of heat insulation on the heating of polymers in high-frequency electrothermy. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2014, no. 2.
13. Butorin, D.V., Bychkovsky V.S., Filippenko N.G., Livshits A.V., Kargapoltcev S.K. Investigations of Mechanical, Physical and Technical Processes in Oil-filling of products Made of Polimeric and Composite Materials. Proceedings of the 6th International Symposium on Innovation and Sustainability of Modern Railway, ISMR 2018. Irkutsk: Irkutsk state University of railway engineering Publ., 2018, pp 447–452. (In Russian)
14. Bychkovsky, V.S., Filippenko N.G., Popov S.I., Livshits A.V., Kargapoltsev S.K. The Creation of Self-lubricating Polymeric Materials for the Products with Friction Units in Machinery Production Equipment. Proceedings of the 6th International Symposium on Innovation and Sustainability of Modern Railway, ISMR 2018. Irkutsk: Irkutsk state University of railway engineering Publ., 2018, pp 506–511. (In Russian)

Критерии авторства

Лившиц А.В., Каргапольцев С.К., Филиппенко Н.Г., Буторин Д.В. совместно подготовили статью и несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Livshits A.V., Kargapoltsev S.K., Filippenko N.G., Butorin D.V. jointly prepared the article for publication and bear the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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



РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ

© Б.Я. Мокрицкий¹, А.Г. Серебренникова²

Комсомольский-на-Амуре государственный университет,
681013, Российская Федерация, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27.

РЕЗЮМЕ: В данной работе проведено изучение влияния инструментального материала на износостойкость отечественного твердосплавного металлорежущего инструмента при обработке нержавеющей стали. Приведены некоторые результаты сравнительного исследования разных инструментальных материалов при одинаковых условиях эксплуатации для того, чтобы выявить наиболее предпочтительные из них. Целью работы является выявление наиболее рациональных инструментальных материалов для заданных условий эксплуатации инструмента и накопление базы данных для разработки рекомендаций. Рассмотрено наружное точение проходными резцами с механическим креплением режущих пластин. Пластины четырехгранные квадратные (диаметр описанной окружности 17,5 мм) с центральным крепежным отверстием и без него, со стружечной канавкой и без таковой. Диаметр заготовки изменялся в процессе обработки от 280 до 60 мм. Скорость резания поддерживали в пределах 50–55 м/мин за счет варьирования числа оборотов шпинделя. Использовали токарно-винторезный станок модели 16К25. Подача резца из требований шероховатости обрабатываемой поверхности выбрана равной 0,21 мм/об. заготовки. Глубину резания принимали равной 0,5 мм для условий чистовой обработки и 1 мм – для условий черновой обработки. В том и другом случаях предельно допустимой величиной износа по задней грани считали 0,5 мм. Сопоставляли режущий инструмент по периоду износостойкости, т.е. по времени работы режущих пластин при должной шероховатости до достижения износа 0,5 мм по задней грани. Для измерения достигнутой величины износа обработку прерывали через каждые 15 мин. Измерение износа осуществляли на мультисенсорном измерительном центре (видеоизмерительной машине) модели Micro Vu Sol 161. Результаты испытаний дублировали и документировали. В результате выполненных исследований показано, что: инструментальные материалы существенно различаются по износостойкости; применение покрытий на отечественном твердом сплаве марки ВК8 заметно повышает работоспособность режущих пластин; технологический прием доработки режущих кромок со стороны передней и задней поверхностей тоже существенно повышает работоспособность инструмента. Для объяснения выявленных результатов и закономерностей был произведен контроль силы резания по всем трем ее составляющим. Анализ результатов записи составляющих сил резания показал, что их величина и соотношение между собой существенно зависят от используемого инструментального материала и обрабатываемого материала. Установлено, что роль покрытия в повышении работоспособности инструмента существенно зависит от условий эксплуатации, в том числе от глубины резания. Покрытие, являвшееся наиболее эффективным (из рассматриваемых) при глубине резания 0,5 мм, может не оказаться таковым при глубине резания 1,5 мм и уступить первенство тому покрытию, которое было вторым или третьим по эффективности при глубине 0,5 мм. В результате проведенных экспериментальных исследований выделены инструментальные материалы, наиболее рациональные по периоду износостойкости для нержавеющей стали марки 09Х17Н7Ю. Среди них выявлены рациональные отечественные и импортные инструментальные материалы. Сравнимые инструментальные материалы существенно (в два и более раз) неравноценны по периоду износостойкости. Исследовано, что рекомендуемые каталогами справочные данные по параметрам режима резания и ожидаемому периоду износостойкости для импортных инструментальных материалов не подтверждаются. Установлено, что для данной марки нержавеющей стали рекомендации по выбору отечественного инструментального материала и параметрам режима резания либо отсутствуют, либо устарели. Выявлены технологические приемы упрочнения отечественных инструментальных материалов, позволяющих повысить их работоспособность не хуже, чем покрытия. Из числа исследованных инструментальных материалов найдены наиболее рациональные для заданных условий эксплуатации при чистовой и черновой обработке. Их

¹Мокрицкий Борис Яковлевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии машиностроения, e-mail: boris@knastu.ru

Boris Ya. Mokritskiy, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Technology of Mechanical Engineering, e-mail boris@knastu.ru

²Серебренникова Анжела Геннадьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения, e-mail: anzhela03121967@ya.ru

Anzhela G. Serebrennikova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Technology of Mechanical Engineering, e-mail anzhela03121967@ya.ru



применение позволяет вести обработку без смены режущей кромки или пластины в течение часа и более, что делает их применимыми для современного металлорежущего высокопроизводительного оборудования с числовым программным управлением и в структуре автоматизированных комплексов.

Ключевые слова: износостойкость резцов, покрытия на твердосплавном инструменте, силы резания

Информация о статье: Дата поступления 01 октября 2018 г.; дата принятия к печати 23 ноября 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2018 г.

Для цитирования: Мокрицкий Б.Я., Серебренникова А.Г. Результаты сравнительного исследования работоспособности режущих инструментов при обработке специализированных нержавеющей сталей. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(12):96–103. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-96-103

RESULTS OF COMPARATIVE STUDY OF CUTTING TOOL PERFORMANCE WHEN MACHINING SPECIALIZED STAINLESS STEELS

Boris Ya. Mokritskiy, Anzhela G. Serebrennikova

Komsomolsk-on-Amur State University,
27, Lenin St., Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russian Federation

ABSTRACT: The paper studies the effect of the tool material on the wear resistance of domestic carbide cutting tools when processing stainless steels. It provides some results of the comparative study of various tool materials operating in similar conditions in order to identify the most efficient ones. The purpose of the work is to identify the most rational tool materials for the given operating conditions of a tool and accumulate a database for recommendation development. The consideration is given to external turning by straight turning tools with mechanically fastened cutting plates. The plates are square and quadrangular (the diameter of the circumscribed circle is 17.5 mm) with and without a central mounting hole, with and without a chip groove. During processing the workpiece diameter has changed from 280 to 60 mm. The cutting speed has been maintained within 50–55 m/min by spindle speed variation. The screw-cutting lathe of model 16K25 is used. The cutter feed is chosen to equal 0.21 mm/rev. of a workpiece based on the surface roughness requirements. The cutting depth is assumed to be 0.5 mm for finishing conditions and 1mm for rough machining conditions. In either case, 0.5 mm is considered the maximum allowable value of wear on the rear face. The cutting tools were compared by their wear resistance period, i.e. according to the operation time of the cutting plates with the proper roughness until the wear of 0.5mm is achieved on the rear face. Machining was interrupted every 15 minutes to measure the amount of wear reached. The wear was measured using a multisensor measuring center (video measuring machine) of Micro Vu Sol 161 model. The test results were duplicated and documented. The conducted study has shown that: wear resistance of tool materials varies significantly; the use of coatings on domestic hard alloy of VK8 grade significantly increases the performance of the cutting plates; the technological method of cutting edge finishing from the front and rear surfaces also significantly increases the working capacity of a tool. To explain the identified results and patterns all three components of the cutting force have been monitored. The analysis of the recording results of cutting force components has shown that their magnitude and correlation significantly depends on the tool material used and material being processed. It has been determined that the role of coating in improving tool performance significantly depends on the operating conditions including the cutting depth. The coating, which showed itself as the most effective (among those considered) at the cutting depth of 0.5 mm, may not be effective at the cutting depth of 1.5 mm and yields to the coating that was second efficient or even third at the depth of 0.5 mm. The conducted experimental studies have allowed to identify the tool materials, whose wear resistance period is the most rational for the stainless steel 09X17H7Yu. These materials include both rational domestic and imported tool materials. Compared tool materials are significantly (two or more times) unequal by the period of their wear resistance. It has been found out that the recommended by the catalogs reference data on cutting mode parameters and an expected durability period for imported tool materials are not confirmed. It has been found out that the recommendations for the choice of domestic tool material and cutting mode parameters are either absent or outdated for this grade of stainless steel. Some technological methods of hardening domestic tool materials that allow to improve tool material performance as good as coating have been revealed. Having studied a number of tool materials, we have identified the most rational for the given operating conditions under finishing and rough machining. Their use allows to carry out machining without changing the cutting edge or plate for an hour or more, which makes them applicable to modern metal cutting high-performance equipment with numerical control and in the structure of automated complexes.

Keywords: cutter wear resistance, carbide tool coating, cutting forces

Information about the article: Received October 01, 2018; accepted for publication November 23, 2018; available online December 28, 2018.



For citation: Mokritskiy B.Ya., Serebrennikova A.G. Results of comparative study of cutting tool performance when machining specialized stainless steels. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018; 22(12):pp. 96–103. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-96-103

Введение

Потребность в изделиях, выполненных из специализированных нержавеющей сталей, постоянно растет. Однако рекомендации по применению металлорежущего инструмента при обработке таких деталей либо устарели для современного оборудования, либо отсутствуют. Более того, имеющиеся рекомендации ориентированы только на импортный металлорежущий инструмент, сведений по отечественному инструменту нет по разным причинам. Применение такого импортного инструмента создает угрозу импортной зависимости. Стоимость такого инструмента высока из-за эксклюзивности применяемых инструментальных материалов (как субстрата, так и покрытия), состав, структура и технология получения такого материала, как правило, засекречены, конструкция режущей части и стружкодробящей части очень сложны.

Далее приведены некоторые результаты сравнительного исследования разных инструментальных материалов при одинаковых условиях эксплуатации для того, чтобы выявить наиболее предпочтительные из них.

Целью работы является выявление наиболее рациональных инструментальных материалов для заданных условий эксплуатации инструмента и накопление базы данных для разработки рекомендаций.

Рассмотрено наружное точение про-

ходными резцами с механическим креплением режущих пластин. Пластины четырехгранные квадратные (диаметр описанной окружности 17,5 мм) с центральным крепежным отверстием и без него, со стружечной канавкой и без таковой. Диаметр заготовки, выполненной из специализированной нержавеющей стали марки 09X17H7Ю, изменялся в процессе обработки от 280 до 60 мм. Скорость резания поддерживали в пределах 50–55 м/мин за счет варьирования числа оборотов шпинделя. Использовали токарно-винторезный станок модели 16K25. Подача резца из требований шероховатости обрабатываемой поверхности выбрана равной 0,21 мм/об. заготовки. Глубину резания принимали равной 0,5 мм для условий чистовой обработки и 1 мм – для условий черновой обработки. В том и другом случаях предельно допустимой величиной износа по задней грани считали 0,5 мм. Сопоставляли режущий инструмент по периоду износоустойчивости, т.е. по времени работы режущих пластин при должной шероховатости до достижения износа 0,5 мм по задней грани. Для измерения достигнутой величины износа обработку прерывали через каждые 15 мин. Измерение износа осуществляли на мультисенсорном измерительном центре (видеоизмерительной машине) модели Micro Vu Sol 161. Результаты испытаний дублировали и документировали.

Результаты исследования

На рис. 1 приведена экспериментальная зависимость величины износа h_z от времени t работы базового твердосплавного инструмента, а именно – марки ВК8. Подобные графики получены для различных инструментальных материалов. Результаты сравнения некоторых из них между собой иллюстрированы на рис. 2. Здесь приведены очень ограниченные сведения об

упрочнении базового варианта инструмента.

Результаты испытаний следующие:

– покрытие № 1 – это Ti (до 1 мкм) + TiN (1 мкм) + (NbZrTiAl) N (2,5 мкм) (нанесение слоев покрытия методом конденсации ионной бомбардировкой (КИБ) с фильтрацией капельной фазы и при ассистировании ускоренными ионами);

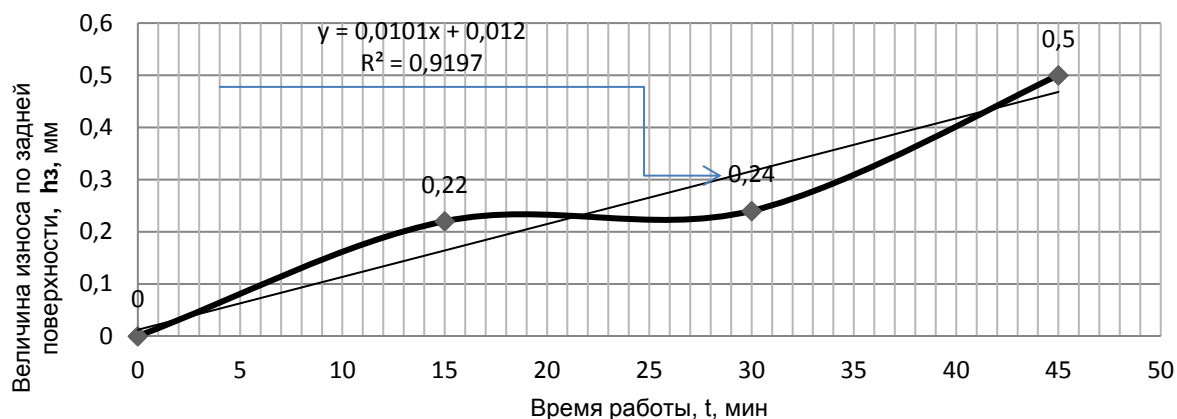


Рис. 1. Пример зависимости величины износа h_3 от времени t работы твердосплавного (марка ВК8) инструмента (режим резания $v = 55$ м/мин, $n = 160$ об/мин, $s = 0.21$ мм/об, $t = 1$ мм)
Fig. 1. An example of dependence of the wear magnitude h_3 on the cutting time t of a carbide tool (of VK8 grade) in the cutting mode $v = 55$ m/min, $n = 160$ rpm, $s = 0.21$ mm/rev, $t = 1$ mm)

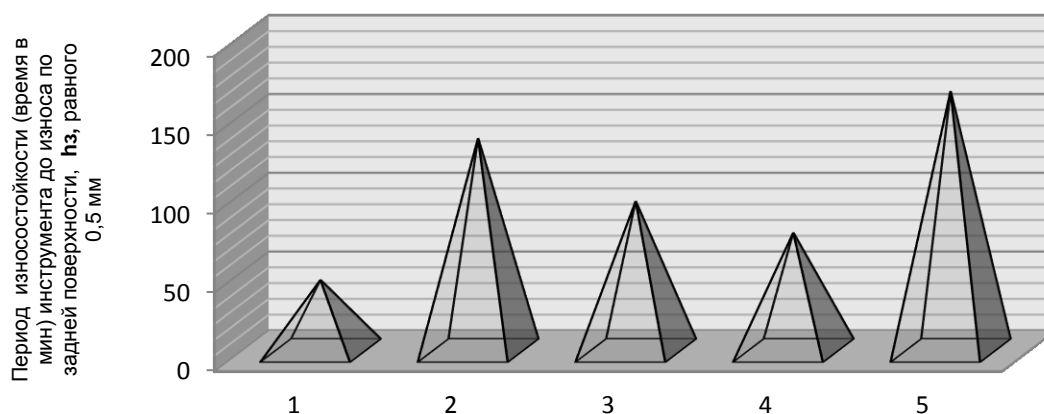


Рис. 2. Пример сравнения периода износостойкости различных инструментальных материалов: 1 – ВК8; 2 – ВК8 + покрытие № 1; 3 – ВК8 + покрытие № 2; 4 – ВК8 + покрытие № 3; 5 – ВК8 + подвергнут алмазной термозаточке [4] по передней поверхности + полированию по задней поверхности пластины

Fig. 2. An example of comparing wear resistance periods of various tool materials: 1 – VK8; 2 – VK8 + coating no. 1; 3 – VK8 + coating no. 2; 4 – VK8 + coating no. 3; 5 – VK8 subjected to diamond thermo-grinding [4] on the front surface + polished on the back surface of the plate

– покрытие № 2 – это Ti (до 1мкм) + TiN (1мкм) + (TiAl) N (2 мкм) + TiN (0,5 мкм) (нанесение слоев покрытия методом КИБ с фильтрацией капельной фазы и при ассистировании ускоренными ионами);

– покрытие № 3 – это (AlCr)N(1,5 мкм) + (AlTi)N(2мкм)) (нанесение слоев покрытия методом КИБ с фильтрацией капельной фазы без ассистирования ускоренными ионами).

Отдельные сведения по технологии нанесения покрытий даны в работах [1, 2]. Примеры применения инструментальных материалов частично показаны в работе [3].

Из приведенных данных следует,

что:

– инструментальные материалы существенно неравноценны по износостойкости;

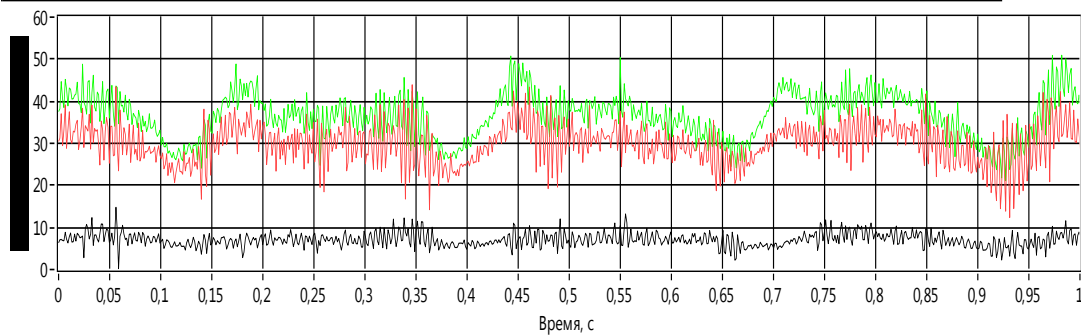
– применение покрытий на отечественном твердом сплаве марки ВК8 заметно повышает работоспособность режущих пластин;

– технологический прием [4] доработки режущих кромок со стороны передней и задней поверхностей тоже существенно повышает работоспособность инструмента.

Для объяснения выявленных результатов и закономерностей был произведен контроль силы резания по всем трем ее со-

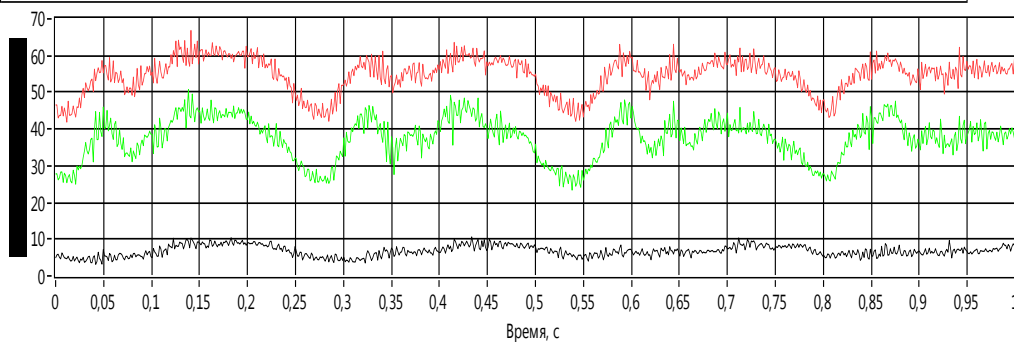


Нагрузка по осям



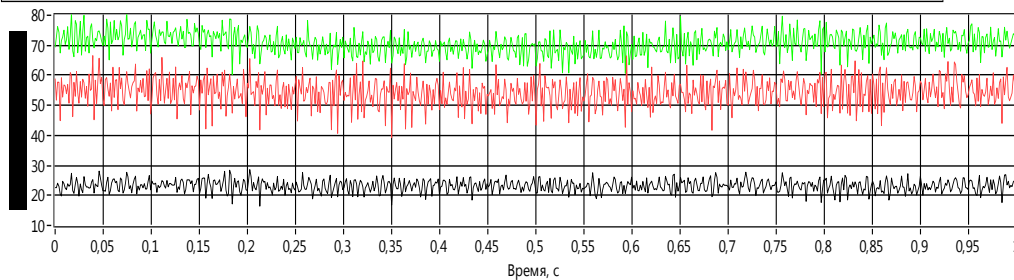
a

Нагрузка по осям



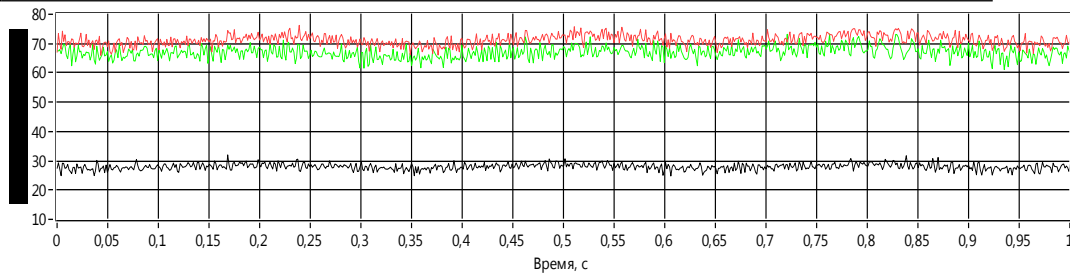
b

Нагрузка по осям



c

Нагрузка по осям



d

Рис. 3. Примеры записи составляющих силы резания в разных условиях обработки (черный цвет – продольная составляющая силы резания; зеленый – радиальная составляющая; красный – вертикальная составляющая, величины сил специально показаны в кгс): а – инструментальный материал VK8 + покрытие № 3, обрабатываемый материал 12Х18Н10; б – инструментальный материал VK8, обрабатываемый материал 12Х18Н10; в – инструментальный материал VK8 + покрытие № 3, обрабатываемый материал, 09Х17Н7Ю; д – инструментальный материал VK8, обрабатываемый материал 09Х17Н7Ю

Fig. 3. Examples of cutting force components recording at different machining conditions (black colour – longitudinal component of the cutting force; green colour – radial component, red colour – vertical component, the magnitudes of the forces are given in kgF) a – tool material VK8 + coating no. 3, processed material 12H18N10; b – tool material VK8, processed material 12H18N10; c – tool material VK8 + coating no.3, processed material 09H17N7YU; d – tool material VK8, processed material 09H17N7YU



ставляющим. Примеры записи составляющих силы резания приведены на рис. 3. По вертикальной оси графиков, приведенных на рис. 3, умышленно приведена динамическая нагрузка в кгс (килограмм-сила) для того, чтобы более четко (чем в ньютонах) показать различие в величинах, составляющих силы резания. Для сравнения величин сил резания на рис. 3 приведены данные для двух разных специализированных нержавеющей сталей, а именно: марки 09X17H7Ю и марки 12X18H10.

Анализ результатов записи составляющих сил резания показал, что их величина и соотношение между собой существенно зависит от используемого инструментального материала и обрабатываемого материала.

Установлено, что роль покрытия в

повышении работоспособности инструмента существенно зависит от условий эксплуатации, в том числе от глубины резания. Покрытие, являвшееся наиболее эффективным (из рассматриваемых) при глубине резания 0,5 мм, может не оказаться таковым при глубине резания 1,5 мм и уступить первенство тому покрытию, которое было вторым или третьим по эффективности при глубине 0,5 мм. Это не противоречит имеющимся представлениям³ [5–7], но на этой специализированной стали проявляется наиболее ярко.

Попутно можно отметить, что это типично не только для точения стали, но и при фрезеровании концевыми фрезами [8–11]. Для концевых фрез это влияние покрытий оценено моделированием, в том числе с помощью программного продукта ANSYS [12, 13].

Заключение

1. В результате проведенных экспериментальных исследований выявлены инструментальные материалы, наиболее рациональные по периоду износостойкости для нержавеющей стали марки 09X17H7Ю. Среди них выявлены рациональные отечественные и импортные инструментальные материалы. Сравнимые инструментальные материалы существенно (в два и более раза) неравноценны по периоду износостойкости.

2. Выявлено, что рекомендуемые каталогами справочные данные по параметрам режима резания и ожидаемому периоду износостойкости для импортных инструментальных материалов не подтверждаются.

3. Установлено, что для данной марки нержавеющей стали рекомендации по выбору отечественного инструменталь-

ного материала и параметрам режима резания либо отсутствуют, либо устарели.

4. Выявлены технологические приемы упрочнения отечественных инструментальных материалов, позволяющих повысить их работоспособность не хуже, чем покрытия.

5. Из числа исследованных инструментальных материалов выявлены наиболее рациональные для заданных условий эксплуатации при чистовой и черновой обработке. Их применение позволяет вести обработку без смены режущей кромки или пластины в течение часа и более, что делает их применимыми для современного металлорежущего высокопроизводительного оборудования с числовым программным управлением и в структуре автоматизированных комплексов.

Библиографический список

1. Верещака А.С., Верещака А.А. Повышение эффективности инструмента путем управления составом,

структурой и свойствами покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 9. С. 9–18.

³Шарипов О.А. Повышение эффективности и обеспечение надежности резания инструментом из твердого сплава с износостойким покрытием: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. М.: МГТУ «Станкин», 1992. 198 с. / Sharipov O.A. Improving efficiency and ensuring cutting reliability of a carbide tool with a wear-resistant coating: Candidate's Dissertation in technical sciences: 05.03.01. M.: MSTU "Stankin", 1992. 198 p.



2. Vereshchaka A., Lee W.Y. High Precision // High Speed Machining Technologies. Edition of HRDI, S. Korea, Cheonan. 2002. 393 p.
3. Мокрицкий Б.Я., Верещака А.А., Белых С.В., Мокрицкая Е.Б. Упрочнение сложносоставными покрытиями режущих пластин для обработки коррозионно-стойкой стали 09X17H7Ю // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. № 5. С. 3–5.
4. Мокрицкий Б.Я. Повышение работоспособности металлорежущего инструмента путем управления свойствами инструментального материала. Владивосток: Изд-во Дальнаука, 2010. 232 с.
5. Vereshchaka A., Lee W.Y. High Precision // High Speed Machining Technologies. Edition of HRDI, S. Korea, Cheonan, 2002. 393 p.
6. Scherbarth S. Moderne Scheidstoffe und Werkzeuge-Wege zur gesteigerten Produktivität. Sandvik Dusseldorf. Werkzeugtagung, 2002.
7. Cselle T. Nanostrukturierte Schichten in der Werkstoff. Platit AG. Werkzeugtagung 2002.
8. Мокрицкий Б.Я., Саблин П.А., Верещака А.А. Инструментальное обеспечение современных машиностроительных производств. Комсомольск-на-Амуре: Изд-во Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, 2017. 200 с.
9. Ситамов Э.С., Мокрицкий Б.Я. Результаты сравнительного исследования износостойкости твердосплавного инструмента при обработке нержавеющей стали // Металлообработка. 2018. № 4 (106). С. 7–13.
10. Табаков В.П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента. М.: Машиностроение, 2008. 312 с.
11. Верещака А.С., Григорьев С.Н., Табаков В.П. Методологические принципы создания функциональных покрытий для режущего инструмента // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 2. С. 18–19.
12. Vereschaka A.A., Vereschaka A.S., Batako A.D., Mokritskii B.J., Aksenenko A.Y. and Sitnikov N.N. Improvement of structure and quality of nanoscale multilayered composite coatings, deposited by filtered cathodic vacuum arc deposition method// Research Article. Nanomaterials and Nanotechnology. 2017. Vol. 7. P. 1–13. DOI: 10.1177/1847980416680805 journals.sagepub.com/home/nax.SAGE.
13. Vereschaka A., Mokritskii B., Mokritskaya E., Sharipov O., Oganyan M. Two-component end mills with multilayer composite nano-structured coatings as a viable alternative to monolithic carbide end mills // Mechanics & Industry. 2017. Vol. 18. No. 7.
1. Vereshchaka A.S., Vereshchaka A.A. Improving tool efficiency by controlling coating composition, structure and properties. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Hardening Technologies and Coatings], 2005, no. 9, pp. 9–18. (In Russian)
2. Vereshchaka A., Lee W.Y. High Precision. High Speed Machining Technologies. Edition of HRDI, S. Korea, Cheonan, 2002, 393 p.
3. Mokrickij B.Ya., Vereshchaka A.A., Belyh S.V., Mokrickaya E.B. Hardening of cutting tool inserts by composite coatings for machining stainless steel 09KH17N7YU. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Hardening Technologies and Coatings], 2016, no. 5, pp. 3–5. (In Russian)
4. Mokrickij B.Ya. *Povyshenie rabotosposobnosti metallovezhushchego instrumenta putem upravleniya svoystvami instrumental'nogo materiala* [Improving metal-cutting tool performance by controlling tool material properties]. Vladivostok: Dal'nauka Publ., 2010, 232 p. (In Russian)
5. Vereshchaka A., Lee W.Y. High Precision // High Speed Machining Technologies. Edition of HRDI, S. Korea, Cheonan, 2002. 393 p.
6. Scherbarth S. Moderne Scheidstoffe und Werkzeuge-Wege zur gesteigerten Produktivität. Sandvik Dusseldorf. Werkzeugtagung, 2002.
7. Cselle T. Nanostrukturierte Schichten in der Werkstoff. Platit AG. Werkzeugtagung 2002.
8. Mokrickij B.Ya., Sablin P.A., Vereshchaka A.A. *Instrumental'noe obespechenie sovremennyh mashinostroitel'nyh proizvodstv* [Instrumental support of modern engineering industries]. Komsomol'sk-na-Amure: Komsomolsk-on-Amur state technical University Publ., 2017, 200 p. (In Russian)
9. Sitamov E.S., Mokrickij B.Ya. Results of comparative study of carbide tool wear resistance under stainless steel machining. *Metallrobrabotka* [Metal Working], 2018, no. 4 (106), pp. 7–13. (In Russian)
10. Tabakov V.P. *Formirovanie iznosostojkih ionno-plazmennyyh pokrytij rezhushchego instrumenta* [Formation of wear-resistant ion-plasma coatings of cutting tools.]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2008, 312 p. (In Russian)
11. Vereshchaka A.S., Grigor'ev S.N., Tabakov V.P. Methodological principles of creation the functional coatings of new generation for cutting tool manufacture. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Strengthening Technologies and Coatings], 2013, no. 2, pp. 18–19. (In Russian)
12. Vereschaka A.A., Vereschaka A.S., Batako A.D., Mokritskii B.J., Aksenenko A.Y. and Sitnikov N.N. Improvement of structure and quality of nanoscale multilayered composite coatings, deposited by filtered cathodic vacuum arc deposition method. Research Article. Nanomaterials and Nanotechnology. 2017, vol. 7, pp. 1–13. DOI: 10.1177/1847980416680805 journals.sagepub.com/home/nax.SAGE.
13. Vereschaka A., Mokritskii B., Mokritskaya E., Sharipov O., Oganyan M. Two-component end mills with multilayer composite nano-structured coatings as a viable alternative to monolithic carbide end mills. Mechanics & Industry. 2017, vol. 18, no. 7.



Критерии авторства

Мокрицкий Б.Я., Серебренникова А.Г. предложили новые результаты применения эффективных отечественных инструментальных материалов для обработки высокоантикоррозионных нержавеющей сталей. Мокрицкий Б.Я. несет ответственность за плагиат. Он разработал основные материалы покрытий на режущий инструмент. Серебренникова А.Г. разработала методику проведения эксперимента и провела записи составляющих сил резания.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authorship criteria

Mokritskiy B.Ya., Serebrennikova A.G. have presented new results of effective domestic tool material application for the machining of highly corrosion resistant stainless steels. Mokritsky B.Ya. bears the responsibility for plagiarism. He developed basic coating materials for cutting tools. Serebrennikova A.G. has developed an experimental technique and recorded the components of the cutting forces.

Conflict of interests

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.923.46

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-12-104-114>

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ КВАЗИОПТИМАЛЬНОГО КОРРЕЛЯЦИОННОГО АЛГОРИТМА

© Н.В. Носов¹

Самарский государственный технический университет,
443100, Российская Федерация, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.

РЕЗЮМЕ: В статье предложен новый подход к оценке структуры поверхности спинки и корыта лопаток газотурбинного двигателя. Оценка качества поверхности проводилась на оптико-электронном комплексе с применением квазиоптимального корреляционного алгоритма, что позволило разработать формулы по идентификации параметров шероховатости и параметров структуры поверхности. Показано совершенствование технологии обработки профиля пера лопаток газотурбинного двигателя через построение оптико-электронной информационно-измерительной системы контроля параметров автокорреляционной функции. Рассматриваемый метод измерения параметров структуры микрорельефа поверхностей лопаток газотурбинного двигателя связан с применением оптико-электронных средств и информационных технологий, анализа качества поверхности, теории измерений и цифровой обработки изображений, теории корреляционного анализа, теории вероятностей и математической статистики. Применяемый метод основан на компьютерной обработке изображения микрорельефа исследуемой поверхности с помощью квазиоптимального корреляционного алгоритма, что позволяет оценивать параметры корреляционной функции в производственных условиях. Одним из основных показателей качества лопаток турбин является их надежность и долговечность. В связи с этим управление качеством поверхности лопаток состоит в раскрытии механизма формирования неровностей поверхности в зависимости от свойств обрабатываемого материала, вида обработки, параметров оборудования, инструмента, режимов обработки и других конструктивных и технологических факторов. Известно, что чем меньше шероховатость поверхности, тем выше усталостная прочность лопаток, так как многочисленными исследованиями установлено, что очаги разрушения деталей машин от усталости металла зарождаются во впадинах микронеровностей. В настоящее время широкое применение в машиностроении находят оптические средства для оценки качества поверхности. Однако эти средства, как правило, могут использоваться только в лабораторных условиях и для выборочного контроля.

Ключевые слова: структура микрорельефа поверхности, лопатка турбины, бинарное изображение, квазиоптимальный алгоритм, корреляционная функция, режимы виброконтактного полирования

Информация о статье: Дата поступления 28 октября 2018 г.; дата принятия к печати 30 ноября 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2018 г.

Для цитирования: Носов Н.В. Исследование структуры поверхности лопаток газотурбинного двигателя с помощью квазиоптимального корреляционного алгоритма. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(12):104–114. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-104-114

STUDY OF GAS TURBINE ENGINE BLADE SURFACE STRUCTURE USING QUASIOPTIMAL CORRELATION ALGORITHM

Nikolay V. Nosov

Samara State Technical University,
244, Molodogvardeiskaya St., Samara 443100, Russian Federation.

ABSTRACT: The article proposes a new approach to the assessment of the surface structure of the blade back and pressure side of a gas turbine engine. The surface quality was estimated on an optical-electronic complex using a quasi-optimal correlation algorithm. This allowed to develop the formulas for surface roughness and surface structure parameter

¹Носов Николай Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения, станков и инструментов, e-mail: nosov.nv@samgtu.ru
Nikolay V. Nosov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Machines and Tools, e-mail: nosov.nv@samgtu.ru



identification. The processing technology of the blade feather profile of the gas turbine engine was improved through the construction of an electrooptical information and measuring system to control autocorrelation function parameters. The considered method of measuring parameters of the gas turbine engine blade surface microrelief structure is associated with the use of optoelectronic means and information technologies, analysis of surface quality, theory of measurement and digital image processing, theory of correlation analysis, probability theory and mathematical statistics. The applied method is based on computer processing of the image of the studied surface microrelief with the help of a quasioptimal correlation algorithm that allows to estimate the correlation function parameters in production conditions. One of the main quality indicators of turbine blades is their reliability and durability. Therefore, the quality management of blade surface involves the description of the mechanism of surface roughness formation depending on the properties of the processed material, type of machining, parameters of equipment, tools, processing modes and other design and technological factors. It is known that the lower the surface roughness, the higher the fatigue strength of blades, as it is proved by numerous studies that machine part destruction centers caused by metal fatigue arise in the cavities of micro-irregularities. Today, optical means are widely used in mechanical engineering for surface quality assessment. Unfortunately, these devices can only be used in laboratory conditions and for sample inspection.

Keywords: surface microrelief structure, turbine blade, binary image, quasioptimal algorithm, correlation function, modes of vibrocontact polishing

Information about the article: Received October 28, 2018; accepted for publication November 30, 2018; available online December 28, 2018.

For citation: Nosov N.V. Study of gas turbine engine blade surface structure using quasioptimal correlation algorithm. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018; 22(12):pp. 104–114. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-104-114

Введение

Рассмотрим новый подход к оценке структуры поверхности спинки и корыта лопаток газотурбинного двигателя (ГТД). Управление качеством поверхности лопаток состоит в раскрытии механизма формирования неровностей поверхности в зависимости от свойств обрабатываемого материала, вида обработки, параметров оборудования, инструмента, режимов обработки и других конструктивных и технологических факторов [1–3]. Широкое применение в машиностроении находят оптические средства для оценки качества поверхности [4–6]. В работе [7–8] раскрыт оптико-электронный метод определения параметров структуры, основанный на компьютерной обработке изображения исследуемой поверхности. При этом был установлен мультипликативный характер дополнительной погрешности измерения, возникающей под воздействием функции влияния $f_{эл}(\Delta\Phi, \Delta\alpha)$, где $\Delta\Phi$ и $\Delta\alpha$ – отклонения мощности светового потока и угла его падения на исследуемый микрорельеф от номинальных значений. Метод основан на сравнительной корреляционной обработке полутонового изображения структуры исследуемого микрорельефа и специального набора полутоновых изображений эталонных структур с известными параметрами микрорельефов.

Обработка изображений

Обработка изображений осуществлялась с использованием известного для вычисления двумерной корреляционной функции выражения [9]:

$$r_{xu}(k_1, k_2) = \frac{\sum_{n_1=0}^{N_1-1} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} (u(n_1, n_2) - m_u)(x(n_1 - k_1, n_2 - k_2) - m_x)}{\sigma_1 \sigma_2}, \quad (1)$$

где через $u(n_1, n_2)$ обозначен фрагмент изображения (эталон), который расположен внутри



зоны поиска $x(n_1, n_2)$, то есть изображения исследуемого микрорельефа формата $K_1 \times K_2$ пикселей, а σ_1 и σ_2 – средние квадратичные отклонения величин $u(n_1, n_2)$ и $x(n_1, n_2)$ от их математических ожиданий m_u и m_x соответственно. Структурный параметр микрорельефа – среднее арифметическое отклонение микронеровностей поверхности от средней поверхности, определяемой, как среднее значение тона изображения $Ra, \text{мкм}$, определялся с заданной вероятностью из экспериментальной зависимости $Ra = f(U_{CP}), \text{мкм}$, где U_{CP} – случайное среднее значение переменной составляющей автокорреляционной функции. Однако, применение выражения (1) требует значительного объема вычислительных операций, что существенно снижает возможности метода для оперативного контроля структурных параметров микрорельефа. Например, время обработки изображения исследуемого микрорельефа размером 320×240 пикселей составляет 447484 мс для ПЭВМ с процессором Intel(R) Core(TM)2CPU 4300 @ 1.80GHz.

Для проведения исследований о состоянии структуры микрорельефа исследуемых поверхностей использовался комплекс аппаратуры, рассмотренный в [10], а именно измерительный микроскоп, видеокамера и персональный компьютер. В качестве видеокамеры использовалась камера DIGITAL CAMERA Computar ZC-F11CH3, на выходе которой формировались черно-белые изображения заданного формата.

Для проведения исследований методом шлифования и полирования были изготовлены образцы эталонных поверхностей из жаропрочного сплава ЖС6ФУ, имеющих различную микрогеометрию. На профилографе модели SJ - 201P были определены следующие параметры шероховатости: образец № 1 – $Ra = 0,13 \text{мкм}$, образец № 2 – $Ra = 0,084 \text{мкм}$, образец № 3 – $Ra = 0,048 \text{мкм}$ и образец № 4 – $Ra = 0,025 \text{мкм}$. Оптико-электронная система комплекса была настроена таким образом, что анализируемая поверхность эталонных образцов имела размер $3 \times 2,5 \text{мм}$. Световой поток мощностью $600 \cdot 10^{-3}$ лм падал на исследуемую поверхность под углом 45° . Формат видеокadra, записываемого в память компьютера, составлял 320×240 пикселей.

Оптико-электронная система измерительного комплекса была настроена таким образом, что формат видеокadra $K_1 \times K_2$, записываемого в память компьютера, составлял 320×240 пикселей. В [11] было отмечено, что при использовании черно-белой видеокамеры Computar ZC-F11CH3 полученная информация является избыточной. В связи с этим на этом этапе исследований было выполнено преобразование исходного полутонового изображения поверхности в формат 1 пиксель – 1 байт. Таким образом, диапазон изменения видеосигнала по яркости B в полученном изображении составил 0–255 относительных единиц.

В настоящей работе проведены исследования микрорельефа сложных поверхностей лопаток турбин в производственных условиях на основе оптимальных алгоритмов, которые позволяют существенно повысить быстродействие оптико-электронного метода оценки параметров микрорельефа.

Для решения поставленной задачи были рассмотрены квазиоптимальные корреляционные алгоритмы, которые нашли широкое применение в корреляционных экстремальных системах навигации беспилотных летательных аппаратов² [12].

Был исследован алгоритм с парной критериальной функцией, использующий бинарные изображения:

²Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учебник. 11-е изд. М.: КНОРУС, 2010. 664 с. / Ventsel E.S. Probability theory: textbook. 11th edition. M.: KNORUS, 2010. 664p.



$$r_{x,y}(k_1, k_2) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{2^{n-1}} F_{ii}(\Delta), \quad (2)$$

где $F_{ii}(\Delta)$ – парная критериальная функция приобретает единичное значение при совпадении i – го пикселя в эталонном изображении – ЭИ и фрагменте бинарного текущего изображения – ТИ микрорельефа, N – количество сравниваемых элементов в ЭИ и фрагменте ТИ микрорельефа, $r_{x,y}(k_1, k_2)$ – коэффициент корреляции, представляющий нормализованную сумму совпавших пикселей в ТИ и ЭИ. Схема формирования и перемещения выделенного ЭИ по бинарному изображению структуры микрорельефа была такая же, как и в [12]. В изображении с первой строки выделяется полоса шириной N_2 пикселей и по центру этой полосы задается эталон – размером $N_1 \times N_2$ пикселя. Затем эталон, начиная с крайней левой позиции, перемещается по выделенной полосе с шагом в 1 пиксель. При каждом совмещении эталона и фрагмента ТИ подсчитывается $r_{x,y}(k_1, k_2)$ по формуле (2). Закончив вычисление $r_{x,y}(k_1, k_2)$ в первой полосе, задается следующая полоса того же формата, но смещенная вниз на один пиксель. В этой полосе по центру задается новый эталон с теми же размерами, и выполняются те же самые вычисления $r_{x,y}(k_1, k_2)$ и т.д. Так как эталон формируется в самом изображении микрорельефа, коэффициенты $r_{x,y}(k_1, k_2)$ являются коэффициентами автокорреляции. Обработав все изображение, получим двумерную автокорреляционную функцию. При этом компенсируется и негативное воздействие функции влияния [6] на оценку параметров структуры микрорельефа

$$\Delta B = B_T \cdot f_{\text{вл}}(\Delta\Phi, \Delta\alpha) - B_{\text{Э}} \cdot f_{\text{вл}}(\Delta\Phi, \Delta\alpha) = f_{\text{вл}}(\Delta\Phi, \Delta\alpha) \cdot 0 \text{ при } B_T = B_{\text{Э}}.$$

Кроме того, только в этой точке и наращивается сумма совпавших по значению пикселей эталона $B_{\text{Э}}$ и фрагмента ТИ – B_T , согласно (2).

Бинаризация полутонного изображения проводилась по адаптивному методу² [13]. Изображение поверхности разбивалось на квадратные фрагменты (окна 8×8 пикселей) и в каждом окне подсчитывался средний уровень яркости видеосигнала $B_T(x, y)$. В результате сравнения каждого пикселя окна $B_i(x, y)$ с пороговым значением $B_T(x, y)$ ему придавалось новое значение по правилу: $B_i(x, y) = 0\text{FFH}$, если $B_i(x, y) \geq B_T(x, y)$ и $B_i(x, y) = 00\text{H}$, если $B_i(x, y) < B_T(x, y)$. Бинарные изображения исследуемых поверхностей приведены на рис. 1.

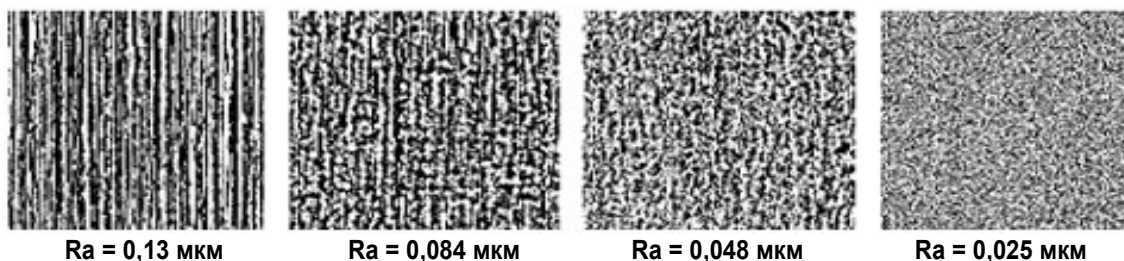


Рис. 1. Бинарные изображения структуры исследуемых образцов
Fig. 1. Binary images of the structure of the samples under investigation

Из рис. 1 видно, что структура микрорельефа меняется с изменением параметра Ra . Ориентированная в вертикальном направлении структуры для образца с $Ra = 0,13 \text{ мкм}$ транс-



формируется в структуры, имеющие случайный характер чередования мелких светлых и темных пятен для образца с $Ra = 0,025 \text{ мкм}$. Отмеченный эффект связан с изменением соотношений между регулярной и случайной компонентой в механически обработанной поверхности.

Для проведения исследований о влиянии микрорельефа поверхности на вид корреляционной функции была разработана программа на языке Borland Delphi-7. Первый этап исследований заключался в выборе исходного полутонового изображения поверхности для анализа из банка заранее созданных изображений. На втором этапе исследований задавались параметры эталона $N_1 \times N_2$ пикселей, и вычислялась нормированная двумерная корреляционная функция по классическому алгоритму.

Рассматриваемый метод исследований предусматривал также и получение графиков видеосигнала по строкам исходного изображения и коэффициента корреляции. Внешний вид интерфейса для данного этапа исследований имеет вид, приведенный на рис. 2.

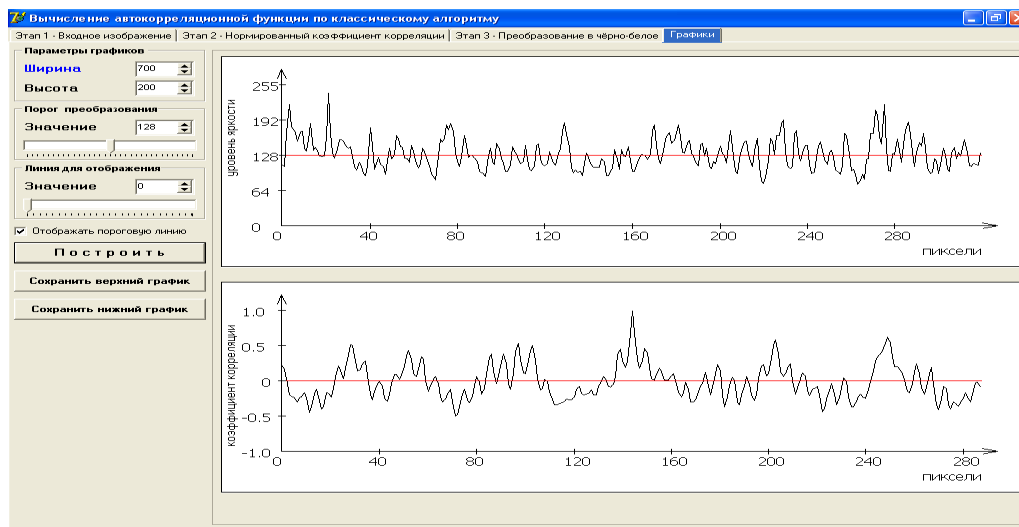


Рис. 2. Внешний вид графиков изменения уровня яркости по строкам видеокадров исследуемого изображения и нормированного коэффициента корреляции

Fig. 2. Appearance of brightness level variation graphs by the rows of the examined image video frames and the normalized correlation coefficient

Анализ полученных двумерных автокорреляционных функций показал, что по средней случайной амплитуде U_{CP} переменной составляющей функции $r_{x,y}(k_1, k_2)$ исследуемые микрорельефы существенно отличаются друг от друга. Для зависимости $Ra = f(U_{CP})$ методом наименьших квадратов было определено аналитическое выражение в виде [13]

$$Ra = 0,0065 \times U_{CP} - 0,02 \text{ мкм}, \quad (3)$$

а, для доверительного интервала I_β , отн. ед., куда попадает случайная величина U_{CP} , выражение

$$I_\beta = (3,4U_{CP}^2 + 14,4U_{CP} + 1) \times 10^{-3} \text{ отн. ед.} \quad (4)$$

Среднеквадратическое отклонение оценки (СКО) при определении U_{CP} определялось по формуле²:



$$\sigma_T = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}.$$

На поверхности каждого образца исследовалось 30 изображений. Задавая вероятность распознавания структуры исследуемых микрорельефов $P = 0,99$ и $t_\beta = 2,576$, получим средние квадратичные отклонения, доверительные интервалы и амплитуды переменной составляющей автокорреляционной функции.

Выполнена идентификация микрогеометрии поверхности лопаток 1 ступени турбины на основе вычисления номинальных значений параметров шероховатости Ra, Rp, R_{max}, Sm, t_m по регрессионным уравнениям (5) в зависимости от средней амплитуды автокорреляционной функции, вычисленной по изображению исследуемой поверхности.

$$\begin{aligned} Ra &= -0,020 + 0,0065 \times U_{cp} \text{ мкм}, \\ Rp &= 0,16 + 0,013 \times U_{cp} \text{ мкм}, \\ R_{max} &= 0,88 + 0,052 \times U_{cp} \text{ мкм}, \\ Sm &= 46,8 - 0,91 \times U_{cp} \text{ мкм}. \end{aligned} \quad (5)$$

Рассмотренный алгоритм и метод определения параметров структуры микрорельефа на основе U_{cp} был применен при исследовании полированных поверхностей пера лопаток 1-й ступени газотурбинного двигателя (ГТД). Внешний вид спинки и корыта лопатки приведен на рис. 3 а. Окончательная обработка профиля пера лопатки формирует требуемые параметры микрогеометрии поверхности лопаток ГТД. В производственных условиях обработка спинки и корыта лопаток осуществлялась на виброконтактном станке ЛВП-4, представленном на рис. 3 б.

Траектория рабочего движения обрабатываемой лопатки при виброконтактном полировании формируется в результате геометрического сложения взаимно-перпендикулярных колебаний от двух кривошипно-шатунных механизмов. Траектория такого движения имеет вид сетки с регулируемыми параметрами, геометрически сложна и практически неповторима. Благодаря такому движению на поверхности спинки и корыта лопатки формируется однородная поверхность. Режимы вертикальных и горизонтальных колебаний непосредственно влияют на качество поверхности, производительность обработки и динамические нагрузки, возникающие в колебательной системе. Обычно значения амплитуды и частоты колебаний принимают равными: частоту $20\text{--}25\text{с}^{-1}$, амплитуду $5\text{--}10\text{мм}$, что позволяет получать скорость обработки $30\text{--}120\text{ м/мин}$.

Моделирование процесса обработки показало [14], что максимальная производительность процесса достигается при оптимальном соотношении частот $\omega_0 = \omega_r / \omega_b$, где ω_r – частота горизонтальных колебаний, ω_b – частота вертикальных колебаний. Исследования проводились в следующем диапазоне $1/2 \leq \omega_0 \leq 1$. Приравняем скорости вращения двух рядом стоящих фигур в интервалах: $B_1 = 1/2$, $B_2 = 3/5$, $B_3 = 2/3$, $B_4 = 3/4$, $B_5 = 4/5$, $B_6 = 5/6$, $B_6 = 1$, получим следующую зависимость:

$$tg(\omega_0) = \frac{(\cos B_i + \cos B_{i+1})\omega_0 - (B_i \cos B_i + B_{i+1} \cos B_{i+1})}{(B_i \sin B_i + B_{i+1} \sin B_{i+1}) - (\sin B_i + \sin B_{i+1})\omega_0}.$$



Правая часть уравнения – гипербола, левая – тангенсоида. Решая данное уравнение относительно ω_0 , был получен следующий ряд оптимальных соотношений частот: 0,543; 0,617; 0,704; 0,763; 0,833; 0,917.

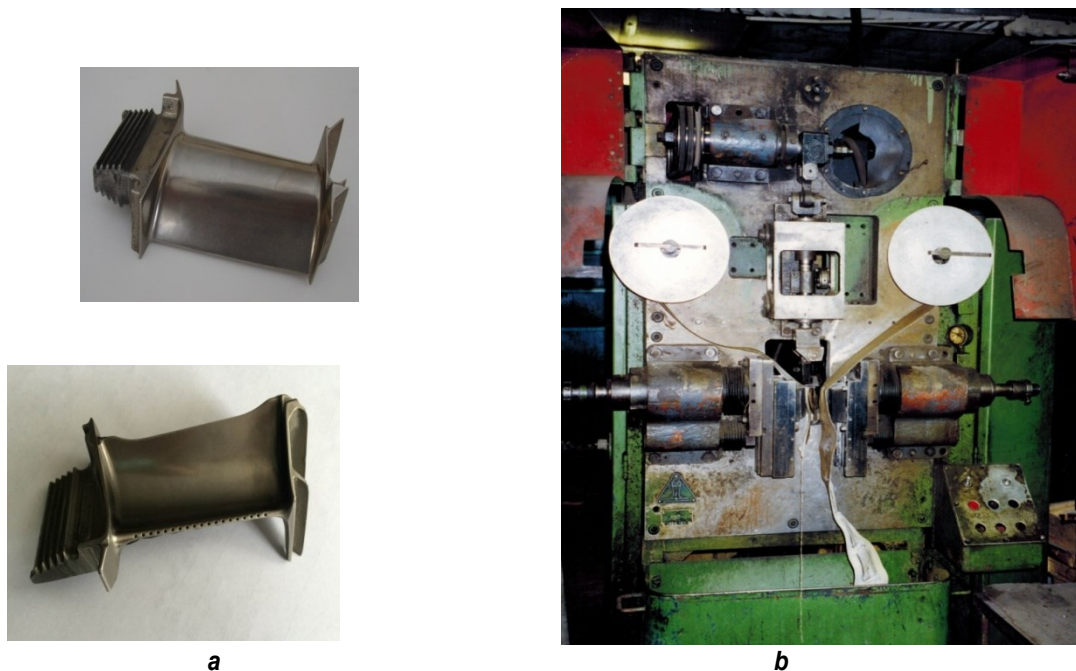


Рис. 3. Лопатка 1-й ступени ГТД (а), виброконтактный станок ЛВП-4 (b)
Fig. 3. First stage blade of the gas turbine engine (a), vibrocontact machine-tool HDL-4 (b)

В нашем случае обработка лопаток 1 ступени турбины осуществлялась с $\omega_0 = 0,833$ абразивными лентами в 2 перехода: 1 переход П8 63С16ПМА и 2 переход П8 63С6НМА. При виброконтактном полировании лопаток 12 ступени компрессора использовались алмазные ленты: АС280/63 Р9 100% и АС263/50 Р9 100%. Режимы обработки: скорость полирования составила 30 м/мин, вертикальное перемещение 4–6 мм, горизонтальное перемещение 3–5 мм, цикл обработки 12–17 с, давление ложементов в зоне обработки составило 0,4–0,6 МПа.

Известно, что параметры микрогеометрии поверхности должны быть одинаковыми во всех направлениях поверхности лопатки. Примем условие, что при равных параметрах шероховатости поверхности на поверхности формируется равноосная структура и не допущена односторонняя шероховатость. Для этого в эксперименте электронное изображение поворачивалось на 90° , 180° и 270° и определялись параметры корреляционной поверхности, если они совпадали по своим значениям в пределах 5%, то имело место появление на поверхности лопатки соответствующей структуры. Проведены экспериментальные исследования параметров микрорельефа поверхности лопаток 1 ступени ГТД, полученные после операции виброконтактного полирования спинки, корыта и радиуса перехода спинки и корыта в бандажные полки, а также структуру поверхностей в районе отверстий на входной кромке лопатки.

Обработка результатов эксперимента показала, что среднее значение переменной составляющей корреляционной функции, вычисленное по 30 изображениям, составило $U_{cp} = 22,1$ отн.ед. Использование выражения (4) дало значение для $I_\beta = 0,21$ отн.ед., тогда $U_{cp_{min}} = 21,89$ отн.ед., и $U_{cp_{max}} = 22,32$ отн.ед. Выражение (3) для участка поверхности спинки пера лопатки дало следующие результаты по высотным параметрам структуры поверхности:

$Ra_n = 0,14$ мкм, $R_{a_{min}} = 0,09$ мкм и $R_{a_{max}} = 0,16$ мкм, что вполне согласуется со значениями Ra профиля поверхности, измеренными с помощью профилографа SJ-201P.



Далее было выполнено последовательное оптико-электронное сканирование всей поверхности спинки и корыта лопатки, вычисление Ra_n для каждого участка и построение полей шероховатости, представленных на рис. 4. Из приведенных данных видно, что шероховатость поверхности на спинке больше, чем на корыте на 0,15–0,2 мкм. Это связано с тем, что при обработке площадь контакта поверхности лопаток с ложементами с течением времени меняется, и давление на спинке повышается. Кроме этого, лопатки в процессе обработки совершают колебание не по плоскости, а по некоторой дуге, которая не всегда совпадает с радиусом закрутки лопатки, поэтому формирование микронеровностей в большей степени зависит от кинематики процесса виброконтактного полирования.

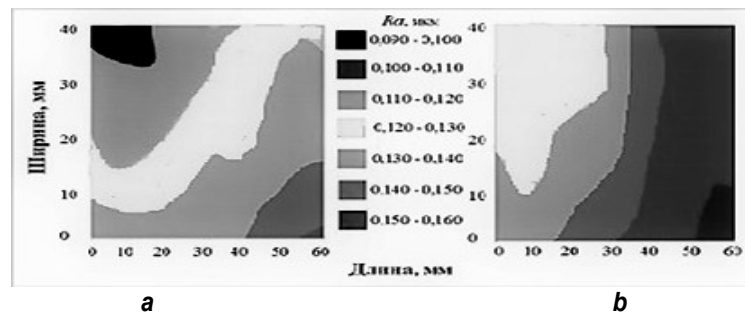


Рис. 4. Поля шероховатости поверхности лопаток 1-й ступени турбины после виброконтактного полирования: а – корыто; б – спинка
Fig. 4. Roughness fields of turbine first stage blade surface roughness after vibrocontact polishing: a – pressure side; b – back

Оптический метод, в силу своей универсальности, имеет возможность оценить микрогеометрию входной кромки лопаток 1 ступени турбины, на которой изготовлены отверстия для охлаждения (рис. 5). Исследованиями установлено, что поверхность между отверстиями имеет ярко выраженную структуру с $U_{cp_{min}} = 25,12$ отн. ед., и $U_{cp_{max}} = 25,62$ отн. ед., что соответствует величине $R_a = 0,27–0,28$ мкм. Это связано с тем, что после прошивки отверстий электроэрозионным способом следующей операцией является обдувка поверхности микрошариками, которая приводит к появлению однородной структуры на обработанной поверхности. В тоже время вокруг отверстия на расстоянии 1–1,5 мм от отверстия формируется поверхность с большей шероховатостью $R_a = 0,35–0,39$ мкм.

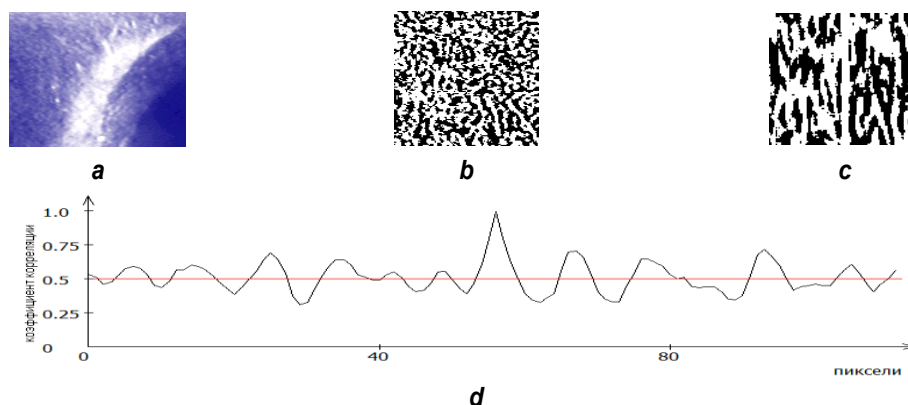


Рис. 5. Полутоновое изображение участка поверхности входной кромки лопатки с отверстием (а); бинарное изображение этого участка (б); корреляционная поверхность (с); график изменения коэффициента корреляции (d)
Fig. 5. Halftone image of the surface area of the blade inlet edge with a hole (a); binary image of this area (b); correlation surface (C); graph of correlation coefficient variation (d)



Несмотря на малые размеры неровностей поверхности составляющих шероховатость, они оказывают существенное влияние на эксплуатационные свойства поверхности лопаток. Полученные следы от механической обработки являются концентраторами напряжений и влияют на процесс усталости металлов при действии циклических и знакопеременных нагрузок. Во впадинах неровностей происходит увеличение напряжений, что может привести к образованию усталостных трещин.

При исследовании распределения напряжений на дне обработанных рис. авторами [14], с помощью методов теории упругости и с привлечением аппарата теории случайных функций, предложена зависимость по определению коэффициента концентрации напряжений α_σ

$$\alpha_\sigma = 1 + \pi \frac{32(0,05U_{cp}-0,95)}{100S_m},$$

где U_{cp} – средняя амплитуда автокорреляционной функции (максимальная высота неровностей), S_m – период колебания автокорреляционной функции (шаг неровностей).

Распределение коэффициента концентрации напряжений поверхности лопаток 1 ступени турбины, вычисленного с использованием приведенной зависимости, колеблется в пределах 1,2–1,25.

Заключение

1. Применение квазиоптимального алгоритма позволяет существенно сократить время определения параметров текстуры микрорельефа оптико-электронным методом и, следовательно, оперативно их контролировать непосредственно в производственных условиях.

2. Полученные поля шероховатости позволяют определять наиболее опасные участки поверхности, где образуются недопустимые значения концентраторов напряжений, и, следовательно, применять соответствующие меры уменьшения напряженного состояния поверхностного слоя, что позволит повысить надежность и долговечность промышленных изделий при их эксплуатации.

3. Доказано, что применение оптико-электронного метода оценки качества поверхности турбинных лопаток позволяет более глубоко анализировать технологию изготовления лопаток турбин.

4. Установлено, что применение оптимальных соотношений частот вертикальных и горизонтальных колебаний приводит к образованию однородной структуры поверхности профиля пера лопаток.

5. Исследованы области поверхности лопаток первой ступени турбины, примыкающей к отверстиям на входной кромке, и показано, что около отверстия величина шероховатости повышается в 1,5–1,7 раза.

Библиографический список

1. Петрешин Д.И., Сулов А.Г., Федонин О.Н. Управление параметрами качества поверхностного слоя деталей машин в условиях неопределенности // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2016. № 4 (55). С. 57–61.
2. Сулов А.Г., Петрешин Д.И. Автоматизированное обеспечение комплексного параметра качества поверхностного слоя СХ при механической обработке // Научные технологии в машиностроении. 2011. № 2. С. 34–40.
3. Иванов А.Ю., Леонов Д.Б. Технологические методы обеспечения качества изделий // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2011. № 5 (75) С. 111–114.
4. Петрешин Д.И. Применение лазерного оптического датчика для измерения высотных параметров шероховатости поверхности деталей машин в самообучающейся адаптивной технологической системе // Контроль. Диагностика. 2009. № 11. С. 53–57.



5. Макеев А.В. Об оптических методах контроля шероховатости поверхности // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2016. Т. 5. № 1. С. 147–151.
6. Наумов А.И., Кичигин Е.К., Сафонов И.А., Мох А.М.А.Э. Бортовой комплекс высокоточной навигации с корреляционно-экстремальной навигационной системой и цифровой картой рельефа местности // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. Т. 9. № 6-1. С. 51–55.
7. Микрюков А.Н. Использование изменений графического поля в задачах корреляционно-экстремальной навигации // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2010. № 3. С. 65–69.
8. Плужников А.Д., Потапов Н.Н. Корреляционно-экстремальная обработка навигационной информации: Цифровые алгоритмы и аппаратная реализация // Датчики и системы. 2013. № 11(174). С. 22–27.
9. Белов Р.В., Огородников К.О. Реализация модифицированного алгоритма рекуррентно-поискового оценивания корреляционно-экстремальной навигационной системы по рельефу местности // Управление большими системами: сборник трудов. 2017. № 68. С. 162–176.
10. Пат. № 2413179, Российская Федерация, G01B 11/30 (2006/01), G01N 21/93 (2006/01). Способ контроля шероховатости поверхности изделия / А.Д. Абрамов, А.И. Никонов, Н.В. Носов; заявитель и патентообладатель Самарский государственный технический университет; заявл. 16.03.2009; опубл. 27.09.2010. Бюл. № 6. 11 с.
11. Абрамов А.Д., Никонов А.И. Анализ и корреляционный метод устранения погрешности оптико-электронного определения микрорельефных параметров. Вестник компьютерных и информационных технологий. 2016. № 1. С. 3–9. DOI: 10.14489/vkit.2016.01.pp.003-009
12. Вдовин В.А., Муравьев А.В., Певзнер А.А. Метод адаптивной бинаризации растрового изображения // Ярославский педагогический вестник. 2012. Т. III. № 4. С. 65–69.
13. Абрамов А.Д., Носов Н.В. Оценка параметров микрорельефа поверхностей деталей машин на основе квази-оптимальных корреляционных алгоритмов // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2016. № 9. С. 19–25.
14. Носов Н.В., Китайкин В.Л. Повышение качества лопаток турбин из сплава ЖС6-9И. Техническая надежность конструкций. Куйбышев, 1986. С. 52–53.

References

1. Petreshin D.I., Suslov A.G., Fedonin O.N. The control parameters quality of surface layer of machine parts in conditions of uncertainty. *Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroeniya* [Progressive Technologies and Systems of Mechanical Engineering], 2016, no. 4 (55), pp. 57–61. (In Russian)
2. Suslov A.G., 1. Petreshin D.I. Automated support of surface layer quality complex parameter Cx in machining. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroyenii* [Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering], 2011, no. 2, pp. 34–40. (In Russian)
3. Ivanov A.Yu., Leonov D.B. Technological methods of product quality provision. *Nauchno-tehnicheskij vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta informacionnyh tekhnologij, mehaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics" of Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO University)], 2011, no. 5 (75), pp. 111–114. (In Russian)
4. Petreshin D.I. Application of a Laser Optical Sensor Control for Measurement of High-Altitude Parameters of Machines Details Surface Roughness in Self-Learning Adaptive Technological System. *Kontrol'. Diagnostika* [Testing. Diagnostics], 2009, no. 11, pp. 53–57. (In Russian)
5. Makeev A.V. Optical methods for control of surface microgeometry. *Interekspo Geo-Sibir'* [Interexpo Geo-Siberia], 2016, vol. 5, no. 1, pp. 147–151. (In Russian)
6. Naumov A.I., Kichigin E.K., Safonov I.A., Moh A.M.A.E. The aircraft onboard complex of accurate navigation with terrain reference navigation system and digital map terrain elevation data. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Voronezh State Technical University], 2013, vol. 9, no. 6-1, pp. 51–55. (In Russian)
7. Mikryukov A.N. Using graphic field changes in the problems of correlation-extreme navigation. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Instruments and Systems. Monitoring, Control and Diagnostics], 2010, no. 3, pp. 65–69. (In Russian)
8. Pluzhnikov A.D., Potapov N.N. Digital algorithms and hardware implementation of correlational-extremal processing of navigation information. *Datchiki i sistemy* [Sensors and Systems], 2013, no. 11(174), pp. 22–27. (In Russian)
9. Belov R.V., Ogorodnikov K.O. *Realization of the modified algorithm of re-current-search estimation of correlation-extreme navigation system on the terrain* [Implementation of modified recurrent-search estimation algorithm of correlation-extremal terrain-aided navigation system]. *Upravlenie bol'shimi sistemami: sbornik trudov* [Large-Scale Systems Control], 2017, no. 68, pp. 162–176. (In Russian)
10. Abramov A.D., Nikonov A.I., Nosov N.V. *Sposob kontrolya sherohovatosti poverhnosti izdeliya* [Method of product surface roughness control]. Patent RF, no. 2413179, 2010.
11. Abramov A.D., Nikonov A.I. Analysis and correlation method for eliminating the errors of opto-electronic determination of microrelief parameters. *Vestnik komp'yuternyh i informacionnyh tekhnologij* [Herald of Computer and Information Technologies], 2016, no. 1, pp. 3–9. (In Russian). DOI: 10.14489/vkit.2016.01.pp.003-009



12. Vdovin V.A., Murav'ev A.V., Pevzner A.A. A method of adaptive binarization of the raster image. *Yaroslavskij pedagogicheskij vestnik* [Yaroslavl Pedagogical Bulletin], 2012, vol. 3, no. 4, pp. 65–69. (In Russian)
13. Abramov A.D., Nosov N.V. Estimation of microrelief parameters of machine parts surfaces on the basis of quasioptimal correlation algorithms. *Vestnik komp'yuternyh i informacionnyh tekhnologij* [Herald of Computer and Information Technologies], 2016, no. 9, pp. 19–25. (In Russian)
14. Nosov N.V., Kitajkin V.L. *Povysheniye kachestva lopatok turbin iz splava ZHS6-9I. Tekhnicheskaya nadezhnost' konstrukcij* [Improving quality of turbine blades made of ZHS6-9I alloy. Technical reliability of designs]. Kujbyshev, 1986, pp. 52–53. (In Russian)

Критерии авторства

Носов Н.В. предложил новый подход к оценке структуры поверхности спинки и корыта лопаток газотурбинного двигателя, подготовил рукопись и несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Nosov N.V. has proposed a new approach to the assessment of the surface structure of blade back and blade pressure side of a gas turbine engine, prepared the manuscript for publication and bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.914.1

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-12-115-124>

ПОДАВЛЕНИЕ АВТОКОЛЕБАНИЙ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ ПРОГРАММНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ СИСТЕМЫ ЧИСЛОВОГО ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ СТАНКА

© В.М. Свинин¹, А.В. Савилов², А.В. Шутенков³, М.А. Панин⁴

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

РЕЗЮМЕ: Определение предельных возможностей современного токарного станка с числовым программным управлением по модуляции скорости резания, создаваемой программным путем, и оценка эффективности подавления автоколебаний заготовки в границах этих возможностей. Проведен анализ литературных источников. Для создания модуляции частоты вращения шпинделя программным путем применили техническое решение фирмы Siemens, основанное на использовании таймера. Экспериментальные исследования проводили на токарном обрабатывающем центре модели DMG NEF 400 со стойкой числового программного управления Siemens 840D. Для измерений параметров в опытах использовали лазерный виброметр Polytec OFV-505, трехкомпонентный динамометр Kistler Type 9129AA, профилометр Taylor Hobson Form Talysurf i200, встроенную в систему числового программного управления станка функцию Servo Trace, программное обеспечение «Dyna Ware» и «National Instruments Lab View 2012». Испытания станка на холостом ходу при всех сочетаниях частоты вращения шпинделя и частоты ее модуляции позволили установить, что инерционность шпинделя препятствует полной отработке станком заданной глубины модуляции. Степень этой отработки определена графиками в пространстве технологических параметров. С учетом возможностей станка проведены опыты по гашению автоколебаний нежесткой заготовки модулированной скоростью резания. Для конкретных условий обработки модуляция скорости резания обеспечила снижение уровня автоколебаний и колебаний силы резания в 20 раз, и шероховатости обработанной поверхности в 2 раза. На основе испытаний станка найдена область его рационального использования для гашения автоколебаний нежестких заготовок с помощью модуляции скорости резания. Экспериментальным путем доказана способность станка практически полного подавления автоколебаний при работе в границах его возможностей.

Ключевые слова: автоколебания, модуляция скорости резания, глубина и частота модуляции, точение валов

Информация о статье: Дата поступления 29 октября 2018 г.; дата принятия к печати 30 ноября 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2018 г.

Для цитирования: Свинин В.М., Савилов А.В., Шутенков А.В., Панин М.А. Подавление автоколебаний при токарной обработке программной модуляцией скорости резания системы числового программного управления станка. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(12):115–124. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-115-124

¹Свинин Валерий Михайлович, профессор кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, e-mail: svinin_vm@mail.ru

Valery M. Svinin, Professor of the Department of Technology and Equipment of Machine-Building Industries, e-mail: svinin_vm@mail.ru

²Савилов Андрей Владиславович, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, e-mail: saw@istu.edu

Andrey V. Savilov, Associate Professor of the Department of Technology and Equipment of Machine-Building Industries, e-mail: saw@istu.edu

³Шутенков Антон Владимирович, магистрант, e-mail: shuteanton@yandex.ru

Anton V. Shutenkov, Master Degree student, e-mail: shuteanton@yandex.ru

⁴Панин Михаил Александрович, аспирант, e-mail: Panin_ma@mail.ru

Mikhail A. Panin, Postgraduate student, e-mail: Panin_ma@mail.ru



DAMPING OF SELF-OSCILLATIONS AT LATHE TURNING BY SOFTWARE MODULATION OF CNC MACHINE-TOOL CUTTING SPEED

Valery M. Svinin, Andrey V. Savilov, Anton V. Shutenkov, Mikhail A. Panin

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

ABSTRACT: The purpose of the paper is determination of the limiting capabilities of a modern CNC lathe by cutting speed modulation created by software and evaluation of the damping efficiency of workpiece self-oscillations within the limits of these capabilities. The literary sources are reviewed. Software modulation of the spindle speed is performed using the technical solution of Siemens based on the use of a timer. Experimental studies are carried out on a turning machining center of the DMG NEF 400 model with a Siemens 840D CNC stand. Parameters in the experiments are measured using a laser vibrometer Polytec OFV-505, a three-component dynamometer Kistler Type 9129AA, a profilometer Taylor Hobson Form Talysurf i200, a Servo Trace function built in the system of machine-tool numeric control, Dyno Ware and National instruments Lab View 2012 software. Conducted tests of the idle machine-tool at all combinations of the spindle speed and its modulation frequency allowed to find out that spindle inertia prevents the machine-tool from complete development of the given depth of modulation. The degree of this development is determined by the graphs in the space of technological parameters. Machine-tool capabilities considered, the authors carried out the experiments on damping the self-oscillations of a non-rigid workpiece by the modulated cutting speed. For specific processing conditions the modulation of the cutting speed reduced the level of self-oscillations and cutting force fluctuations by 20 times and treated surface roughness by 2 times. Conducted tests of the machine-tool provided the opportunity to specify the area of its rational use for damping of non-rigid workpiece self-oscillations by means of cutting speed modulation. Machine-tool ability of almost complete elimination of self-oscillations when operating within its capabilities has been proved experimentally.

Keywords: self-oscillations, cutting speed modulation, depth and frequency of modulation, shaft turning

Information about the article: Received October 29, 2018; accepted for publication November 30, 2018; available online December 28, 2018.

For citation: Svinin V.M., Savilov A.V., Shutenkov A.V., Panin M.A. Damping of self-oscillations at lathe turning by software modulation of CNC machine-tool cutting speed. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018; 22(12):pp. 115–124. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-115-124

Введение

Одной из основных проблем, препятствующих повышению производительности, точности и качества обработки заготовок на современных металлорежущих станках, в том числе с числовым программным управлением (ЧПУ), является опасность возникновения автоколебаний, поддержание и развитие которых обеспечивается регенеративным эффектом [1]. Известные традиционные способы их подавления (повышение жесткости технологической системы или изменение ориентации ее главных осей, снижение силовой напряженности процесса резания, введение дополнительного демпфирования и другие) по разным причинам не всегда позволяют решить эту проблему [2]. Поэтому возникает потребность в поиске и разработке новых путей борьбы с автоколебаниями. Одним из таких путей, непосредственно разрушающих механизм энергетического поддержания автоколебаний,

т.е. их регенерацию, является модуляция скорости резания, впервые предложенная в 1970 г. В.А. Шнепсом [3].

С тех пор к методу модуляции скорости резания вследствие его гибкости и простоты реализации проявили интерес многие отечественные и зарубежные ученые [4–22]. На основании теоретических и экспериментальных исследований, а также имитационного моделирования была доказана эффективность подавления автоколебаний при точении и фрезеровании. Установлено, что модуляция скорости резания по гармоническому (синусоидальному) закону предпочтительнее, чем по прямоугольному, треугольному или случайному законам вследствие меньших ошибок отслеживания и более значительного повышения предела устойчивости. Среди исследователей сложилось мнение, что на подавление автоколебаний глу-



бина модуляции скорости резания оказывает более сильное влияние, чем ее частота.

Несмотря на большой объем выполненных исследований, недостаточно изученным оказался вопрос выбора предельно достижимых значений параметров модуляции скорости резания, допускаемых инерционностью шпинделя, заготовки и инструмента, а также тепловой перегрузкой приводного электродвигателя шпинделя. Отсутствие информации о реальной способности современных станков с ЧПУ к модуляции скорости резания сдерживает применение этого метода на производстве. Вторым

препятствием к практическому использованию модулированной скорости резания является отсутствие у большинства моделей станков с ЧПУ встроенной функции по ее созданию, что требует поиска специального программного решения.

Целью данной работы является определение предельных возможностей современного токарного станка с ЧПУ по модуляции скорости резания, создаваемой программным путем, и оценка эффективности подавления автоколебаний заготовки в границах этих возможностей.

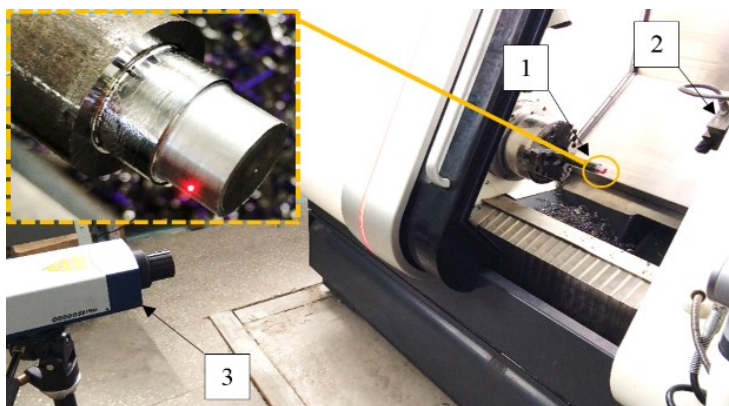


Рис. 1. Экспериментальная установка: 1 – заготовка, закрепленная в трехкулачковом патроне, с установленной фокусировкой лазерного луча; 2 – динамометр Kistler Type 9129AA с закрепленным инструментом; 3 – лазер Polytec OFV-505

Fig. 1. Experimental installation: 1 – a workpiece fixed in a three-jaw cartridge with a set focus of the laser beam; 2 – Kistler Type 9129AA dynamometer with the fixed instrument; 3 – Polytec OFV-505 laser

Оборудование и методы

Экспериментальное исследование проводили на токарном обрабатывающем центре DMG NEF 400, оснащенный стойкой ЧПУ Siemens 840D (рис. 1). В литературных источниках технической направленности имеется очень мало информации о создании программным путем модуляции скорости резания. Нами было найдено два технических решения, одно из которых основано на использовании механизма синхронных действий [23], а второе – таймера [24]. Предварительные опыты показали, что второе решение более эффективно и поэтому оно было выбрано для проведения исследова-

ния. Выявление способности станка отрабатывать заданные частоту и глубину модуляции проводили на холостом ходу при частотах вращения шпинделя n от 50 до 3500 оборотов в минуту и относительных частотах модуляции за один оборот $\varepsilon_f = 0,125; 0,25; 0,5$ и 1 . Диапазон изменения относительной частоты модуляции выбирали согласно рекомендациям работы [25]. Перевод относительной частоты модуляции за один оборот шпинделя ε_f в абсолютную частоту модуляции f в Герцах выполняется по формуле $f = n/(60\varepsilon_f)$. В ходе опытов для каждого сочетания частот вращения шпин-



деля и ее модуляции последовательно изменяли глубину модуляции от 0 до 25% с шагом в 5%. При этом допустимая силовая нагрузка на шпинделе была принята на уровне 50%. Ее фактическую величину контролировали визуально с помощью индикатора шкалы на экране стойки ЧПУ. Степень отработки станком заданных значений глубины и частоты модуляции угловой скорости шпинделя оценивали в ходе обработки по графикам на экране монитора, создаваемых встроенной в систему управления функцией Servo Trace.

В опытах по резанию обтачивали заготовку из стали 45 в состоянии поставки диаметром 46 мм, закрепленную консольно с вылетом 230 мм в трехлапчатом патроне. В качестве инструмента использовали резец SANDVIK DCLNL 2020K 12 со сменной режущей пластиной CNMG 432 – MM 2035, который устанавливали в трехкомпонентный динамометр Kistler Type 9129AA, расположенный на револьверной головке станка. Сигнал об измеренных составляющих силы резания анализировали при помощи программного обеспечения «Dyno Ware».

Условия обработки выбирали в соответствии с методиками, описанными в работе [26]. Режим резания всухую предварительно был назначен в соответствии с рекомендациями производителя инструмента, а затем скорректирован по результатам проведенного модального анализа [27] таким образом, чтобы он соответствовал области неустойчивого резания. В итоге был назначен следующий режим обработки: частота вращения шпинделя 1000 об/мин, глубина резания 1 мм, подача 100 мм/мин. В ходе опытов на свободном конце заготовки протачивали пояски длиной 20 мм. Шероховатость обработанной поверхности измеряли профилометром Taylor Hobson Form Talysurf i200.

Для регистрации колебаний свободного конца заготовки при резании применили лазерный виброметр Polytec OFV-505, сигнал от которого обрабатывали в программе «National Instruments Lab View 2012» с использованием модуля «Sounds and Vibraton Assistant». Перед началом опытов поверхность вала была проточена начисто для лучшей фокусировки луча лазера.

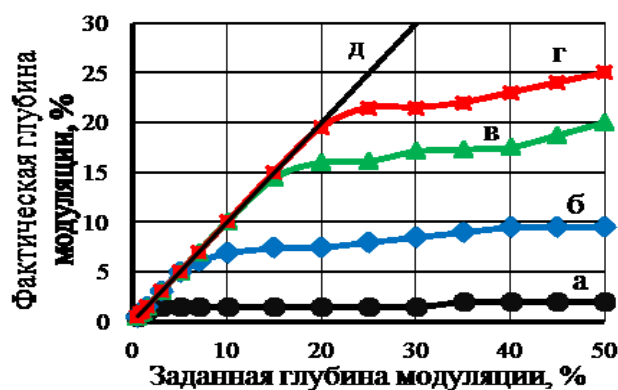


Рис. 2. Зависимость фактической глубины модуляции от её номинальной при частоте вращения шпинделя 1000 об/мин и относительной частоте: а – 1 мод/об; б – 0,5 мод/об; в – 0,25 мод/об; г – 0,125 мод/об; д – 0 мод/об

Fig. 2. Dependence of the actual modulation depth on its nominal depth at a spindle speed of 1000 rpm and relative frequency of: а – 1 mod/rev; б – 0.5 mod/rev; в – 0.25 mod/rev; г – 0.125 mod/rev; д – 0 mod/rev

Результаты и обсуждение

Результаты испытаний станка показали, что инерционность шпинделя препятствует отработке Заданной глубины модуляции частоты его вращения. С повыше-

нием угловой скорости шпинделя и параметров ее модуляции это препятствие нарастает. Для иллюстрации этого явления при частоте вращения шпинделя 1000



об./мин на рис. 2 представлены графики зависимости фактической глубины модуляции от заданной при разных значениях ее относительной частоты. На графиках видно, что для данного случая полная отработка модуляции возможна только при ее глубине в 20% при $\varepsilon_f = 0,125$ мод/об, 15% при $\varepsilon_f = 0,25$ мод/об и 5% при $\varepsilon_f = 0,5$ мод/об.

Результаты всех испытаний отражают графики на рис. 3 и 4.

Увеличение частоты вращения шпинделя и частоты ее модуляции приводит к резкому снижению способности станка обрабатывать заданную глубину модуляции. Например, при абсолютной частоте модуляции 4,17 Гц на частоте вращения шпинделя $n = 500$ об/мин возможна глубина модуляции скорости резания в 50% от номинальной, а на $n = 1500$ об/мин уже только 5% (рис. 3).

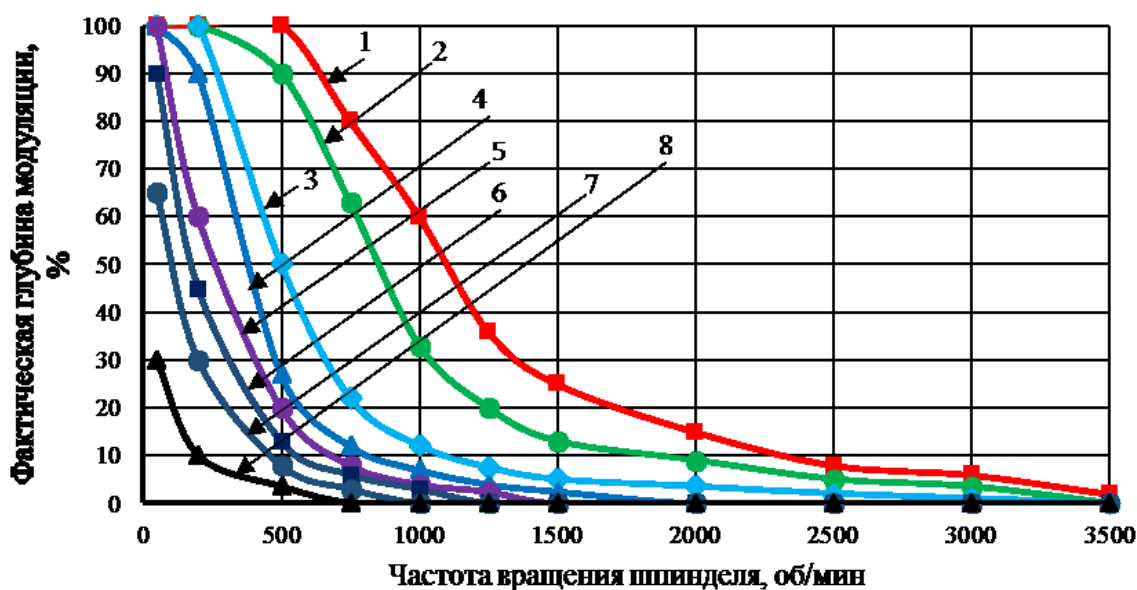


Рис. 3. Зависимость глубины модуляции от частоты вращения шпинделя и частоты модуляции:
1 – 1 Гц; 2 – 1,7 Гц; 3 – 4,17 Гц; 4 – 6,25 Гц; 5 – 8,3 Гц; 6 – 10,4 Гц; 7 – 12,5 Гц; 8 – 16,7 Гц
Fig. 3. Dependence of the modulation depth on the spindle speed and modulation frequency:
1 – 1 Hz; 2 – 1.7 Hz; 3 – 4.17 Hz; 4 – 6.25 Hz; 5 – 8.3 Hz; 6 – 10.4 Hz; 7 – 12.5 Hz; 8 – 16.7 Hz

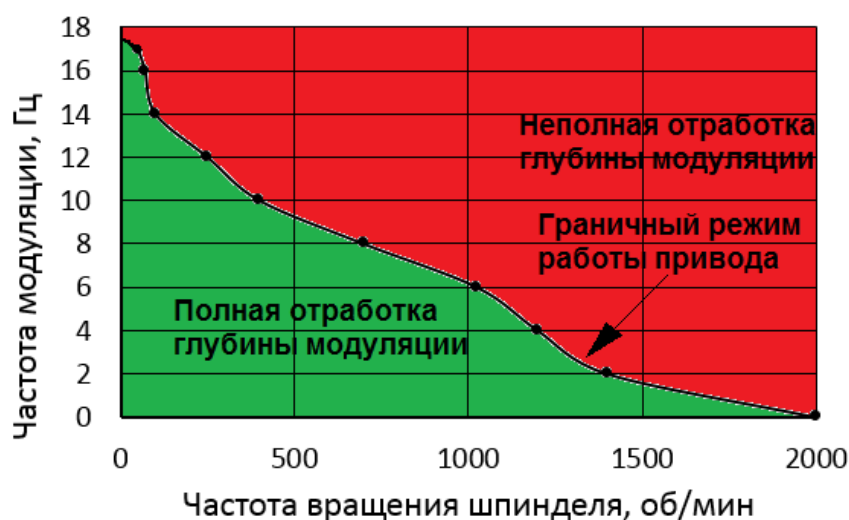


Рис. 4. Зоны полной и неполной отработки глубины модуляции частоты вращения шпинделя
Fig. 4. Zones of complete and incomplete development of the spindle speed modulation depth



**Влияние глубины модуляции скорости резания на амплитуды автоколебаний
и колебаний силы резания**
**Effect of cutting speed modulation depth on the amplitudes of self-oscillations
and cutting force fluctuations**

Глубина модуляции, %	Амплитуда первой гармоники автоколебаний, мкм	Амплитуда первой гармоники колебаний силы, Н
Относительная частота модуляции 0,5 мод/об		
0	0,578	55,5
5	0,342	22
10	0,225	14
15	0,149	9
20	0,131	5,7
22,5	0,011	2,6
25	0,030	1,5
Относительная частота модуляции 0,25 мод/об		
0	0,578	55,5
5	0,188	24,7
10	0,226	15,2
15	0,043	4,42
20	0,306	16
22,5	0,028	2,6
25	0,156	3,7
Относительная частота модуляции 0,125 мод/об		
0	0,578	55,5
5	0,329	33,7
10	0,180	13,7
15	0,086	5,75
20	0,330	2,7
22,5	0,064	12
25	0,099	2,3

На рис. 4 область технологических параметров разделена на две зоны по абсолютной частоте модуляции. В первой зоне станок обрабатывает заданную глубину модуляции полностью, а во второй – частично. Таким образом, на частоте вращения $n = 1000$ об/мин максимально возможная обрабатываемая частота модуляции равна 6 Гц (см. рис. 4).

Полученная в испытаниях информация имеет не только теоретическую, но и практическую ценность. Она может плодотворно использоваться заводскими технологиями для назначения безвибрационных

режимов резания при обработке ответственных деталей. Поэтому подобные испытания можно рекомендовать машиностроительным предприятиям для всех моделей станков с ЧПУ, на которых возможно использовать модулированную скорость резания для подавления автоколебаний маложестких заготовок или инструментов.

С учетом изученных возможностей станка были проведены опыты по точению нежесткой заготовки с целью гашения автоколебаний путем модуляции скорости резания. Натурный эксперимент проводили при частоте вращения шпинделя $n = 1000$ об/мин,

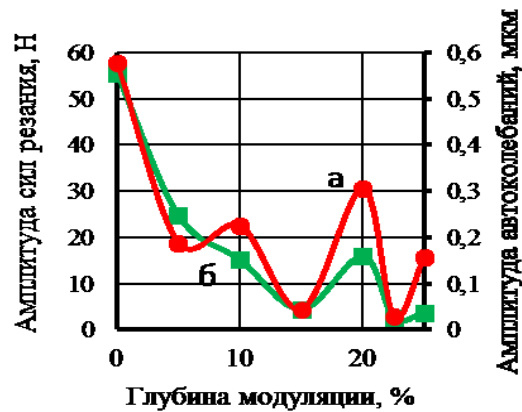


Рис. 5. Влияние глубины модуляции на: а - амплитуду автоколебаний,
б - амплитуду колебаний силы резания
Fig. 5. The influence of the modulation depth on: a - amplitude of self-oscillations,
b - amplitude of cutting force oscillations

частотах модуляции $\varepsilon_f = 0,5; 0,25$ и $0,125$ мод/об ($f=8,3; 4,17$ и $2,8$ Гц) и ступенчатым увеличением глубины модуляции до 25%, которые станок способен полностью обработать. Результаты опытов представлены в таблице.

Повышение глубины модуляции скорости резания на всех ее частотах сопровождается существенным снижением амплитуд автоколебаний и колебаний силы резания, что свидетельствует о значительном повышении динамической устойчивости процесса резания. На рис. 5 показаны совмещенные графики влияния глубины модуляции на амплитуды автоколебаний заготовки и колебаний силы резания при относительной частоте модуляции $\varepsilon_f = 0,25$ мод/об. Глубина модуляции в 22,5% позволила в

этом случае снизить интенсивность автоколебаний и неравномерность силовой нагрузки примерно в 20 раз.

Интересно отметить, что графики на рис. 5 носят немонотонный характер, подтверждающий периодическое изменение фазового сдвига текущих автоколебаний относительно вибрационного следа на поверхности резания с ростом глубины модуляции. Это хорошо согласуется с современным представлением о физической природе регенеративных автоколебаний [1, 16, 25] и дает ключ к управлению их уровнем. Создание благоприятных условий резания путем модуляции скорости положительно отразилось на качестве обработанной поверхности (рис. 6). Параметр R_a ее шероховатости снизился с 3,7 мкм до 1,9 мкм, т.е. практически вдвое.

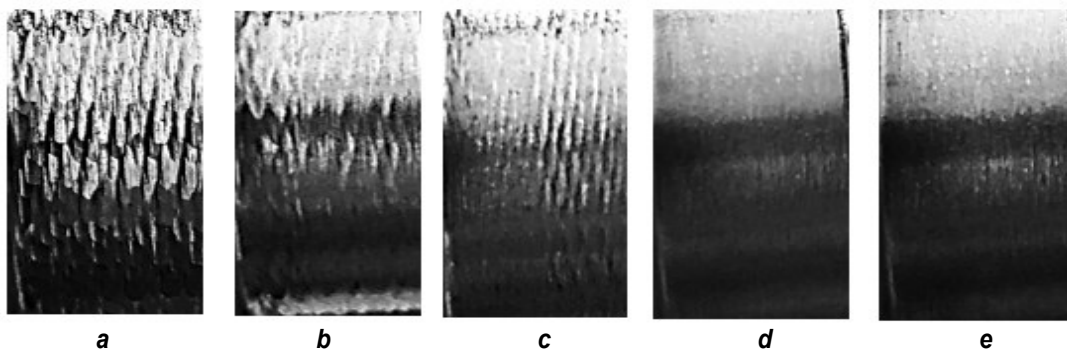


Рис. 6. Фотографии поверхностей обработанных: а - с постоянной скоростью резания и с модулированной скоростью резания при относительной частоте модуляции 0.5 мод/об и её глубине: б - 5%, с - 10%, d - 20%, e - 25%

Fig. 6. Images of the surfaces machined: a - with a constant cutting speed and with modulated cutting speed at a relative modulation frequency of 0.5 mod/rev and its depth of: b - 5%, c - 10%, d - 20%, e - 25%



Проведенное исследование доказало высокую эффективность метода подавления автоколебаний при точении путем модуляции скорости резания. Однако для его успешного внедрения в промышленность требуется проведение дальнейших

исследований для оценки способностей конкретных моделей станков к модуляции частоты вращения шпинделя и поиска оптимальных параметров модуляции для наилучшего гашения автоколебаний в широком диапазоне режимов резания и обрабатываемых материалов.

Заключение

1. Анализ возможных способов подавления автоколебаний при обработке резанием показывает, что одним из наиболее эффективных является программное управление скоростью резания. Этот метод прост в реализации и не требует сложной технологической наладки. Однако практическое применение этого метода затруднено недостаточной изученностью процесса и ограниченными возможностями станков по его реализации.

2. Для конкретного токарного обрабатывающего центра модели DMG NEF 400 со

стойкой ЧПУ Siemens 840D путем испытаний установлены предельно возможные параметры модуляции частоты вращения шпинделя, что создает условия его рациональной эксплуатации.

3. Опытным путем доказано, что обработка с модулированной скоростью резания в пределах возможностей станка может обеспечить почти полное подавление автоколебаний заготовок малой жесткости.

4. Метод модуляции скорости резания нуждается в дальнейших исследованиях с целью широкого промышленного внедрения.

Библиографический список

1. Altintas Y., Weck M. Chatter stability of metal cutting and grinding // CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2004. Vol. 53. Issue 2. P. 619–642. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60032-8
2. Quintana G., Ciurana J. Chatter in machining processes: a review // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2011. Vol. 51. P. 363–376. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2011.01.001
3. Шнепс В.А. Экспериментальное исследование влияния синусоидального изменения скорости на устойчивость резания // Вопросы динамики и прочности. 1970. Вып. 20. С. 123–130.
4. Stoferle T., Grab H. Vermeiden von Ratterschwingungen durch Periodische Drehzahländerung // Werkstatt und Betrieb. 1972. Vol. 105. P. 727–730.
5. Hoshi T., Sakisaka N., Moriyama I., Sato M. Study for practical application of fluctuating speed cutting for regenerative chatter control. // CIRP Annals - Manufacturing Technology. 1977. Vol. 25. P. 175–179. DOI:10.1299/kikai1938.44.1085
6. Sexton J.S., Stone R.J. An investigation of the transient effects during variable speed cutting // Journal of Mechanical Engineering Science. 1980. Vol. 22. Issue 3. P. 107–118. DOI:10.1243/JMES_JOUR_1980_022_024_02.
7. Jemielniak K., Widota A. Suppression of Self-excited Vibration by the Spindle Speed Variation Method // Int. J. Mach. Tool Des. Res. 1984. Vol. 24. P. 207–214.

8. Lin S.C., Devor R.E., Kapoor S.G. The effects of variable speed cutting on vibration control in face milling // ASME, Journal of Engineering for Industry. 1990. Vol. 112. P. 1–11. DOI: 10.1115/1.2899290
9. Lee A.C., Liu C.S. Analysis of chatter vibration in the end milling process // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 1991. Vol. 31. Issue 4. P. 471–479. DOI: 10.1016/0890-6955(91)90030-7.
10. Свинин В.М. Гашение автоколебаний при фрезеровании путем периодического изменения скорости резания // Перспективные направления развития машиностроения Забайкалья: тез. докл. региональной науч.-техн. конф. ЧитПИ (г. Чита, 1991 г.). Чита, 1991. С. 15–16.
11. Altintas Y., Chan P.K. In process detection and suppression of chatter in milling, // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 1992. Vol. 32. P. 329–347. DOI:10.1016/0890-6955(92)90006-3
12. Tsao T., Carthy M., Kapoor S. A new approach to stability analysis of variable speed machining systems // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 1993. Vol. 33. Issue 6. P. 791–808. DOI: 10.1016/0890-6955(93)90038-V
13. Jayaram S., Kapoor S.G., DeVor R.E. Analytical stability analysis of variable spindle speed machining // ASME, Journal of Engineering for Industry. 2000. Vol. 122. P. 391–397. DOI:10.1115/1.1285890
14. Yilmaz A., Al-Regib E., NiJ. Machine Tool Chatter



Suppression by Multi-Level Random Spindle Speed Variation // ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2002. Vol. 124. P. 208–216. DOI:10.1115/1.1378794

15. Афонин А.А., Афолина Н.А., Орлов А.Б. Повышение виброустойчивости технологической системы, на основе управляемой девиации параметров режима резания // Справочник. Инженерный журнал. 2004. Приложение № 8. С. 29–32.

16. Свинин В.М. Фрезерование с модулированной скоростью резания. Иркутск: Изд-во ИргТУ. 2007. 302 с.

17. Zhang, H., Ni, J. Internal Energy Based Analysis on Mechanism of Spindle Speed Variation for Regenerative Chatter Control // Journal of Vibration and Control. 2010. Vol.16. Issue 2. P. 281–301. DOI:10.1177/1077546309103562

18. Albertelli P., Musletti S., Leonzio M., Bianchi G., Monno M. Spindle speed variation in turning: Technological effectiveness and applicability to real industrial cases // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2012. Vol. 62. Issue 1-4. P. 59-67. DOI: 10.1007/s00170-011-3790-8.

19. Внуков Ю.Н., Натальчишин В.В., Гермашев А.И., Кучугуров М.В., Дядя С.И. Применение модуляции скорости главного движения фрезерного станка для гашения регенеративных автоколебаний при фрезеровании тонкостенных деталей // Вестник ИТУ «КПИ». 2014. Серия машиностроения. № 3 (72). С. 12–17.

20. Ding Y., Zhu L.M., Zhang X.J., Ding H. Integration Method for Stability Analysis of Milling With Variable Spindle Speeds // ASME Journal of Vibration and Acoustics. 2015. Vol. 138. Issue 1. P. 011010. DOI: 10.1115/1.4031617.

21. Niu, J., Ding, Y., Zhu, L., Ding, H. Stability Analysis of Milling Processes With Periodic Spindle Speed Variation Via the Variable-Step Numerical Integration Method

// ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2016. Vol. 138. Issue 11. P. 114501. DOI: 10.1115/1.4033043.

22. Stepan, G., Kiss, A. K., Ghalamchi, B., Sopanen, J., Bachrathy, D. Chatter Avoidance in Cutting Highly Flexible Workpieces // CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2017. Vol. 66. Issue 1. P. 377–380. DOI:10.1016/j.cirp.2017.04.054.

23. Кучугуров М.В., Гермашев А.И., Дядя С.И., Пирожок А.В. Особенности реализации возможностей управления приводами станков на базе стойки ЧПУ SIEMENS // ISSN 2078-7677. Високи технології в машинобудуванні, 2015. Випуск 1 (25). С. 80–87.

24. SINUMERIK 828D, 840D sl: Avoiding vibration in slewing gear pieces [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/78452062/sinumerik-828d-840d-sl%3A-avoiding-vibration-in-slewing-gear-pieces?dti=0&lc=en-WW> (дата обращения: 14.10.2018).

25. Свинин В.М. Выбор параметров модуляции скорости резания для гашения регенеративных автоколебаний // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. 2006. № 41. С. 135–142.

26. Серебrenникова А.Г., Пятых А.С., Тимофеев С.А. Исследование зависимости сил резания от геометрических параметров токарного резца // Авиационное машиностроение и транспорт Сибири: Сборник статей IX Всерос.-практ. конф. Иркутск: Изд-во Иркутского государственного технического университета, 2017. С. 241–246.

27. Савилов А.В., Пятых А.С., Тимофеев С.А. Оптимизация процессов механообработки на основе модального и динамометрического анализа // Наука и технологии в промышленности. 2013. № 1-2. С. 42–46.

References

1. Altintas Y, Weck M. Chatter stability of metal cutting and grinding. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2004, vol. 53, issue 2, pp. 619–642. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60032-8

2. Quintana G, Ciurana J. Chatter in machining processes: a review. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2011, vol. 51, pp. 363–376. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2011.01.001

3. Shneps V.A. Experimental study of the effect of sinusoidal speed variation on cutting stability. *Voprosy dinamiki i prochnosti* [Problems of Dynamics and Quality], 1970, Issue. 20, pp. 123–130. (In Russian).

4. Stoferle T., Grab H. Vermeiden von Ratterschwingungen durch Periodische Drehzahländerung. Werkstatt und Betrieb, 1972, vol. 105, pp. 727–730.

5. Hoshi T., Sakisaka N., Moriyama I, Sato M. Study for practical application of fluctuating speed cutting for regenerative chatter control. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 1977, vol. 25, pp. 175–179. DOI:10.1299/kikai1938.44.1085

6. Sexton J.S., Stone R.J. An investigation of the transient effects during variable speed cutting. Journal of Mechanical Engineering Science, 1980, vol. 22, issue 3, pp. 107–118.

DOI:10.1243/JMES_JOUR_1980_022_024_02.

7. Jemielniak K., Widota A. Suppression of Self-excited Vibration by the Spindle Speed Variation Method. Int. J. Mach. Tool Des. Res, 1984, vol. 24, pp. 207–214.

8. Lin S.C., Devor R.E., Kapoor S.G. The effects of variable speed cutting on vibration control in face milling. ASME, Journal of Engineering for Industry, 1990, vol. 112, pp. 1–11. DOI: 10.1115/1.2899290

9. Lee A.C., Liu C.S. Analysis of chatter vibration in the end milling process. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1991, vol. 31, issue 4, pp. 471–479. DOI: 10.1016/0890-6955(91)90030-7.

10. Svinin V.M. *Gashenie avtokolebanij pri frezerovanii putem periodicheskogo izmeneniya skorosti rezaniya* [Damping of self-oscillations at milling by periodical



changing of the cutting speed]. *Tezisy dokladov regional'noj nauchno-tekhnicheskoy konferencii ChitPI "Perspektivnye napravleniya razvitiya mashinostroeniya Zabajkalya"* [Abstracts of the regional scientific and technical conference of Chita Polytechnic university "Promising development areas of machine-building in the Trans-Baikal region", Chita, 1991]. Chita, 1991, pp. 15–16. (In Russian).

11. Altintas Y., Chan P.K. In process detection and suppression of chatter in milling // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1992, vol. 32, pp. 329–347. DOI:10.1016/0890-6955(92)90006-3

12. Tsao T., McCarthy M., Kapoor S. A new approach to stability analysis of variable speed machining systems // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1993, vol. 33, Issue 6, pp. 791–808. DOI: 10.1016/0890-6955(93)90038-V

13. Jayaram S., Kapoor S.G., Devor R.E. Analytical stability analysis of variable spindle speed machining // *ASME, Journal of Engineering for Industry*, 2000, vol. 122, pp. 391–397. DOI:10.1115/1.1285890

14. Yilmaz A., Al-Regib E., Ni J. Machine Tool Chatter Suppression by Multi-Level Random Spindle Speed Variation. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2002, vol. 124, pp. 208–216. DOI:10.1115/1.1378794

15. Afonin A.A., Afonina N.A., Orlov A.B. Increasing vibration resistance of the technological system based on controlled deviation of cutting mode parameters. *Spravochnik. Inzhenernyj zhurnal* [Handbook. Engineering journal], 2004, Appendix no. 8, pp. 29–32. (In Russian).

16. Svinin V.M. *Frezerovanie s modulirovannoy skorost'yu rezaniya* [Milling with modulated cutting speed]. Irkutsk: Irkutsk state technical university Publ., 2007, 302 p. (In Russian).

17. Zhang, H., Ni, J. Internal Energy Based Analysis on Mechanism of Spindle Speed Variation for Regenerative Chatter Control. *Journal of Vibration and Control*, 2010, vol. 16, Issue 2, pp. 281–301. DOI:10.1177/1077546309103562

18. Albertelli P., Musletti S., Leonzio M., Bianchi G., Monno M. Spindle speed variation in turning: Technological effectiveness and applicability to real industrial cases. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, Vol. 62, Issue 1–4, pp. 59–67. DOI: 10.1007/s00170-011-3790-8.

19. Vnukov Yu.N., Natal'chishin V.V., Germashev A.I., Kuchugurov M.V., Dyadya S.I. Application of speed modulation of the main movement of the milling machine for

damping regenerative self-oscillations at milling of thin-walled parts. *Visnik NTUU «KPI»*. 2014. Seriya mashinobuduvannya, no. 3 (72), pp. 12–17. (In Russian).

20. Ding Y., Niu J., Zhu, L., Ding, H. Numerical Integration Method for Stability Analysis of Milling with Variable Spindle Speeds. *ASME Journal of Vibration and Acoustics*, 2015, vol. 138, issue 1, pp. 011010. DOI: 10.1115/1.4031617.

21. Niu, J., Ding, Y., Zhu, L., Ding, H. Stability Analysis of Milling Processes with Periodic Spindle Speed Variation Via the Variable-Step Numerical Integration Method. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2016, vol. 138, issue 11, 114501 p. DOI: 10.1115/1.4033043.

22. Stepan G., Kiss A.K., Ghalamchi B., Sopanen J., Bachrathy D. Chatter Avoidance in Cutting Highly Flexible Workpieces. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2017, vol. 66, issue 1, pp. 377–380. DOI:10.1016/j.cirp.2017.04.054.

23. Kuchugurov M.V., Germashev A.I., Dyadya S.I., Pirozhok A.V. Implementation features of possibilities of SIEMENS CNC stand-based machine-tool drive control. ISSN 2078-7677. *Visoki tekhnologii v mashinobuduvanni*, 2015, Vipusk 1 (25), pp. 80–87. (In Russian).

24. SINUMERIK 828D, 840D sl: Avoiding vibration in slewing gear pieces. URL: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/78452062/sinumerik-828d-840d-sl%3A-avoiding-vibration-in-slewing-gear-pieces?dti=0&lc=en-WW> (14 October 2018).

25. Svinin V.M. Selection of cutting speed modulation parameters for damping regenerative self-oscillations. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Journal of Samara State Technical University, Series Technical Sciences], 2006, no. 41, pp. 135–142. (In Russian).

26. Serebrennikova A.G., Pyatyh A.S., Timofeev S.A. *Issledovanie zavisimosti sil rezaniya ot geometricheskikh parametrov tokarnogo rezca* [Study of cutting forces dependence on the geometric parameters of the lathe cutter]. *Sbornik statej IX Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konfere-cii "Aviamashinostroenie i transport Sibiri"* [Collection of articles of IX all-Russian scientific and practical conference "Aircraft engineering and transport in Siberia"]. Irkutsk: Irkutsk state technical University Publ., 2017, pp. 241–246. (In Russian).

27. Savilov A.V., Pyatyh A.S., Timofeev S.A. Optimization of machining process on the basis of modal and dynamometer analysis. *Nauka i tekhnologii v promyshlennosti* [Science and Technology in Industry], 2013, no. 1-2, pp. 42–46. (In Russian).

Критерии авторства

Свинин В.М., Савилов А.В., Шутенков А.В., Панин М.А. подготовили рукопись и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authorship criteria

Svinin V.M., Savilov A.V., Shutenkov A.V., Panin M.A. prepared the manuscript for publication and bear the responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.025

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-12-125-134>

МОДЕЛЬ И РАСЧЕТ ЭНЕРГИИ АДГЕЗИИ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО И ОБРАБАТЫВАЕМОГО МАТЕРИАЛОВ

© А.С. Янюшкин¹, Л.С. Секлетина², В.А. Гартфельдер³, Д.В. Лобанов⁴

Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова,
428015, Российская Федерация, г. Чебоксары, Московский просп., 15.

РЕЗЮМЕ: Совершенствование процесса электроалмазного шлифования алмазными кругами на металлической связке и обоснование режима самозатачивания установлено на основе расчетов энергии адгезии в зоне контакта инструментального и обрабатываемого материалов. Комплексные исследования процесса электроалмазного шлифования выполнены на примере затачивания твердосплавных инструментов с учетом критического анализа литературных данных, производственного опыта и собственных исследований с использованием современной аппаратуры и растровой микроскопии. Поскольку засаливание и потеря режущих свойств круга требуют периодической правки, то необходимо создать условия работы алмазных кругов на металлической связке в режиме самозатачивания, причем с минимальным удельным расходом алмазных кругов. В соответствии с предложенной моделью и математической формулой для вычисления энергии адгезии получены теоретические и экспериментальные данные по определению энергии адгезии в зависимости от плотности тока правки и эффективной мощности шлифования. Найдены значения энергии адгезии для элементов, входящих в состав металлических связок и элементов минералокерамических твердых сплавов. Расчеты показали, что комбинированный метод электроалмазного шлифования с одновременной непрерывной электрохимической правкой круга позволяет снизить уровень энергии адгезии до уровня, когда поверхностная энергия адгезионного взаимодействия обрабатываемого материала и элементов алмазного круга будет меньше энергии адгезии в контактной зоне. В этих условиях процесс засаливания не происходит. Таковыми являются плотность тока правки алмазного круга в пределах от 0,25 до 0,45 А/см². Установлено, что в соответствии с предложенной моделью и на основании математической формулы для вычисления энергии адгезии, комбинированный метод электроалмазного шлифования с одновременной непрерывной электрохимической правкой круга позволяет снизить уровень энергии адгезии до уровня, когда поверхностная энергия адгезионного взаимодействия обрабатываемого материала и элементов алмазного круга будет меньше энергии адгезии в контактной зоне. В этих условиях процесс засаливания не происходит. Экспериментально определено, что наиболее рациональным значением плотности тока правки, при котором достигается режим самозатачивания, можно считать значение $i_{пр}$ от 0,25 до 0,4 А/см². Установлено, что комбинированное электрохимическое шлифование с одновременной электрохимической правкой круга обеспечивает снижение эффективной мощности в 4 раза по сравнению со шлифованием без использования электрического тока.

Ключевые слова: шлифование, энергия адгезии, засаливание, режим самозатачивания, качество обработанной поверхности

Информация о статье: Дата поступления 29 октября 2018 г.; дата принятия к печати 30 ноября 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2018 г.

¹Янюшкин Александр Сергеевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, e-mail: yanyushkinas@mail.ru

Alexander S. Yanyushkin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, e-mail: yanyushkinas@mail.ru

²Секлетина Лариса Станиславовна, доцент кафедры стандартизации и сертификации, e-mail: larsek@list.ru

Larisa S. Sekletina, Associate Professor of the Department of Standardization and Certification, e-mail: larsek@list.ru

³Гартфельдер Виктор Адольфович, кандидат технических наук, профессор, декан машиностроительного факультета, e-mail: harvik48@list.ru

Viktor A. Gartfelder, Cand. Sci. (Eng.), Professor, Dean of the Mechanical Engineering Faculty, e-mail: harvik48@list.ru

⁴Лобанов Дмитрий Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения, e-mail: shut_tm@bk.ru

Dmitry V. Lobanov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, e-mail: shut_tm@bk.ru



Для цитирования: Янющкин А.С., Секлетина Л.С., Гартфельдер В.А., Лобанов Д.В. Модель и расчет энергии адгезии контактного взаимодействия инструментального и обрабатываемого материалов. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(12):125–134. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-125-134

MODEL AND CALCULATION OF ADHESION ENERGY OF TOOL AND PROCESSED MATERIAL CONTACT INTERACTION

Alexander S. Yanyushkin, Larisa S. Sekletina, Viktor A. Gartfelder, Dmitry V. Lobanov

Chuvashskiy State University named after I.N. Ulianov,
15, Moskovskiy pr., Cheboksary 428015, Russian Federation

ABSTRACT: The process of electric powered grinding by diamond wheels on a metal bond has been improved and the self-sharpening mode has been justified on the basis of the calculations of adhesion energy in the contact zone of tool and processed materials. Comprehensive studies of electric powered diamond grinding are performed on the example of hard alloy tool sharpening with consideration of the critical analysis of the literature data, manufacturing experience and the authors' own researches using modern equipment and raster microscopy. Since clogging and wheel cutting property loss require periodic dressing, it is necessary to create the operation conditions of diamond wheels on a metal bond in the self-sharpening mode, when the specific consumption of diamond wheels is minimal. On the basis of the proposed model and mathematical formula for adhesion energy calculation, theoretical and experimental data are obtained for adhesion energy estimation depending on the dressing current density and effective grinding power. The values of the adhesion energy are found for the elements of the metal bonds and the elements of mineral ceramic hard alloys. The calculations have shown that the combined method of electric powered diamond grinding with simultaneous continuous electrochemical dressing of the wheel allows to reduce the adhesion energy level to the one when the surface energy of the adhesion interaction of the processed material and the elements of the diamond wheel is lower than the adhesion energy in the contact zone. In these conditions, clogging does not occur. These conditions include the dressing current density of the diamond wheel in the range from 0.25 to 0.45 A/cm². It is determined that in accordance with the proposed model and on the basis of a mathematical formula for adhesion energy calculation, the combined method of electric powered diamond grinding with simultaneous continuous electrochemical dressing of the wheel allows to reduce the level of adhesion energy to the level when the surface energy of the adhesion interaction of the processed material and diamond wheel elements will be lower than the adhesion energy in the contact zone. Clogging does not occur in these conditions. It has been determined experimentally that the most rational value of the dressing current density, at which the self-sharpening mode is achieved, can be considered the value of i_{np} from 0.25 to 0.4 A/cm². It has been found out that the combined electrochemical grinding with simultaneous electrochemical dressing of the wheel decreases the effective power by 4 times in comparison with grinding without the use of electric current.

Keywords: grinding, adhesion energy, clogging, self-sharpening mode, quality of the processed surface

Information about the article: Received October 29, 2018; accepted for publication November 30, 2018; available online December 28, 2018.

For citation: Yanyushkin A.S., Sekletina L.S., Gartfelder V.A., Lobanov D.V. Model and calculation of adhesion energy of tool and processed material contact interaction. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018; 22(12):pp. 125–134. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-125-134

Введение

Промышленность выпускает ряд алмазных кругов из сверхтвердых материалов, используемых для затачивания и шлифования высокопрочных материалов. Они имеют высокую твердость, износостойкость и теплопроводность. Однако, несмотря на уникальные свойства сверхтвердых материалов, остаются проблемы, связанные с их эксплуатацией, которые не позволяют в полной мере эффективно их использовать. Это связано с тем, что в процессе обработки шлифовальные круги из сверхтвердых материалов, особенно на металлической связке, как правило, полностью теряют свою работоспособность. Причина потери – засаливание кругов. Все это приводит к резкому возрастанию сил резания, мощности, расходу кругов, ухудшению качества обработанной поверхности [1].



Решению этих вопросов посвящены многочисленные исследования отечественных и зарубежных авторов в самых различных направлениях. Так, в работах проф. А.С. Янющкина описывается комбинированный электроалмазный метод, который состоит в одновременном электрохимическом растворении шлифуемой поверхности и непрерывной правке круга⁵ [2]. Работы других авторов посвящены определению оптимальных электрических режимов в приэлектрохимической обработке. Много работ посвящено анализу износа алмазных шлифовальных кругов и нахождению путей по его снижению [3–9].

В литературных источниках нет единого взгляда на природу засаливания. Одни считают, что основная причина заключается в забивании пор абразивных зерен мелкодисперсными частицами (шламом) и образовании спрессованного слоя, закрывающего выступающие зерна [10–17].

Другой взгляд на проблему засаливания кругов заключается в адгезии к абразивным зернам частиц металла, а также в адгезии к связке круга [12–14].

Обе точки зрения не дают полного ответа на проблему засаливания. Чтобы выяснить механизм его формирования, необходимо изучить строение поверхностного слоя круга, структуру, механизм его образования и физико-химические процессы, протекающие в зоне контакта, инструментального и обрабатываемого материалов.

Снижение износа возможно также за счет оптимизации электрических и механических параметров. Однако применительно к исследованиям в области комбинированного электроалмазного метода они не носили системного характера. Кроме этого требуют дальнейшего развития теоретические положения по факторам засаливания и самозатачивания шлифовальных кругов с учетом ряда технологических условий, оказывающих существенное влияние на качество режущего инструмента в целом⁶ [15, 16].

Только в отдельных работах делается акцент на целый комплекс механизмов образования засаленного слоя, дается обоснование причин его образования и пути борьбы с этим вредным явлением [17–21]. Однако, по нашему мнению, процесс засаливания более многогранен и требует дальнейшего изучения.

Для оценки и решения проблемы засаливания нами предлагается рассмотреть следующую модель контактного взаимодействия инструментального и обрабатываемого материалов в процессе затачивания. Суть ее заключается в сравнении энергии адгезии (F_a) контактного взаимодействия в зоне шлифования (затачивания) с поверхностной энергией контактирующих тел (W_p), в нашем случае – инструментального и обрабатываемого материалов. При этом считается, что если энергия адгезии больше или равна поверхностной энергии ($F_a \geq W_p$), то контактирующие тела находятся в состоянии адгезии, если $F_a \leq W_p$ адгезия отсутствует.

В качестве модели взаимодействия двух тел A и B принято соотношение, реализующееся по следующей схеме (рис. 1). До вступления в адгезию A (инструментальный материал) и B (обрабатываемый материал) занимают в пространстве области, ограниченные поверхностями инструментального и обрабатываемого материалов.

Под действием системы сил $F^{(A)}$ и $F^{(B)}$, приложенных к A и B появляется прочная связь, в результате которой внутренняя энергия может быть представлена суммой поверхностной энергии контактирующих тел:

$$W_p^{(A, B)} = W_p^{(A)} + W_p^{(B)}.$$

⁵Янющкин А.С. Технология электроалмазного затачивания режущих инструментов и методы ее реализации: моногр. Старый Оскол: ТНТ, 2013. 336 с. / Yanushkin A. S. Technology of electric powered diamond sharpening of cutting tools and its implementation methods: Monography. Stary Oskol: TNT, 2013. 336 p.

⁶Попов В.Ю. Повышение качества изделий из инструментальных сталей при электроалмазном шлифовании: дис. ... канд. техн. наук. Братск, 2002. 159 с. / Popov V.Yu. Improving the quality of products made of tool steels at electric powered diamond grinding: Candidate's Dissertation in technical sciences. Bratsk, 2002. 159 p.

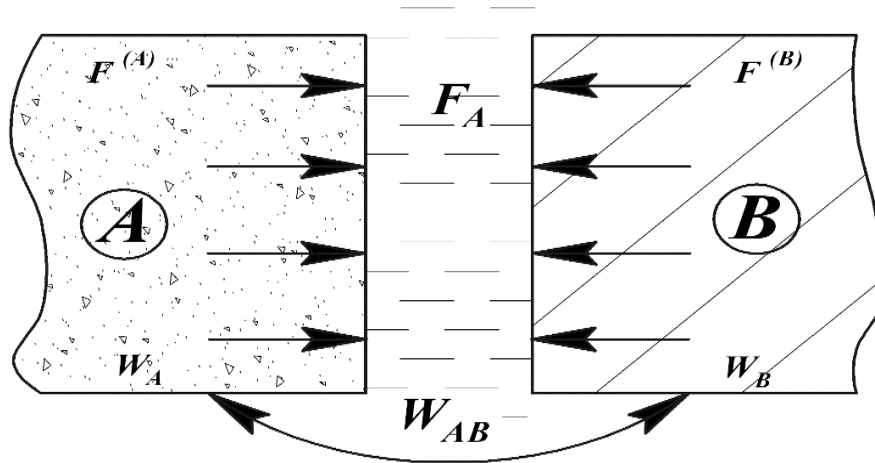


Рис.1. Расчетная схема двух тел, вступивших в адгезионный контакт: A – инструментальный материал (шлифовальный круг); B – обрабатываемый материал (твердый сплав); «AB» – третье тело (засаленный слой), представляющий границу, инструментального и обрабатываемого материалов

Fig. 1. Design diagram of two bodies in the adhesive contact: A – tool material (grinding wheel); B – processed material (hard alloy); "AB" – third body (clogged layer), which represents the boundary of the tool and processed materials

При этом допускается, что интегральной характеристикой этих изменений является энергия адгезии тел A и B, характеризующая убылью F_a на единицу площади в зоне контакта инструментального и обрабатываемого материалов или свободной энергии тел A и B:

$$F_a = W_p^{(A,B)} - W_p^{(A)} - W_p^{(B)},$$

где $W_p^{(A)}$, $W_p^{(B)}$, $W_p^{(A,B)}$ – поверхностные энергии, соответственно, тел A, B и конструкции «A – B», представляющей собой новое формирование в виде засаленного слоя.

Для системы инструментального и обрабатываемого материалов эта формула приобретает вид:

$$W_p^{(A,B)} = \int_{-h_1}^0 w_A(x) dx + \int_0^{h_2} w_B(x) dx, \quad (1)$$

$$W_p^{(A)} = \int_{-h_1}^0 w_A(x) dx; \quad W_p^{(B)} = \int_0^{h_2} w_B(x) dx, \quad (2)$$

где x – координата, отсчитываемая от плоскости контакта в направлении, перпендикулярном к ней; w_A – плотность потенциала инструментального материала до вступления в адгезионный контакт; w_B – плотность обрабатываемого материала до вступления в адгезионный контакт.

В конечном виде результатом вычислений может быть представлено выражение:

$$F_a = 8 \frac{E^{(A)} E^{(B)} (k^{(A)} + k^{(B)})^2}{E^{(A)} k^{(B)2} + E^{(B)} k^{(A)2}} 10^{-12}, \quad (3)$$

где $k^{(j)} = \frac{\nu^{(j)}}{1 - \nu^{(j)}}$; $\nu^{(j)}$ – коэффициент Пуассона. $E = 1/8 W_p 10^{12}$ – модуль упругости 162.



Полученная формула позволяет на первом этапе рассчитать энергию адгезии F_a для чистых металлов и их одноименного контактного взаимодействия.

Предложенные рассуждения переводят известные общезначимые представления о поверхностной энергии и энергии адгезии в плоскость механики деформируемого твердого тела. Задача в этом случае заключается в подборе или построении математической модели контактного взаимодействия, инструментального и обрабатываемого материалов, в рамках которой предложенные качественные представления могут быть описаны и оценены количественно. Нами предлагается это выполнить на основе исследования сил и мощности резания в зависимости от электрических параметров затачивания твердосплавных инструментов, при которых установлена стабилизация режущих свойств алмазных кругов на металлической связке.

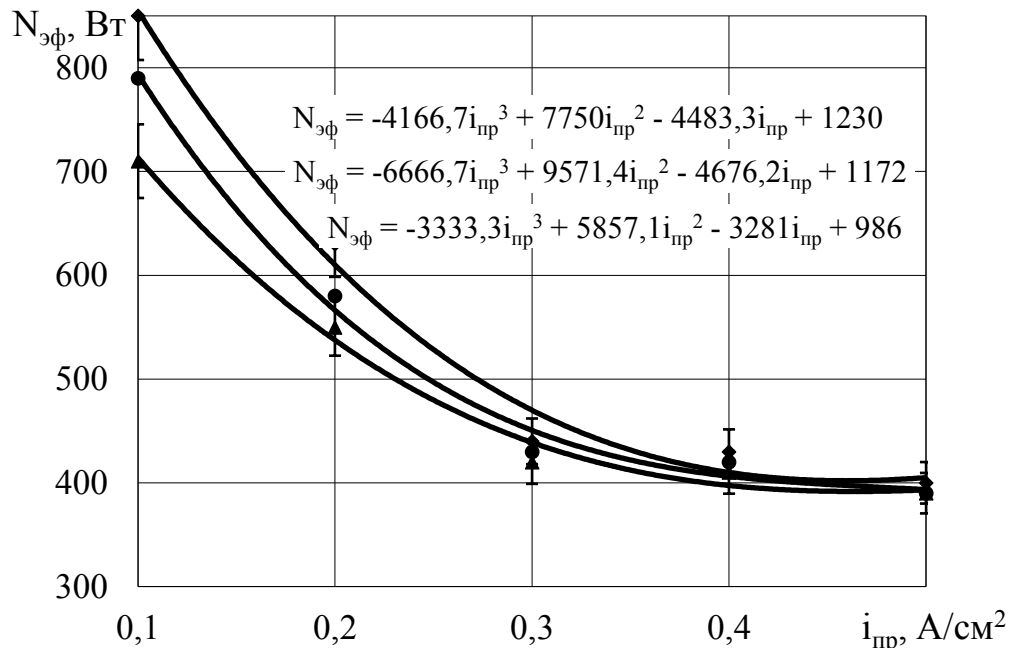


Рис. 2. График зависимости мощности резания от плотности тока правки алмазного круга на различных металлических связках
Fig. 2. Dependence graph of cutting power on the current density of diamond wheel dressing with various metal bonds

На рис. 2 показана зависимость мощности резания от плотности тока правки при комбинированной электроалмазной обработке твердосплавных пластин различными алмазными кругами, из которых видно, что при плотности тока, равной 0,3 А/см² и более, наблюдается стабилизация режущих свойств алмазных кругов и работа их в режиме самозатачивания.

Для того чтобы увязать зависимость $N_{эф}(i)$ с зависимостью $F_a(i)$ на основе графиков, представленных на рис.2, проведем следующие рассуждения:

$$\frac{F_a(i)}{F_a} = \frac{N_{эф}(i)}{N_{эф_{\max}}} \quad (4)$$

Зависимость $N_{эф}(i)$, полученную экспериментально, можно аппроксимировать следующей аналитической зависимостью:



$$N_{\text{эф}}(i) = \begin{cases} \alpha i + \beta, & \text{если } 0 \leq i_{np} \leq i_0 \\ N_{\text{эф}} = N_{\text{эф}_{\min}}, & \text{если } i_{np} \geq i_0, \end{cases} \quad (5)$$

где α , β – параметры, которые определяются для каждого сочетания материалов алмазного круга и обрабатываемого инструмента. Выразим их через $N_{\text{эф}_{\min}}$, $N_{\text{эф}_{\max}}$ и i_0 . При $i_{np} = 0$ $N_{\text{эф}}(0) = N_{\text{эф}_{\max}}$.

Отсюда: $\beta = N_{\text{эф}_{\max}}$.

При $i_{np} = i_0$. $N_{\text{эф}}(i_0) = N_{\text{эф}_{\min}}$, так как $\alpha i_0 + N_{\text{эф}_{\max}} = N_{\text{эф}_{\min}}$, то $\alpha = -\frac{N_{\text{эф}_{\max}} - N_{\text{эф}_{\min}}}{i_0}$.

Получаем, что в наших условиях уравнения имеют вид:

$$F_a(i) = \begin{cases} F_a \cdot \frac{1}{N_{\text{эф}_{\max}}} \cdot \left(N_{\text{эф}_{\max}} - i_{np} \frac{N_{\text{эф}_{\max}} - N_{\text{эф}_{\min}}}{i_0} \right), & 0 \leq i_{np} \leq i_0; \\ F_a \cdot \frac{N_{\text{эф}_{\min}}}{N_{\text{эф}_{\max}}}, & i_{np} \geq i_0 \end{cases}$$

или

$$F_a(i) = \begin{cases} F_a \cdot \left(1 - \frac{i_{np}}{i_0} \cdot \left(1 - \frac{N_{\text{эф}_{\min}}}{N_{\text{эф}_{\max}}} \right) \right), & 0 \leq i_{np} \leq i_0; \\ F_a \cdot \frac{N_{\text{эф}_{\min}}}{N_{\text{эф}_{\max}}}, & i_{np} \geq i_0 \end{cases} \quad (6)$$

здесь значение i_0 соответствует минимальной плотности тока правки, при котором начинается работа алмазного круга в режиме самозатачивания.

Найдем эту точку с учетом условия приемлемого удельного расхода алмазного круга. Для этого дополним график мощности резания от плотности тока правки зависимостью удельного расхода алмазного круга, также от плотности тока правки (рис. 3).

Сделаем следующие допущения по мощности, $N_{\text{эф}} = N_{\text{рез}} - N_{\text{х.х}}$. Мощность холостого хода в эксперименте $N_{\text{х.х}} = 200$ Вт, поэтому считаем, что эффективной мощности $N_{\text{эф}} = 400$ Вт вполне достаточно для комбинированного электроалмазного шлифования, при котором достигается режим самозатачивания. Также допускаем, что наиболее приемлемой величиной удельного расхода алмазного круга целесообразен расход в пределах $q = 1,0$ мг/г.

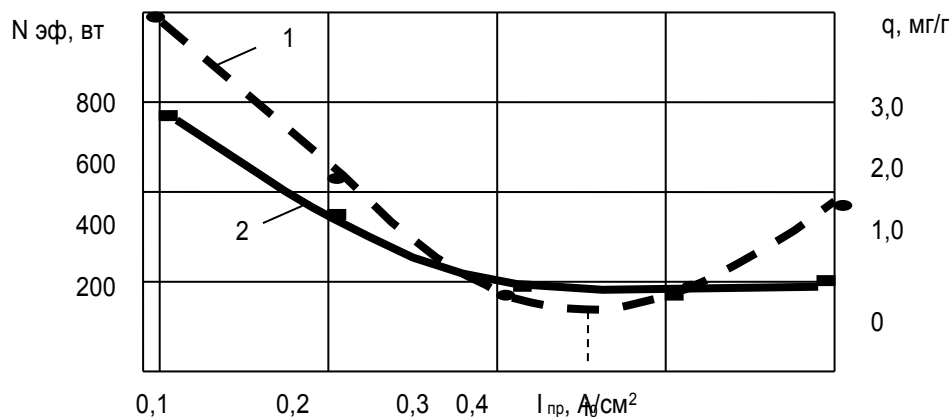


Рис. 3. График зависимости мощности и удельного расхода алмазного круга



от плотности тока непрерывной правки шлифовального круга
**Fig. 3. Dependence graph of diamond wheel power and specific consumption
on the current density of grinding wheel continuous dressing**

Таким образом, точки пересечения графиков показывают рациональную область (заштриховано), а точка перегиба будет означать найденную плотность тока правки алмазного круга i_0 . В данном случае $i_0 = 0,35 \text{ A/cm}^2$.

После подстановки принятых обозначений и допущений формула имеет окончательный вид:

$$F_a = 8 \frac{E^{(1)} E^{(2)} \left(\frac{\nu^{(1)}}{1 - \nu^{(1)}} + \frac{\nu^{(2)}}{1 - \nu^{(2)}} \right)^2}{E^{(1)} \left(\frac{\nu^{(2)}}{1 - \nu^{(2)}} \right)^2 + E^{(2)} \left(\frac{\nu^{(1)}}{1 - \nu^{(1)}} \right)^2} \left(1 - \frac{i}{i_0} \left(1 - \frac{N_{\phi_{\min}}}{N_{\phi_{\max}}} \right) \right) \cdot 10^{-12}. \quad (7)$$

В данной работе представлены расчеты для условий шлифования алмазным кругом АС6 125/100 МО13-100 % с током непрерывной электрохимической правки круга более $0,35 \text{ A/cm}^2$. В этих условиях алмазный круг является анодом. Под действием положительного полюса происходят анодные процессы, предотвращающие адгезию инструментального и обрабатываемого материалов.

Выполненные расчеты энергии адгезии по данной математической зависимости показывают отсутствие контактного взаимодействия компонентов твердого сплава с химическими элементами металлической связки алмазного круга (таблица).

**Результаты расчета энергии адгезии при взаимодействии элементов связки
алмазного круга с материалом твердого сплава при шлифовании (затачивании)
с непрерывной правкой круга**

**Results of adhesion energy calculation under interaction of the bonding elements
of the diamond wheel with the hard alloy material at grinding (sharpening)
with continuous dressing of the wheel**

Катод Анод	WC	TiC	Co	W	Ti
	$2W_p = 11,04$	$2W_p = 7,2$	$2W_p = 3,30$	$2W_p = 6,0$	$2W_p = 1,76$
Al $2W_p^{(Al)} = 1,13$	0,75 —	0,66 —	0,97 —	1,04 —	0,79 —
Cu $2W_p^{(Cu)} = 1,92$	1,05 —	0,94 —	1,26 —	1,36 —	1,04 —
Sn $2W_p^{(Sn)} = 0,77$	0,49 —	0,43 —	0,69 —	0,69 —	0,61 —
Zn $2W_p^{(Zn)} = 1,84$	1,15 —	1,01 —	1,33 —	1,30 —	1,02 —
Ni $2W_p^{(Ni)} = 3,36$	1,91 —	1,70 —	1,88 —	2,26 —	1,34 —
Si $2W_p^{(Si)} = 2,16$	1,15 —	1,03 —	1,36 —	1,47 —	1,11 —
Алмаз $2W_p^{(A)} = 14,4$	6,58 —	5,15 —	1,71 —	3,16 —	0,91 —
Fe $2W_p^{(Fe)} = 3,2$	2,18 —	1,88 —	1,83 —	1,43 —	1,19 —
Al_2O_3 $2W_p^{(Al_2O_3)} = 6,4$	3,07 —	2,78 —	2,71 —	3,34 —	1,91 —



Примечание. Знак «—» означает отсутствие контактного взаимодействия и фиксации элементов обрабатываемого материала на поверхности круга, а значит и отсутствие процесса засаливания алмазного круга.

Аналогичные экспериментальные данные получены и при других методах затачивания режущих инструментов, где присутствует непрерывная электрохимическая правка алмазных кругов на металлических связках.

Заключение

В соответствии с предложенной моделью и на основании математической формулы для вычисления энергии адгезии получено соотношение для определения энергии адгезии в зависимости от плотности тока правки и эффективной мощности шлифования. Найдены значения энергии адгезии для элементов, входящих в состав металлических связок и элементов минералокерамических твердых сплавов. Расчеты показали, что комбинированный метод электроалмазного шлифования с одновременной непрерывной электрохимической правкой круга позволяет снизить уровень энергии адгезии до уровня, когда поверхностная энергия адгезионного взаимодействия обрабатываемого материала и элементов алмазного круга будет меньше энергии адгезии в контактной зоне. В этих условиях процесс засаливания не происходит.

Экспериментально определено, что рациональным значением плотности тока правки, при котором достигается режим самозатачивания, можно считать значение $i_{\text{прот}}$ 0,25 до 0,4 А/см². Установлено, что комбинированное электрохимическое шлифование с одновременной электрохимической правкой круга обеспечивает снижение эффективной мощности в 4 раза по сравнению со шлифованием без использования электрического тока.

Библиографический список

1. Степанов Ю.С., Белкин Е.А., Барсуков Г.В. Моделирование микрорельефа абразивного инструмента и поверхности детали. М.: Машиностроение – 1.2004. 214 с.
2. Янюшкин А.С., Архипов П.В., Торопов В.А. Механизм засаливания шлифовальных кругов // Вестник машиностроения. 2009. № 3. С. 62–69.
3. Малышев В.И., Попов А.Н. Имитационная модель процесса шлифования с вибрационной правкой шлифовального круга // Известия Самарского научного центра Рос. Акад. наук. 2010. Т. 12. № 4-4. С. 923–925.
4. Yanyushkin A., Lobanov D., Arkhipov P., Ivancivsky V. Contact processes in grinding // Applied Mechanics and Materials. 2015. Т. 788. С. 17–21.
5. Носенко В.А. Влияние контактных процессов на износ круга при шлифовании // Инструмент и технологии. 2004. № 17–18. С. 162–167.
6. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Мулюхин Н.В. Пути решения проблем формообразования режущего инструмента для обработки неметаллических композитов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2018. Т. 20. № 3. С. 36–46. DOI: 10.17212/1994–6309–2018–20.3-36-46.
7. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S., Rychkov D.A., Petrov N.P. Optimal organization of tools for machining composites // Russian Engineering Research. 2011. Т. 31. № 2. С. 156–157.
8. Васильев Е.В., Попов А.Ю., Реченко Д.С. Алмазное шлифование твердосплавных пластин // СТИН. 2012. № 5. С. 7–10.
9. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Скиба В.Ю., Гартфельдер В.А., Секлетина Л.С. Повышение эффективности алмазного инструмента на металлической связке при шлифовании высокопрочных материалов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2017. № 3 (76). С. 17–27.
10. Братан С.М., Сидоров Д.Е., Ревенко Д.В. Моделирование съема материала при шлифовании поверхностей с введением в зону обработки дополнительной электрической энергии // Вісник СевНТУ. 2011. № 118. С. 6–14.
11. Козлов А.М., Боглов Д.В. Моделирование совмещенной абразивной обработки // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2010. № 2. С. 50–53.
12. Strelchuk P.M. The energy intensity analysis of the diamond-spark grinding of the WolKarnanostructural hard alloy / P.M. Strelchuk, M.D. Uzunyan // Journal of Superhard Materials. 2010. Vol. 32. P. 50–54.
13. Lobanov D.V., Arkhipov P.V., Yanyushkin A.S., Skeebe V.Yu. The research into the effect of conditions of combined electric powered diamond processing on cutting power // Key Engineering Materials. 2017. Т. 736. С. 81–85.
14. Geng Zhi, Li Xuekun, Qian Zhiqiang, Liu Haitao, Rong Yiming Experimental study of time-dependent performance in superalloy high-speed grinding with CBN wheels // Machining Science and Technology. 2016. Vol. 20. P. 615–633.



15. Mogilnikov V.A., Chmir M.Y., Timofeev Y.S., Poluyanov V.S. Diamond-ECM Grinding of sintered hard alloys of WC-Ni // *Procedia CIRP*. 2016. Vol. 42. P. 143–148.
16. Худобин Л.В., Унянин А.Н. Минимизация засаливания шлифовальных кругов. Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2007. 298 с.
17. Овчаренко А.Г., Козлюк А.Ю., Курепин М.О., Тюрин А.Г., Терентьев Д.С. Исследование влияния комбинированной магнитно-импульсной обработки на качество твердосплавного инструмента // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2011. № 3. С. 95–98.
18. Веселов С.В., Щербakov В.И., Черкасова Н.Ю. Особенности строения вольфрамокобальтового покрытия сформированного на стальной поверхности при использовании промежуточного слоя хрома // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2012. № 4. С. 68–71.
19. Майборода В.С., Ульяненко Н.В., Дюбнер Л.Г. Застосування магнітно-абразивної обробки для зміцнення різального інструменту // Вищий навчальний заклад технологічного профілю в Житомирському регіоні. 2003. № 3 (27). С. 22–31.
20. Kim C.S., Massa T.R., Rohrer G.S. Modeling the Relationship Between Microstructural Features and the Strength of WC-Co Composites // *Int. J. Ref. Metals. Hard. Mater.*, 2006. 24 (1–2). P. 89–100.
21. Ковалев В.Д., Васильченко Я.В., Клименко Г.П., Андронов А.Ю., Ткаченко Н.А. Применение обработки импульсным магнитным полем для упрочнения деталей машин и режущего инструмента // *Вестник двигателестроения*. 2004. № 4. С. 149–151.

References

1. Stepanov Yu.S., Belkin E.A., Barsukov G.V. *Modelirovanie mikrorel'efa abrazivnogo instrumenta i poverhnosti detali* [Modeling of the abrasive tool microrelief and part surface]. Moscow: Mashinostroenie – 1 Publ., 2004, 214 p. (In Russian)
2. Yanyushkin A.S., Arhipov P.V., Toropov V.A. A glazing process mechanism of the grinding wheels. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of Mechanical Engineering], 2009, no. 3, pp. 62–69. (In Russian)
3. Malyshev V.I., Popov A.N. Simulation model of grinding with vibrating edit grinding wheels. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskaya Akademiya nauk* [Proceedings of the Samara scientific center RAS], 2010, vol. 12, no. 4-4, pp. 923–925. (In Russian)
4. Yanyushkin A., Lobanov D., Arkhipov P., Ivancivsky V. Contact processes in grinding. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 788, pp. 17–21.
5. Nosenko V.A. Influence of contact processes on wheel wear at grinding. *Instrument i tekhnologii* [Tool and Technology], 2004, no. 17–18, pp. 162–167. (In Russian)
6. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Mulyuhin N.V. Methods of solving the problems of shaping the cutting tool for processing non-metallic composites. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* [Metal Working and Materials Science (Technology, Equipment, Tools)], 2018, vol. 20, no. 3, pp. 36–46. (In Russian) DOI: 10.17212/1994–6309–2018–20.3-36-46.
7. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S., Rychkov D.A., Petrov N.P. Optimal organization of tools for machining composites. *Russian Engineering Research*, 2011, vol. 31, no. 2, pp. 156–157.
8. Vasil'ev E.V., Popov A.Yu., Rechenko D.S. Diamond grinding of hard-alloy plates. *STIN* [Russian Engineering Research] Publ., 2012, no. 5, pp. 7–10. (In Russian)
9. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Skiba V.Yu., Gartfel'der V.A., Sekletina L.S. Enhancing the effectiveness of the diamond metal bond instrument when grinding high-strength materials. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* [Metal Working and Materials Science (Technology, Equipment, Tools)], 2017, no. 3 (76), pp. 17–27. (In Russian)
10. Bratan S.M., Sidorov D.E., Revenko D.V. Modeling material removal at surface grinding with the introduction of additional electrical energy into the zone being processed. *Visnik SevNTU*, 2011, no. 118, pp. 6–14. (In Russian)
11. Kozlov A.M., Boglov D.V. Modeling of combined abrasive treatment. *Fundamental'nye i prikladnye problem tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology], 2010, no. 2, pp. 50–53. (In Russian)
12. Strelchuk P.M. The energy intensity analysis of the diamond-spark grinding of the WolKarnanostructural hard alloy. *Journal of Superhard Materials*, 2010, vol. 32, pp. 50–54.
13. Lobanov D.V., Arkhipov P.V., Yanyushkin A.S., Skeebe V.Yu. The research into the effect of conditions of combined electric powered diamond processing on cutting power. *Key Engineering Materials*, 2017, vol. 736, pp. 81–85.
14. Geng Zhi, Li Xuekun, Qian Zhiqiang, Liu Haitao, Rong Yiming Experimental study of time-dependent performance in superalloy high-speed grinding with CBN wheels. *Machining Science and Technology*, 2016, vol. 20, pp. 615–633.
15. Mogilnikov V.A., Chmir M.Y., Timofeev Y.S., Poluyanov V.S. Diamond-ECM Grinding of sintered hard alloys of WC-Ni. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 42, pp. 143–148.
16. Hudobin L.V., Unyanin A.N. *Minimizaciya zasalivaniya shlifoval'nyh krugov* [Minimization of grinding wheel clogging]. Ul'yanovsk: UIGTU Publ., 2007, 298 p. (In Russian)
17. Ovcharenko A.G., Kozlyuk A.Yu., Kurepin M.O., Tyurin A.G., Terent'ev D.S. The research influence of the combined magnetic-pulse processing on quality of the hard alloy tool. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* [Metal Working and Materials Science (Technology, Equipment, Tools)], 2011, no. 3, pp. 95–98. (In Russian)



18. Veselov S.V., Shcherbakov V.I., Cherkasova N.Yu. Features of the structure of the tungsten-cobalt coating formed on the steel surface using an intermediate chromium layer. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* [Metal Working and Materials Science (Technology, Equipment, Tools)], 2012, no. 4, pp. 68–71. (In Russian)
19. Majboroda V.S., Ul'yanenko N.V., Dyubner L.G. Застосування магнітно-абразивної обробки для зміцнення різального інструменту. Вищий навчальний заклад технологічного профілю в Житомирському регіоні, 2003, no. 3 (27), pp. 22–31.
20. Kim C.S., Massa T.R., Rohrer G.S. Modeling the Relationship Between Microstructural Features and the Strength of WC–Co Composites. *Int. J. Ref. Metals. Hard. Mater.*, 2006, 24 (1–2), pp. 89–100.
21. Kovalev V.D., Vasil'chenko Ya.V., Klimenko G.P., Andronov A.Yu., Tkachenko N.A. Use of pulsed magnetic field treatment for hardening of machine parts and cutting tools. *Vestnik dvigatelestroeniya* [Bulletin of Drive Engineering], 2004, no. 4, pp. 149–151. (In Russian)

Критерии авторства

Янюшкин А.С., Секлетина Л.С., Гартфельдер В.А., Лобанов Д.В. подготовили рукопись и несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Yanyushkin A.S., Sekletina L.S., Gartfelder V.A., Lobanov D.V. prepared the manuscript for publication and bear the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 681.5:517.443

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-12-135-144>

АНАЛИЗ СВОЙСТВ ВИЗУАЛЬНО-ГРАФИЧЕСКОГО ОТОБРАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ О РЕЖИМАХ РАБОТЫ ДОЗИРУЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

© Д.Б. Федосенков¹, А.А. Симикина², С.М. Кулаков³, Б.А. Федосенков⁴

¹Сибирская генерирующая компания,

115054, Российская Федерация, г. Москва, ул. Дубининская, д. 53, стр. 5.

²Кемеровский государственный университет,

650000, Российская Федерация, г. Кемерово, ул. Красная, 6.

³Сибирский государственный индустриальный университет,

654041, Российская Федерация, г. Новокузнецк, пр. Бардина, 25.

⁴Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,

650000, Российская Федерация, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28.

РЕЗЮМЕ: Анализ свойств время-частотных отображений информации об одномерных сигналах расхода, характеризующих режимы работы дозирующего оборудования. Производился анализ свойств многомерных (2D/3D-) отображений во время-частотном пространстве для одномерных сигналов расхода при описании процесса дозирования устройствами непрерывного и дискретного действия в составе смесеприготовительного агрегата для производства мелкодисперсных сыпучих смесей. Представлены и описаны свойства визуально-графического отображения информации о режимах работы дозирующего оборудования. Одномерные сигналы расхода на выходе блока дозирующих устройств при этом отображаются в вейвлет-среде в двумерном/трехмерном пространстве. Такое преобразование переводит одномерные измерительные сигналы в многомерно-точечную среду, когда в каждой технологической точке смесеприготовительного агрегата одномерные материалопотоковые сигналы расхода представляются своими многомерными отображениями (распределениями энергии) во время-частотном пространстве. Рассмотрено четыре задачи анализа время-частотного распределения Вигнера, отображающие конкретные режимы процессов дозирования. Режимы дозирования характеризуются моно- и мультикомпонентными стационарными и нестационарными сигналами расхода, порождаемыми дозирующими устройствами непрерывного действия. При этом время-частотные отображения сигналов расхода представлены в виде многомерных распределений Вигнера и Чуи-Уилльямса в трехмерной – в первых трех задачах – и двумерной (в четвертой задаче) среде. В первой задаче описан практический пример расчета и анализа многомерного отображения стационарного и нестационарного время-частотно-зависимых чирп-сигналов с варьированием параметров последнего. Дано пояснение расчетной дискретности распределений Вигнера. В других задачах показан эффект демпфирования паразитных элементов в распределении Чуи-Уилльямса. В частности, во второй задаче рассмотрен вариант отображения двухкомпонентного гармонического сигнала, в третьей задаче представлен анализ сигнала дозирования с двумя чирп-компонентами с взаимно обратноизменяющимися частотами, в четвертой – анализируется также двухкомпонентный сигнал, один из которых представляет собой чирп-сигнал с линейно-возрастающей частотой, другой – сложный чирп-сигнал с падающей синусоидально-модулированной мгновенной частотой. В последней задаче также представлен практический пример получения многомерного отображения мультикомпонентного сигнала от

¹Федосенков Денис Борисович, кандидат технических наук, доцент, начальник отдела управления активами, e-mail: rafwavelet@ngs.ru

Denis B. Fedosenkov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Chief of the Department for Assets Administering, e-mail: rafwavelet@ngs.ru

²Симикина Анна Алексеевна, аспирант кафедры автоматизации производственных процессов и АСУ, e-mail: simikovaanna@mail.ru

Anna A. Simikova, Postgraduate student of the Department of Automation of Manufacturing Processes and Computer-aided Control Systems, e-mail: simikovaanna@mail.ru

³Кулаков Станислав Матвеевич, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации и информационных систем, e-mail: kulakov-ais@mail.ru

Stanislav M. Kulakov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Automation and Information Systems, e-mail: kulakov-ais@mail.ru

⁴Федосенков Борис Андреевич, доктор технических наук, профессор кафедры информационных и автоматизированных производственных систем, e-mail: kulakov-ais@mail.ru

Boris A. Fedosenkov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Information and Computer-aided Manufacturing Systems, e-mail: rafwavelet@ngs.ru



блока из двух и более дозаторов. Отмечена семантическая прозрачность отображений при мониторинговании процесса мультикомпонентного дозирования. Исправленное распределение Вигнера (Чуи-Уилльямса) является более целесообразным для целей автоматизированного контроля (в форме визуально-графического мониторинга) и автоматического управления в режимах стабилизации и слежения за динамикой нестационарных процессов различного характера, в том числе процессов дозирования в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе.

Ключевые слова: режимы дозирования, дозаторы непрерывного и дискретного действия, мультикомпонентные сигналы расхода, виртуальные элементы распределения, чирп-сигналы, отображения Вигнера и Чуи-Уилльямса

Информация о статье: Дата поступления 09 ноября 2018 г.; дата принятия к печати 30 ноября 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2018 г.

Для цитирования: Федосенков Д.Б., Симилова А.А., Кулаков С.М., Федосенков Б.А. Анализ свойств визуально-графического отображения информации о режимах работы дозирующего оборудования. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(12):135–144. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-135-144

FEATURE ANALYSIS OF VISUAL-GRAPHIC REPRESENTATIONS OF INFORMATION CHARACTERIZING BATCHING EQUIPMENT OPERATION MODES

Denis B. Fedosenkov, Anna A. Simikova, Stanislav M. Kulakov, Boris A. Fedosenkov

Siberian Generating Company,
53, Dubinskaya St., block 5, Moscow 115054, Russian Federation
Kemerovo State University,
6, Krasnaya St., Kemerovo 650000, Russian Federation
Siberian State Industrial University,
25, Bardin pr., Novokuznetsk 654041, Russian Federation
Gorbachev Kuzbass State Technical University,
28, Vesenniyaya St., Kemerovo 650000, Russian Federation

ABSTRACT: The purpose of the paper is the analysis of the properties of time-frequency representation of the information on one-dimensional flow signals characterizing the operation modes of batching equipment. The properties of multidimensional (2D/3D-) representations in the time-frequency space are analyzed for one-dimensional flow signals when describing the batching process performed by continuous and discrete-type devices as components of a mixture-producing unit for the production of finely dispersed dry compositions. The properties of the visual-graphic representation of information on operation modes of the batching equipment are given and described. One-dimensional flow signals at the output unit of batching devices are displayed in a wavelet environment in the two-dimensional/three-dimensional space. Such transformation transfers one-dimensional measurement signals into a multi-dimensional one-point environment where one-dimensional material-flow signals in each technological point of the batch preparation equipment are represented by their multidimensional presentations (energy distributions) in the time-frequency space. Consideration is given to four analysis problems of Wigner time-frequency distribution, which represent specific modes of a batching process. Batching modes are characterized by mono- and multi-component stationary and non-stationary flow signals generated by continuous-type batching devices. In this case time-frequency presentations of flow rate signals are presented in the form of multidimensional Wigner and Choi-Williams distributions in three-dimensional (in the first three problems) and two-dimensional (in the fourth problem) environments. The first task describes a practical example of calculation and analysis of a multidimensional presentations of stationary and non-stationary time-frequency-dependent (chirp) signals with varied parameters of the latter. The calculated discreteness of Wigner distributions is explained. Other problems demonstrate the effect of damping parasitic elements in the Choi-Williams distribution. In particular, the second problem deals with the representation variant of a two-component harmonic signal. The third task presents the analysis of a batching signal with two chirp components having mutually reverse frequencies. The fourth problem also analyzes a two-component signal, one of which is a chirp signal with a linearly increasing frequency, another – a complex chirp-signal with a falling sine-modulated instantaneous frequency. The last task also presents a practical example of obtaining a multidimensional presentation of a multi-component signal from the block of two or more batchers. The semantic transparency of representations is noted under monitoring of the process of multi-component batching. The corrected Wigner distribution (Choi-Williams one) is more appropriate for the purposes of computer-aided control (in the form of visual-graphic monitoring) and automatic control in the regimes of stabilization and tracking the dynamics of non-stationary processes of various nature including the batching processes in different branches of industry and agro-industrial complex.



Keywords: *batching modes, continuous-type and discrete batchers, multi-component flow rate signals, virtual distribution elements, chirp-signals, Wigner and Choi-Williams representations*

Information about the article: Received November 09, 2018; accepted for publication November 30, 2018; available online December 28, 2018.

For citation: Fedosenkov D.B., Simikova A.A., Kulakov S.M., Fedosenkov B.A. Feature analysis of visual-graphic representations of information characterizing batching equipment operation modes. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018; 22(12):pp. 135–144. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-135-144

Введение

При эксплуатации автоматизированных систем управления технологическими процессами приготовления смесей мелко-дисперсных материалов важным аспектом является наличие возможности контролировать текущие режимы работы оборудования на визуальном-графическом уровне, что, помимо функции мониторинга, позволяет синхронно осуществлять функцию управле-

ния динамикой протекающих на объекте процессов.

Рассмотрим несколько задач⁵ [1], созвучных по характеру свойств визуальном-графического отображения конкретным режимам работы дозирующих блоков непрерывного и дискретного действия различной конфигурации, представленным аналитическими моделями.

Задачи анализа свойств время-частотных распределений режимов дозирования

Задача 1. Блок дозирующих устройств включает один дозатор, сигнал разгрузки которого имеет форму чирп-подобной функции Габора [2, 3] с линейным ростом частоты, то есть функции произведения чирп-сигнала постоянной амплитуды и функции Гаусса,

$$s(t) = (\alpha/\pi)^{0.25} \exp(-\alpha t^2/2 + j\beta t^2/2 + j\omega_0 t). \quad (1)$$

Соответствующее сигнальное распределение Вигнера имеет вид

$$W(t, \omega) = \pi^{-1} \exp[-\alpha t^2 - (\omega - \beta t - \omega_0)^2 / \alpha]. \quad (2)$$

Прежде всего, следует отметить, что распределение Вигнера для такого сигнала положительно [2, 4]. В случае, когда сигнал

в виде функции Габора превращается в простой чирп-сигнал (при $\alpha = 0$), то есть псевдосинусоидальный сигнал с линейно возрастающей частотой, распределение (2) описывается выражением:

$$W(t, \omega) = \delta[(\omega - (\beta t + \omega_0))], \quad \text{при } \alpha = 0, \quad (3)$$

которое показывает, что энергия сигнала полностью концентрируется вдоль мгновенной частоты $(\omega_0 + \beta t)$, см. рис. 1 а. Если принять $\beta = 0$, то распределение будет сосредоточено только на неизменной несущей частоте ω_0 (рис. 1 б):

$$W(t, \omega) = \delta(\omega - \omega_0), \quad \text{при } \alpha, \beta = 0. \quad (4)$$

⁵Федосенков Б.А. Научно-технические основы создания и моделирования автоматизированных систем управления непрерывными смесеприготовительными процессами: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.06. М.: Изд. комплекс МГУПП, 2005. 55 с. / Fedosenkov B.A. Scientific and engineering fundamentals of creating and modeling of the computer-aided control systems for continuous-type mixture-producing processes: Doctoral dissertation in technical sciences: 05.13.06. M.: Moscow University of Food Production Publ., 2005. 55 p.

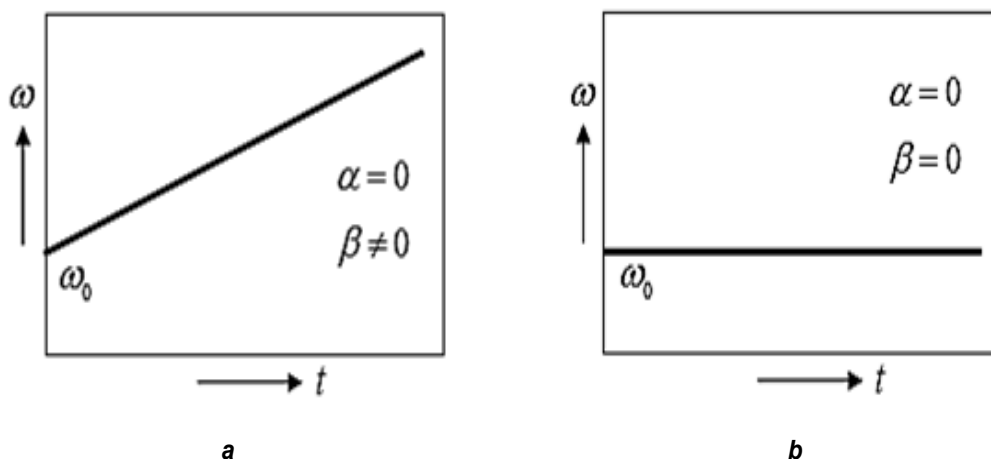


Рис. 1. Распределение Вигнера для: а – гармонического сигнала с время-зависимой частотой;
б – гармонического сигнала с постоянной частотой
Fig. 1. Wigner distribution for: a – harmonic signal with time-dependent frequency;
b – harmonic signal with a constant frequency

Расчетная дискретность и частотно-временной разброс отображения реального одномерного сигнала в виде его представления в 2D-пространстве, то есть в виде карты модифицированного сигнала материало потока (МСМ-карты) (рис. 2), объясняется, главным образом, действием следующих факторов:

1) неточностью адаптивной аппроксимации исходного сигнала вследствие неквадратичности скалярного произведения по всем отсчетам аппроксимируемого сегмента осциллограммы, то есть в силу соотношения

$$\langle x(t)_k, x(t)_k \rangle \neq \|x(t)\|^2,$$

где $\|x(t)\|^2 = \sum_{k=1, N_t} x(t)_k^2$; k – номер отсчета (дискреты) анализируемого сигнала; N_t – длина дискретного интервала (сегмента осциллограммы); $\|x(t)\|$ – норма сигнала;

2) генетической (присущей по определению) локальной «атомарностью» (ограниченностью величины носителя) вейвлет-функций, используемых для аппроксимации материало потоковых сигналов;

3) особенностью процедуры вейвлет-поиска соответствия, выражающейся в фрагментарности процесса «проецирования» тех или иных участков осциллограммы

исследуемого сигнала на соответствующие словарные поля вейвлет-тезауруса;

4) дискретностью исходного одномерного сигнала, участвующего в численной реализации двумерного распределения;

5) наличием краевых эффектов, вызванных наложением ограничения на ширину расчетного окна (интервала), ведущего к возникновению разрывов первого рода на границах интервала.

Карта Вигнера [5–7] для нестационарного время-частотно-зависимого сигнала на рис. 2 а зарегистрирована на интервале 900 с, а карта стационарного сигнала на рис. 2 б – на интервале 15 с. При этом частота нестационарного сигнала менялась в диапазоне 0,05–0,33 Гц, а стационарного оставалась стабильной на уровне 6,25 Гц.

Задача 2. Блок дозирования включает два дозатора, формирующих двухкомпонентный гармонический материало поток. При этом сигнал, предназначенный для дальнейшей обработки, имеет вид:

$$s(t) = X_{m1} \cdot \exp(j\omega_1 t) + X_{m2} \cdot \exp(j\omega_2 t),$$

где $\omega_1 \neq \omega_2$ – рабочие частоты дозирования.

Отметим, что предварительно первичные материало потоковые сигналы обрабатываются с помощью высокочастотной фильтрации, в ходе которой из исходного

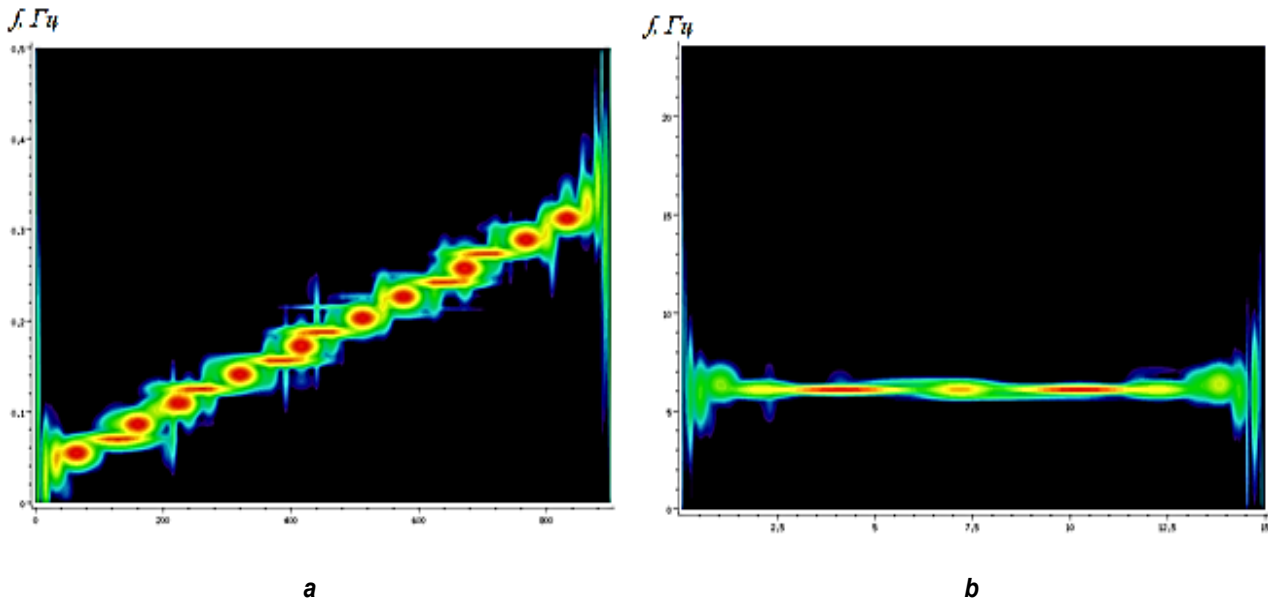


Рис. 2. Расчетные распределения Вигнера реальных сигналов дозирования для случаев:
а – формула (3); б – формула (4)

Fig. 2. Calculated Wigner distributions of real batching signals for the cases: a – formula (3); b – formula (4)

сигнала удаляется постоянная составляющая. Тогда исправленное распределение Вигнера [2, 5] (то есть распределение Чуи-Уилльямса [1, 2, 8, 9]) запишется следующим образом:

$$E(t, \omega) = X_{m1}^2 \delta(\omega - \omega_1) + X_{m2}^2 \delta(\omega - \omega_2) + 2X_{m1}X_{m2} \cos(\omega_2 - \omega_1)t \times$$

$$\times \sqrt{\frac{\sigma}{4\pi(\omega_1 - \omega_2)}} \times \exp \left\{ -\frac{\left[\omega - \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2) \right]^2 \sigma}{4(\omega_1 - \omega_2)^2} \right\}. \quad (5)$$

Отсюда видно, что распределение имеет вид суммы двух диракоподобных функций (как в вышеприведенном примере для одиночного дозатора), отражающих реальное распределение материалопотоковых сигналов, плюс паразитное распределение энергии материалопотока на полусуммарной частоте.

Введем обозначение:

$$\sqrt{\frac{\sigma}{4\pi(\omega_1 - \omega_2)}} \times \exp \left\{ -\frac{\left[\omega - \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2) \right]^2 \sigma}{4(\omega_1 - \omega_2)^2} \right\} = \Omega(\omega, \omega_1, \omega_2, \sigma).$$

Тогда при $\sigma \rightarrow \infty$

$$\lim_{\sigma \rightarrow \infty} \Omega(\omega, \omega_1, \omega_2, \sigma) = \delta \left[\omega - \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2) \right]. \quad (6)$$

Это значит, что на полусуммарной частоте происходят импульсные всплески в виде дельта-функций, объясняемые наличием виртуального члена, характеризующего интерференционную (паразитную) энергию в выражении исправленного распределения Вигнера (5). При этом для $\sigma = \infty$ ядро $\Phi(\theta, \tau) = \exp(-\theta^2 \tau^2 / \sigma)$ в составе обобщенного распределения:



$$E(t, \omega) = \frac{1}{4\pi^2} \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \exp[-j(\theta t + \omega \tau + \theta u)] \times \\ \times \Phi(\theta, \tau) \cdot S_k^*(u - \tau/2) \cdot S_l(u - \tau/2) du d\tau d\theta$$

становится равным: $\Phi(\theta, \tau) = 1$, что соответствует обычному распределению Вигнера с наличием виртуальных время-частотных компонент. Таким образом [1, 4, 10], при возрастании/уменьшении коэффициента коррекции σ интенсивность паразитных составляющих повышается/снижается.

Данная ситуация иллюстрируется на рис. 3.

На частотах дозирования ω_1 и ω_2 отображаются реальные процессы двухкомпонентного дозирования, а на паразитной частоте $\omega_{пар} = (\omega_1 + \omega_2)/2$ – виртуальный процесс. Все три компонента отображаются в виде диракоподобного распределения интенсивностей сигнала расхода (стены в форме совокупностей δ -импульсов). Здесь $\omega_1 = 1$, $\omega_2 = 9$, $\omega_{пар} = 5 \text{ с}^{-1}$. Высоты δ -функций ограничены значением 700. Распределениям (b) и (c) соответствуют коэффициенты коррекции σ , равные 10^6 и 10^5 .

Задача 3. Блок дозирования включает два дозатора, работающих в режимах расхода с время-частотно-зависимыми (то есть с чирп-подобными) сигналами. При этом формируется следующий сигнал материалопотока:

$$s(t) = X_{m1}(\alpha_1/\pi)^{0,25} \exp(-\alpha_1 t^2/2 + j\beta_1 t^2/2 + j\omega_1 t) + \\ + X_{m2}(\alpha_2/\pi)^{0,25} \exp(-\alpha_2 t^2/2 - j\beta_2 t^2/2 + j\omega_2 t).$$

На рис. 4 представлены распределения Вигнера (a) и Чуи-Уилльямса (b) (исправленное распределение Вигнера), отображающие сигнал дозирования. Виртуальные элементы распределения расположены между реальными концентрациями энергии, сосредоточенными вдоль мгновенных частот $(\omega_1 + \beta_1 t)$ – для первого дозатора, и $(\omega_2 - \beta_2 t)$ – для второго; $\omega_2 > \omega_1$ при $t = 0$. На распределении Чуи-Уилльямса паразитные элементы выглядят пренебрежимо малыми благодаря соответствующей величине коэффициента коррекции σ .

Задача 4. Блок дозирующих устройств включает два дозатора непрерывного действия; при этом один дозатор генерирует чирп-сигнал с мгновенной линейно-возрастающей частотой $\omega = \omega_1 + \beta_1 t$, другой – сигнал с мгновенной синусоидально-модулированной падающей частотой $\omega = \omega_2 - \beta_2 \sin \omega_m t$, причем во втором случае спад расхода происходит линейно с наличием динамической составляющей, изменяющейся по синусоидальному закону (на практике последний случай соответствует одному из режимов работы шнековых или спиральных дозаторов при возрастающей нагрузке):

$$s(t) = X_{m1} \exp(j\beta_1 t^2/2 + j\omega_1 t) + \\ + X_{m2} \exp(-j\beta_2 \sin \omega_m t + j\omega_2 t).$$

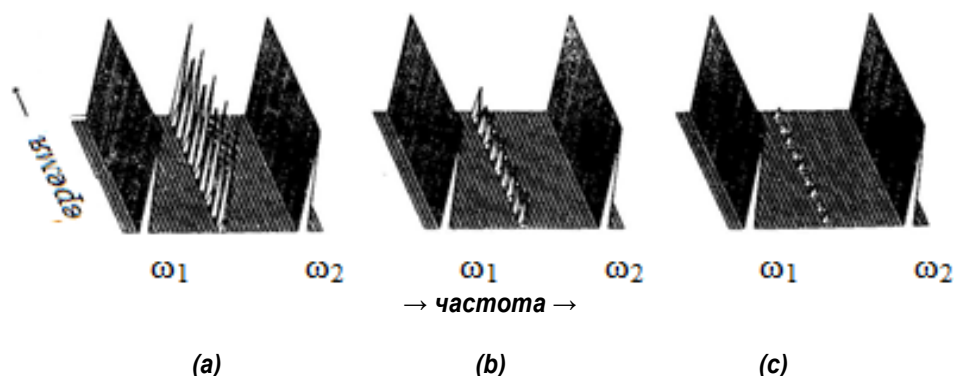


Рис. 3. Время-частотные распределения Вигнера (a) и Чуи-Уилльямса (b) и (c) для суммы двух гармонических сигналов расхода вида $s(t) = X_{m1} \cdot \exp(j\omega_1 t) + X_{m2} \cdot \exp(j\omega_2 t)$

Fig. 3. Time frequency distributions of Wigner (a) and Choi-Williams (b) and (c) time-frequency distributions for the sum of two harmonic flow rate signals of the form $s(t) = X_{m1} \cdot \exp(j\omega_1 t) + X_{m2} \cdot \exp(j\omega_2 t)$

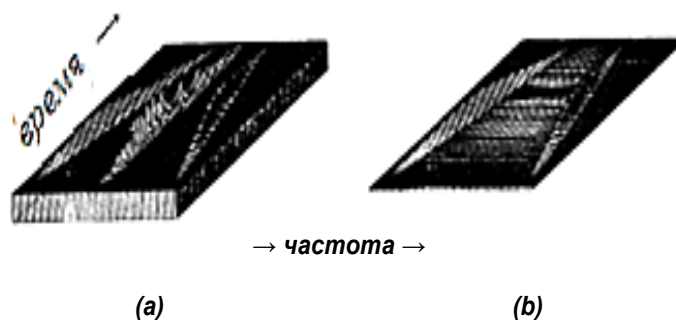


Рис. 4. Распределения Вигнера (а) и Чуи-Уилльямса (b) для суммы двух чирп-сигналов, соответственно, с возрастающей и спадающей мгновенными частотами
Fig. 4. Wigner (a) and Choi-Williams (b) distributions for the sum of two chirp signals, respectively, with increasing and decreasing instantaneous frequencies

На рис. 5 приведены карты распределений Вигнера и Чуи-Уилльямса, отображающие подобного рода двухкомпонентный сигнал.

Оба распределения показывают наличие концентраций интенсивности сигналов обоих дозаторов на мгновенных частотах $\omega = \omega_1 + \beta_1 t$ и $\omega = \omega_2 - \beta_2 \sin \omega_m t$, причем $\omega_1 > \omega_2$ при $t = 0$. На распределении Вигнера, помимо реальных концентраций

энергии, присутствует виртуальная концентрация в промежутке между указанными мгновенными частотами. На распределении Чуи-Уилльямса паразитная концентрация, вызванная интерференционными членами распределения, достаточно мала, поскольку демпфирована заданием соответствующего значения коэффициента коррекции.

Практические примеры визуально-графического отображения одномерных информационных сигналов расхода в многомерной среде

На рис. 6 представлен практический пример отображения результатов мониторинга процесса микродозирования: слева – нормированный центрированный материалоточный сигнал (в г/с) на выходе блока

из двух шнековых дозаторов, работающих в режимах наброса и сброса нагрузки, реконструированный по ВПС-алгоритму⁵ сигнал, ошибка аппроксимации; справа – карта Вигнера данного процесса.

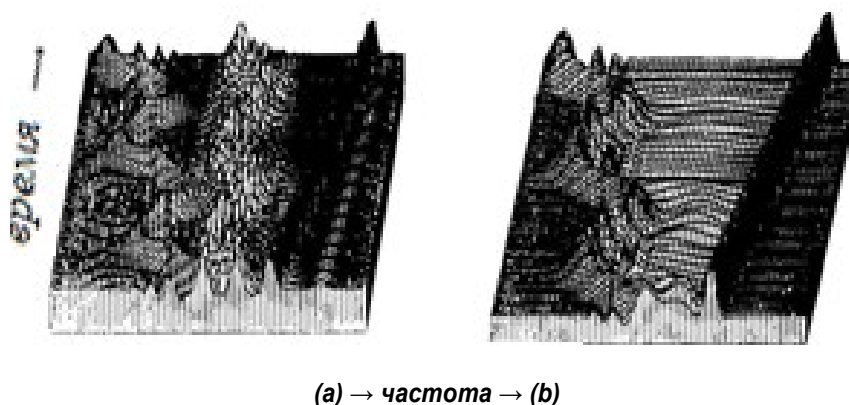


Рис. 5. Распределения Вигнера (а) и Чуи-Уилльямса (b) для двухкомпонентного сигнала
 $s(t) = X_{m1} \exp(j\beta_1 t^2/2 + j\omega_1 t) + X_{m2} \exp(-j\beta_2 \sin \omega_m t + j\omega_2 t)$

Fig. 5. Wigner (a) and Choi-Williams (b) distributions for the two-component signal
 $s(t) = X_{m1} \exp(j\beta_1 t^2/2 + j\omega_1 t) + X_{m2} \exp(-j\beta_2 \sin \omega_m t + j\omega_2 t)$

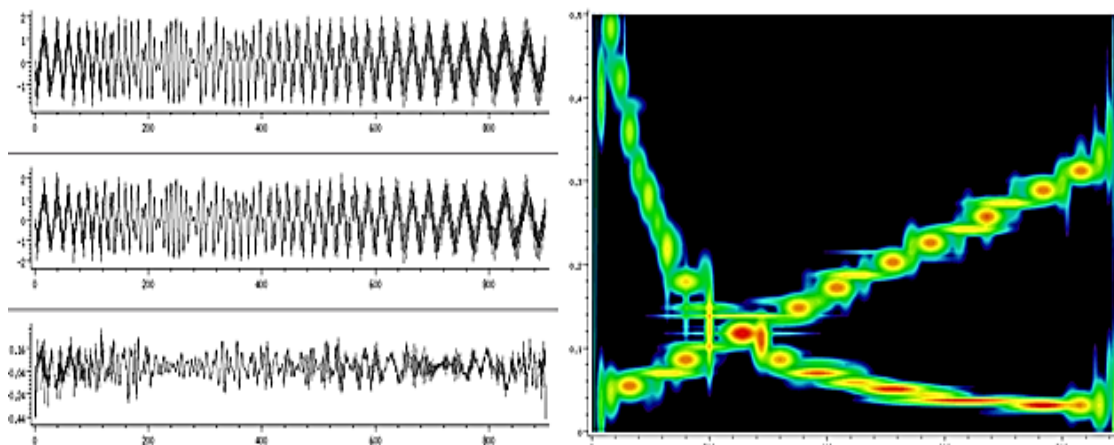


Рис. 6. Время-частотный мониторинг работы блока из двух дозирующих устройств
Fig. 6. Time-frequency monitoring of two batcher unit operation

Здесь ВПС-алгоритм (алгоритм вейвлет-поиска соответствия, или МР-алгоритм [2, 10–14]) является алгоритмом адаптивной аппроксимации одномерных сигналов дозирования вейвлетами, отбираемыми из специализированного словаря вейвлет-функций Габора. На карте Вигнера диапазоны частот в интервале регистрации сигнала дозирования на выходе блока дозаторов составляют: для режима сброса нагрузки для одного дозатора $f_{сбр} = 0,05$ –

0,33 Гц, для режима наброса нагрузки для другого дозатора $f_{наб} = 0,5$ –0,03 Гц. Интервал регистрации двухкомпонентного сигнала расхода $\Delta = 900$ с.

На рис. 7 приведена осциллограмма сигнала микродозирования сыпучих ингредиентов на выходе блока дозирующих устройств, состоящего из четырех дозаторов, и соответствующая этому сигналу время-частотная карта Вигнера в 2D-формате.

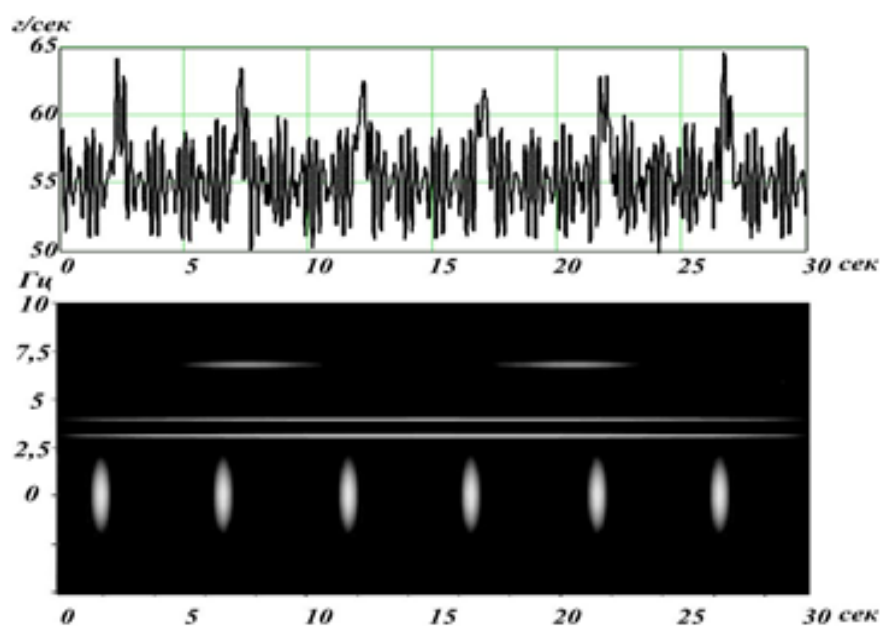


Рис. 7. Осциллограмма дозирования и карта Вигнера для блока из четырех дозаторов
Fig. 7. Batching oscillogram and a Wigner map for the unit of four batchers



В составе блока дозаторов два спиральных дозатора, работающих в непрерывном режиме с рабочими частотами 3,23 Гц и 4,02 Гц; один спиральный дозатор, формирующий дозы в дискретном режиме с периодом 13 с (с частотой следования порций 0,077 Гц) с частотой заполнения каждой дозы на уровне 6,89 Гц (период работы дозатора в непрерывном режиме составляет 0,145 с); один порционный дозатор, формирующий дозы на частоте следования 0,2 Гц с периодом 5 с. На карте Вигнера – в отличие от одномерной осциллограммы – отчетливо просматриваются все *частотные компоненты* материалопотоков отдельных дозаторов,

формирующие многокомпонентный сигнал дозирования, а также соответствующие временные *интервалы с их наличием или отсутствием*.

В системах автоматического регулирования (САР) – стабилизации или слежения – при использовании распределения Вигнера в качестве визуально-графического отображения текущих режимов САР, паразитные члены распределения в формуле (5) удаляются, причем удаляются непосредственно в процессе вычисления распределения и при отображении *2D / 3D-энергии* сигнала на технологическом мониторе.

Заключение

Следует отметить, что использование распределения Чуи-Уилльямса – по сравнению с распределением Вигнера – является более предпочтительным вследствие предоставления им возможности управлять интенсивностью виртуальных время-частотных атомов. В частности, такое предпочтение объясняется еще и тем, что отображение остаточных незначительных интенсивностей (служащих в качестве «маячков» текущего режима) виртуальной энергии на время-частотной карте позволяет контролировать реальные *рабочие частоты* элементов оборудования, генериру-

ющих соответствующие сигнальные компоненты, и при необходимости *корректировать их* в ходе управления процессом.

Таким образом, исправленное распределение Вигнера (Чуи-Уилльямса) является более целесообразным для целей автоматизированного контроля (в форме визуально-графического мониторинга) и управления в форме автоматического регулирования в режимах стабилизации и слежения за динамикой нестационарных процессов различного характера, в том числе и процессов дозирования в различных отраслях промышленности и аграрно-промышленном комплексе.

Библиографический список

1. Cohen L. Time-frequency distributions - A Review // Proceedings of the IEEE, 1989, July. Vol. 77. No. 7. P. 94–981.
2. Mallat St. A wavelet tour of signal processing, Academic Press, 2nd Ed., Ecole Polytechnique, Paris; Courant Institute, New York University, Library of Congress Catalog Card Number: 99-65087. 1999, Reprinted 2001. 637 p.
3. Boashash B., Touati S., Auger F., Flandrin P., Chassande-Mottin E., et al. Measures, performance assessment, and enhancement TFDs // Time-frequency signal analysis and processing: a comprehensive reference, Academic Press. 2016, January. P. 387–452.
4. Auger F., Chassande-Mottin, E. Quadratic time-frequency analysis I: Cohen's class / in "Time-frequency analysis: concepts and methods", ISTE. 2008 (January). P. 131–163.
5. Debnath L. Recent development in the Wigner-Ville distribution and time-frequency signal analysis, PINSA, 68, A, No. 1. 2002. January. P. 35–56.
6. Debnath L. Wavelet transforms and their applications, Birkhauser, Boston, 2002.
7. Mallat S., Zhang Z. Matching Pursuit With Time-Frequency Dictionaries, IEEE Transactions on Signal Processing. 1993. Vol. 41. No. 12. P. 3397–3414.
8. Choi H.L. and Williams W. J. IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing. 1989. Vol. 37. P. 862.
9. Мартыганова Е.П. Модель web-сервиса по специализированной обработке данных на основе жадных алгоритмов. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова. 2014. 86 p.
10. Townsend S., Lee B., Jr. Sparse Approximation and Atomic Decomposition: Considering Atom Interactions in Evaluating and Building Signal Representations, Dissertation, March 2009. 260 p.
11. Ferrando S.E., Doolittle E.J., Bernal A.J., Bernal L.J. Probabilistic matching pursuit with Gabor dictionaries,



Signal Processing. 2000. Vol. 80. P. 2099–2120.

12. Davis G.M., Mallat S.G., Zhang Z. Adaptive time-frequency decomposition with matching pursuit, Proc. SPIE 2242, Wavelet Applications. 402. 1994.

13. Gribonval R., Depalle P., Rodet X., Bacry E., and Mallat S. Sound signals decomposition using a high resolution matching pursuit. In Proc. Int. Computer Music

Conf. (ICMC'96), August 1996. P. 293–296.

14. Tropp J.A., Gilbert A.C. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit, IEEE Transactions on information theory. 2007. Vol. 53. No. 12. P. 4655–4666.

References

1. Cohen L. Time-frequency distributions - A Review // Proceedings of the IEEE, 1989, July, vol. 77, no. 7, pp. 94–981.

2. Mallat St. A wavelet tour of signal processing, Academic Press, 2nd Ed., Ecole Polytechnique, Paris; Courant Institute, New York University, Library of Congress Catalog Card Number: 99-65087. 1999, Reprinted 2001, 637 p.

3. Boashash B., Touati S., Auger F., Flandrin P., Chassande-Mottin E., et al. Measures, performance assessment, and enhancement TFDs // Time-frequency signal analysis and processing: a comprehensive reference, Academic Press. 2016, January, pp. 387–452.

4. Auger F., Chassande-Mottin, E. Quadratic time-frequency analysis I: Cohen's class / in "Time-frequency analysis: concepts and methods", ISTE. 2008 (January), pp. 131–163.

5. Debnath L. Recent development in the Wigner-Ville distribution and time-frequency signal analysis, PINSA, 68, A, No. 1. 2002. January, pp. 35–56.

6. Debnath L. Wavelet transforms and their applications, Birkhauser, Boston, 2002.

7. Mallat S., Zhang Z. Matching Pursuit with Time-Frequency Dictionaries, IEEE Transactions on Signal Processing. 1993, vol. 41, no. 12, pp. 3397–3414.

8. Choi H.L. and Williams W. J. IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing. 1989, vol. 37, pp. 862.

9. Martuganova E.R. *Model' web-servisa po specializirovannoj obrabotke dannyh na osnove zhadnyh algoritmov* [Web-service model for specific data processing based on greedy algorithms]. Moscow: Lomonosov Moscow State University Publ., 2014, 86 p. (In Russian)

10. Townsend S., Lee B., Jr. Sparse Approximation and Atomic Decomposition: Con-sidering Atom Interactions in Evaluating and Building Signal Representations, Dissertation, March 2009, 260 p.

11. Ferrando S.E., Doolittle E.J., Bernal A.J., Bernal L.J. Probabilistic matching pursuit with Gabor dictionaries, Signal Processing, 2000, vol. 80, pp. 2099–2120.

12. Davis G.M., Mallat S.G., Zhang Z. Adaptive time-frequency decomposition with matching pursuit, Proc. SPIE 2242, Wavelet Applications, 402, 1994.

13. Gribonval R., Depalle P., Rodet X., Bacry E., and Mallat S. Sound signals decomposition using a high resolution matching pursuit. In Proc. Int. Computer Music Conf., August, 1996, pp. 293–296.

14. Tropp J.A., Gilbert A.C. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit, IEEE Transactions on information theory, 2007, vol. 53, no. 12, pp. 4655–4666.

Критерии авторства

Федосенков Д.Б., Симикова А.А., Федосенков Б.А. предложили идею статьи, сформулировали цель и задачи исследования, разработали, спланировали и провели экспериментальную работу, проанализировали результаты исследований. Эти авторы несут ответственность за плагиат. Кулаков С.М. откорректировал тематику исследований и проанализировал полученные результаты. Авторы в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Fedosencov D.B., Simikova A.A., Fedosencov B.A. suggested the idea of the article, formulated the purpose and objectives of the study, developed, planned and conducted the experimental work, analyzed the study results. They bear the responsibility for plagiarism. Kulakov S.M. corrected the research topic and analyzed the obtained results. The authors bear equally responsible 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 681.3.016

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-12-145-156>

ФОРМИРОВАНИЕ МЕТАДАННЫХ МНОГОМЕРНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА БАЗЕ КЛАССИФИКАЦИОННЫХ СХЕМ

© М.Б. Фомин¹, Е.А. Кузнецов², С.Г. Шорохов³

^{1,3}Российский университет дружбы народов,
117198, Российская Федерация, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6.

²Лаборатория новых информационных технологий,
129075, Российская Федерация, г. Москва, Мурманский пр-д, 14.

РЕЗЮМЕ: Разработан способ формирования метаданных многомерной информационной системы путем сопряжения классификационных схем. Каждая классификационная схема представляет собой иерархию значений измерений, относящихся к отдельной структурной компоненте наблюдаемого явления. В основе метода лежит выявление групп значений измерений, которые связаны с группами значений других измерений. Группы значений разных измерений используются для построения кластеров сочетаний значений измерений. Сочетания кластера формируются декартовым произведением групп значений измерений. Метаданные информационной системы представлены в виде множества допустимых сочетаний значений измерений, которые формируются как набор кластеров. Для решения этой сложной задачи наблюдаемое явление рассматривается как набор структурных компонент. Из полного набора измерений информационной системы выделяются отдельные наборы измерений, семантически связанные со структурными компонентами наблюдаемого явления. Семантические связи, выявленные в процессе анализа структурной компоненты, позволяют построить иерархию групп значений измерений и представить их совокупность в виде графа – классификационной схемы, связанной со структурной компонентой. В информационных системах с многоаспектным описанием предметной области кубы данных характеризуются большой разреженностью, что затрудняет формирование метаданных. Классификационные схемы описывают отдельные аспекты метаданных, связанные с отдельными структурными компонентами наблюдаемого явления. Сопряжение классификационных схем дает возможность получить полное описание метаданных. Использование классификационных схем позволяет разбить задачу описания структуры аналитического пространства многомерной информационной системы на более простые задачи анализа его отдельных структурных компонент. Сопряжение классификационных схем, относящихся к разным структурным компонентам, дает возможность сформировать метаданные информационной системы. В метаданных центральное место занимает множество допустимых сочетаний значений измерений.

Ключевые слова: многомерная информационная система, многомерный куб данных, разреженный куб данных, классификационная схема, сочетание значений измерений, множество допустимых сочетаний

Информация о статье: Дата поступления 08 ноября 2018 г.; дата принятия к печати 30 ноября 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2018 г.

Для цитирования: Фомин М.Б., Кузнецов Е.А., Шорохов С.Г. Формирование метаданных многомерных информационных систем на базе классификационных схем. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(12):145–156. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-145-156

¹Фомин Максим Борисович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информационных технологий, e-mail: fomin-mb@rudn.ru

Maxim B. Fomin, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of Information Technology, e-mail: fomin-mb@rudn.ru

²Кузнецов Евгений Александрович, ведущий разработчик департамента цифровых решений, e-mail: kuznetsovea@lanit.ru

Evgeniy A. Kuznetsov, Leading programmer of the Department of Digital Solutions, e-mail: kuznetsovea@lanit.ru

³Шорохов Сергей Геннадьевич, кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры информационных технологий, e-mail: shorokhov-sg@rudn.ru

Sergey G. Shorokhov, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Senior Lecturer of the Department of Information Technology, e-mail: shorokhov-sg@rudn.ru



CLASSIFICATION SCHEME-BASED GENERATION OF MULTIDIMENSIONAL INFORMATION SYSTEM METADATA

M.B. Fomin, E.A. Kuznetsov, S.G. Shorokhov

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University),
6, Miklukho-Maklaya St., Moscow 117198, Russian Federation
Laboratory of New Information Technologies (LANIT)
14, Murmanskii proezd, Moscow 129075, Russian Federation

ABSTRACT: The purpose of the paper is development of a method for generating metadata of a multidimensional information system by classification scheme conjugation. Each classification scheme is a hierarchy of dimension values (members) related to a separate structural component of the observed phenomenon. The method is based on the identification of groups of dimension values that are associated with the groups of values of other dimensions. The groups of members for different dimensions are used to generate clusters of member combinations. Cluster combinations are generated by the Cartesian product of groups of members. The metadata of the information system are presented as a set of possible member combinations, which is formed as a set of clusters. To solve this complex problem the observed phenomenon is considered as a set of structural components. Separate sets of dimensions, which are semantically related to the structural components of the observed phenomenon, are distinguished from the complete set of dimensions of the information system. The semantic relationships identified in the analysis of the structural component allow to generate a hierarchy of groups of dimension values and represent all of them in the form of a graph – a classification scheme associated with the structural component. In information systems with a multidimensional representation of a subject domain, data cubes are characterized by high sparseness, which complicates metadata generation. The classification schemes describe specific aspects of the metadata associated with the individual structural components of the observed phenomenon. Conjugation of the classification schemes allows to obtain a complete description of the metadata. The use of classification schemes provides the opportunity to divide the task of describing the structure of the multidimensional information system analytical space into simpler tasks of analysis of its individual structural components. The conjugation of classification schemes related to different structural components enables the generation of information system metadata. The central place in the metadata belongs to the set of possible member combinations.

Keywords: *multidimensional information system, multidimensional data cube, sparse data cube, classification scheme, combination of measurement values, set of possible member combinations*

Information about the article: Received November 08, 2018; accepted for publication November 30, 2018; available online December 28, 2018.

For citation: Fomin M.B., Kuznetsov E.A., Shorokhov S.G. Classification scheme-based generation of multidimensional information system metadata. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018; 22(12):pp. 145–156. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-145-156

Введение

В информационной системе, в которой показатели, характеризующие наблюдаемое явление, представлены в многомерной форме, размерностями куба данных являются измерения. Каждое измерение соответствует некоторому аспекту анализа наблюдаемого явления. В случае если система содержит большой объем семантически разнородных данных, многомерный куб данных характеризуется высокой разреженностью и неравномерностью заполнения [1]. Модель данных информационной системы формируется в соответствии со следующим

принципом: каждая значимая ячейка многомерного куба соответствует некоторому факту. Для эффективного описания структуры многомерного куба может быть использован кластерный метод. Этот метод базируется на семантическом анализе сочетаемости значений разных измерений в значимых ячейках куба [2]. Он позволяет описать метаданные информационной системы в виде множества допустимых сочетаний значений измерений. Допустимые сочетания ставятся в соответствие значимым ячейкам многомерного куба.



Постановка задачи

В случае если многомерная информационная система создается для описания семантически разнородных фактов, и структура аналитического пространства содержит большое число измерений, многомерный куб данных характеризуется значительной разреженностью, которая должна быть отражена в модели данных [3–9]. В этой ситуации при описании множества допустимых сочетаний возникает сложная задача анализа сочетаемости значений всех измерений куба в совокупности. Эта задача может быть упрощена в случае если наблюдаемое явление допускает разделение на набор структурных компонент, каждая из которых имеет свои аспекты анализа. Учет семантики имеет важное значение при построении модели данных [10]. Разделение на набор структурных компонент позволяет выделить в аналитическом пространстве наборы измерений, ассоциированные со структурными компонентами, и рассматривать сочетаемость значений измерений в каждом наборе измерений по отдельности.

Можно предложить метод построения множества допустимых сочетаний значений измерений многомерного куба, состоящий из следующих этапов:

- разбиение наблюдаемого явления, которое описывает информационная система, на структурные составляющие;

- анализ сочетаемости значений измерений, характеризующих эти структурные составляющие;

- построение классификационных схем, содержащих описание допустимых сочетаний значений измерений по отдельности для каждой структурной составляющей;

- соединение сочетаний, взятых из разных классификационных схем, во множество допустимых сочетаний значений измерений многомерного куба в совокупности.

В процессе выполнения описанного выше алгоритма характеристики наблюдаемого явления и связи между ними надо рассматривать с позиции классификации, которая отражала бы семантику наблюдаемого явления. В качестве характеристик выступают измерения куба данных. Классификацию характеристик можно выполнить с использованием иерархического принципа. В этом случае выявленные свойства могут быть представлены в форме связного ациклического графа. Характеристики наблюдаемого явления разделяются по признаку значимости и распределяются по разным уровням иерархии графа. После формирования иерархии характеристик можно переходить к построению графа, используя при этом попарный анализ сочетаемости значений измерений, соответствующих характеристикам, расположенным в иерархии одна под другой.

Описание разреженного куба данных с использованием сочетаний значений измерений

Каждому аспекту анализа наблюдаемого явления, для описания которого разрабатывается многомерная информационная система, соответствует одно из измерений многомерного куба H . Полный набор измерений образует множество $D(H) = \{D^1, D^2, \dots, D^n\}$, где D^i – i -е измерение, $n = \dim(H)$ – размерность многомерного куба. Измерение задается множеством значений измерения: $D^i = \{d_{1_i}^i, d_{2_i}^i, \dots, d_{k_i}^i\}$, где k_i – число значений i -го измерения. Значения измерения D^i

выбираются из множества позиций классификатора, который соответствует тому аспекту наблюдаемого явления, который связан с измерением D^i .

Многомерный куб данных является структурированным набором ячеек. Каждой ячейке c многомерного куба может быть сопоставлено сочетание значений измерений $c = (d_{1_i}^1, d_{2_i}^2, \dots, d_{i_n}^n)$, по одному значению для каждого из измерений [11]. В случае разреженного куба не все возможные сочета-



ния значений измерений соответствуют значимым, то есть описывающим факты, ячейкам куба.

В случае если многомерный куб содержит семантически разнородные данные, возможна ситуация, когда значения некоторых измерений не могут быть заданы в сочетании с имеющимся набором значений других измерений. В такой ситуации при описании значимой ячейки многомерного куба значения некоторых измерений не могут быть определены. Для задания значений этих семантически неопределенных измерений может применяться специальное значение «Не используется» [11]. Мы будем использовать такой расширенный способ задания значений измерений в ячейках. Структуру многомерного куба данных информационной системы в этом случае можно описать как множество допустимых сочетаний значений измерений. В сочетаниях этого множества могут использоваться значения, взятые из классификаторов, соответствующих измерениям, и специальное значение «Не используется». Для обозначения множества допустимых сочетаний значений измерений будем использовать аббревиатуру «МДС».

Использование кластерного метода описания структуры многомерного куба данных

Структура МДС описывает семантику наблюдаемого явления, информация о котором содержится в многомерном кубе данных. Выявить структуру многомерного куба данных может помочь классификационный подход [12–15]. Для установления связей между элементами различных размерностей могут быть использованы непараметрические методы статистического анализа [16]. Сжатое описание МДС, учитывающее семантику, может быть получено с помощью кластерного метода, который основан на анализе попарных связей между значениями измерений [17]. Кластерный метод позволяет выявить группы значений измерений. Группа $G_j^i = \{d_1^i, d_2^i, \dots, d_{m_j}^i\}$ значений i -го измерения включает m_j значений ($1 \leq m_j \leq k_i$), где j – номер группы, и содержит

Наблюдаемое явление характеризуется значениями показателей, заданными в значимых ячейках многомерного куба. Полный набор показателей образует множество $V(H) = \{v_1, v_2, \dots, v_p\}$, где v_j – j -й показатель, p – число показателей в гиперкубе. В значимой ячейке могут быть заданы не все показатели из $V(H)$. Такая ситуация возникает в случае семантического несоответствия между значениями измерений, задающими ячейку, и некоторыми показателями. При описании МДС для каждой значимой ячейки c требуется задать свое множество $V(c) = \{v_1, v_2, \dots, v_{p_c}\}$, состоящее из определенных в этой ячейке показателей, $1 \leq p_c \leq p$. Для описания в ячейке c показателей, не входящих во множество $V(c)$, будем применять специальное значение «Не используется». Должно выполняться правило: множество показателей $V(c)$, заданных в значимой ячейке c , не может быть пустым. Описание показателей в незначимых ячейках многомерного куба, соответствующих сочетаниям значений измерений, не входящим в МДС, не имеет смысла.

значения измерения, которые «одинаково» сочетаются в МДС со значениями из некоторых групп других измерений.

С помощью семантического анализа наблюдаемого явления можно выявить связанные группы значений в разных измерениях. Кластер сочетаний K – множество сочетаний значений измерений, которое может быть получено при помощи операции декартова произведения, в которой операндами являются группы значений измерений или специальное значение «Не используется», по одному операнду для каждого из измерений, используемых в кластере: $G_1 \times G_2 \times \dots \times G_n$. Кластеры сочетаний могут быть использованы при описании МДС.

В наблюдаемом явлении можно выделить различающиеся смысловые компоненты. В этом случае можно сформировать



подмножества сочетаний, каждое из которых соответствует своей смысловой компоненте. Подмножество сочетаний является объединением кластеров сочетаний. Оно может быть построено как результат анализа сочетаемости характеристик наблюдаемого явления, соответствующих некоторой его смысловой компоненте. Технически характеристики отображаются в кластерах в виде значений измерений многомерного куба.

Кластерный метод позволяет получить описание МДС для многомерного куба H путем выполнения следующих шагов.

1. В структуре наблюдаемого явления должны быть выделены N семантических компонент. Этим компонентам должны быть сопоставлены подмножества сочетаний Q_k , $k = 1, \dots, N$. Должно быть построено выражение для множества допустимых сочетаний $\text{МДС}(H)$, в котором подмножества Q_k связаны при помощи теоретико-множественных операций объединения, пересечения и дополнения.

2. В каждом подмножестве Q_k должны быть выделены слои измерений $L^i = \{D^{j_1}, D^{j_2}, \dots, D^{j_{l_i}}\}$, где $i = 1, \dots, m_k$ – номер слоя в подмножестве, m_k – количество слоев, j_i – номер измерения в слое, $j = 1, \dots, l$, l – количество измерений в i -м слое. Слой измерений – это набор измерений, сочетаемость значений которых во множестве не зависит от того, какие значения в сочетаниях принимают измерения, не входящие в слой. В случае если известны подмножества

сочетаний значений измерений для каждого из слоев измерений, подмножество сочетаний Q_k может быть получено при помощи декартова произведения по слоям: $Q = \text{МДС}(L^1) \times \text{МДС}(L^2) \times \dots \times \text{МДС}(L^m)$. Здесь $\text{МДС}(L^i)$ – множество сочетаний значений измерений i -го слоя.

3. Для каждого из слоев L^i подмножества Q_k подмножество допустимых сочетаний $\text{МДС}(L^i)$ должно быть представлено в виде набора кластеров сочетаний в слое. Каждый кластер в слое определяется набором групп значений измерений G_j^k , k – номер измерения в слое, j – номер группы, $j = 1, \dots, l$: $K = \{G_1^{j_1}, G_2^{j_2}, \dots, G_l^{j_l}\}$. Сочетания кластера могут быть получены декартовым произведением групп значений измерений (или специального значения «Не используется» вместо группы), по одной группе для каждого из измерений слоя:

$$\text{МДС}(K) = G_1^{j_1} \times G_2^{j_2} \times \dots \times G_l^{j_l}.$$

На рис. 1 представлена диаграмма, описывающая взаимосвязь структурных элементов МДС.

Можно выделить два типичных случая разбиения наблюдаемого явления на смысловые компоненты и представления $\text{МДС}(H)$ с использованием нескольких подмножеств. Первый – когда при анализе разных смысловых компонент возникают разные разбиения измерений на слои, второй –

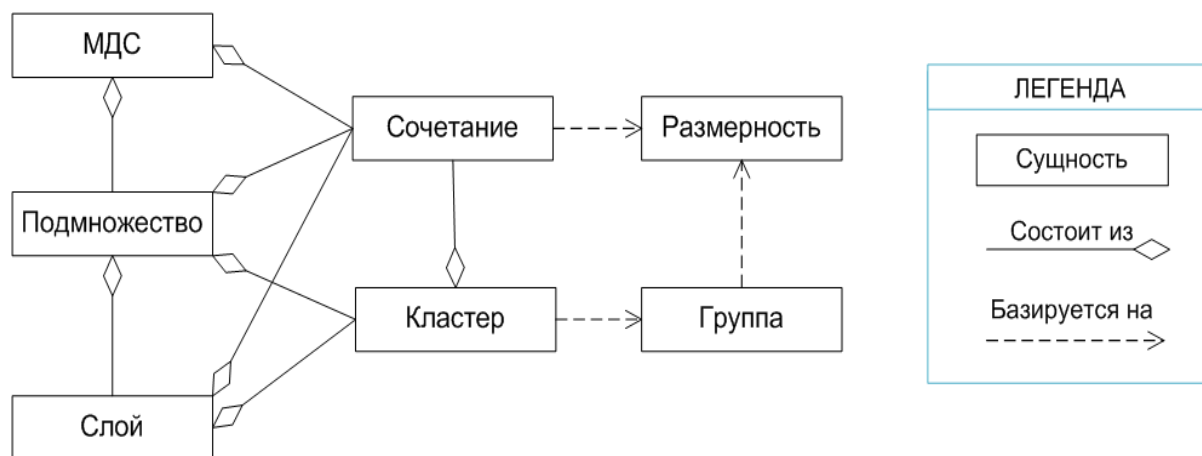


Рис. 1. Диаграмма структуры множества допустимых сочетаний значений измерений
Fig. 1. Structural diagram of the set of possible member combinations



когда имеется простой способ построения подмножества, описывающего МДС с избытком, и эффективный способ описания сочетаний, которые должны быть исключены из этого подмножества, чтобы сократить его до МДС.

В первом случае разбиению наблюдаемого явления на l смысловых компонент соответствует объединение подмножеств сочетаний значений измерений:

$$SPMC(H) = Q_1 \cup Q_2 \cup \dots \cup Q_l.$$

В силу семантических различий этих смысловых компонент множество измерений в разных подмножествах может быть по-разному разбито на слои:

$$D(H) = L_1^1 \cup L_1^2 \cup \dots \cup L_i^{m_i},$$

где $i = 1 \dots l$ – номер разбиения, m_i – число слоев в i -м разбиении. Каждое подмножество Q_i формируется в соответствии со своим разбиением множества измерений на слои.

Описание наблюдаемого явления набором классификационных схем

Процесс описания свойств наблюдаемого явления в рамках многомерной модели данных с позиций семантики заключается в выявлении классификационных признаков (измерений многомерного куба) и установлении связей между ними. При этом наблюдаемое явление не рассматривается как многокомпонентный объект, и классификационные признаки не ранжируются: среди них не выделяются главные и второстепенные. Установление связей между измерениями производится путем поиска соответствия между их значениями. В случае большого числа измерений это сложная задача, недостатки такого подхода могут быть устранены введением в модель данных информационной системы дополнительных объектов – классификационных схем характеристик наблюдаемого явления (будем использовать для их обозначения аббревиатуру «КСХ»). Установим для КСХ следующие требования:

Во втором случае множество допустимых сочетаний представляется в виде разности подмножеств:

$$MDC(H) = R \setminus Q,$$

где R – множество сочетаний, описанное с избытком (сокращаемое подмножество), а Q – множество исключаемых сочетаний. Сокращаемое подмножество может быть сформировано с использованием следующего правила: в него включаются сочетания, полученные декартовым произведением всех значений измерений, дополненные набором сочетаний, содержащих значение «Не используется» для некоторых измерений, с исключением тех сочетаний, которые могут быть получены заменой специального значения «Не используется» на допустимое значение. Такой подход может быть использован в случае, если множество $MDC(H)$ имеет сложную структуру и известен простой алгоритм формирования подмножества Q .

1. При задании КСХ должна учитываться компонентная структура наблюдаемого явления. Если наблюдаемое явление семантически может быть разделено на отдельные структурные составляющие, для каждой из которых может быть выбран свой набор аспектов анализа, каждой такой составляющей должна сопоставляться КСХ. Процедура построения КСХ должна базироваться на выявлении и анализе соответствующих выбранным аспектам анализа характеристик. Характеристикам должны быть сопоставлены измерения многомерного куба.

2. Классификационные схемы характеристик наблюдаемых явлений должны быть построены по иерархическому принципу. Среди относящихся к КСХ характеристик должно быть установлено ранжирование, выделяющее измерения, которые в большей и в меньшей степени выражают



смысл структурной составляющей наблюдаемого явления, которая сопоставлена КСХ. Должно быть выбрано главное измерение, которое в наибольшей степени отражает семантику соответствующей КСХ структурной составляющей. Из остальных измерений, включенных в КСХ, которые с семантической точки зрения подчинены главному измерению и выражают частные свойства структурной составляющей наблюдаемого явления, должна быть сформирована иерархия характеристик. Должен быть реализован следующий принцип: значения главного измерения выражают наиболее значимые свойства наблюдаемого явления; значения измерений, лежащих ниже по иерархии по отношению к главному, выражают подчиненные свойства, уточняющие смысл значений главного измерения.

3. При построении иерархий характеристик наблюдаемого явления в КСХ должна быть возможность описания значений главного измерения по-отдельности или группами значений, поскольку разные значения могут быть связаны с разными аспектами семантики структурной составляющей наблюдаемого явления. Для значений главного измерения, имеющих такое семантическое различие, должны быть построены разные иерархии характеристик.

4. В иерархии характеристик, которая имеется в КСХ, должна присутствовать информация о том, какой набор показателей количественно описывает наблюдаемое явление в случае выбора конкретных значений измерений, присутствующих в иерархии.

Примером наблюдаемого явления, которое может быть разбито на отдельные структурные составляющие, может служить «Кредитование». Четыре его компоненты, которым могут быть сопоставлены КСХ: «Участники операций кредитования», «Инструменты операций кредитования», «Условия сделок операций кредитования» и «Факторы риска операций кредитования».

В процессе разработки информационной системы классификационные схемы могут взять на себя роль источника классификационной информации о наблюдаемом явлении. При этом семантически КСХ связана со структурной составляющей наблюдаемого явления и может быть источником информации о характеристиках структурной составляющей, представленной в иерархической форме. Технологически КСХ связана с измерениями многомерного куба данных и может быть шаблоном при построении мета-данных многомерной информационной системы.

Представление классификационной схемы в виде дерева сочетаний

Классификационная схема характеристик наблюдаемого явления – объект многомерной информационной системы, описывающий структурную составляющую наблюдаемого явления, и содержащий следующие данные:

- набор измерений, включенных в классификационную схему;
- набор значений этих измерений, включенных в классификационную схему;
- главное измерение, выбранное в наборе измерений КСХ;
- набор показателей, включенных в классификационную схему;
- дерево сочетаний значений измерений КСХ, задающее иерархию характеристик, включенных в КСХ.

Иерархический принцип построения КСХ реализуется в структуре дерева сочетаний значений измерений КСХ. Дерево сочетаний КСХ может быть построено как результат семантического анализа структурной составляющей наблюдаемого явления. Дерево можно определить путем описания процедуры его построения. Построение дерева должно осуществляться движением от корня дерева, в котором заданы группы значений ключевого измерения, вниз по уровням иерархии с добавлением в дерево на каждом шаге группы значений измерений, раскрывающей смысл значений измерения предыдущего уровня иерархии. При этом на следующий уровень должна быть добавлена группа, относящаяся к измерению, в

наибольшей степени связанному со значениями измерения предыдущего уровня. Как следствие, в разных ветвях дерева на путях от корня к листьям могут возникать разные последовательности измерений КСХ.

При обходе дерева КСХ от значений главного измерения вниз по уровням иерархии, значения измерений, расположенные на этих уровнях, по мере обхода выражают все менее значимые свойства наблюдаемого явления. Тем самым в дереве КСХ устанавливается ранжирование характеристик наблюдаемого явления.

В результате выполнения описанного выше алгоритма происходит построение дерева сочетаний значений измерений КСХ, обладающее структурой, для которой выполняются следующие правила:

1. Корнем дерева является узел «Ключевое измерение».

2. Дерево представляет собой иерархическую структуру, в которой уровни задаются чередованием узлов типа «Группа значений измерения» и узлов типа «Измерение». При этом группы значений измерений должны быть заданы в измерениях, соответствующих узлам, расположенным в дереве на один уровень выше по иерархии.

3. Листьями дерева являются узлы типа «Группа значений измерения».

4. Узлу типа «Группа значений измерения» (кроме узла, являющегося листом дерева) должен соответствовать один узел типа «Измерение» на расположенном ниже уровне иерархии дерева. Узлу типа «Измерение» может соответствовать один узел или несколько узлов типа «Группа значений измерения» на расположенном ниже уровне иерархии дерева.

5. На пути от корня до листа каждое измерение может встречаться не более чем один раз.

Пример дерева сочетаний значений измерений представлен ниже (рис. 2).

Каждый путь от корня дерева сочетаний к листу содержит некоторый набор групп значений разных измерений. Это означает, что путь задает кластер сочетаний значений измерений КСХ. Для формирования полного набора кластеров сочетаний требуется обойти все дерево. В процессе обхода дерева в ширину число формируемых кластеров увеличивается каждый раз, когда на некотором уровне иерархии встречается несколько групп значений, относящихся к одному узлу типа «Измерение». В случае если

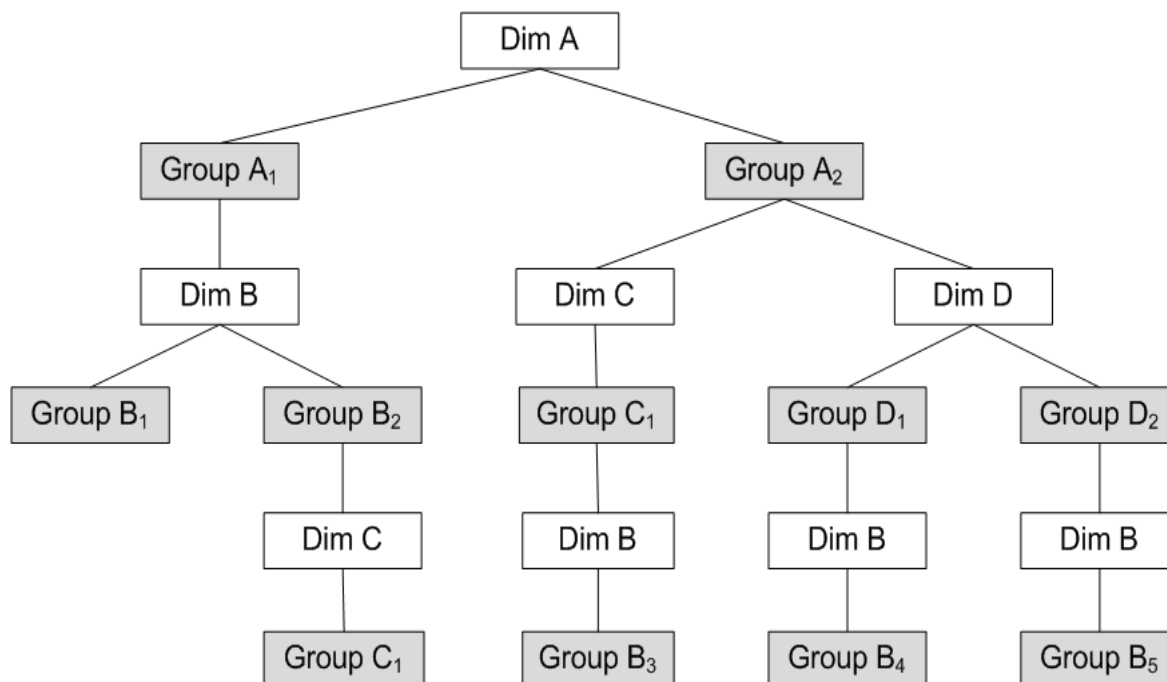


Рис. 2. Пример дерева сочетаний значений измерений классификационной схемы
Fig. 2. An example of a tree of classification scheme member combinations



на пути от корня дерева к листу отсутствует некоторое измерение, которое имеется в структуре КСХ, это измерение должно принимать значение «Не используется» в кластере, который соответствует рассматриваемому пути.

Кластеры сочетаний значений измерений для КСХ, дерево сочетаний значений измерений которой представлено на рис. 2, приведены ниже (таблица).

С позиций семантики каждый кластер, имеющийся в дереве сочетаний клас-

сификационной схемы, соответствует своему набору свойств наблюдаемого явления. В информационной системе эти свойства описываются значениями некоторого набора показателей, включенных в классификационную схему. В разных кластерах могут быть заданы разные наборы показателей. Информация о том, какие показатели заданы в кластере сочетаний КСХ, должна быть описана в дереве сочетаний значений измерений КСХ в виде атрибутов листьев дерева сочетаний.

Кластеры сочетаний значений измерений классификационной схемы
Clusters of classification scheme member combinations

№	Измерение А	Измерение В	Измерение С	Измерение D
1	A1	B1	Не используется	Не используется
2	A1	B2	C1	Не используется
3	A2	B3	C1	Не используется
4	A2	B4	Не используется	D1
5	A2	B5	Не используется	D2

Формирование структуры многомерного куба данных
с использованием классификационных схем

Важным свойством КСХ является возможность использовать сочетания значений измерений, которые в них описаны, при формировании метаданных информационной системы. Набор измерений многомерного куба формируется исходя из следующего принципа: в нем должны присутствовать все характеристики, от которых могут зависеть показатели, используемые при анализе наблюдаемого явления. Построение МДС на таком «широком» наборе измерений многомерного куба является сложной задачей. Решить эту задачу помогает использование КСХ, которые играют классификационную функцию по отношению к МДС.

В каждой из КСХ, относящейся к наблюдаемому явлению, уже содержится информация о сочетаемости значений той части измерений, которые связаны с отдельными свойствами этого наблюдаемого явления. Задача состоит в том, чтобы правильно соединить сочетания из разных КСХ

вместе во множестве допустимых сочетаний. При соединении сочетаний двух КСХ может возникнуть одна из следующих ситуаций:

- измерения, включенные в первую КСХ, отсутствуют во второй и наоборот;
- наборы измерений, имеющиеся в КСХ, частично пересекаются.

В первой ситуации сочетаемость значений измерений одной КСХ не зависит от значений измерений другой КСХ. Такая ситуация соответствует случаю, когда МДС, описывающее структуру многомерного куба данных, разбито на слои. Для каждой из КСХ в этом случае МДС (КСХ) является описанием одного из слоев МДС (H).

В ситуации пересечения наборов измерений, относящихся к двум стыкуемым КСХ, при формировании сочетаний МДС(H) возникает задача продолжения сочетаний одной КСХ сочетаниями другой КСХ с частичным перекрытием по измерениям. Эта задача может не иметь единственного ре-



шения. Выбор правильного варианта построения $МДС(H)$ в описанной ситуации должен производиться аналитиком на основе семантического анализа. При этом должны быть решены следующие вопросы:

– если значения измерений в сочетаниях из разных КСХ в области пересечения измерений совпадают, считать ли такие со-

четания продолжением друг друга, или считать, что каждое из них порождает свое сочетание в $МДС(H)$;

– если для некоторого сочетания из одной КСХ есть несколько продолжений в другой КСХ, какой из возможных вариантов продолжения выбрать при формировании сочетания в $МДС(H)$.

Заключение

Метаданные многоаспектной многомерной информационной системы, спроектированной с использованием кластерного метода, имеют структуру разреженного и неравномерно заполненного многомерного куба. Формирование таких метаданных является сложной задачей, решить которую можно, рассматривая наблюдаемое явление, которое описывает информационная система в виде совокупности структурных составляющих. Каждой структурной составляющей соответствует классификационная схема, данные которой могут быть представлены в виде множества допустимых сочетаний значений измерений, связанных с характеристиками этой структурной составляющей. Классификационные схемы, в сравнении с метаданными информационной системы в целом, описывают узкий набор свойств наблюдаемого явления и представляют характеристики этих свойств в иерархической форме. Решить задачу построения классификационных схем позволяет семантический анализ характеристик структурных составляющих наблюдаемого явления, каждой структурной составляющей по отдельности. Ограниченный набор характеристик в КСХ упрощает процесс формирования иерархии значений характеристик.

В результате появляется возможность выявления внутренней структуры многомерного куба данных. Подмножества измерений, включенных в разные классификационные схемы, частично пересекаются. Состыковка сочетаний из разных КСХ в соответствии со значениями измерений, лежащих в области пересечения, позволяет восстановить структуру многомерного куба данных информационной системы. Эта процедура должна быть выполнена с участием аналитика, который принимает решение о выборе способа продолжения сочетания в случае многозначности.

В случае разработки большой многоаспектной многомерной информационной системы использование кластерного подхода для описания множества допустимых сочетаний значений измерений позволяет обеспечить компактность при задании метаданных и выразить семантику анализируемого наблюдаемого явления. В основе предлагаемого подхода лежит выявление связей между измерениями, которые отражают свойства наблюдаемого явления, и формирование групп значений измерений, элементы которых объединены схожим поведением по отношению к этим связям.

Библиографический список

1. Thomsen E. OLAP Solution: Building Multidimensional Information System. NY, Wiley Computer Publishing. 2002. 688 p.
2. Висков А.В., Фомин М.Б. Методы описания допустимых сочетаний реквизитов-признаков при использовании многомерных моделей в инфокоммуникационных системах // Т-Comm. Телекоммуникации и Транспорт. 2012. № 7. С. 45–47.

3. Hirata, C.M., Lima, J.C. Multidimensional cyclic graph approach: representing a data cube without common sub-graphs. Information Sciences. 2011. Vol. 181. P. 2626–2655. DOI: 10.1016/j.ins.2010.05.012
4. Luo Z.W., Ling T.W., Ang C.H., Lee S.Y., Cui B. Range top/bottom k queries in OLAP sparse data cubes. In: Mayr H.C., Lazansky J., Quirchmayr G., Vogel P. Database and Expert Systems Applications – DEXA 2001.



- Vol. 2113. P. 678–687. Heidelberg, Springer, 2001. P. 678–687. DOI: 10.1007/3-540-44759-8_66
5. Vitter J.S., Wang M. Approximate computation of multidimensional aggregates of sparse data using wavelets. In: Proceedings of the 1999 International Conference on Management of Data – SIGMOD 1999. New York, ACM. 1999. P. 193–204. DOI:10.1145/304182.304199
6. Messaoud R.B., Boussaid O., Rabaseda S.L. A multiple correspondence analysis to organize data cube. In: Databases and Information Systems IV – DB&IS 2006. Vilnius, IOS Press. 2007. P. 133–146.
7. Karayannidis N., Sellis T., Kouvara Y. CUBE file: a file structure for hierarchically clustered OLAP cube. In: Bertino E., Christodoulakis S., Plexousakis D., Christophides V., Koubarakis M., BEohm K., Ferrari E. Advances in Database Technology – EDBT 2004, vol. 2992. Heidelberg, Springer, 2004. P. 621–638. DOI: 10.1007/978-3-540-24741-8_36
8. Chen C., Feng J., Xing L. Computation of sparse data cubes with constraints. In: Kambayashi Y., Mohania M., Wob W. Data Warehousing and Knowledge Discovery – DaWaK 2003. Vol. 2737. Heidelberg, Springer. 2003. P. 14–23. DOI: 10.1007/978-3-540-45228-7_3
9. Wang W., Lu H., Feng J., Yu J.X. Condensed cube: an effective approach to reducing data cube size. In: Proceedings of the 18th International Conference on Data Engineering – ICDE 2002. IEEE Computer Society, Washington. 2002. P. 155–165.
10. Gomez L.I., Gomez S.A., Vaisman A.A. generic data model and query language for spatiotemporal OLAP cube analysis. In: Rundensteiner, E., Markl, V., Manolescu, I., Amer-Yahia S., Naumann F., Ari I. Proceedings of the 15-th International Conference on Extending Database Technology – EDBT 2012. New York, ACM. 2012. P. 300–311.
11. Фомин М.Б. Описание метаданных многомерных информационных систем с использованием кластерного метода // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 7. С. 78–86. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-7-78-86>.
12. Salmam F.Z., Fakir M., Errattahi R. Prediction in OLAP data cubes. Journal of Information & Knowledge Management. 2016. Vol. 15. No. 2. P. 449–458. DOI: 10.1142/S0219649216500222
13. Fu L.: Efficient evaluation of sparse data cubes. In: Li Q., Wang G., Feng L. Advances in Web-Age Information Management, vol. 3129 – WAIM 2004. Heidelberg, Springer, 2004. P. 336–345. DOI: 10.1007/978-3-540-27772-9_34
14. Romero O., Pedersen T.B., Berlanga R., Nebot V., Aramburu M.J., Simitsis A.: Using semantic web technologies for exploratory OLAP: A survey. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. 2015. Vol. 27. No. 2. P. 571–588. DOI: 10.1109/TKDE.2014.2330822
15. Salmam F.Z., Fakir M., Errattahi R. Explanation in OLAP data cubes. Journal of Information Technology Research. 2014. Vol. 7. No. 4. P. 36–78. DOI: 10.4018/jitr.2014100105
16. Orlov Y., Gaidamaka Y., Zaripova E. Approach to estimation of performance measures for SIP server model with batch arrivals. In: Vishnevsky V., Kozyrev D. Distributed Computer and Communication Networks. DCCN 2015, vol 601. Cham, Springer, pp. 141–150. DOI: 10.1007/978-3-319-30843-2_15
17. Висков А.В., Фомин М.Б. Моделирование аналитических измерений в многомерных базах данных // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2012. Т. 63. № 4. С. 15–19.

References

1. Thomsen E. OLAP Solution: Building Multidimensional Information System. NY, Willey Computer Publishing, 2002, 688 p.
2. Viskov A.V., Fomin M.B. Methods of a description of the permissible combination of detail-attributes when using multidimensional models in infocommunication systems. *T-Comm. Telekommunikacii i Transport* [T-Comm], 2012, no. 7, pp. 45–47. (In Russian)
3. Hirata C.M., Lima J.C. Multidimensional cyclic graph approach: representing a data cube without common sub-graphs. Information Sciences, 2011, vol. 181, pp. 2626–2655. DOI: 10.1016/j.ins.2010.05.012
4. Luo Z.W., Ling T.W., Ang C.H., Lee S.Y., Cui B. Range top/bottom k queries in OLAP sparse data cubes. In: Mayr H.C., Lazansky J., Quirchmayr G., Vogel P. Database and Expert Systems Applications – DEXA. Heidelberg, Springer, 2001, vol. 2113, pp. 678–687. DOI: 10.1007/3-540-44759-8_66
5. Vitter J.S., Wang M. Approximate computation of multidimensional aggregates of sparse data using wavelets. In: Proceedings of the 1999 International Conference on Management of Data – SIGMOD 1999. New York, ACM. 1999, pp. 193–204. DOI:10.1145/304182.304199
6. Messaoud R.B., Boussaid O., Rabaseda S.L. A multiple correspondence analysis to organize data cube. In: Databases and Information Systems IV – DB&IS 2006. Vilnius, IOS Press, 2007, pp. 133–146.
7. Karayannidis N., Sellis T., Kouvara Y. CUBE file: a file structure for hierarchically clustered OLAP cube. In: Bertino E., Christodoulakis S., Plexousakis D., Christophides V., Koubarakis M., BEohm K., Ferrari E. Advances in Database Technology – EDBT 2004, vol. 2992. Heidelberg, Springer, 2004, pp. 621–638. DOI: 10.1007/978-3-540-24741-8_36
8. Chen C., Feng J., Xing L. Computation of sparse data cubes with constraints. In: Kambayashi Y., Mohania M., Wob W. Data Warehousing and Knowledge Discovery – DaWaK 2003, vol. 2737. Heidelberg, Springer, 2003, pp. 14–23. DOI: 10.1007/978-3-540-45228-7_3
9. Wang W., Lu H., Feng J., Yu J.X. Condensed cube: an effective approach to reducing data cube size. In: Proceedings of the 18th International Conference on Data



Engineering – ICDE 2002. IEEE Computer Society, Washington, 2002, pp. 155–165.

10. Gomez L.I., Gomez S.A., Vaisman A.A. generic data model and query language for spatiotemporal OLAP cube analysis. In: Rundensteiner, E., Markl, V., Manolescu, I., Amer-Yahia S., Naumann F., Ari I. Proceedings of the 15-th International Conference on Extending Database Technology – EDBT 2012. New York, ACM, 2012, pp. 300–311.

11. Fomin M.B. Cluster method-based description of multidimensional information system metadata. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2017, vol. 21, no. 7, pp. 78–86. (In Russian) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-7-78-86>

12. Salmam F.Z., Fakir M., Errattahi R. Prediction in OLAP data cubes. *Journal of Information & Knowledge Management*. 2016, vol. 15, no. 2, pp. 449–458. DOI: 10.1142/S0219649216500222

13. Fu L.: Efficient evaluation of sparse data cubes. In: Li Q., Wang G., Feng L. *Advances in Web-Age Information Management*, vol. 3129 – WAIM 2004. Heidelberg,

Springer, 2004, pp. 336–345. DOI: 10.1007/978-3-540-27772-9_34

14. Romero O., Pedersen T.B., Berlanga R., Nebot V., Aramburu M.J., Simitsis A.: Using semantic web technologies for exploratory OLAP: A survey. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2015, vol. 27, no. 2, pp. 571–588. DOI: 10.1109/TKDE.2014.2330822

15. Salmam F.Z., Fakir M., Errattahi R. Explanation in OLAP data cubes. *Journal of Information Technology Research*, 2014, vol. 7, no. 4, pp. 36–78. DOI: 10.4018/jitr.2014100105

16. Orlov Y., Gaidamaka Y., Zaripova E. Approach to estimation of performance measures for SIP server model with batch arrivals. In: Vishnevsky V., Kozyrev D. *Distributed Computer and Communication Networks. DCCN 2015*, vol 601. Cham, Springer, pp. 141–150. DOI: 10.1007/978-3-319-30843-2_15

17. Viskov A.V., Fomin M.B. Modeling of analytical dimensions in multidimensional databases. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2012, vol. 63, no. 4, pp. 15–19. (In Russian)

Критерии авторства

Фомин М.Б. предложил модель данных КСХ, Кузнецов Е.А. и Шорохов С.Г. сформулировали свойства КСХ. Авторы проанализировали полученные результаты. Авторы в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Fomin M.B. proposed the data model for classification schemes. Kuznetsov E.A. and Shorokhov S.G. formulated the properties of the classification schemes. The authors analyzed the obtained results. The authors bear equally responsible 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 621.39

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-12-157-168>

ИССЛЕДОВАНИЕ МУЛЬТИЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА МЕТОДАМИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© Н.И. Воропай¹, Е.В. Уколова², Д.О. Герасимов³,
К.В. Суслов⁴, П. Ломбарди⁵, П. Комарницки⁶

^{1,2}ФГБУН Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, 664033, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

^{2,3,4}ФГБОУ ВО Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

⁵Institute IFF Magdeburg, Sandtorstrasse 22, 39106 Magdeburg, Germany

⁶University of applied science Magdeburg-Stendal, Breitscheidstraße 2, 39114 Magdeburg, Germany

РЕЗЮМЕ: Рассмотрены принципы конструирования имитационной модели мультиэнергетического хаба. Исследован энергетический объект методами имитационного моделирования. Проведен анализ экономической эффективности от накопления электроэнергии и преобразования электроэнергии в тепловую. При решении поставленной задачи применялась теория энергетических хабов, принципы имитационного моделирования в системе MatLab. В статье описана техническая возможность реализации мультиэнергетической системы. Представлена функциональная схема мультиэнергетического объекта, выполненная в среде MatLab. На примере накопления и преобразования электроэнергии в тепло проанализирована экономическая эффективность применения принципов мультиэнергетического хаба. Тематическое исследование показывает эффективность разработанного программного обеспечения моделирования энергетического хаба. В данной статье в развитии изложенных подходов представлены принципы построения имитационной модели интегрированной мультиэнергетической системы энергоснабжения на основе использования концепции энергетического хаба. Приведен пример применения разработанной имитационной модели. Предлагаемый подход открывает широкую перспективу для исследования многих значительных проблем в интегрированных энергосистемах с несколькими несущими, включая их свойства, особенности расширения и эксплуатации. Эта статья вносит первый небольшой вклад в обсуждаемое важное направление исследования.

Ключевые слова: энергетический хаб, интегрированная система энергоснабжения, преобразователи энергии, накопители энергии, оптимизация энергопотребления, мультиэнергетические системы

Благодарности: Работа выполнена в рамках проекта III.17.4.1 фундаментальной исследовательской программы СО РАН # АААА-А17-117030310438-9.

¹Воропай Николай Иванович, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, e-mail: voropai@isem.irk.ru

Nikolai I. Voropai, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding Member of RAS, e-mail: voropai@isem.irk.ru

²Уколова Екатерина Владимировна, аспирант, e-mail: ukolovaekaterina@yandex.ru

Ekaterina V. Ukolova, Post-graduate student, e-mail: ukolovaekaterina@yandex.ru

³Герасимов Дмитрий Олегович, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, e-mail: gerasimovdo@mail.ru
Dmitry O. Gerasimov, Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, e-mail: gerasimovdo@mail.ru

⁴Суслов Константин Витальевич, кандидат технических наук, профессор кафедры электроснабжения и электротехники, e-mail: dr.souslov@yandex.ru

Konstantin V. Suslov, Cand. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, e-mail: dr.souslov@yandex.ru

⁵Ломбарди Пио, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник института организации и автоматизации промышленного производства Fraunhofer IFF, e-mail: pio.lombardi@iff.fraunhofer.de
Lombardi Pio, Candidate of technical sciences, Leading Researcher of the Institute of Organization and Automation of Industrial Production Fraunhofer IFF, e-mail: pio.lombardi@iff.fraunhofer.de

⁶Пшемислав Комарницки, кандидат технических наук, профессор по энергетической системе в Университете прикладных наук Магдебург и руководитель отдела
Przemyslaw Komarnicki, Candidate of technical sciences, Professor for the Power System at the University of Applied Sciences in Magdeburg, Head of the Department



Информация о статье: Дата поступления 18 октября 2018 г.; дата принятия к печати 20 ноября 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2018 г.

Для цитирования: Воропай Н.И., Уколова Е.В., Герасимов Д.О., Суслов К.В., Ломбарди П., Комарницки П. Исследование мультиэнергетического объекта методами имитационного моделирования. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(12):157–168. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-157-168

STUDY OF A MULTI-POWER FACILITY BY SIMULATION MODELING METHODS

N.I. Voropai, E.V. Ukolova, D.O. Gerasimov, K.V. Suslov, P. Lombardi, P. Komarnicki

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk 664033, Russian Federation
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation
Institute IFF Magdeburg, Sandtorstrasse 22, 39106 Magdeburg, Germany
University of applied science Magdeburg-Stendal, Breitscheidstraße 2, 39114 Magdeburg, Germany

ABSTRACT: The purpose of the paper is to consider the design principles of the multi-power hub simulation model, study the power facility by the methods of simulation modeling, analyze the economic efficiency of accumulation of electric power and its conversion into heat energy. The set problem is solved using the theory of energy hubs and the principles of simulation modeling in the MatLab system. The article describes the technical feasibility of a multi-power system implementation. The function block diagram of a multi-power facility made in the MatLab environment is presented. The economic efficiency of multi-power hub principle application is analyzed on example of electric energy accumulation and conversion into heat. The case study shows the efficiency of the developed software for energy hub modeling. The article presents the construction principles of the simulation model of the integrated multi-power system of power supply based on the concept of a power hub. An example of developed simulation model application is given. The proposed approach offers a broad perspective for the study of many significant problems in the integrated power systems with multiple carriers including their properties, features of their growth and operation. This article makes the first small contribution to the discussed important research direction.

Keywords: energy hub, integrated power supply system, energy converters, energy storage, energy consumption optimization, multi-power systems

Acknowledgements: The work is carried out under the project III.17.4.1 of the fundamental research program SB RAS # AAAAA 17-117030310438-9.

Information about the article: Received October 18, 2018; accepted for publication November 20, 2018; available online December 28, 2018.

For citation: Voropai N.I., Ukolova E.V., Gerasimov D.O., Suslov K.V., Lombardi P., Komarnicki P. Study of a multi-power facility by simulation modeling methods. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018; 22(12):pp. 157–168. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-157-168

Введение

Системы энергоснабжения, прежде всего системы электро-, тепло- и газоснабжения играют исключительно важную инфраструктурную роль в обеспечении функционирования отраслей экономики и жизнедеятельности населения любой страны. К инфраструктурным системам энергоснабжения предъявляются вполне конкретные требования по надежности энергоснабжения потребителей и качеству поставляемых им энергоресурсов, а также эффективности

функционирования и развития самих этих систем. Необходимо отметить возрастание требований потребителей к надежности и качеству в связи с цифровизацией и компьютеризацией технологических процессов их производства.

В [1] была высказана идея о том, что синергетическое рассмотрение систем энергоснабжения с различными формами энергии дает реальные возможности повышения эффективности энергоснабжения в



целом. С учетом этого была сформулирована концепция энергетического хаба, под которым понимается интегрированный объект с множествами входов и выходов, которые представляют различные виды энергии и с реализацией внутренних функций этого объекта по передаче, хранению и преобразованию различных видов энергии. Примером энергетического хаба является когенерационная установка [2]. В связи с появлением конкурирующих технологий у потребителей для реализации одних и тех же функций при использовании разных энергоресурсов (например, централизованное отопление от ТЭЦ либо с помощью электрообогревателей) таких потребителей можно рассматривать в виде энергетического хаба [2–6]. В [7–9] отмечается, что концепция энергетического хаба может применяться достаточно широко – от представления отдельного устройства, преобразующего несколько видов энергии до здания или части города. В [10] рассмотрена система энергетических хабов, в которой входами одного хаба являются выходы другого, что позволяет исследовать мультиэнергетические интегрированные системы энергоснабжения.

Большое внимание уделяется моделированию энергетического хаба. В [11] в общем виде представлена система линейных алгебраических уравнений, матрица коэффициентов которой отображает преобразование одних видов энергии в другие и связывает входные переменные энергетического хаба, представляющие различные виды энергии, с его выходными переменными. В [12, 13] отмечается, что в общем случае коэффициенты преобразования одних видов энергии в другие могут иметь сложную внутреннюю структуру и содержать нелинейности, что существенно затрудняет решение задач на основе концепции энергетического хаба.

В данной статье в развитии изложенных подходов представлены принципы построения имитационной модели интегрированной мультиэнергетической системы энергоснабжения на основе использования концепции энергетического хаба. Приведен пример применения разработанной имитационной модели.

Принципы конструирования модели и их реализация

В основу конструирования имитационной модели интегрированной мультиэнергетической системы заложены следующие базовые положения:

Средствами Matlab/Simulink разработана универсальная модель энергетического хаба, включающего несколько входов и несколько выходов (например, входы – газ, электроэнергия и тепло, выходы – электроэнергия и тепло), а также функции передачи, преобразования и хранения различных видов энергии и суммирования одного вида энергии, поступающей по нескольким каналам. Используя универсальную модель хаба путем зануления некоторых входов и выходов и некоторых функций, формируются элементарные хабы, каждый из которых представляет модель элемента интегрированной мультиэнергетической системы энергоснабжения (например, когенерационная установка, трансформаторная

подстанция – повышающая или понижающая линия электропередачи, теплопровод системы теплоснабжения, накопитель электроэнергии, газопровод распределительной газовой сети, комплексный потребитель, потребляющий электроэнергию, тепло и газ, потребитель, потребляющий только электроэнергию или только газ, и т.п.).

Функции, реализуемые каждым элементарным хабом по передаче, преобразованию или/и хранению того или иного вида энергии, а также суммирования одного вида энергии, поступающей по нескольким каналам, моделируются полиномами до третьего порядка, аппроксимирующими реальные характеристики элементарных хабов. В принципе, могут быть использованы и полиномы более высоких порядков. Коэффициенты аппроксимирующих полиномов определяются известными методами. При этом учитываются потери соответствующего

энергоносителя при его передаче, накоплению и преобразованию как функций соответствующего хаба, или, иначе, – коэффициент полезного действия рассматриваемого хаба. Применение аппроксимирующих полиномов, помимо универсальности описания различных элементарных хабов, обеспечивает быстроедействие имитационной модели интегрированной мультиэнергетической системы при приемлемой точности этой модели.

Кроме аппроксимирующих полиномов, моделирующих функции элементарных хабов, при необходимости задаются ограничения на входные и/или выходные перемен-

ные элементарных хабов, отражающие реальные технологические ограничения на переменные состояния элементов реальных систем энергоснабжения.

В качестве универсальной энергетической единицы измерения различных видов энергии (электроэнергия, газ, тепло и др.) используется джоуль.

Имитационная модель интегрированной мультиэнергетической системы конструируется путем соединения входов и выходов элементарных хабов в соответствии со схемами соединения реальных элементов, моделируемых элементарными хабами.

Имитационная модель энергетического хаба

На рис. 1 приведена обобщенная функциональная структура имитационной модели энергетического хаба для трех каналов энергоснабжения (электроэнергии, тепла и газа) на примере программной реализации [14]. Эти каналы связывают источ-

ники электрической, тепловой и газовой энергии с электрическими, тепловыми и газовыми нагрузками, реализуя несколько основных функций – передачу, преобразование, преобразование друг в друга и хранение различных видов энергии.

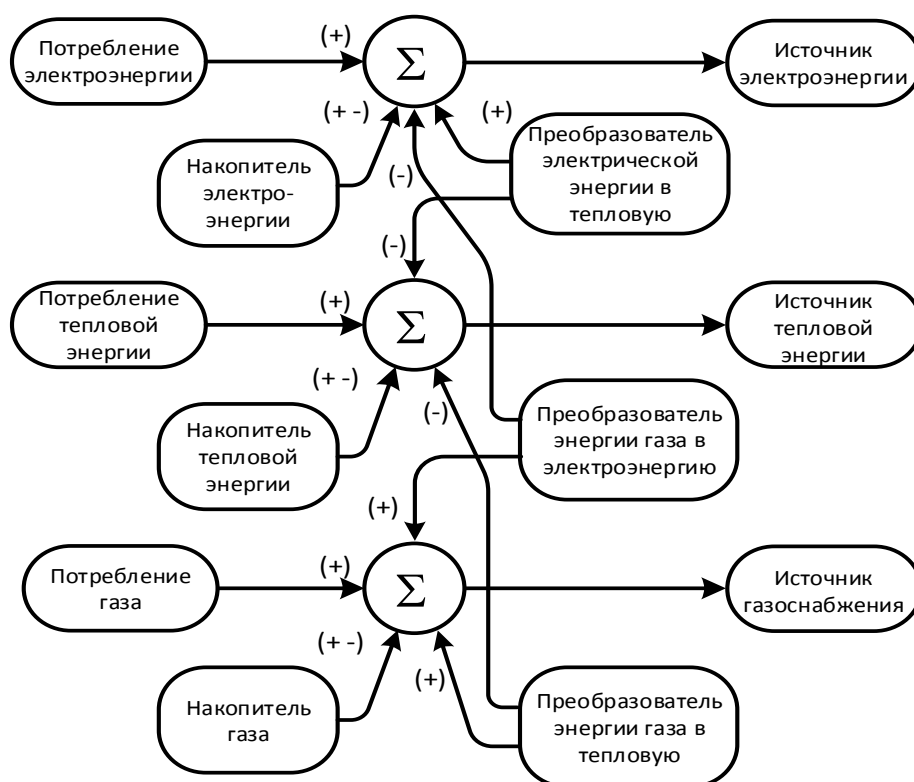


Рис. 1. Обобщенная функциональная структура имитационной модели энергетического хаба
(1 – каналы электроснабжения, 2 – теплоснабжения и 3 – газоснабжения)
Fig. 1. Generalized functional structure of the energy hub simulation model
(1 – electric energy supply channels, 2 – heat supply channels and 3 – gas supply channels)



На рис. 2 представлена уточненная функциональная схема по одному из каналов энергоснабжения имитационной модели общего энергетического хаба с учетом специфики имитационного моделирования в среде Matlab/Simulink.

Функциональная схема состоит из структурных блоков, каждый из которых реализует определенную функцию. Функция передачи – передача энергии от одного узла к другому с учетом потерь энергии, но без преобразования. Функция преобразования занимается трансформацией энергетических параметров (уровень напряжения трансформатором, уровень давления газа насосом и др.) без преобразования в другой вид энергии. Функция преобразования – это преобразование одного вида энергии в другой. Функция хранения связана с накопле-

нием энергии в блоке памяти. Суммирование – дополнительная важная функция для того, чтобы перераспределить энергию между различными каналами энергоснабжения (см. Блок суммирования в диаграмме 1).

На рис. 3 представлена внутренняя структура для двух узлов передачи и преобразования энергии, созданных средствами Matlab/Simulink. Каждая единица общей модели энергетического хаба может рассматриваться как элементарный хаб.

Предложенная имитационная модель позволяет учитывать распределение потоков энергии с учетом изменения стоимости различных видов энергии. А также определить экономическую целесообразность использования систем хранения и конверсионных систем.

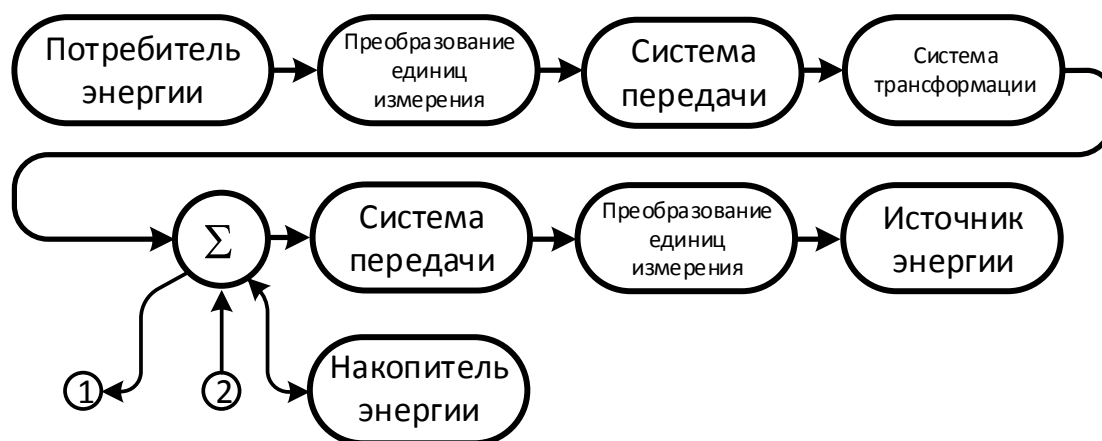


Рис. 2. Функциональная схема канала энергоснабжения имитационной модели энергетического хаба
Fig. 2. Functional diagram of the electric energy supply channel of the energy hub simulation model

Стадия исследования

Рассмотрим интегрированную систему энергопотребления одного здания университетского городка на основе концепции энергетического хаба. Потребление энергетических диаграмм в течение года представлено на рис. 4 (электричество) и 5 (тепло). Произведен расчет стоимости потребленной тепло- и электроэнергии. Дополнительная плата за электроэнергию взимается в часы пикового потребления элект-

троэнергии. Цены на потребленную электроэнергию и тепло рассчитываются на основании полученных данных по энергоснабжению. На рис. 6 и 7 представлен расчет ежемесячных платежей за потребленную электроэнергию и тепло.

Анализ потребления электроэнергии по месяцам позволил выявить периоды времени, когда оплата за электроэнергию имеет максимальное значение. Это произошло в часы пиковой нагрузки в системе.

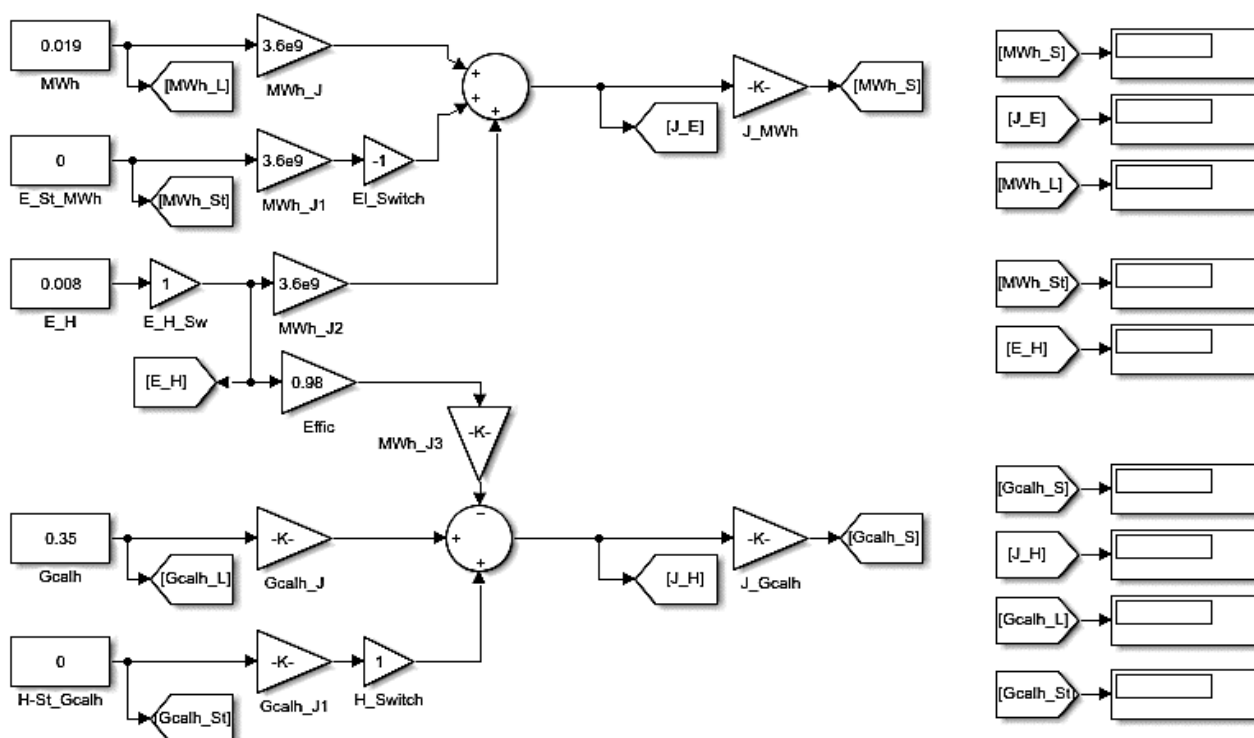


Рис. 3. Имитационная модель энергетического хаба по двум каналам энергоснабжения
Fig. 3. Simulation model of an energy hub by two power supply channels

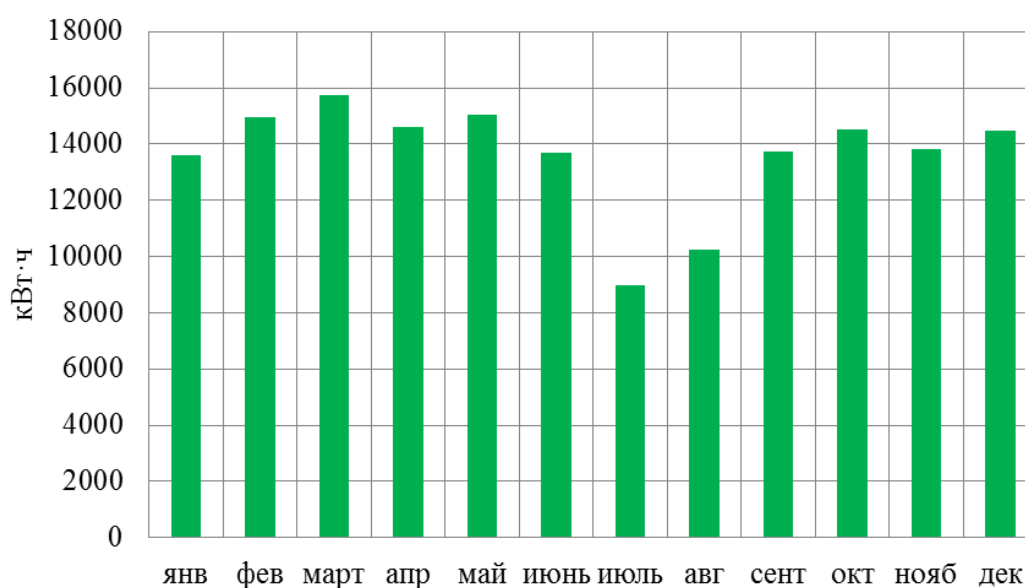


Рис. 4. Потребление электроэнергии
Fig. 4. Electric energy consumption

На рис. 8 приведены среднегодовые данные о перегрузках в пиковые часы (выделены красным (темным) цветом). Фактически, на рис. 9 показана средняя пиковая нагрузка потребляемой мощности в неделю.

Данные получены путем наложения месячных пиковых нагрузок. Таким образом, были идентифицированы характерные периоды перегрузки в течение дня. Стоит отметить, что в предложении мы учитывали рабочие и нерабочие дни.

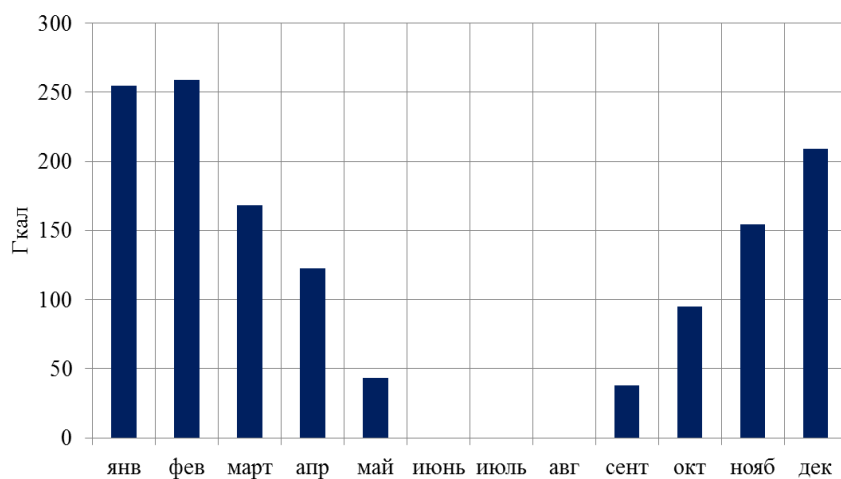


Рис. 5. Теплопотребление
Fig. 5. Heat consumption

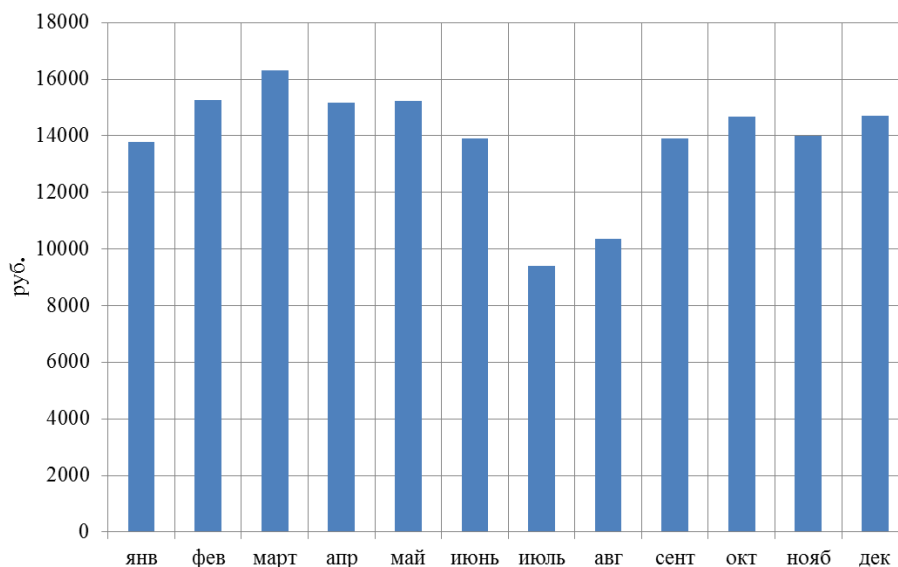


Рис. 6. Оплата за электропотребление
Fig. 6. Electricity billing

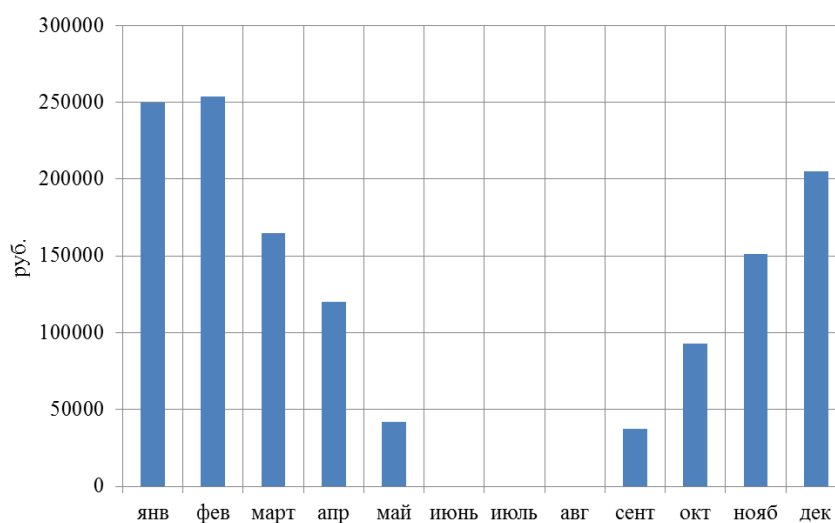


Рис. 7. Оплата за теплопотребление
Fig. 7. Heat billing



		Понедельник	Вторник	Среда	Четверг	Пятница	Суббота	Воскресенье
Время суток	0:00-5:00							
	5:00-6:00	x	x	x	x	x		
	6:00-7:00	x	x	x	x	x		
	7:00-8:00	x	x	x	x	x		
	8:00-9:00							
	9:00-10:00	x		x				
	10:00-11:00		x		x	x		
	11:00-12:00	x				x		
	12:00-13:00							
	13:00-14:00							
	14:00-15:00	x	x	x	x	x		
	15:00-16:00	x	x	x	x	x		
	16:00-17:00	x	x	x	x	x		
	17:00-18:00	x	x	x	x	x		
	18:00-00:00							

Рис. 8. Среднегодовые данные о перегрузке в часы пиковой нагрузки по дням эквивалентной недели
Fig. 8. Average annual data on overloading at the peak load hours by days of an equivalent week

Как показывает диаграмма, изображенная на рис. 8, расчет оплаты за электроэнергию включал два временных периода максимальных значений тарифов. Интересно оценить возможную оплату электроэнергии без учета дополнительной платы за пиковые периоды. Следует отметить, что в России оплата электроэнергии состоит из трех частей. Расчет оплаты за потребленную электроэнергию производился дифференцированным тарифом в трехчасовых зонах.

Тариф:

t_1 – пиковая зона (с 7 до 10 и с 17 до 21 ч) = 1,378 руб/кВт·ч;
 t_2 – полупиковая зона (с 10 до 17 и с 21 до 23 ч) = 1,06 руб/кВт·ч;
 t_3 – ночная зона (с 23 до 7 часов) = 0,705 руб/кВт·ч;

Целевая функция:

$$P_{\text{пик}} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $P_{\text{пик}}$ – пиковая нагрузка,

$$C \rightarrow \min, \quad (2)$$

где C – затраты на энергию.

Чтобы снизить пиковые нагрузки и уменьшить платежи за электроэнергию и тепло, предлагается использовать комплексную модель мультиэнергетической системы. Для этого предлагается преобразовывать электроэнергию в тепло в ночной период.

Для решения этой задачи производится расчет количества электроэнергии, потенциала для преобразования:

$$E_p = (E_{\text{max}} - E_{\text{min}}) \cdot 30, \quad (3)$$

где E_p – электроэнергии для преобразования и хранения; E_{max} – максимальное значение суточного расхода электроэнергии; E_{min} – минимальное ежедневное потребление электроэнергии.

Таким образом, величина E_p будет равна 1425, 24 кВт·ч.

Плата за электроэнергию для преобразования:

$$C_p = E_p \cdot t_3, \quad (4)$$

где t_3 – тариф на электроэнергию в ночное время.



В результате расчетов, с использованием (4), плата за электроэнергию (C_p) равна 1023,7 руб.

Первый вариант снижения затрат – использование системы хранения электроэнергии в ночное время и в часы пиковой нагрузки. Затраты на электроэнергию:

$$C = E_1 t_1 + E_2 t_2 + E_3 t_3, \quad (5)$$

где t_1 – тариф на электроэнергию в пиковой зоне; t_2 – тариф на электроэнергию в полупиковой зоне; t_3 – тариф на электроэнергию в ночное время.

Для этого предполагается накапливать электроэнергию в системах хранения, рассчитанных по формуле (3).

Оплата рассчитывается с помощью (4) и (5):

$$C_1 = E_p \cdot t_1. \quad (6)$$

При применении системы хранения электроэнергии в ночное время и использовании ее в дневное время можно значительно снизить затраты (рис. 9).

Таким образом, задача заключается в снижении пиковой нагрузки на электроэнергию с использованием возможностей интегрированных систем спроса на электроэнергию и тепло по различным тарифным сценариям на электроэнергию и тепло. Исследуем эту проблему с помощью имитационных экспериментов на основе имитационной модели энергетического хаба.

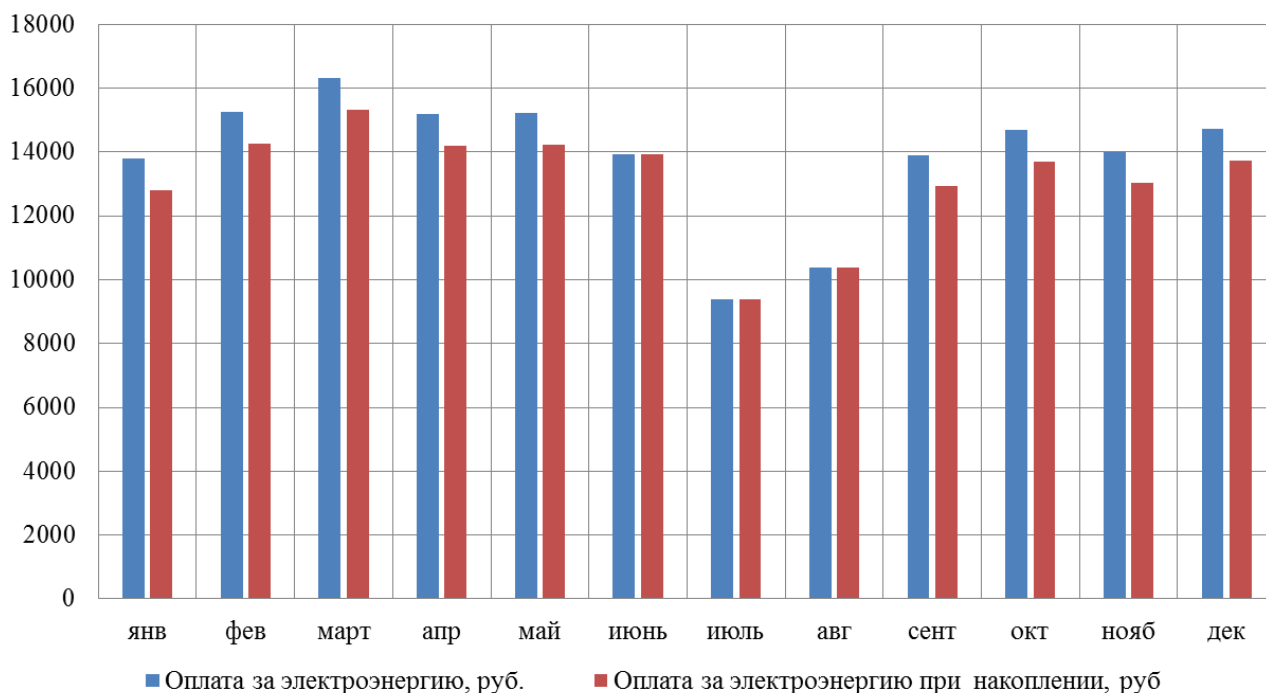


Рис. 9. Экономический эффект от накопления электроэнергии в ночной период
Fig. 9. Economic effect of electric energy accumulation in the night period

Имитационный эксперимент

В имитационных экспериментах рассматриваются следующие условия. Расчет преобразования электроэнергии в тепловую, учитывая коэффициент полезного действия, выполняется с использованием имитационной модели (рис. 3 и рис. 4) в раз-
мере:

1 кВт·ч = 0,00086 Гкал.

Таким образом, можно покрыть часть потребления тепловой энергии (рис. 10).

Экономический эффект от использования преобразования электроэнергии показан на диаграмме (рис. 11).

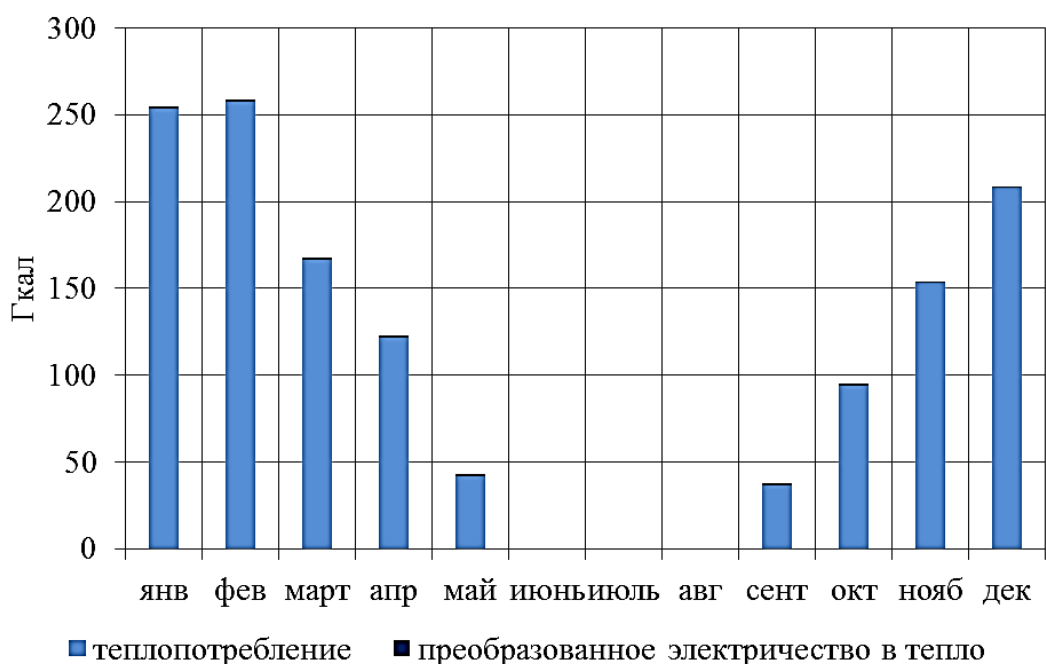


Рис. 10. Расход тепловой энергии отдается на преобразование электроэнергии
Fig. 10. Heat consumption given to electric energy conversion

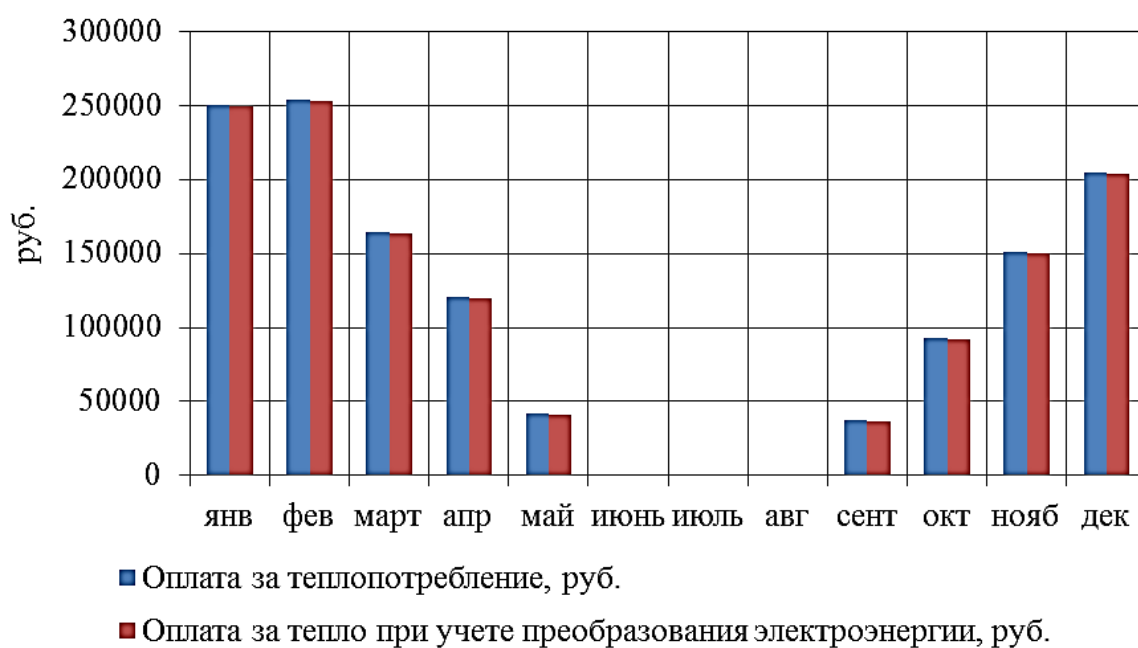


Рис. 11. Оплата за тепло при преобразовании электроэнергии
Fig. 11. Heat billing when converting electric energy

Выводы

Концепция энергетического хаба является очень конструктивным подходом к моделированию интегрированных комплексных энергетических систем. В этой статье вышеупомянутый подход разработан

путем формализации процесса моделирования для лучшего рассмотрения особенностей комплексной мультэнергетической системы при изучении ключевых проблем для таких систем. Тематическое исследование



показывает эффективность разработанного программного обеспечения моделирования энергетического хаба.

Необходимо отметить следующую актуальную проблему для будущей работы, которая касается построения имитационной модели с использованием моделей элементарных хабов для изучения сложных мультиэнергетических систем. Предлагаемый

подход открывает широкую перспективу для исследования многих значительных проблем в интегрированных энергосистемах с несколькими несущими, включая их свойства, особенности расширения и эксплуатации. Эта статья вносит первый небольшой вклад в обсуждаемое важное направление исследования.

Библиографический список

1. Geidl M., Koppel G., Favre-Perrod P., Klok B., Andersson G., Frohlich K., Energy hubs for the future // IEEE Power and Energy Magazine. 2007. Vol. 5. No. 1. P. 24–30.
2. Воропай Н.И., Стенников В.А. Интегрированные интеллектуальные энергетические системы // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2014. № 1. С. 64–73.
3. Le Blond S., Lewis T., Sooriyabandara M., Towards an integrated approach to building energy efficiency: Drivers and enablers // IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies, Manchester, UK. 2011. P. 1–8.
4. Krause T., Kienzle F., Liu Yang, Andersson G., Modeling interconnected national energy systems using an energy hub approach // IEEE Power Tech Conference, Trondheim, Norway. 2011. P. 1–7.
5. Mohammadi M., Noorollahi Y., Mohammadi-ivatloo B., Hosseinzadeh M., Torabzadeh Khorasani S. Optimal management of energy hubs and smart energy hubs – A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 89. June 2018. P. 33–50.
6. Vahid Davatgaran V., Mohsen Saniei M., Saeidollah Mortazavi S. Optimal bidding strategy for an energy hub in energy market // Energy. 2018. Vol. 148. P. 482–493.
7. Koppel G., Andersson G., Reliability modeling of multi-carrier energy systems // Energy. 2009. Vol. 34. P. 235–244.
8. Khorsand H., Reza Seifi A. Probabilistic energy flow for multi-carrier energy systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 94. P. 989–997.
9. Wang J., Zhong H., Ma Z., Xia Q., Kang C. Review and prospect of integrated demand response in the multi-energy system // Applied Energy. 2017. Vol. 202. P. 772–782.
10. Moeini-Aghtaie M., Abbaspour A., Fotuhi-Firuzabad M., Hajipour E., A decomposed solution to multiple energy carriers optimal power flow // IEEE Transactions on Power Systems. 2014. Vol. 29. No. 2. P. 707–716.
11. Xiaping Z., Shahidepour M., Alabdulwahab A., Abu-sorrah A., Optimal expansion planning of energy hub with multiple energy infrastructures // IEEE Transactions on Smart Grid. 2015. Vol. 6. No. 5. P. 2302–2311.
12. Beccuti G., Demiray T., Batic M., Tomasevic N., Vranes S., Energy hub modeling and optimization: An analytical case study // IEEE Power Tech, Eindhoven, Netherlands, 2015. P. 1034–1040.
13. Tronchin L., Manfren M., Nastasi B. Energy efficiency, demand side management and energy storage technologies – A critical analysis of possible paths of integration in the built environment // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 95. P. 341–353.
14. А. с. 2018611255. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Программа для определения характеристик и оптимальных параметров функционирования мульти-энергетической системы / Герасимов Д.О., Суслов К.В., Уколова Е.В., Уколова Е.В.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «ИРНИТУ» (РФ). № 2017662368; заявл. 30.11.17; опубл. 26.01.18. Реестр программ для ЭВМ. 1 с.

References

1. Geidl M., Koppel G., Favre-Perrod P., Klok B., Andersson G., Frohlich K., Energy hubs for the future. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, vol. 5, no. 1, pp. 24–30.
2. Voropaj N.I., Stennikov V.A. Integrated intelligent power systems. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Energetika* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering], 2014, no. 1, pp. 64–73. (In Russian)
3. Le Blond S., Lewis T., Sooriyabandara M., Towards an integrated approach to building energy efficiency: Drivers and enablers. IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies, Manchester, UK, 2011, pp. 1–8.
4. Krause T., Kienzle F., Liu Yang, Andersson G., Modeling interconnected national energy systems using an energy hub approach. IEEE Power Tech Conference, Trondheim, Norway, 2011, pp. 1–7.
5. Mohammadi M., Noorollahi Y., Mohammadi-ivatloo B., Hosseinzadeh M., Torabzadeh Khorasani S. Optimal management of energy hubs and smart energy hubs – A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 89, June 2018, pp. 33–50.



6. Vahid Davatgaran V., Mohsen Saniei M., Saeidollah Mortazavi S. Optimal bidding strategy for an energy hub in energy market. *Energy*, 2018, vol. 148, pp. 482–493.
7. Koppel G., Andersson G., Reliability modeling of multi-carrier energy systems. *Energy*, 2009, vol. 34, pp. 235–244.
8. Khorsand H., Reza Seifi A. Probabilistic energy flow for multi-carrier energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 94, pp. 989–997.
9. Wang J., Zhong H., Ma Z., Xia Q., Kang C. Review and prospect of integrated demand response in the multi-energy system. *Applied Energy*, 2017, vol. 202, pp. 772–782.
10. Moeini-Aghaie M., Abbaspour A., Fotuhi-Firuzabad M., Hajipour E., A decomposed solution to multiple energy carriers optimal power flow. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, vol. 29, no. 2, pp. 707–716.
11. Xiaping Z., Shahidehpour M., Alabdulwahab A., Abu-sorrah A., Optimal expansion planning of energy hub

with multiple energy infrastructures. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, vol. 6, no. 5, pp. 2302–2311.

12. Beccuti G., Demiray T., Batic M., Tomasevic N., Vranes S., Energy hub modeling and optimization: An analytical case study. *IEEE Power Tech*, Eindhoven, Netherlands, 2015, pp. 1034–1040.
13. Tronchin L., Manfren M., Nastasi B. Energy efficiency, demand side management and energy storage technologies – A critical analysis of possible paths of integration in the built environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 95, pp. 341–353.
14. Gerasimov D.O., Suslov K.V., Ukolova E.V., Ukolova E.V. *Programma dlya opredeleniya harakteristik i optimal'nyh parametrov funkcionirovaniya mul'ti-energetich-eskoj sistemy* [Program for determination the characteristics and optimal operation parameters of a multi-power system]. Patent RF, no. 2017662368, 2018.

Критерии авторства

Воропай Н.И., Уколова Е.В., Герасимов Д.О., Суслов К.В., Ломбарди П., Комарницки П., подготовили рукопись и несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Voropai N.I., Ukolova E.V., Gerasimov D.O., Suslov K.V., Lombardi P., Komarnicki P., prepared the manuscript for publication and bear the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.311

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-12-169-184>

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ГИБРИДНОГО АВТОНОМНОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА БАЗЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ И ДИЗЕЛЯ

© Г.Г. Константинов¹, В.В. Криворотова², Н.П. Слюнкин³, Д.С. Федосов⁴

^{1,3,4}Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

²Иркутский государственный университет путей сообщения, 664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

РЕЗЮМЕ: Разработка и исследование гибридного автономного источника электроэнергии на базе фотоэлектрической солнечной электростанции и дизеля. Для достижения цели использовались методы математического и компьютерного моделирования, экспериментальные исследования на практических установках. Предложены модели солнечной станции в программной среде MATLAB Simulink: математическая и компьютерная. Проведено сравнение результатов исследования на моделях и на практической установке, показавшее совпадение полученных результатов. Разработана компьютерная модель гибридного автономного источника электроэнергии на базе фотоэлектрической солнечной электростанции и дизель-генератора. Проведенные исследования разработанной модели показали, что она работает корректно и может применяться для проектирования гибридных фотоэлектрических солнечных электростанций для конкретных районов и нагрузок.

Ключевые слова: фотоэлектрическая солнечная электростанция, гибридные автономные источники электроэнергии, математическое и компьютерное моделирование, дизель-генератор

Информация о статье: Дата поступления 28 октября 2018 г.; дата принятия к печати 30 ноября 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2018 г.

Для цитирования: Константинов Г.Г., Криворотова В.В., Слюнкин Н.П., Федосов Д.С. Разработка и исследование гибридного автономного источника электроэнергии на базе фотоэлектрической солнечной электростанции и дизеля. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(12):169–184. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-169-184

DEVELOPMENT AND STUDY OF HYBRID STAND-ALONE ELECTRIC POWER SOURCE BASED ON SOLAR PHOTOVOLTAIC POWER STATION AND DIESEL GENERATOR

Gennadiy G. Konstantinov, Viktoria V. Krivorotova, Nikolay P. Slyunkin, Denis S. Fedosov

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

¹Константинов Геннадий Григорьевич, кандидат технических наук, профессор кафедры электропривода и электрического транспорта, e-mail: kgg40@mail.ru

Gennadiy G. Konstantinov, Cand. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Electric Drive and Electric Transport, e-mail: kgg40@mail.ru

²Криворотова Виктория Викторовна, доцент кафедры электроэнергетики транспорта, e-mail: vvk_xapga@mail.ru
Viktoria V. Krivorotova, Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of Transport Electrical Engineering, e-mail: vvk_xapga@mail.ru

³Слюнкин Николай Павлович, магистрант, e-mail: n_i_k_i_t_a@list.ru

Nikolay P. Slyunkin, Master Degree Student, e-mail: n_i_k_i_t_a@list.ru

⁴Федосов Денис Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электрических станций, сетей и систем, e-mail: fedosov_ds@istu.edu

Denis S. Fedosov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Electric Stations, Networks and Systems, e-mail: fedosov_ds@istu.edu



Irkutsk State Transport University,
15 Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russian Federation

ABSTRACT: The purpose of the paper is development and study of a hybrid stand-alone electric power source based on a solar photovoltaic power station and a diesel generator. The purpose is achieved through the application of the following methods of mathematical and computer modeling and experimental studies on pilot installations. A mathematical model and a computer model of a solar station are proposed in MATLAB Simulink environment. Conducted comparison of study results on the models and on the pilot installation shows coincidence of the results obtained. The computer model of a hybrid stand-alone electric power source has been developed on the basis of a solar photovoltaic power station and a diesel generator. Carried-out studies of the developed model have demonstrated its correct operation that suggests its application for designing of hybrid solar photovoltaic power stations for specific areas and loads.

Keywords: solar photovoltaic power station, hybrid stand-alone power sources, mathematical and computer modeling, diesel generator

Information about the article: Received October 28, 2018; accepted for publication November 30, 2018; available online December 28, 2018.

For citation: Konstantinov G.G., Krivorotova V. V., Slyunkin N.P., Fedosov D.S. Development and study of hybrid stand-alone electric power source based on solar photovoltaic power station and diesel generator. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018; 22(12):pp. 169–184. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-169-184

Введение

Для удаленных территорий нашей страны, которые экономически не выгодно подключать к единой энергосистеме для электроснабжения промышленных и сельскохозяйственных потребителей, является актуальным применение возобновляемых источников электроэнергии, использующих, например, потенциал солнца и ветра.

Главными целями и задачами в данной работе являются:

- разработка математических моделей электрооборудования ФСЭС;
- разработка компьютерных моделей элементов оборудования ФСЭС;
- исследование и сравнение характеристик физической и компьютерной моделей фотоэлектрического модуля;
- разработка компьютерной модели солнечной электростанции;
- исследование внешних характеристик солнечной электростанции и сравнение их с традиционными источниками электрической энергии;
- разработка компьютерной модели гибридного автономного источника электроэнергии на базе фотоэлектрической солнечной электростанции и дизеля.

Разработка математических моделей электрооборудования фотоэлектрической электростанции

Актуальность создания математической модели фотоэлектрической электростанции (ФСЭС) обусловлена необходимостью изучения поведения фотоэлектрических элементов в различных режимах работы, а также расчетов параметров и проектирования фотоэлектрических элементов [1–4]. На основе математической модели представляется возможным построение вольт-амперной характеристики (ВАХ) фотоэлектрического элемента, на основе которой можно сделать вывод о режиме работы фотоэлектрической электростанции при различных изменениях входных параметров [5–9].

Практическая ценность заключается в том, что на основе математической модели можно реализовать компьютерное моделирование фотоэлектрической солнечной электростанции.

На рис. 1 представлена схема замещения солнечного элемента.

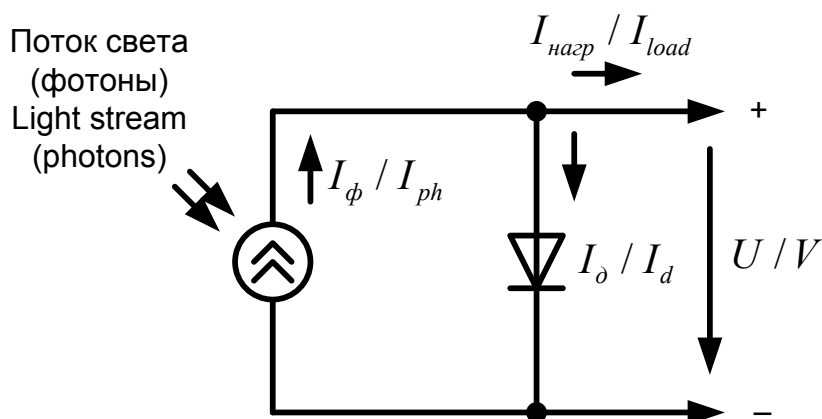


Рис. 1. Схема замещения солнечного элемента
Fig. 1. Solar cell equivalent circuit

Данная схема описывается следующими уравнениями [10]:

$$I_H = I_\phi - I_D, \quad (1)$$

где I_ϕ – ток фотонов, зависящий от плотности потока излучения; I_D – ток, протекающий через идеализированный p-n переход; I_H – ток нагрузки.

$$I_D = I_0 \cdot \left(e^{\left(\frac{V}{\varphi_T} \right)} - 1 \right), \quad (2)$$

где I_0 – обратный ток насыщения; V – выходное напряжение; φ_T – тепловой потенциал, равный контактной разности потенциалов на границе p-n перехода при отсутствии внешнего напряжения:

$$\varphi_T = \frac{k \cdot T_C}{e}, \quad (3)$$

где k – постоянная Больцмана; e – заряд электрона; T_C – температура окружающей среды.

На основании данных уравнений не представляется возможным построение точных ВАХ солнечного элемента. Поэтому необходимо ввести несколько дополнительных элементов в схему замещения, представленную на рис. 1.

На рис. 2 представлена эквивалентная схема замещения солнечного элемента.

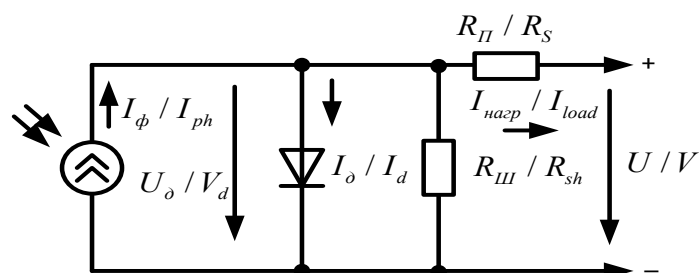


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения солнечного элемента
Fig. 2. Equivalent circuit for solar cell replacing



Для определения выходного тока солнечного элемента необходимо подставить выражения (2) и (3) в выражение (1):

$$I_H = I_\phi - I_0 \cdot \left(e^{\frac{e(V + I_H \cdot R_\Pi)}{A \cdot k \cdot T_C}} - 1 \right) - \frac{V + I_H \cdot R_\Pi}{R_{Ш}}, \quad (4)$$

где A – фактор идеализации (эмпирический показатель, принимающий значения от 1 до 5) [10]; R_Π – последовательное сопротивление солнечного элемента; $R_{Ш}$ – шунтирующее сопротивление солнечного элемента. Поскольку шунтирующее сопротивление $R_{Ш}$ гораздо больше, чем последовательное сопротивление R_Π , то последнее слагаемое в уравнении (4) становится незначительным по сравнению с суммой начальных составляющих, следовательно, последним слагаемым можно пренебречь, тогда выражение (4) преобразуется в

$$I_H = I_\phi - I_0 \cdot \left(e^{\frac{e(V + I_H \cdot R_\Pi)}{A \cdot k \cdot T_C}} - 1 \right). \quad (5)$$

На рис. 3 представлена эквивалентная схема замещения солнечного элемента без учета $R_{Ш}$.

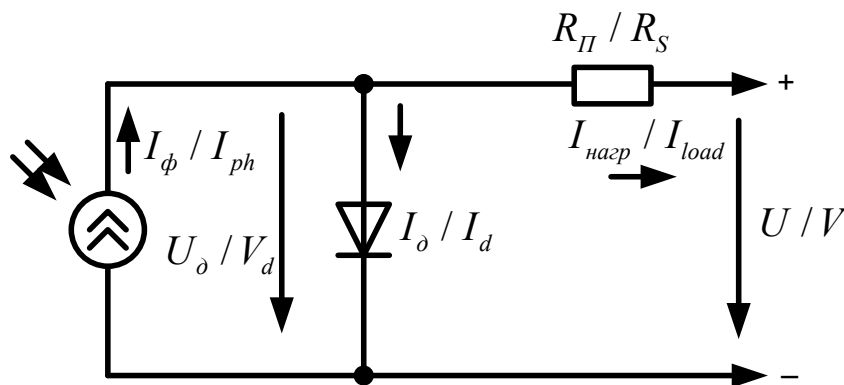


Рис. 3. Эквивалентная схема замещения солнечного элемента без учета $R_{Ш}$
Fig. 3. Equivalent circuit for solar cell replacing without regard for $R_{Ш}$

Выходное напряжение V солнечного элемента является функцией фототока I_H , что в основном определяется током нагрузки в зависимости от уровня солнечной инсоляции и температуры окружающей среды. С учетом (5), выходное напряжение определяется как:

$$V = \frac{A \cdot k \cdot T_C}{e} \cdot \ln \left(\frac{I_\phi + I_0 - I_H}{I_H} \right) - R_\Pi \cdot I_H. \quad (6)$$

Выражение (6) дает напряжение единичного фотоэлемента, которое затем умножается на количество ячеек, соединенных последовательно. Переменная величина температуры окружающей среды T_C влияет на выходное напряжение и фототок ячейки. Эти эффекты выражены через температурные коэффициенты выходного напряжения C_{TV} и фототока C_{TI} :

$$C_{TV} = 1 + \beta_T \cdot (T_C - T_\Pi); \quad (7)$$



$$C_{TI} = 1 + \frac{\gamma_T}{S_C} \cdot (T_{II} - T_C), \quad (8)$$

где $\beta_T = 0,004$ и $\gamma_T = 0,06$ – температурные коэффициенты; T_{II} – температура поверхности панели.

Если температура окружающей среды не изменяется существенно в дневное время, уровень солнечной инсоляции изменяется в зависимости от количества солнечного света и облачности. Изменение уровня солнечной инсоляции вызывает изменение рабочей температуры фототока в ячейке, которая влияет на величину выходного напряжения. Таким образом, изменения уровня солнечной инсоляции, влияющей на величину фототока и рабочей температуры, можно описать через 2 константы C_{SV} и C_{SI} :

$$C_{SV} = 1 + \beta_T \cdot \alpha_S \cdot (S_X - S_C); \quad (9)$$

$$C_{TI} = 1 + \frac{1}{S_C} \cdot (S_X - S_C), \quad (10)$$

где S_C – значение уровня солнечной инсоляции; S_X – уровень солнечной инсоляции для расчетного момента времени.

Изменение температуры ΔT_C , обусловленное изменением уровня солнечной инсоляции, определяется

$$\Delta T_C = \alpha_S \cdot (S_X - S_C), \quad (11)$$

где $\alpha_S = 0,03$ – отклонение изменения рабочей температуры в ячейке, обусловленного изменением уровня солнечной инсоляции [10, 11–13].

Используя поправочные коэффициенты C_{TV} , C_{TI} , C_{SV} и C_{SI} , можно получать значения напряжения V_{SX} и фототока $I_{\Phi X}$ ячейки для соответствующей температуры T_X и уровня солнечной инсоляции S_X :

$$V_{CX} = C_{TV} \cdot C_{SV} \cdot V_C; \quad (12)$$

$$I_{\Phi X} = C_{TI} \cdot C_{SI} \cdot I_{\Phi}. \quad (13)$$

Общий вид вольт-амперной характеристики (ВАХ) солнечного элемента представлен на рис. 4.

Разработанная математическая модель фотоэлектрической солнечной станции [7, 13, 14] позволяет исследовать и анализировать работу солнечных панелей, строить схемы замещения, а также снять вольт-амперную характеристику. Данная математическая модель далее использовалась для разработки компьютерной модели фотоэлектрической солнечной станции, позволяющей проводить (на ней) исследования различных режимов ее работы.

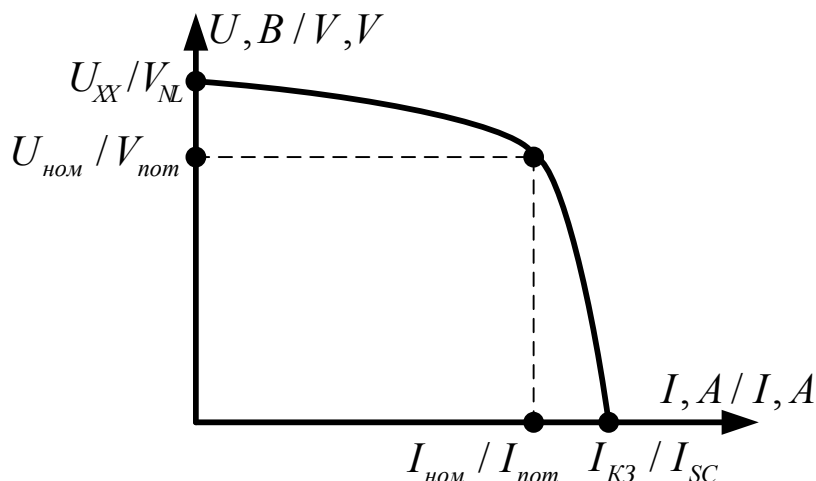


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика солнечного элемента: U_{XX} – напряжение холостого хода; I_{K3} – ток короткого замыкания; $U_{ном}$ – напряжение в точке максимальной мощности; $I_{ном}$ – ток в точке максимальной мощности

Fig. 4. Volt-ampere characteristic of the solar cell: U_{hh} – no load voltage; I_{sc} – short-circuit current; U_{nom} – voltage in the point of maximum power; I_{nom} – current in the point of maximum power

Разработка компьютерных моделей элементов оборудования фотоэлектрической станции

Актуальность создания компьютерной модели фотоэлектрической станции обусловлена необходимостью изучения поведения фотоэлектрических элементов в различных режимах работы и выполнения расчетов параметров и проектирования фотоэлектрических элементов. На основе компьютерной модели представляется возможным снятие характеристик фотоэлектрического элемента, на основе которых можно сделать вывод о режиме работы фотоэлектрической станции при различных изменениях входных параметров. Компьютерная модель позволяет описать объект или явление во всех режимах работы и при различных условиях. Составлению фотоэлектрической системы, включающей в себя солнечную панель, преобразователь постоянного тока в переменный (и нагрузку), предшествовала разработка и исследование компьютерных элементов оборудования этой системы. Разработка элементов осуществлена в среде Simulink в программно-вычислительном комплексе MATLAB [12, 13].

Компьютерная модель солнечного элемента в программно-вычислительном комплексе MATLAB реализована блоком PV Array, представленном на рис. 5.

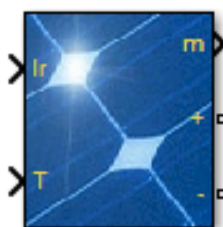


Рис. 5. Блок PV Array
Fig. 5. PV Array block

На рис. 6 а, б представлены полученные по заданным параметрам вольт-амперная и энергетическая характеристики компьютерной модели солнечного элемента.



Для проверки достоверности разработанной компьютерной модели солнечного элемента были проведены испытания солнечного элемента на физической модели с такими же параметрами.

На физической модели для снятия вольтамперной (табл. 1, рис. 6 а) и энергетической (табл. 2, рис. 6 б) характеристик задавалось напряжение сети, соответствующее энергетической освещенности E , равной 400 Вт/м^2 , и температура поверхности фотоэлектрического модуля в пределах плюс 35°C . Энергетическая освещенность и температура поверхности фотоэлектрического модуля поддерживались во время эксперимента постоянными.

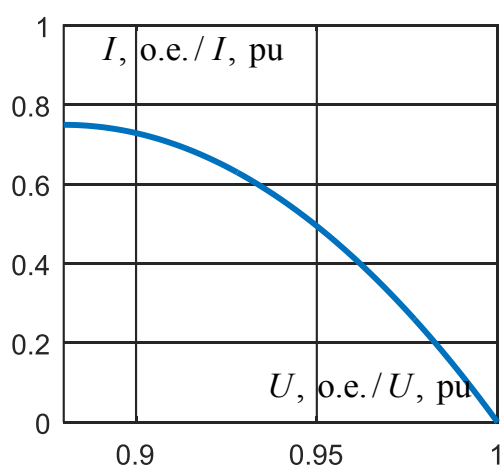
Таблица 1

**Вольт-амперная характеристика физической модели
фотоэлектрического модуля $U = f(I)$**

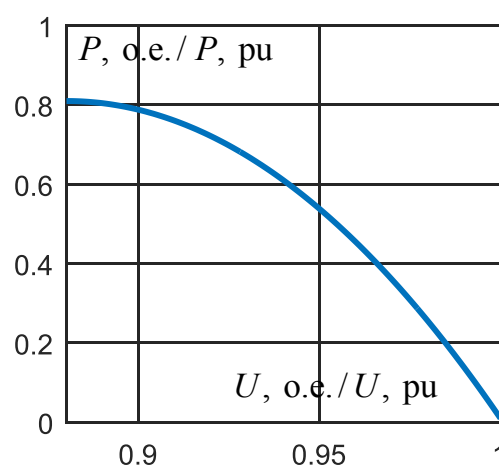
Table 1

Volt-ampere characteristic of the physical model of the photovoltaic module $U = f(I)$

I, o.e.	0	0, 1	0, 2	0, 3	0, 4	0, 6	0, 8	1
U, o.e.	1	0,985	0,98	0,975	0,955	0,94	0,905	0,9



a



b

Рис. 6. Вольт-амперная (а) и энергетическая характеристика (б)
компьютерной модели солнечного элемента

Fig. 6. Volt-ampere (a) and energy characteristic (b) of the solar cell computer model

Таблица 2

**Энергетическая характеристика физической модели
фотоэлектрического модуля $P = f(U)$**

Table 2

Energy characteristic of the physical model of the photovoltaic module $P = f(U)$

P, o.e.	0	0,19	0,29	0,43	0,57	0,71	0,9	1
U, o.e.	1	0,985	0,98	0,975	0,955	0,94	0,905	0,9

Сравнение результатов проведенных исследований позволяет сделать вывод, что компьютерная модель солнечного элемента соответствует физической модели (расхождение в па-



раметрах, менее 10%) и может быть использована для дальнейшего исследования характеристик солнечного элемента и для построения компьютерной модели альтернативного источника энергии на базе фотоэлектрической солнечной электростанции и дизеля.

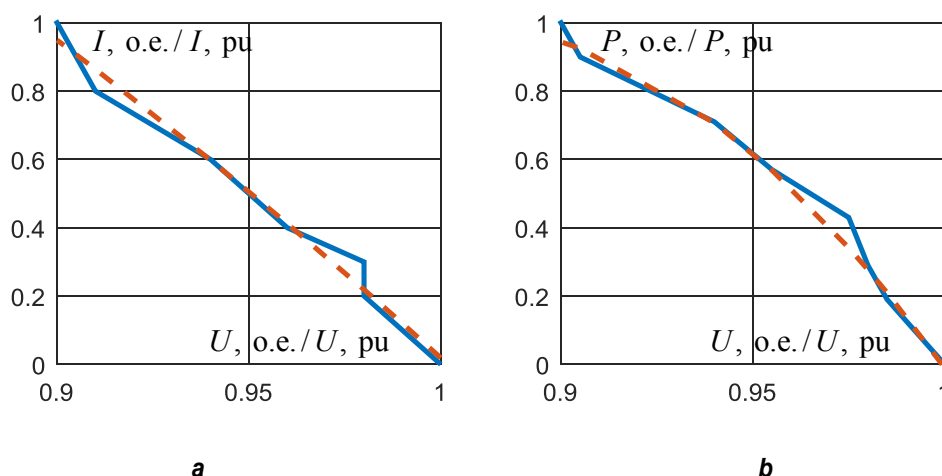


Рис. 7. Вольт-амперная характеристика $U = f(I)$ (a) и энергетическая характеристика $P = f(U)$ (b) физической модели фотоэлектрического модуля
Fig. 7. Volt-ampere characteristic $U = f(I)$ (a) and the energy characteristic $P = f(U)$ (b) of the photovoltaic module physical model

Компьютерная модель фотоэлектрической электростанции

Компьютерная модель фотоэлектрической электростанции представлена на рис. 8. Разработанная модель содержит элементы: солнечную панель блок PV Array, преобразователь постоянного тока в переменный, представленный блоком Universal Bridge, а также нагрузку.

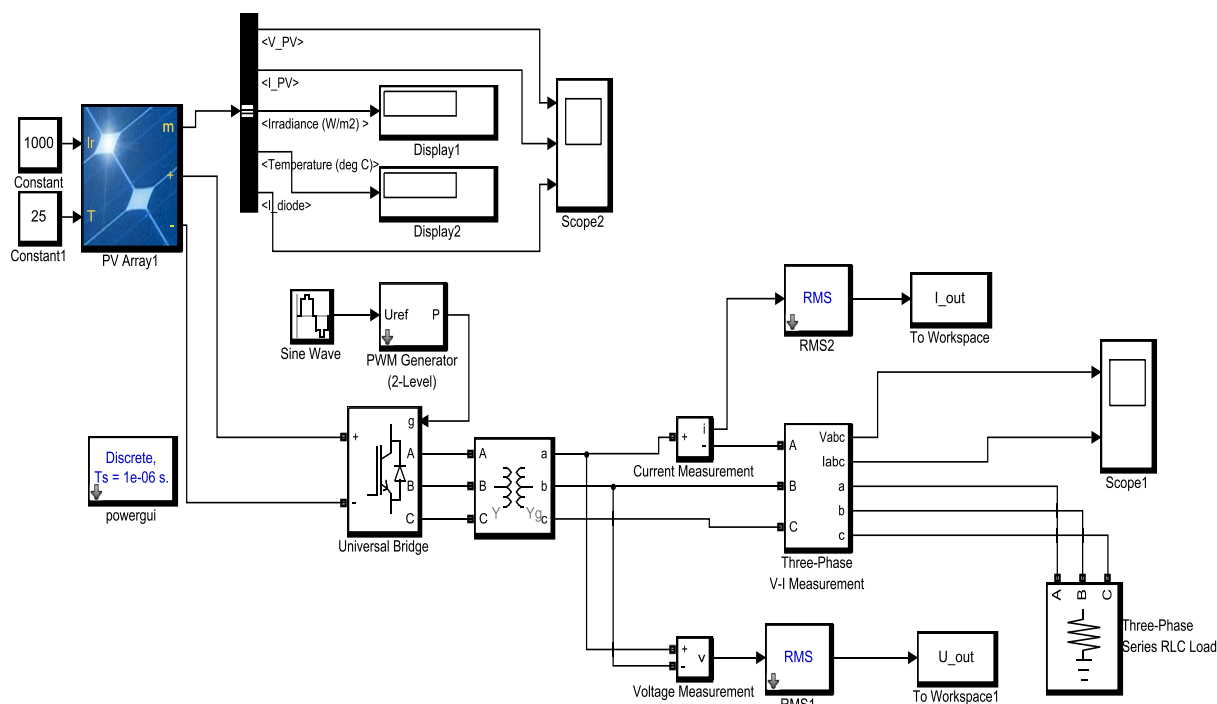


Рис. 8. Компьютерная модель фотоэлектрической электростанции
Fig. 8. Computer model of a photovoltaic power station



На рис. 9 приведены осциллограммы изменения напряжения и тока в сети. На рис. 10 приведены осциллограммы выходного сигнала инвертора.

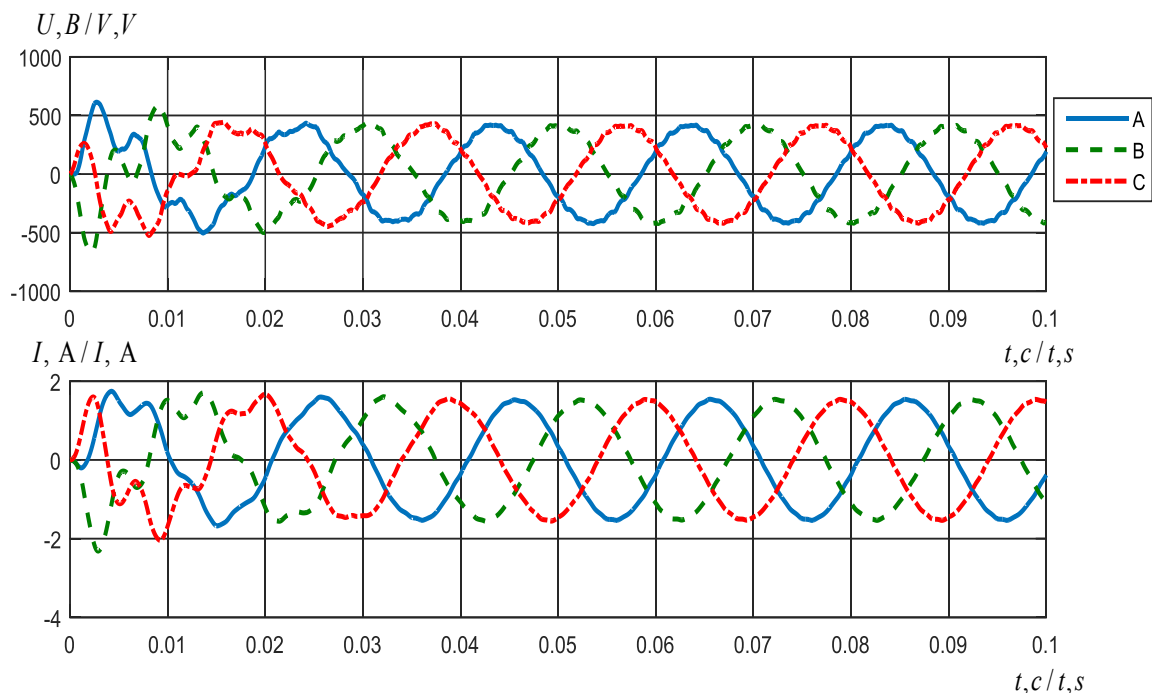


Рис. 9. Напряжение и ток в сети
Fig. 9. Voltage and current in the network

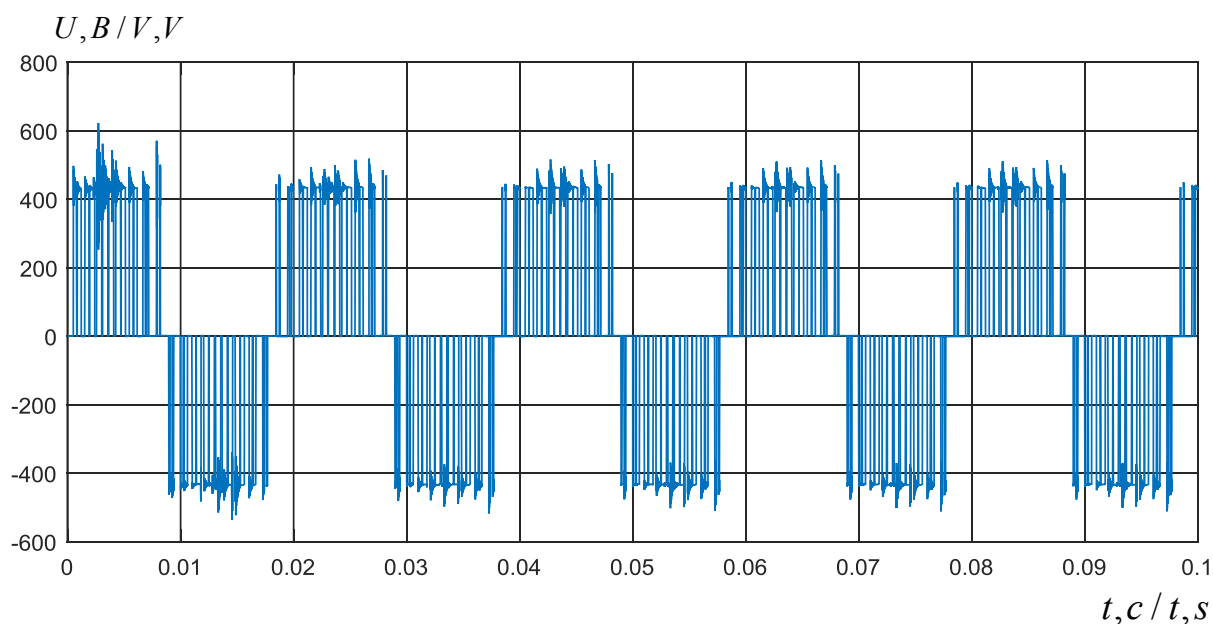


Рис. 10. Выходной сигнал инвертора
Fig. 10. Output signal of the inverter

В приведенной схеме необходимо учитывать емкостную составляющую нагрузки либо использовать фильтр для компенсации гармонических составляющих. Напряжение и ток сети без компенсации представлены на рис. 11.

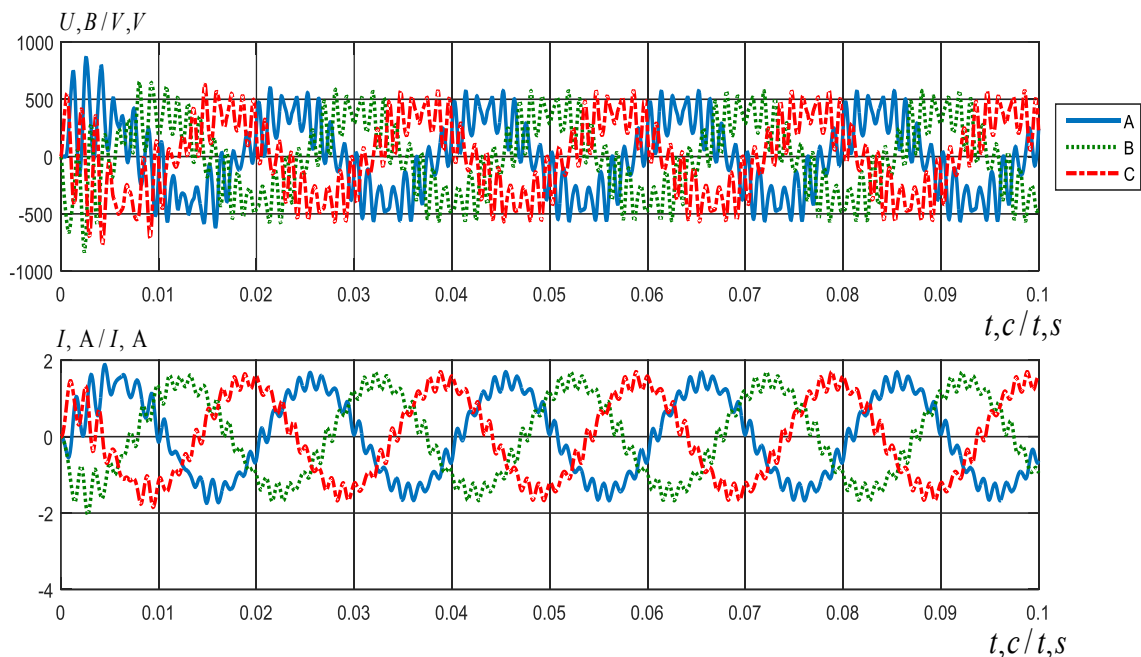


Рис. 11. Напряжение и ток в сети без компенсации
Fig. 11. Voltage and current in the compensation-free network

На компьютерной модели (рис. 8) проведено исследование влияния величины и характера нагрузки на выходное напряжение фотоэлектрической солнечной станции. С этой целью были сняты внешние характеристики и проведено сравнение их с видом внешних характеристик электромашинных источников электрической энергии.

Затем выполняется построение внешних характеристик, полученных для разных по величине и характеру нагрузок (рис. 12).

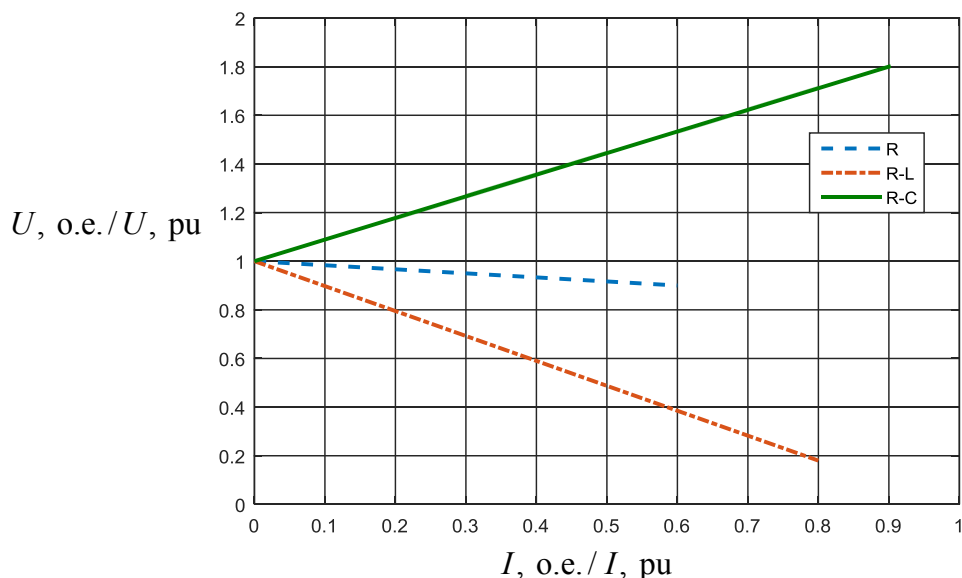


Рис. 12. Внешние характеристики солнечной электростанции при разных по величине и характеру нагрузках
Fig. 12. External characteristics of a solar power station at loads different by magnitude and nature



На рис.13 приведены внешние характеристики электромашиного источника электрической энергии (синхронного трехфазного генератора).

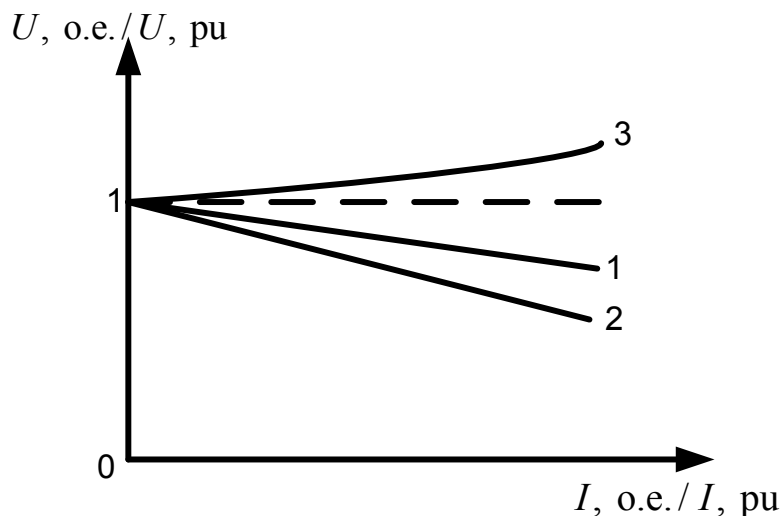


Рис. 13. Внешние характеристики синхронного трехфазного генератора при разных по величине и характеру нагрузках: 1 – активная нагрузка; 2 – активно-индуктивная нагрузка; 3 – активно-емкостная нагрузка

Fig. 13. External characteristics of a synchronous three-phase generator at loads different in magnitude and nature: 1 – active load; 2 – active-inductive load; 3 – resistive-capacitive load

Сравнение характеристик на этих рисунках подтверждает вывод о том, что компьютерная модель фотоэлектрической станции отражает достоверно влияние на выходное напряжение различных по величине и характеру нагрузок и может быть в дальнейшем использована для создания компьютерной модели гибридного автономного источника энергии на базе фотоэлектрической солнечной электростанции и дизеля.

Компьютерная модель гибридного автономного источника электроэнергии на базе фотоэлектрической солнечной электростанции и дизеля

Для бесперебойного электроснабжения удаленных потребителей целесообразно применять гибридные автономные источники энергии, например, на базе фотоэлектрической солнечной электростанции и дизеля.

Ниже представлена разработанная компьютерная модель гибридного автономного источника электроэнергии на базе фотоэлектрической солнечной электростанции и дизель-генератора. Такая компоновка позволяет бесперебойно обеспечивать потребителей электрической энергией, а также значительно уменьшать ее стоимость. Для ее создания необходимо было дополнить разработанную компьютерную модель фотоэлектрической станции компьютерными моделями дизель-генератора.

Компьютерная модель дизель-генератора

Дизель-генератор в программно-вычислительном комплексе MATLAB реализован через блок Synchronous Machine pu Fundamental, представленный на рис. 14.

Для моделирования источника механической мощности используется блок Hydraulic Turbine and Governor, представленный на рис. 15.

В результате этих дополнений компьютерная модель гибридного автономного источника электроэнергии на базе фотоэлектрической солнечной электростанции и дизеля приняла следующий вид (рис. 16).

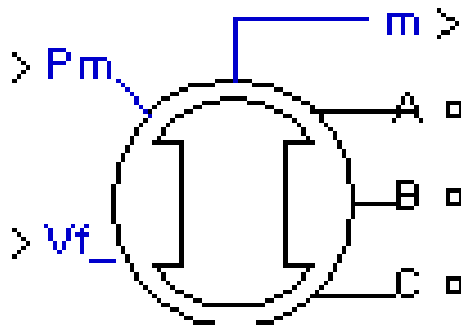


Рис. 14. Блок Synchronous Machine pu Fundamental
Fig. 14. Synchronous Machine pu Fundamental block

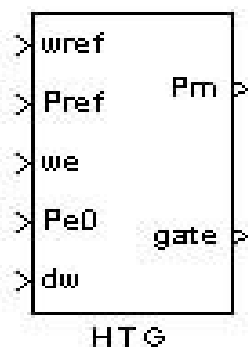


Рис. 15. Блок Hydraulic Turbine and Governor
Fig. 15. Hydraulic Turbine and Governor block

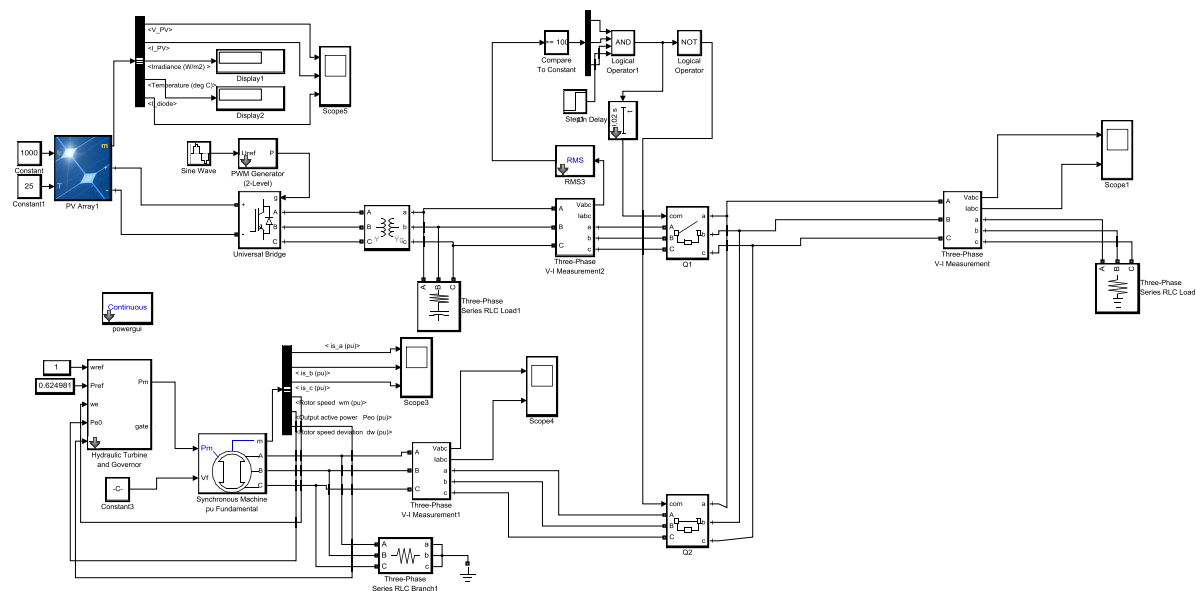


Рис. 16. Компьютерная модель гибридного автономного источника электроэнергии
на базе фотоэлектрической солнечной электростанции и дизеля
Fig. 16. Computer model of a hybrid stand-alone electric power source based
on a solar photovoltaic power station and a diesel generator

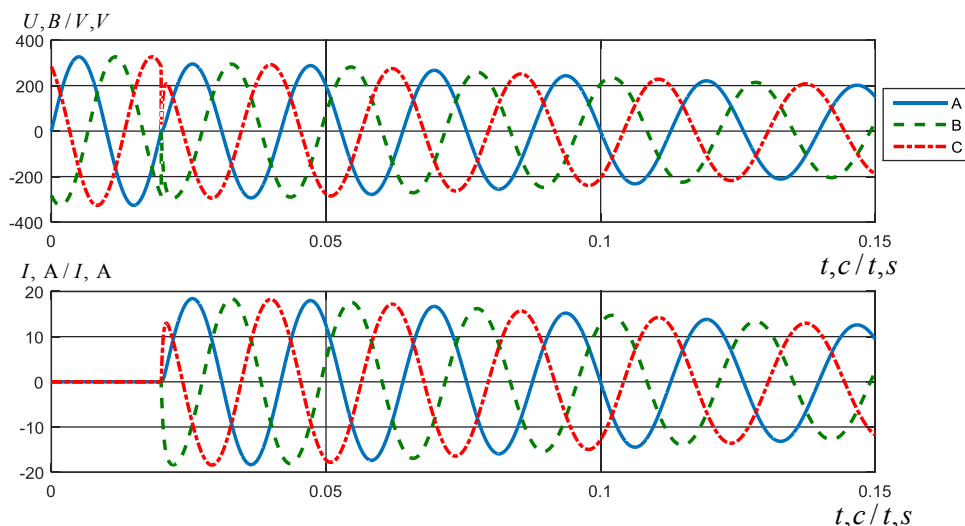


Рис. 17. Осциллограмма токов и напряжений дизель-генератора
Fig. 17. Oscillogram of currents and voltages of the diesel generator

На осциллограмме видно, что в момент времени 0,07с происходит подключение дизель-генератора на нагрузку и наблюдается переходный процесс. Он объясняется тем, что синхронный генератор включается в сеть на нагрузку. Осциллограмма токов и напряжений, снятая на нагрузке, представлена на рис. 18. На осциллограмме видно, что в момент времени 0,05 с пропадает напряжение на солнечной панели, отключится выключатель Q1. С момента времени 0,05 с до 0,07 с наблюдается бестоковая пауза, затем в момент времени 0,07 с включается выключатель Q2.

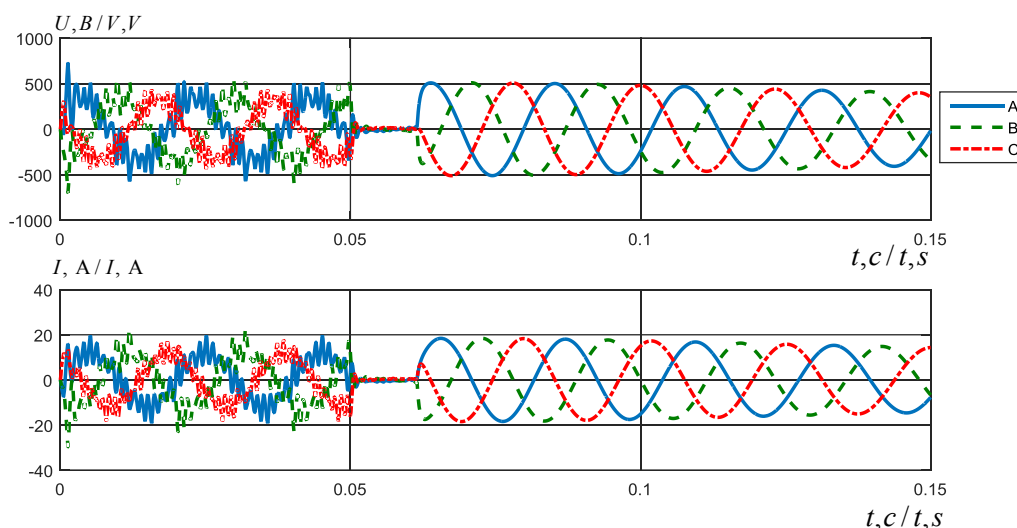


Рис. 18. Осциллограмма токов и напряжений на нагрузке
Fig. 18. Oscillogram of currents and voltages on the load

Также на осциллограмме наблюдается электромеханический переходный процесс. Схема может работать в обратном порядке: дизель-генератор работает на нагрузку 10 кВт. В момент времени 0,05 с освещенность солнечной панели увеличивается с 200 В/м² до 1000 В/м², при этом выдаваемое напряжение солнечной панели увеличивается. В этот же момент времени по уставке 100 В отключается выключатель Q2. Затем по схеме АВР через 0,02 с включается



выключатель Q1 и производится подключение на заданную нагрузку солнечной панели. Осциллограммы токов и напряжений на выводах дизель-генератора и нагрузки при работе АВР в обратной последовательности представлены на рис. 19.

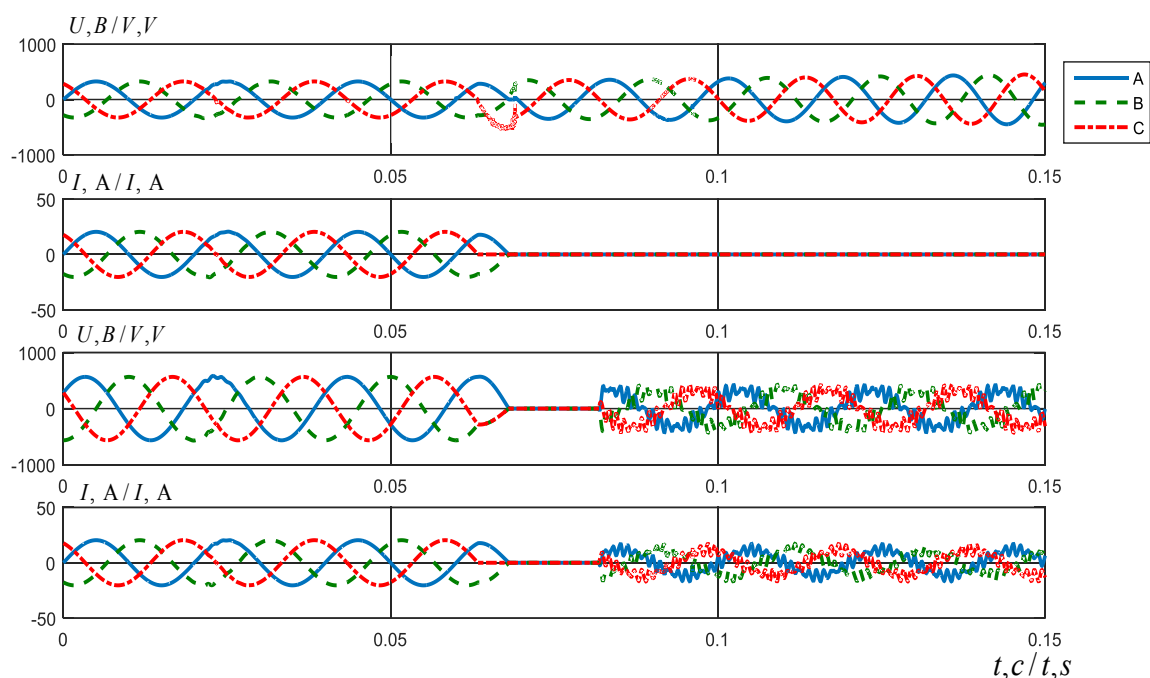


Рис. 19. Осциллограммы токов и напряжений на выводах дизель-генератора и нагрузки
Fig. 19. Oscillograms of currents and voltages on the terminals of the diesel generator and load

На осциллограммах видно, что в момент времени 0,05 с появляется напряжение на солнечной панели, отключается выключатель Q2. С момента времени 0,05 с до 0,07 с наблюдается бестоковая пауза, затем в момент времени 0,07 с включается выключатель Q1.

Для перекрытия паузы АВР могут использоваться накопители энергии.

Заключение

В статье разработаны математические и компьютерные модели элементов оборудования фотоэлектрической солнечной электростанции. Компьютерная модель разработана в программной среде MATLAB Simulink.

Разработана компьютерная модель гибридного автономного источника электроэнергии на базе фотоэлектрической солнечной электростанции и дизель-генератора. Компьютерная модель позволят исследовать влияние величины и характера нагрузки на величину выходного напряжения фотоэлектрической солнечной электростанции.

Проведено сравнение результатов исследования на моделях и на практической установке, показавшее их адекватность и возможность использования этих моделей при проектировании гибридных фотоэлектрических солнечных электростанций для конкретных районов и нагрузок.

Библиографический список

1. Lau K.Y., Yousof M.F.M., Arshad S.N.M., Anwari M., Yatim A.H.M. Performance analysis of hybrid photovoltaic/diesel energy system under Malaysian conditions // Energy, 2010. No. 35 (8). P. 3245–3255. DOI: 10.1016/j.energy.2010.04.008
2. Seeling-Hochmuth G.C. A combined optimisation concept for the design and operation strategy of hybrid-PV energy



- systems // Solar Energy. 1997. № 61(2). P. 77–87. DOI: 10.1016/S0038-092X(97)00028-5
3. Dufo-López R., Bernal-Agustín J.L. Design and control strategies of PV-diesel systems using genetic algorithms // Solar Energy. 2005. No. 79(1). P. 33–46. DOI: 10.1016/j.solener.2004.10.004
4. Velasco G., Casellas F., Guinjoan F., Martinez H., Pique R. Grid-PV-diesel hybrid system management application to MED-solar project scenarios // 2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering, IEEEIC 2015 – Conference Proceedings. P. 713–718. DOI:10.1109/IEEEIC.2015.7165252
5. Linn S., Ze Ya. A. Solar/wind/diesel hybrid energy system with battery storage for rural electrification // International Journal of Scientific Engineering and Technology Research, May 2014. Vol. 03. Issue 10. P. 2172–2176.
6. Nema P., Nema R.K., Rangnekar S. A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2009. No. 13(8). P. 2096–2103. DOI: 10.1016/j.rser.2008.10.006.
7. Слюнкин Н.П., Константинов Г.Г. Разработка математической модели ФЭС // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (г. Иркутск, 24–28 апреля 2017 г.). Иркутск, 2017. Ч. 2. С. 359–364.
8. Константинов Г.Г., Петров А.А. Солнечная энергетика как альтернатива традиционным источникам электроэнергии // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (г. Иркутск, 24–28 апреля 2017 г.). Иркутск, 2017. Ч. 2. С. 336–340.
9. Лукутин Б.В., Суржикова О.А., Шандарова Е.Б. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электрообеспечении. М.: Энергоатомиздат, 2008. 231 с.
10. Лукутин Б.В. Возобновляемые источники энергии. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. 184 с.
11. Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К. Солнечная энергетика. М.: Изд. Дом МЭИ, 2008.
12. Терехин В.Б. Моделирование систем электропривода в Simulink. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. 292 с.
13. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс. 2008.
14. Шарифов Б.Н., Терегулов Т.Р. Моделирование солнечной панели в программе MathLab/SIMULINK // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2015. Т. 19. № 4 (70). С. 77–83.

References

1. Lau K.Y., Yousof M.F.M., Arshad S.N.M., Anwari M., Yatim A.H.M. Performance analysis of hybrid photovoltaic/diesel energy system under Malaysian conditions. Energy, 2010, no. 35(8), pp. 3245–3255. DOI: 10.1016/j.energy.2010.04.008
2. Seeling-Hochmuth G.C. A combined optimisation concept for the design and operation strategy of hybrid-PV energy systems. Solar Energy, 1997, no. 61(2), pp. 77–87. DOI: 10.1016/S0038-092X(97)00028-5
3. Dufo-López R., Bernal-Agustín J.L. Design and control strategies of PV-diesel systems using genetic algorithms. Solar Energy, 2005, no. 79(1), pp. 33–46. DOI: 10.1016/j.solener.2004.10.004
4. Velasco G., Casellas F., Guinjoan F., Martinez H., Pique R. Grid-PV-diesel hybrid system management application to MED-solar project scenarios. 2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering, IEEEIC 2015 – Conference Proceedings, pp. 713–718. DOI:10.1109/IEEEIC.2015.7165252.
5. Linn S., Ze Ya.A. Solar/wind/diesel hybrid energy system with battery storage for rural electrification. International Journal of Scientific Engineering and Technology Research, May 2014, vol. 03, Issue no. 10, pp. 2172–2176.
6. Nema P., Nema R.K., Rangnekar S. A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, no. 13(8), pp. 2096–2103. DOI: 10.1016/j.rser.2008.10.006.
7. Slyunkin N.P., Konstantinov G.G. *Razrabotka matematicheskoy modeli FSES* [Development of mathematical model of FSES]. *Materialy Vserossiyskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem "Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyah Sibiri"* [Proceedings of All-Russian scientific and practical Conference with international participation "Improving efficiency of energy production and use in Siberia", Irkutsk, 24–28 April 2017]. Irkutsk, 2017, part. 2, pp. 359–364. (In Russian)
8. Konstantinov G.G., Petrov A.A. *Solnechnaya energetika kak al'ternativa tradicionnym istochnikam elektroenergii* [Solar energy as an alternative to traditional sources of electric power]. *Materialy Vserossiyskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem "Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyah Sibiri"* [Proceedings of All-Russian scientific and practical Conference with international participation "Improving efficiency of energy production and use in Siberia", Irkutsk, 24–28 April 2017]. Irkutsk, 2017, part. 2, pp. 336–340. (In Russian)
9. Lukutin B.V., Surzhikova O.A., Shandarova E.B. *Vozobnovlyаемая энергетика в децентрализованном электроснабжении* [Renewable energy in decentralized power supply]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 2008, 231 p. (In Russian)
10. Lukutin B.V. *Vozobnovlyаемые источники энергии* [Renewable energy source]. Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publ., 2008, 184 p. (In Russian)



11. Vissarionov V.I., Deryugina G.V., Kuznecova V.A., Malinin N.K. *Solnechnaya energetika* [Solar energy]. Moscow: Dom MEI Publ., 2008. (In Russian)
12. Terekhin V.B. *Modelirovanie sistem elektroprivoda v Simulink* [Simulation of electric drive systems in Simulink]. Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publ., 2010, 292 p. (In Russian)
13. Chernyh I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Modeling of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow: DMK Press Publ., 2008.
14. Sharifov B.N., Teregulov T.R. Research of the characteristics of the solar panel in the program MATLAB/Simulink. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviacionnogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Ufa State Aviation Technical University], 2015, vol. 19, no. 4(70), pp. 77–83. (In Russian)

Критерии авторства

Константинов Г.Г. предложил математическую модель. Слюнкин Н.П. разработал компьютерную модель. Федосов Д.С. проанализировал полученные результаты. Криворотова В.В. провела исследования на компьютерной модели. Авторы несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Konstantinov G.G. has proposed a mathematical model. Slyunkin N.P. has developed a computer model. Fedosov D.S. has analyzed the results obtained. Krivorotova V.V. has conducted studies using a computer model. The authors bear the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.321

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-12-185-201>

МОДЕЛЬ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКОМ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА ГРАНИЦЕ БАЛАНСОВОЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ И СЕТЕВОЙ ОРГАНИЗАЦИИ

© Р.А. Петухов¹, Е.Ю. Сизганова², Н.В. Сизганов³, А.Н. Филатов⁴

^{1,2,4}Сибирский федеральный университет,

660041, Российская Федерация, г. Красноярск, пр. Свободный, 79.

³ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики»,

660074, Российская Федерация, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 9 а, пом. 225.

РЕЗЮМЕ: В данной работе предложена структура системы управления потоком реактивной мощности на границе балансовой принадлежности предприятия и сетевой организации, рассмотрены особенности нейронных сетей и представлена численно-математическая модель на основе искусственной нейронной сети для адаптивного управления потоком реактивной мощности, автоматизировано и программно реализовано обучение нейросети. Применен метод Левенберга-Марквардта для обучения искусственной нейронной сети, разработана структура системы управления потоком реактивной мощности и регулирования уровней напряжения. Разработан и программно реализован алгоритм обучения искусственной нейронной сети, основанный на методе Левенберга-Марквардта. Предложена адаптивная система управления потоком реактивной мощности на границе балансовой принадлежности предприятия и сетевой организации на основе синтеза искусственной нейронной сети и собственной логики СТАТКОМ.

Ключевые слова: активно-адаптивные элементы, искусственные нейронные сети, обучение нейронных сетей, метод Левенберга-Марквардта, система электроснабжения, компенсирующее устройство

Информация о статье: Дата поступления 17 октября 2018 г.; дата принятия к печати 16 ноября 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2018 г.

Для цитирования: Петухов Р.А., Сизганова Е.Ю., Сизганов Н.В., Филатов А.Н. Модель адаптивной системы управления потоком реактивной мощности на границе балансовой принадлежности предприятия и сетевой организации. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(12):185–201. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-185-201

MODEL OF ADAPTIVE CONTROL SYSTEM OF REACTIVE POWER FLOW AT THE BALANCE AFFILIATION BOUNDARY OF AN ENTERPRISE AND A GRID OPERATOR

Roman A. Petukhov, Evgeniya Yu. Sizganova, Nikita V. Sizganov, Aleksey N. Filatov

Siberian Federal University,

79, Svobodny pr., Krasnoyarsk 660041, Russian Federation

¹Петухов Роман Алексеевич, старший преподаватель кафедры электротехнических комплексов и систем, e-mail: rom_pet1@mail.ru

Roman A. Petukhov, Senior Lecturer of the Department of Electrotechnical Complexes and Systems, e-mail: rom_pet1@mail.ru

²Сизганова Евгения Юрьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехнических комплексов и систем, e-mail: seu_eset@mail.ru

Evgeniya Yu. Sizganova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Electrotechnical Complexes and Systems, e-mail: seu_eset@mail.ru

³Сизганов Никита Вячеславович, инженер-исследователь отдела математического моделирования, e-mail: vitz1234@gmail.com

Nikita V. Sizganov, Engineer-Researcher of the Department of Mathematical Modeling, e-mail: vitz1234@gmail.com

⁴Филатов Алексей Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехнических комплексов и систем, e-mail: AFilatov@sfu-kras.ru

Aleksey N.F., Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Electrotechnical Complexes and Systems, e-mail: AFilatov@sfu-kras.ru



Scientific Production Center of Magnetic Hydrodynamics LLC,
9a, Akademika Kirenskogo St., office 225, Krasnoyarsk 660074, Russian Federation

ABSTRACT: The paper proposes the structure of the reactive power flow control system at a balance affiliation boundary of an enterprise and a grid operator. It deals with the features of neural networks and presents a numerical mathematical model based on an artificial neural network for adaptive control of reactive power flow. Training of the neural network is automated and implemented in software. Levenberg-Marquardt method is used for neural network training. The structure of the control system of reactive power flow and voltage levels is designed. A Levenberg-Marquardt method-based algorithm for neural network training is developed and implemented in software. The authors have proposed an adaptive control system of reactive power flow at the balance affiliation boundary of an enterprise and a grid operator based on the synthesis of the artificial neural network and STATCOM own logic.

Keywords: active-adaptive elements, artificial neural networks, neural network training, Levenberg-Marquardt method, power supply system, compensating device

Information about the article: Received October 17, 2018; accepted for publication November 16, 2018; available online December 28, 2018.

For citation: Petukhov R.A., Sizganova E.Yu., Sizganov N.V., Filatov A.N. Model of adaptive control system of reactive power flow at the balance affiliation boundary of an enterprise and a grid operator. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018; 22(12):pp. 185–201. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-185-201

Введение

В [1] показано, что для возможности регулирования потоков реактивной мощности (РМ) при обеспечении допустимых (ГОСТ 32144-2013⁵) уровней напряжения в распределительных сетях промышленных предприятий и устойчивости нагрузки необходима разработка централизованной и адаптивной системы управления параметрами средств регулирования, способной мгновенно оценивать параметры текущего режима, находить актуальные причинно-следственные законы функционирования электрической системы, управлять группой разнообразных элементов системы, с большим количеством свойств, также меняющихся со временем. Для успешного адаптивного управления потоками реактивной мощности (УПРМ) системы электроснабжения промышленного предприятия (СЭС ПП)

автоматизированная система контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ) должна работать как человеко-машинная система [2], сочетающая использование эффективных современных средств вычислительной техники с деятельностью человека-инженера, роль которого заключается в принятии окончательного решения по заданию экономического режима работы СЭС предприятия в масштабе реального времени как в ручном, так и в диалоговом режимах [3]. Применение искусственной нейронной сети для достижения достаточной скорости принятия решений управления, при этом схожести эвристического алгоритма искусственной нейронной сети (ИНС) с мышлением человека (при достаточной эффективности обучения) дает нужное решение задачи УПРМ в большинстве практически значимых случаев [4].

Структура системы управления

Для моделирования адаптивного управления потоками реактивной мощности и уровнями напряжения в электрической сети требуются следующие исходные данные:

- схема замещения электрической сети системы электроснабжения промыш-

ленного предприятия с указанием значений активных и реактивных сопротивлений линий, асинхронных двигателей, трансформаторов, СТАТКОМ;

- диапазоны регулирования реактивной мощности СТАТКОМ;



- диапазоны регулирования коэффициентов трансформации трансформаторов с устройством регулирования под нагрузкой (РПН);

- пределы допустимых изменений напряжения во всех узлах электрической сети.

Создать модель адаптивного управления, в соответствии с физическими параметрами элементов схемы замещения электрической сети СЭС ПП адекватными реальным объектам, позволяет программный комплекс Matlab. Кроме того, в Simulink Matlab достаточно просто совместить информационную сеть с электротехнической, при этом предоставив управление искусственной нейронной сети (ИНС), но в силу учета особенностей блоков моделей FACTS, реализованных в программном комплексе Simulink Matlab, необходима обработка выходных значений нейронной сети для корректной интерпретации блоками сигналов управления ИНС.

На рис. 1 представлена структура системы управления, для которой входными параметрами являются значения напряжений трех фаз на границе балансовой принадлежности ($U_{вн}$). Кроме того, для создания адаптивной модели поведения ИНС необходимо иметь обратную связь с объектом управления, а именно: с напряжениями трех фаз в каждой контрольной точке электроснабжения предприятия ($U_{ин}$).

Прежде чем передать сигналы управления от ИНС на активно-адаптивные элементы модели, необходимо обработать выходной сигнал для корректной работы блоков имитационной модели:

- задать задержку во времени приблизительно в 0,5 с. для предотвращения возникновения резонансов и усугубления переходных процессов на стороне 10 кВ главной понизительной подстанции (ГПП) и успешного управления СТАТКОМ;

- установить в дополнительном контуре перед ТРДН блок обработки сигналов

(рис. 1), который сравнивает текущее состояние РПН с состоянием, которое необходимо принять по команде ИНС, затем подает сигнал на вход управления РПН для переключения на отпайку выше или ниже. Необходимость этого обусловлена тем, что блок ТРДН с РПН имеет ограничения в логике при использовании управления им извне, кроме того, у РПН существует физическая задержка, обоснованная скоростью переключения между отпайками приблизительно равная 3 с. Недостаток внешней управляющей логики в РПН в том, что при наличии двух входных сигналов *Вверх* и *Вниз*, положение отпайки меняется только тогда, когда значение входного сигнала изменяется с 0 на 1 (с учетом физического ограничения в 3 с, заданного в параметрах блока). Процесс повторяется до тех пор, пока РПН не примет необходимое значение ИНС.

После задержки в 0,5 с. задается эталонное напряжение (V_{ref}), необходимое ИНС для успешного управления СТАТКОМ. Кроме схемы управления, представленной на рис. 1, СТАТКОМ имеет свою собственную логику. На рис. 2 показана однолинейная схема СТАТКОМ и его упрощенная схема управления.

Элементами схемы управления СТАТКОМ являются:

- *фазовая автоподстройка частоты* (PLL), которая синхронизируется по входному напряжению прямой последовательности V_1 . Выходное значение (градус $\Theta = \omega t$) используется для вычислений продольной и поперечной составляющей переменного тока и напряжения (обозначены на рисунке V_d , V_q и I_d , I_q);

- *измерительные системы*, измеряющие активные и реактивные составляющие напряжения прямой последовательности в цепи постоянного тока, которой схема и управляет, а также напряжение в цепи постоянного тока V_{dc} ;

⁵ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 2014-07-01. / GOST 32144-2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Standards of power quality in public power supply systems. Introduced 1 July 2014.

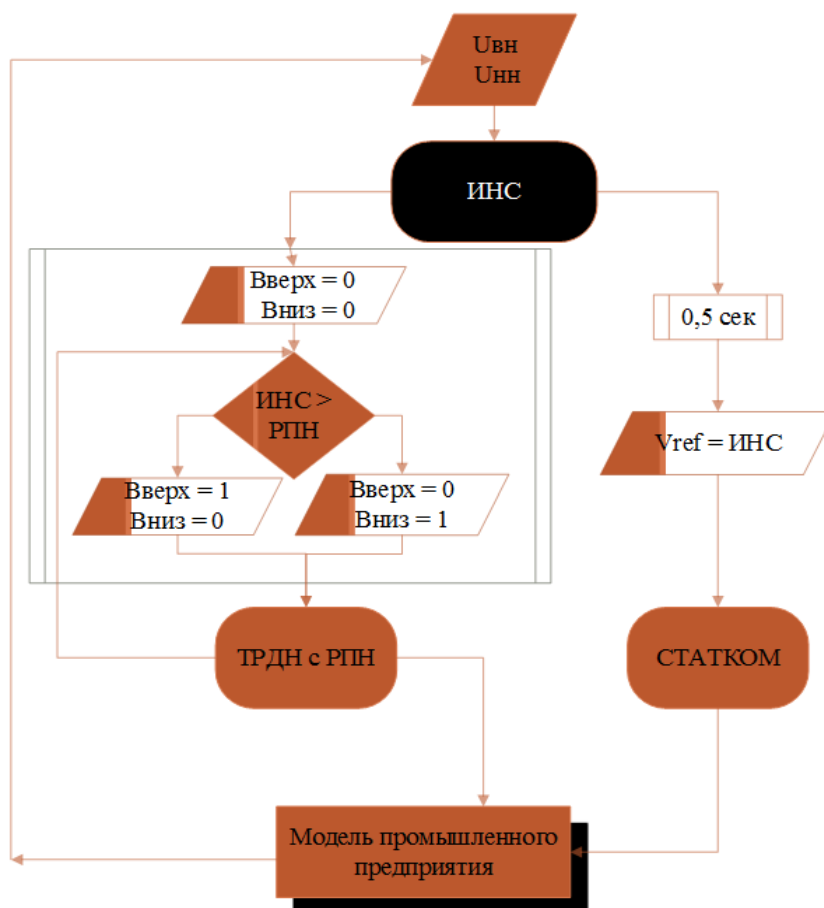


Рис. 1. Структура системы управления
Fig. 1. Control system structure

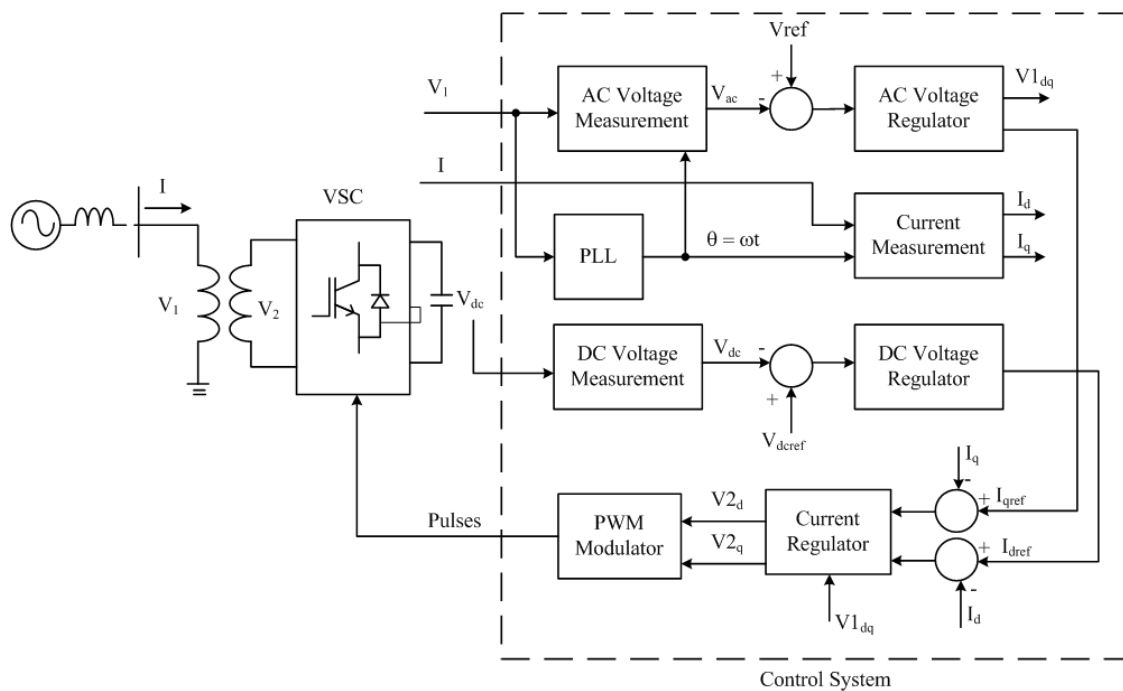


Рис. 2.Схема управления СТАТКОМ
Fig. 2. STATCOM control circuit



• *внешний контур регулирования*, состоящий из регуляторов постоянного и переменного напряжения. Выход регулятора переменного напряжения – это эталонный ток I_{qref} для регулятора тока (I_q – поперечный напряжению ток, регулирующий поток реактивной мощности). Выход регулятора постоянного напряжения – это эталонный ток I_{dref} для регулятора тока (I_d – совпадающий по фазе с напряжением ток, регулирующий поток активной мощности);

• *внутренний контур*, состоящий из регулятора тока, управляет амплитудой и фазой напряжения (V_{2d} V_{2q}), генерируемого преобразователем с широтно-импульсной

модуляцией (PWM) из I_{dref} и I_{qref} эталонных токов, созданных с помощью регуляторов постоянного и переменного напряжения соответственно. Взаимодействие регулятора тока с регулятором с прямой связью определяет выходное напряжение V_2 (V_{2d} V_{2q}) из измерений V_1 (V_{1d} V_{1q}) и реактивного сопротивления утечки трансформатора.

Таким образом, синтезированная структура системы управления позволяет ИНС оперативно реагировать на изменения на границе балансовой принадлежности и подстраивать под них активно-адаптивные элементы с учетом всех вышеописанных ограничений.

Особенности нейронных сетей для адаптивного управления

Особенность применения нейронных сетей связана с тем, что они используют механизм обучения. Пользователь нейронной сети подбирает представительные данные, а затем запускает алгоритм обучения, который автоматически настраивает параметры сети. При этом от пользователя, конечно, требуется какой-то набор эвристических знаний о том, как следует отбирать и подготавливать данные, выбирать нужную архитектуру сети и интерпретировать результаты [5–7].

Структура нейронных сетей тесно связана с используемыми алгоритмами обучения. В общем случае можно выделить три фундаментальных класса нейросетевых архитектур, широко применяемых для надежного и эффективного управления [8].

В *однослойных сетях прямого распространения* нейроны располагаются по слоям. В простейшем случае в такой сети существует входной слой источника, информация от которого передается на выходной слой нейронов (не наоборот), при этом под единственным слоем подразумевается слой вычислительных элементов (нейронов). При подсчете числа слоев не принимаются во внимание узлы источника, так как они не выполняют вычислений. Для каждого нейрона сети помимо синаптических связей с элементами входного вектора настраивается

связь с фиктивным единичным входом (коэффициент смещения). Так как выходные переменные могут принимать как бинарные, так и аналоговые значения, выбор вида активационных функций ограничен только областью допустимых значений выходных сигналов, принятой для нормализации.

Многослойные сети прямого распространения характеризуются наличием одного или нескольких скрытых слоев, узлы которых называются скрытыми нейронами или скрытыми элементами. Функция последних заключается в посредничестве между внешним входным сигналом и выходом нейронной сети. Добавляя один или несколько скрытых слоев, можно выделить статистики высокого порядка. Такая сеть позволяет выделять глобальные свойства данных с помощью локальных соединений за счет наличия дополнительных синаптических связей и повышения уровня взаимодействия нейронов. Способность скрытых нейронов выделять статистические зависимости высокого порядка особенно существенна, когда размер входного слоя достаточно велик.

Рекуррентные нейронные сети отличаются от сети прямого распространения наличием, по крайней мере, одной обратной связи. Например, рекуррентная сеть может состоять из единственного слоя нейронов,



каждый из которых направляет свой выходной сигнал на входы всех остальных нейронов слоя. Наличие обратных связей в сетях оказывает непосредственное влияние на способность таких сетей к обучению и на их производительность. Более того, обратная

связь подразумевает использование элементов единичной задержки, что приводит к нелинейному динамическому поведению, если, конечно, в сети содержатся нелинейные нейроны [8].

Численно-математическая модель на основе ИНС для адаптивного управления

Нейронная сеть прямого распространения (НСПР) состоит из слоев нейронов, следующих друг за другом. На входе каждый последующий слой использует выходы предыдущего (*скрытого*) слоя. Исключением является *входной слой*, принимающий непосредственно входные сигналы [9, 10]. Основная функция скрытых слоев – выделение статистики высокого порядка. Обучение НСПР – это процесс определения значений весов сети на основе примеров, образующих *обучающее множество* для сети с n входами и m выходами, состоит из N входных значений – *обучающих примеров*. Структура обучающего множества имеет вид:

$$\langle \tilde{X}, \tilde{Y} \rangle = \{(\tilde{x}_i, \tilde{y}_i)\}_{i=1, \overline{N}}, \quad (1)$$

где $\tilde{x}_i \in R^n$ – входной вектор из i -го примера, $\tilde{y}_i \in R^m$ – вектор ожидаемых значений (указаний учителя).

Степень близости вектора-ответа сети y_i на i -м примере и соответствующего вектора указаний учителя $\tilde{y}_i$ при текущем векторе весов нейронной сети $w \in R^W$, где w – количество весовых коэффициентов НСПР, характеризуется мгновенным функционалом качества обучения⁶:

$$Q_i = Q(\varepsilon_i(w)) = \varepsilon_i^T(w) \cdot V \cdot \varepsilon_i(w), \quad (2)$$

где $\varepsilon_i(w) = y_i(w) - \tilde{y}_i \in R^m$ – вектор отклонений выходов сети от указаний учителя, $V \in R^{m \times m}$ – положительно определенная матрица, задающая взвешенную норму вектора $\varepsilon_i(w)$. Обычно V – единичная матрица,

что сводит функционал к евклидовой норме вектора отклонений:

$$Q(\varepsilon_i(w)) = \varepsilon_i^T(w) \varepsilon_i(w) = (y_i(w) - \tilde{y}_i)^T (y_i(w) - \tilde{y}_i) = \sum_{j=1}^m (y_{ij}(w) - \tilde{y}_{ij})^2. \quad (3)$$

Степень соответствия сети данным из обучающего множества задается интегральным функционалом качества обучения⁶:

$$E(w) = \sum_{i=1}^N Q_i(w) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^m (y_{ij}(w) - \tilde{y}_{ij})^2. \quad (4)$$

Для случая с одним выходом ($m = 1$) и с учетом его обозначения как $F(x, w)$ функционал принимает следующий вид:

$$E(w) = \sum_{i=1}^N Q_i(w) = \sum_{i=1}^N (y_i(w) - \tilde{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^N (F(x_i, w) - \tilde{y}_i)^2. \quad (5)$$

Цель обучения НСПР – определение такого вектора весов w^* , чтобы функционал (5) принимал минимальное значение, что превращает процесс обучения сети в решение задачи безусловной оптимизации:

$$w^* = \arg \min_{w \in R^W} E(w). \quad (6)$$

Многовыходная нейронная сеть с выходами может быть заменена совокупностью m одновыходных сетей, что позволяет без ограничения общности рассмотреть методы обучения лишь для случая сетей с $m = 1$.

Для решения (6) существует множество методов, из которых можно выделить

⁶Сараев П.В. Суперпозиционное линейно-нелинейное нейроструктурное моделирование: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.18. Липецк. 2012. / Saraev P.V. Superposition linear-nonlinear neurostructural modeling: Doctoral Dissertation in technical sciences: 05.13.18. Lipetsk. 2012.



метод обратного распространения ошибки. Несмотря на широкое применение, его главными недостатками являются медленная сходимость и негативное влияние локальных минимумов поверхности $E(w)$ [11].

Для устранения указанных недостатков обычно используется информация высокого порядка об $E(w)$. В рамках квадратичной аппроксимации ошибки в окрестности точки w функционал имеет вид

$$E(w + \Delta w) \approx E(w) + \nabla E(w) \Delta w + \frac{1}{2} \Delta w^T \nabla^2 E(w) \Delta w. \quad (7)$$

На основе квадратичной аппроксимации разработаны широко известные методы Гаусса-Ньютона и Левенберга-Марквардта (ЛМ-метод), которые сводят задачу (6) для (7) к уравнению:

$$\nabla E(w) + \nabla^2 E(w) \Delta w = 0. \quad (8)$$

При этом

$$\begin{aligned} \nabla E(w) &= \frac{\partial \varepsilon(w)}{\partial w} \cdot \varepsilon(w) = \frac{\partial (y(w) - \tilde{y})}{\partial w} \\ \varepsilon(w) &= \frac{\partial F(x, w)}{\partial w} \cdot \varepsilon(w); \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \nabla^2 E(w) &= \left(\frac{\partial \varepsilon(w)}{\partial w} \right)^T \cdot \frac{\partial \varepsilon(w)}{\partial w} \\ &+ \sum_{i=1}^N \varepsilon(w) \nabla^2 \varepsilon(w). \end{aligned} \quad (10)$$

Ключевое различие между этими методами – подход к вычислению матрицы Гессе $\nabla^2 E(w)$. Если представить (10) в виде

$$H = J^T J + S, \quad (11)$$

где S – информация о вторых производных, то для метода Гаусса-Ньютона $S = 0$, в то время как в ЛМ-методе S аппроксимируется эвристическими правилами.

Исходя из (8–11), метод ЛМ-метод заключается в решении уравнения относительно $\Delta(w)$:

$$(J^T J + \lambda I) \Delta(w) = -J^T \varepsilon(w) \quad (12)$$

или в другой интерпретации:

$$\begin{cases} (J^T J + \lambda I) \delta = J^T \varepsilon(w) \\ \tilde{\varepsilon}(w) = -\varepsilon(w) = \tilde{y} - y(w) \end{cases} \quad (13)$$

где λ – коэффициент затухания Левенберга, δ – вектор, состоящий из величин приращения весов.

Найденный вектор δ позволяет изменить вектор весов w . Элементы вектора w обычно упорядочиваются сначала по слою, затем по нейронам, и, наконец, по весу каждого нейрона и его смещению.

Параметр λ задается изначально и определяет поведение алгоритма, делая его более похожим на градиентный метод или метод Гаусса-Ньютона. В самом начале обучения, когда функция $F(x, w)$ подобрана грубо, удобно использовать метод наискорейшего спуска, поэтому λ выбирается относительно большим. По мере уточнения коэффициентов w более эффективным становится метод Гаусса-Ньютона (при этом λ становится малой величиной; при $\lambda = 0$ метод вырождается в метод Гаусса-Ньютона). Так ЛМ-метод реализует адаптивную модель перехода между классами методов с явной аппроксимацией S и без нее.

В классическом методе Гаусса-Ньютона требуется невырожденность матрицы H . Для гарантированного обращения H К. Левенберг предложил подправлять элементы главной диагонали путем добавления к ней матрицы λI , где I – единичная матрица).

После того, как при заданном λ вектор δ будет вычислен, необходимо решить следующее: принимать модификацию или ее отклонить. Для этого рассчитывают $E(w + \delta)$ и сравнивают полученное значение с $E(w)$. Если $E(w + \delta) \leq E$, то уменьшают λ и изменяют веса $w + \delta$, иначе λ увеличивают и метод применяют заново для нового λ .

Для настройки величины λ часто используется вспомогательная величина v , (обычно $v = 10$). Если λ необходимо увеличить, то λ умножается на v , иначе – делится. Умножение повторяется до тех пор, пока $E(w + \delta) > E(w)$. Как только выполняется



неравенство $E(w + \delta) \leq E(w)$, считается, что *один обучающий цикл* (эпоха) нейросети завершился.

Таким образом, процедура, реализующая обучающий цикл НСПР, имеет вид [12]:

- 1) построить матрицу Якоби J ;
- 2) рассчитать градиент ошибки $g = J^T \tilde{\varepsilon}(w)$;
- 3) рассчитать приближенную матрицу Гессе с помощью матрицы Якоби $H^* = J^T J$;
- 4) решить уравнение $(H^* + \lambda I)\delta = g$ относительно неизвестного вектора δ ;
- 5) вычислить $E(w+\delta)$;
- 6) если $E(w+\delta) > E(w)$, то $\lambda := \nu \lambda$ и перейти на шаг 4, иначе $\lambda := \frac{\lambda}{\nu}$, $E(w) := E(w + \delta)$ и закончить цикл обучения.

Одним из дополнительных критериев останова в ЛМ-методе является то, что λ становится слишком большим.

Недостатки ЛМ-метода:

- 1) высокая чувствительность к начальным значениям весовых коэффициентов;

2) за счет использования данных из всей выборки возможно переобучение шума [12];

3) высокая вычислительная сложность, под которой подразумевается большая длительность вычислений при большом количестве обучающих примеров N и/или весовых коэффициентов w .

Для решения проблем ЛМ-метода существуют следующие подходы:

1. *Модификация*. Для увеличения сходимости к оптимальному решению предложены модификации различной сложности (примеры: настройка параметра $\lambda = 0.01 \tilde{\varepsilon}(w)^T \tilde{\varepsilon}(w)$ [13], использование геодезического ускорения [14], включение в метод регуляризации Байеса [15] и др.).

2. *Оптимизация вычислительного процесса*, направленная на сокращение времени вычислений одной эпохи.

3. *Распараллеливание* – процесс, который непосредственно не влияет на вычислительную сложность, но позволяет более эффективно использовать ресурсы компьютера.

Автоматизация и программная реализация обучения нейросети

Искусственные нейронные сети в Matlab представляют новое направление в практике создания технических систем. Возможности нейронных сетей выполнять операции сравнения по образцу и классификации объектов, недоступные для традиционной математики, позволяют создавать искусственные системы для решения задач распознавания образов, диагностики заболеваний, автоматического анализа документов и многих других нетрадиционных приложений.

До создания искусственной нейронной сети необходимо подготовить обучающую выборку, при этом она должна полно и разносторонне представлять описываемый феномен, включать в себя различные возможные ситуации. Хорошо, когда данных много, но это само по себе тоже не всегда помогает.

Для формирования обучающей выборки ИНС подготовлен зацикленный

Matlab-скрипт⁷,

```
i=1;  
while i~=300,
```

в котором случайным образом генерируются и записываются в вектор выходных значений i -го шага:

1) позиция РПН от -9 до 9 – Tap

```
point = rand;  
if point > 0.5  
    Tap = round(rand*10)-1;  
else Tap = -1*(round(rand*10)-1);  
end  
Bixodi(i,1) = [Tap];
```

2) необходимое на низкой стороне ГПП(10кВ) напряжение – Vref

```
point = rand;  
if point > 0.5
```



```
Vref = 1+rand/2;  
else Vref = 1-rand/2;  
end  
Bixodi(i,2) = [Vref];
```

3) напряжение на границе балансовой принадлежности – U_v

```
point = rand;  
if point > 0.5  
Uv = 1+rand/2;  
else Uv = 1-rand/2;  
end
```

4) По завершении симуляции имитационной модели подготавливается вектор входных значений i -го шага цикла,

```
sim('C:\Diss\cex_4new.slx')  
Uvn(1,:)=[Uvn_(length(Uvn_),1),  
Uvn_(length(Uvn_),2), Uvn_(length(Uvn_),3)];  
Unn(1,:)=[Unn_1(length(Unn_1),1),  
Unn_1(length(Unn_1),2),  
Unn_1(length(Unn_1),3)];  
Unn(2,:)=[Unn_2(length(Unn_2),1),  
Unn_2(length(Unn_2),2),  
Unn_2(length(Unn_2),3)];  
Unn(3,:)=[Unn_3(length(Unn_3),1),  
Unn_3(length(Unn_3),2),  
Unn_3(length(Unn_3),3)];  
Unn(4,:)=[Unn_4(length(Unn_4),1),  
Unn_4(length(Unn_4),2),  
Unn_4(length(Unn_4),3)];  
Unn(5,:)=[Unn_5(length(Unn_5),1),  
Unn_5(length(Unn_5),2),  
Unn_5(length(Unn_5),3)];  
Unn(6,:)=[Unn_6(length(Unn_6),1),  
Unn_6(length(Unn_6),2),  
Unn_6(length(Unn_6),3)];  
Unn(7,:)=[Unn_7(length(Unn_7),1),  
Unn_7(length(Unn_7),2),  
Unn_7(length(Unn_7),3)];
```

выполняется проверка корректного управления, а именно:

- отклонение напряжения на стороне 0,4 кВ не выходит за рамки допустимого

ГОСТ 32114-2013⁵;

- коэффициент мощности не более 0,4.

```
if (abs(Unn-380) <= (380*0.05)) && (tg_fi < 0.4)  
Bxodi(i,:)=[Uvn(1,:), Unn(1,:), Unn(2,:), Unn(3,:),  
Unn(4,:), Unn(5,:), Unn(6,:), Unn(7,:)];  
i = i+1;  
disp(i);
```

при корректном управлении моделью векторы i -го шага сохраняются в два массива «вход» и «выход».

```
save('MCorr.mat');  
end;  
end.
```

Цикл повторяется, пока обучающая выборка не составит 300 примеров корректного управления.

Реализовано обучение ИНС на алгоритме Левенберга-Марквардта, предназначенном для оптимизации параметров нелинейных регрессионных моделей. Предполагается, что в качестве критерия оптимизации используется среднеквадратичная ошибка модели на обучающей выборке.

Для того чтобы контролировать обобщающие способности модели – все данные разделены на три выборки *Train*, *Test*, *Validation* в соотношении 70%: 15%: 15%. Обучение происходило на *Train*, периодически проверяя качество модели на *Test*. Для финальной непредвзятой оценки использовалась *Validation*.

Чтобы избежать переобучения ИНС во время обучения, даже если данных мало, применяется техника регуляризации.

Идея дообучать ИНС перманентно все время на новых поступающих данных – сама по себе правильная, в реальных биологических системах все именно так и происходит. Тем не менее, для обычных искусственных нейронных сетей на современном этапе технического развития такая практика

⁵Сизганов Н.В. Управление потоками реактивной мощности в системе электроснабжения с активно-адаптивными элементами: магистерская дис. 13.04.02. Красноярск, 2016. 91 с. / Sizganov N.V. Control of reactive power flows in the power supply system with active-adaptive elements: Master's Degree thesis 13.04.02. Krasnoyarsk, 2016. 91 p.

является рискованной: сеть может переобучиться или подстроиться под самые последние поступившие данные – и потеряет свои обобщающие способности.

Для того чтобы систему можно было использовать на практике, ИНС нужно:

- 1) обучить,
- 2) протестировать качество обучения на тестовых и валидационных выборках,
- 3) выбрать удачный вариант сети, зафиксировать веса ИНС,
- 4) использовать обученную ИНС на практике, веса в процессе использования не менять.

Представленная в данной работе ИНС имеет всего два слоя, что достаточно для малого объема исходных данных с одним скрытым слоем, содержащим 24 нейрона по количеству входных напряжений (рис. 3).

Matlab-скрипт для обучения ИНС выглядит следующим образом⁷:

```
// задаются входные и выходные массивы для обучения (x,t);
x = Vxodi';
t = Vixodi';
//выбирается функция обучения нейронной сети ('trainlm' – метод Левенберга-Марквардта);
trainFcn = 'trainlm';
//указывается количество нейронов в сети с 2 слоями;
hiddenLayerSize = 24;
net = fitnet(hiddenLayerSize,trainFcn);
//реализуется регуляризация;
net.input.processFcns = {'removeconstantrows','mapminmax'};
net.output.processFcns = {'removeconstantrows','mapminmax'};
```

```
//перемешивается обучающая выборка в случайном порядке и разбивается на Train, Test, Validation;
net.divideFcn = 'dividerand';
net.divideMode = 'sample';
net.divideParam.trainRatio = 70/100;
net.divideParam.valRatio = 15/100;
net.divideParam.testRatio = 15/100;
//в качестве критерия оптимизации используется среднеквадратичная ошибка модели на обучающей выборке – 'mse';
net.performFcn = 'mse';
//обучается нейронная сеть на Train-выборке;
[net,tr] = train(net,x,t);
//тестируется нейронная сеть на Test-выборке;
y = net(x);
e = gsubtract(t,y);
performance = perform(net,t,y)
//проверяется нейронная сеть на Validation-выборке;
trainTargets = t .* tr.trainMask{1};
valTargets = t .* tr.valMask{1};
testTargets = t .* tr.testMask{1};
trainPerformance = perform(net,trainTargets,y)
valPerformance = perform(net,valTargets,y)
testPerformance = perform(net,testTargets,y)
//выводится на монитор структура ИНС;
view(net)
//создается объект Simulink на основе полученной ИНС;
gensim(net);
end.
```

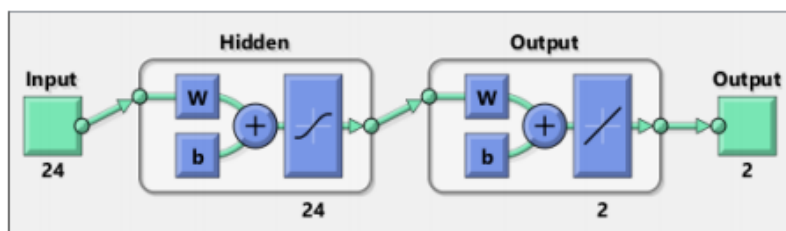


Рис. 3. Структура искусственной нейронной сети
Fig. 3. Structure of an artificial neural network

Результат обучения отражен на графике (рис. 4). Обучение заканчивается при достижении минимального значения сред-

неквадратичной ошибки на Validation-выборке, что соответствует лучшей эффективности ИНС.

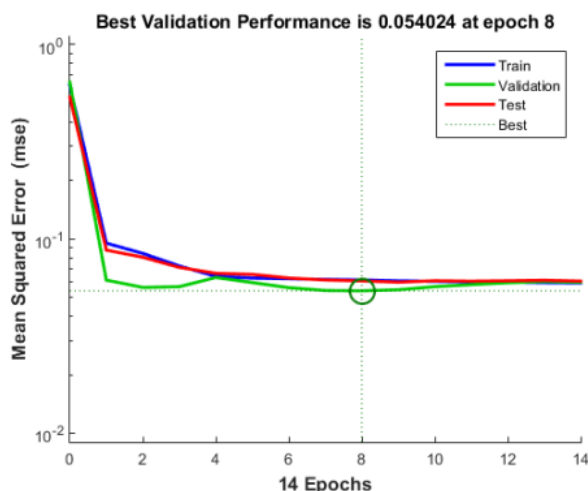


Рис. 4. График эффективности обучения ИНС
Fig. 4. Graph of artificial neural network training efficiency

Результаты имитационного моделирования

Для использования ИНС в Simulink, созданный в Matlab-скрипте блок ИНС⁷ был подключен через обработчик выходного сигнала к активно-адаптивным элементам сети и приборам измерения (рис. 5).

Рассмотрено три режима работы на границе балансовой принадлежности пред-

приятия и энергосистемы (рис. 6)⁷:

- номинальный (рис. 6 а);
- 0,85 номинального напряжения (рис. 6 б);
- 1,15 номинального напряжения (рис. 6 в).

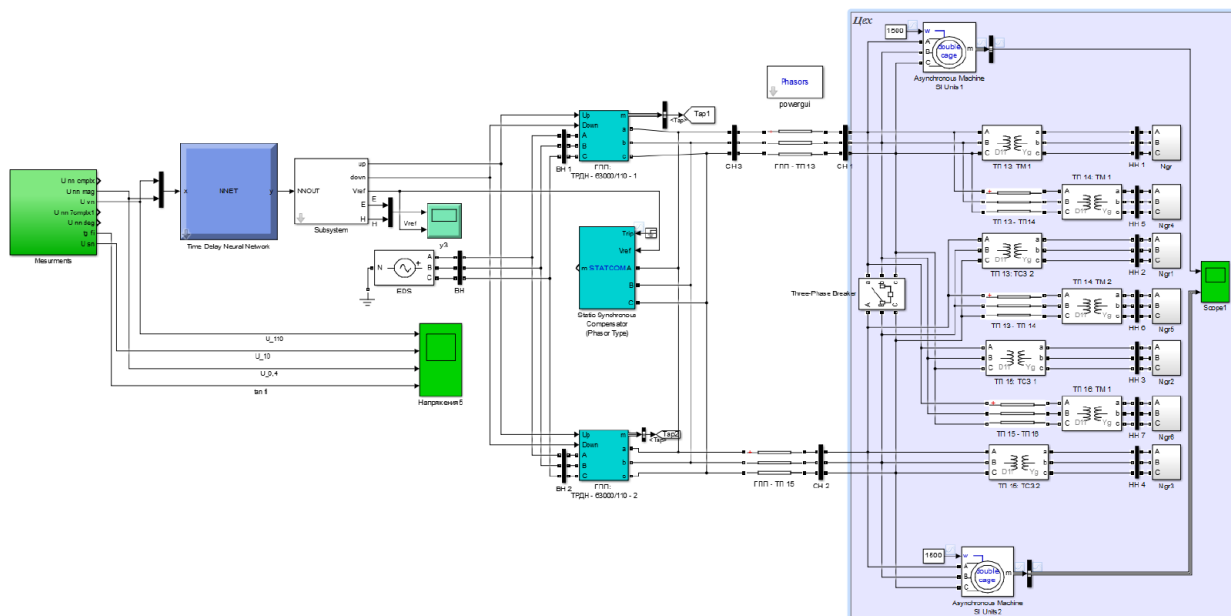
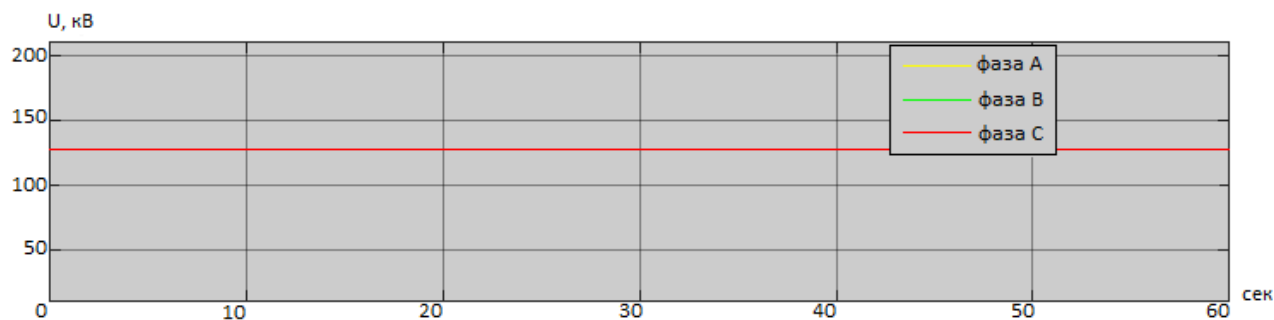
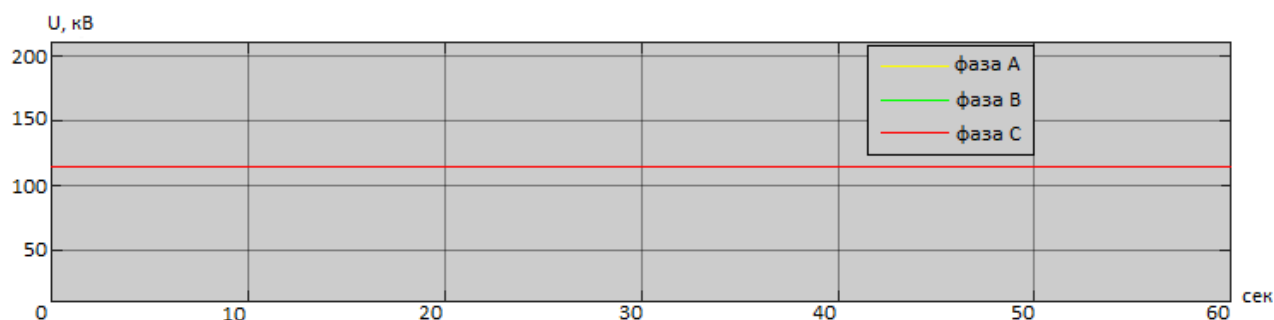


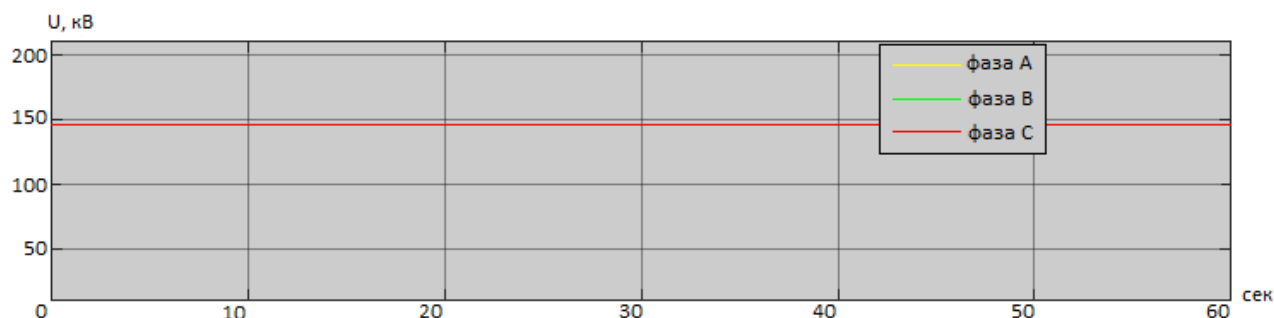
Рис. 5. Модель системы электроснабжения предприятия с управлением ИНС
Fig. 5. Model of an enterprise power supply system controlled by an artificial neural network



a



b



c

Рис. 6. Напряжение на границе балансовой принадлежности предприятия и сетевой организации:

a – номинальное, b – 0,85 от номинального, c – 1,15 от номинального

Fig. 6. Voltage at the balance affiliation boundary of the enterprise and the network organization:

a – nominal, b – 0.85 of nominal, c – 1.15 of nominal

Проанализировано влияние изменения напряжения на границе балансовой принадлежности на работу ИНС и изменение напряжений на стороне 10 кВ главной понижающей подстанции (ГПП) (рис. 7) и на стороне 0,4 кВ трансформаторных подстанций (ТП) (рис. 8). Представленные графики (рис. 6–8) показывают величину напряжения трех фаз в каждой контрольной точке системы.

Из графиков (рис. 7) видно, что ИНС

даже при номинальном значении напряжения подает сигналы активно-адаптивным элементам на повышение напряжения, но из данных графиков не ясна причина такого поведения ИНС.

Для анализа поведения ИНС стоит обратить внимание на напряжение низкой ступени цеховых трансформаторных подстанций (рис. 8), где установлена обратная связь с моделью СЭС ПП во всех контрольных точках.

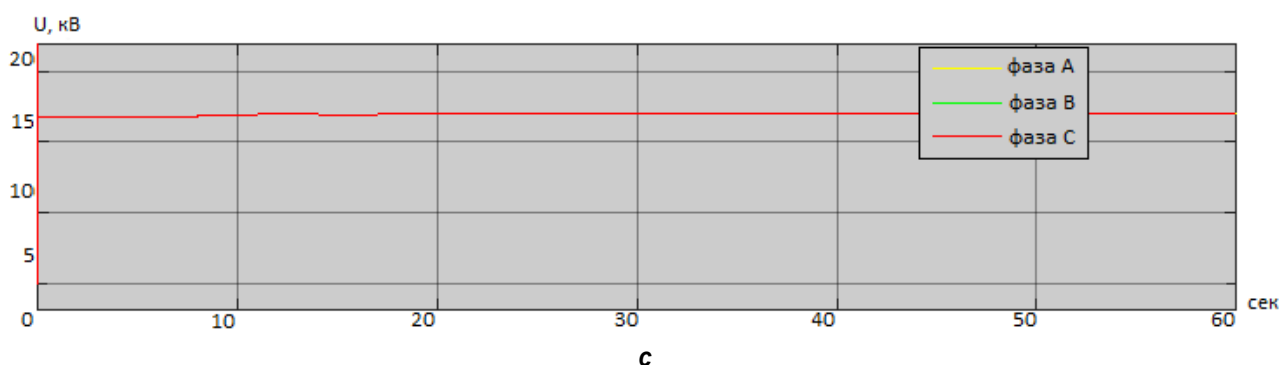
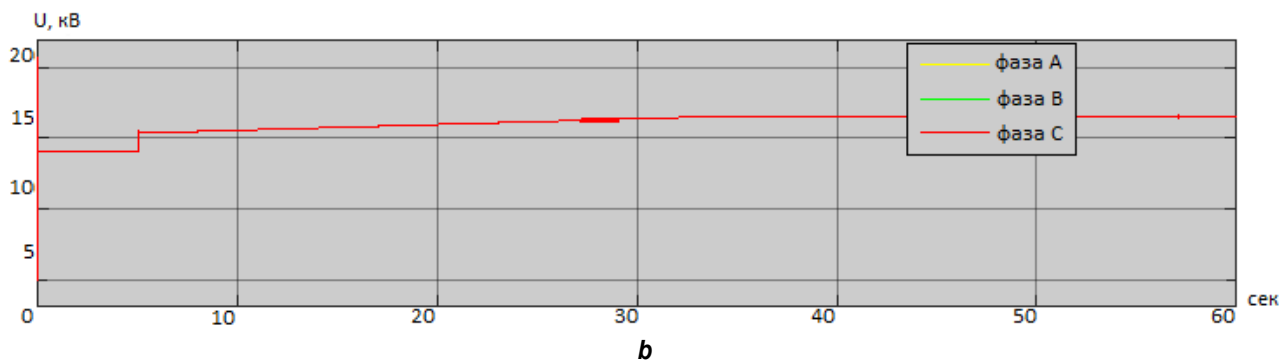
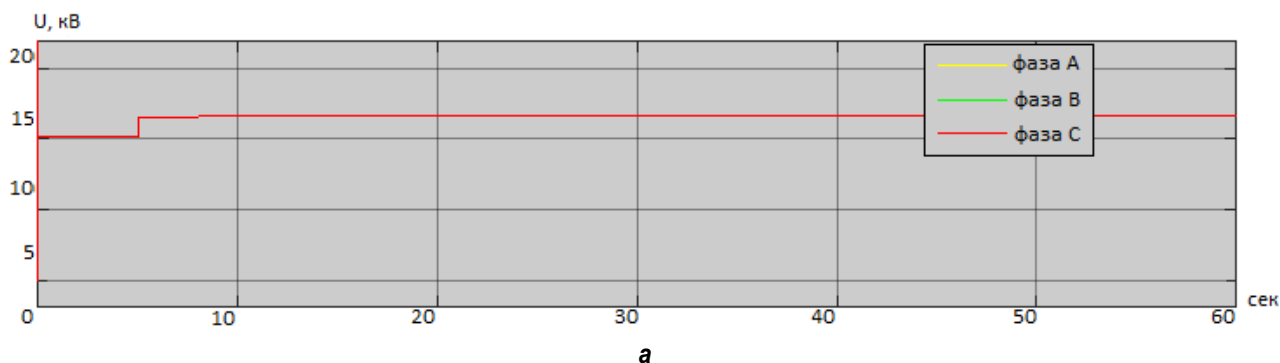
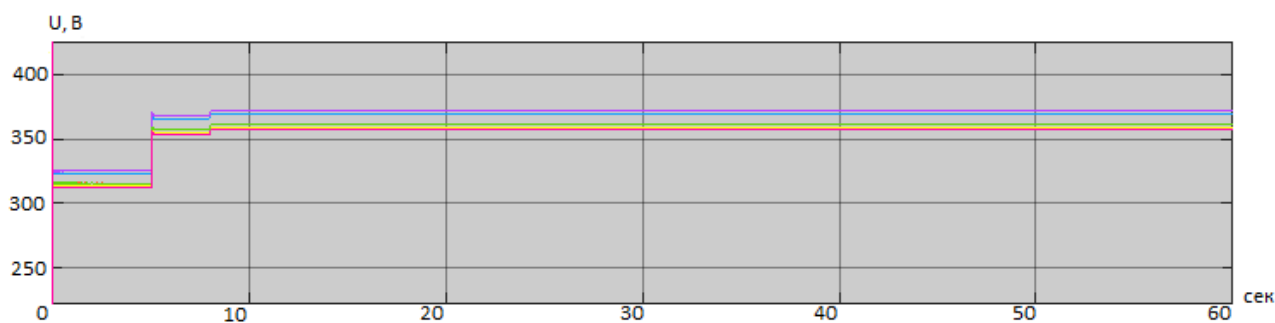


Рис. 7. Напряжения на стороне 10 кВ ГПП в зависимости от напряжения на границе раздела балансовой принадлежности: а – при номинальном, б – при 0,85 от номинального, с – при 1,15 от номинального

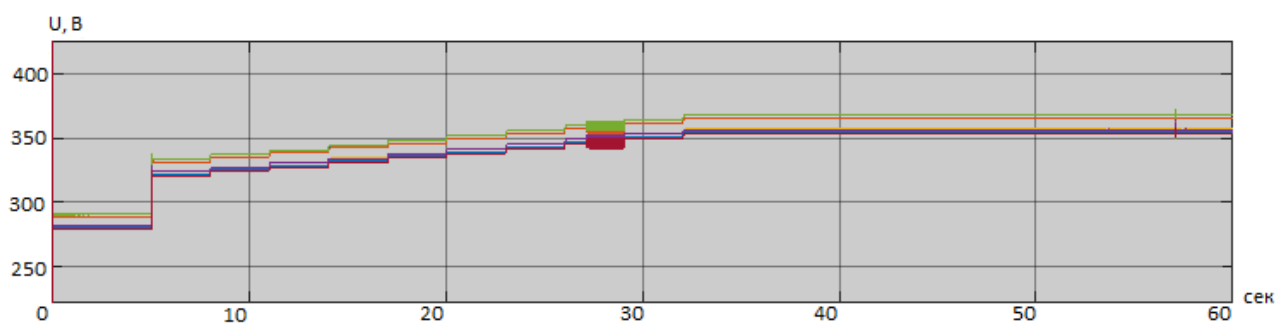
Fig. 7. Voltages on the 10 kV side of the main step-down substation depending on the voltage at the balance affiliation boundary: a – at nominal voltage, b – at 0.85 of nominal, c – at 1.15 of nominal

Видно, что даже при номинальном напряжении на границе балансовой принадлежности в системе слишком большие потери в сети 0,4 кВ. На стороне низкого напряжения ТП в среднем $U = 0,325$ кВ, что составляет 81,25% от опорного напряжения сети, что не соответствует показателям качества электрической энергии согласно ГОСТ 32144-2013⁵. ИНС в режиме реального времени определяет изменения напряжения и дает сигнал на СТАКОМ для его увеличения, затем осуществляет плавное

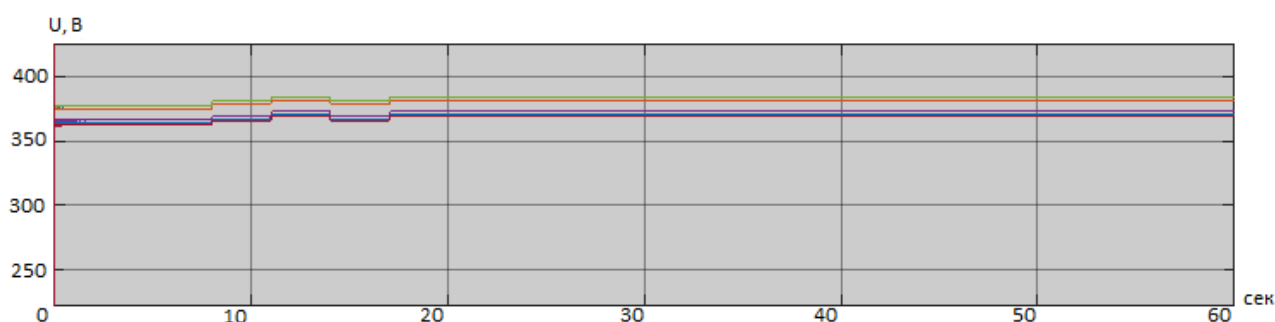
переключение РПН до достижения допустимой величины напряжения. Стоит отметить, что во всех трех режимах ИНС справляется с поставленной задачей поддержания качества напряжения в контрольных точках системы, однако при большой нехватке напряжения на границе балансовой принадлежности (15%) при переключении положения отпайки РПН происходит резонанс напряжений. Не смотря на все меры предосторожности, предпринятые в данной работе, резонанс длится приблизительно 1,5 с. Время



a



b



c

Рис. 8. Напряжение на стороне 0,4 кВ ТП в зависимости от напряжения на границе раздела балансовой принадлежности: а – при номинальном, б – при 0,85 от номинального, с – при 1,15 от номинального

Fig. 8. Voltages on the 0.4 kV side of the transformer substation depending on the voltage at the balance affiliation boundary: a – at nominal voltage, b – at 0.85 of nominal, c – at 1.15 of nominal

резонанса могло быть и меньше, но коммутация 1 отпайки длится 3 с. и предотвратить ее после запуска невозможно.

Согласно Приказу Минэнерго РФ⁸, максимальное значение коэффициента реактивной мощности ($\text{tg } \varphi$), потребляемой в часы больших суточных нагрузок электрической сети при уровне напряжения в точке поставки потребителя электрической энергии 110 кВ (154 кВ) не должен превышать значение 0,5.

В результате моделирования полу-

чены графики изменения коэффициента мощности в зависимости от уровня напряжения на границе балансовой принадлежности предприятия и сетевой организации (рис. 9)⁷.

Как видно из представленных графиков (рис. 9), разработанная модель адаптивного управления потоком реактивной мощности и регулирования уровней напряжения, на основе синтеза ИНС и собственной логики СТАТКОМ с поставленной задачей успешно справляется.

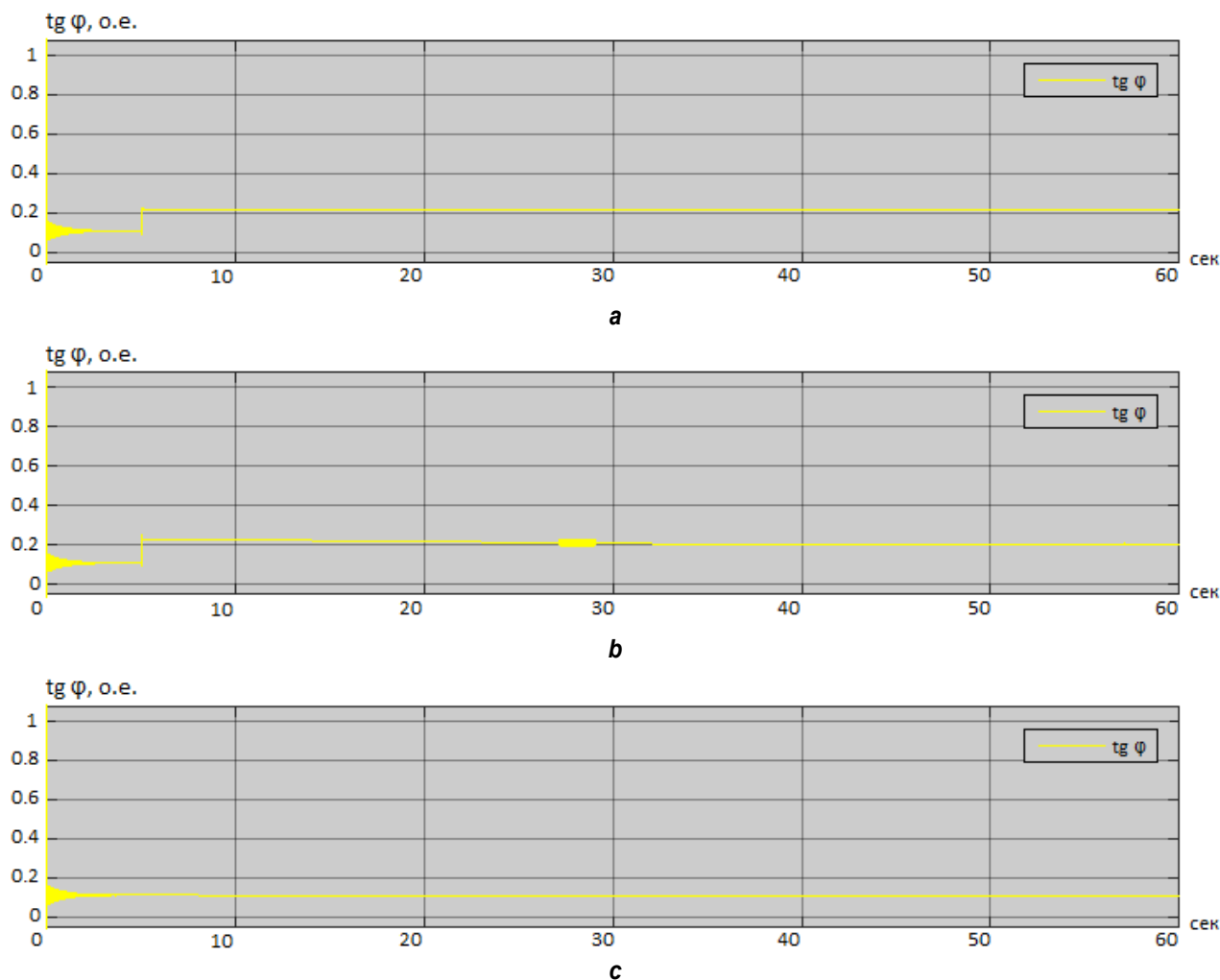


Рис. 9. График изменения коэффициента мощности: а – при номинальном напряжении, б – при 0,85 от номинального напряжения, с – при 1,15 от номинального напряжения

Fig. 9. Graph of power factor change: a – at rated voltage, b – at 0.85 of rated voltage, c – at 1.15 of rated voltage

Закключение

1. На основе синтеза ИНС и собственной логики СТАТКОМ разработана структура системы управления потоками реактивной мощности и регулирования уровней напряжения, в которой ИНС оперативно реагирует на изменения уровня напряжения на границе балансовой принадлежности предприятия и энергосистемы, а активно-адаптивные элементы подстраиваются под эти изменения с учетом всех ограничений.

2. Использована полносвязная структура ИНС прямого распространения с одним скрытым и одним выходным слоем, которая позволяет ИНС работать быстро и эффективно.

3. Разработан и программно реализован алгоритм обучения ИНС, основанный на методе Левенберга-Марквардта, предназначенном для оптимизации параметров нелинейных регрессионных моделей. В качестве критерия оптимизации использована

⁸О порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии: Приказ Минэнерго РФ от 23.06.2015. № 380. / On the calculation order of active and reactive power consumption ratio values for separate power receiving devices (groups of power receiving devices) of electric energy consumers: the Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation of 23 June 2015. No. 380



среднеквадратичная ошибка модели на обучающей выборке, автоматизация набора которой осуществлена в среде Matlab.

4. В результате моделирования показано, что синтезированная система адаптивного управления потоками реактивной

мощности позволяет на границе балансовой принадлежности предприятия организовать регулирование уровня напряжения, обеспечивая определяемый ГОСТ 32144-2013⁵, и поддерживает требуемое значение коэффициента реактивной мощности ($\text{tg } \varphi$).

Библиографический список

1. Петухов Р.А., Сизганова Е.Ю., Сизганов Н.В., Филатов А.Н. К вопросу автоматизации управления потоками реактивной мощности в системах электроснабжения // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 7. С. 123–146. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-7-123-146>
2. Guo Z. et al. (2019) Cloud Computing Platform Design and Machine Learning-Based Fault Location Method in Automatic Dispatching System of Smart Grid. In: Liang Q., Mu J., Jia M., Wang W., Feng X., Zhang B. (eds) Communications, Signal Processing, and Systems. CSPS. Lecture Notes in Electrical Engineering. 2017. Vol. 463. Springer, Singapore DOIhttps://doi.org/10.1007/978-981-10-6571-2_259
3. Han D., Sun W., Fan X. Dynamic energy management in smart grid: a fast randomized first-order optimization algorithm IJEPES, 94 (2018), 10.1016/j.ijepes.2017.07.003
4. Gwang W.K., Lee K.Y. Coordination control of ULTC transformer and STATCOM based on an artificial neural network, IEEE Trans. on Power System. 2005. Vol. 20 (2). P. 580–586.
5. Медведев В.С., Потемкин В.Г. Нейронные сети. MATLAB 6.М.: ДИАЛОГ–МИФИ, 2002. 496 с.
6. Anil K. Jain, Jianchang Mao, K.M. Mohiuddin – Artificial Neural Networks: A Tutorial, Computer.1996. Vol. 29.No. 3.P. 31–44.
7. Комякова О.А. Возможности искусственных нейронных сетей как аппарата для прогнозирования расхода электрической энергии на предприятиях железнодорожного транспорта // Омский научный вестник. Серия: Приборы, машины и технологии. 2013. № 2. С. 264–266.
8. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. 2-е изд. / пер. с англ. М.: Изд. Дом «Вильямс», 2006. 1104 с.
9. Пархоменко С.С., Леденева Т.М. Обучение нейронных сетей методом Левенберга-Марквардта в условиях большого количества данных // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2014. № 2.С. 98–106.
10. Кохонен Т. Толковый словарь «нейронных» терминов. Самоорганизующиеся карты / пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. С. 532.
11. Хайкин С. Преимущества и ограничения обучения методом обратного распространения // Нейронные сети. М.: Вильямс, 2006.С. 304–314.
12. Sousa C. Neural network learning by the Levenberg-Marquardt algorithm with Bayesian regularization (part 1). 2009. URL: http://crsouza.blogspot.com/2009/11/neural-networklearning-by-levenberg_18.html.
13. Suratgar A.A., Tavakoli M.B., Hoseinabadi A. Modified Levenberg-Marquardt method for neural networks training.
14. Transtrum M.K., Sethna J.P. Improvements to the levenberg-marquardt algorithm for nonlinear least-squares minimization // Journal of Computational Physics. 2012.
15. Sousa C. Neural network learning by the Levenberg-Marquardt algorithm with Bayesian regularization (part 2). 2009. URL: <http://crsouza.blogspot.com/2009/11/neural-networklearning-by-levenberg.html>.

References

1. Petuhov R.A., Sizganova E.Yu., Sizganov N.V., Filatov A.N. To the problem of automated control of reactive power flows in electrical energy supply systems. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2018, vol. 22, no. 7, pp. 123–146. (In Russian) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-7-123-146>
2. Guo Z. et al. (2019) Cloud Computing Platform Design and Machine Learning-Based Fault Location Method in Automatic Dispatching System of Smart Grid. In: Liang Q., Mu J., Jia M., Wang W., Feng X., Zhang B. (eds) Communications, Signal Processing, and Systems. CSPS. Lecture Notes in Electrical Engineering. 2017. Vol. 463. Springer, Singapore DOIhttps://doi.org/10.1007/978-981-10-6571-2_259
3. Han D., Sun W., Fan X. Dynamic energy management in smart grid: a fast randomized first-order optimization algorithm IJEPES, 94 (2018), 10.1016/j.ijepes.2017.07.003
4. Gwang W.K., Lee K.Y. Coordination control of ULTC transformer and STATCOM based on an artificial neural network, IEEE Trans. on Power System. 2005, vol. 20 (2), pp. 580–586.
5. Medvedev V.S., Potemkin V.G. Neironnye seti. MATLAB 6. [Neural networks]. Moscow: DIALOG–MIFI Publ., 2002, 496 p. (In Russian)
6. Anil K. Jain, Jianchang Mao, K.M. Mohiuddin – Artificial Neural Networks: A Tutorial, Computer. 1996, vol.



29, no. 3, pp. 31–44.

7. Komyakova O.A. Application of artificial neural networks as a tool for electricity load forecasting in railway enterprises. *Omskij nauchnyj vestnik: Seriya: Pribory, mashiny i tekhnologii* [Omsk Scientific Bulletin. Series: Devices, Machines and Technologies], 2013, no. 2, pp. 264–266. (In Russian)

8. Hajkin S. Neural networks: full course, 2006, 1104 p. (Russ. ed.: *Nejronnye seti: polnyj kurs*. Moscow: Dom «Vil'yams» Publ., 2006, 1104 p.)

9. Parhomenko S.S., Ledeneva T.M. Training neural networks of the method Levenberg-Marquardt in larger amount of data. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyj analiz i informacionnye tekhnologii* [Proceedings of Voronezh state University. Series: System Analysis and Information Technologies], 2014, no. 2, pp.98–106. (In Russian)

10. Kohonen T. Dictionary of "neural" terms. Self-organizing maps, 2013, 532 p. (Russ. ed.: *Tolkovyj slovar' «nejronnyh» terminov. Samoorganizuyushchiesya karty*. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2013, 532 p.)

11. Hajkin S. Advantages and limitations of the training method of back propagation. *Nejronnye seti* [Neural Networks], Moscow: Vil'yams Publ., 2006, pp. 304–314. (In Russian)

12. Sousa C. Neural network learning by the Levenberg-Marquardt algorithm with Bayesian regularization (part 1). 2009. URL: http://crsouza.blogspot.com/2009/11/neural-networklearning-by-levenberg_18.html.

13. Suratgar A.A., Tavakoli M.B., Hoseinabadi A. Modified Levenberg-Marquardt method for neural networks training.

14. Transtrum M.K., Sethna J.P. Improvements to the Levenberg-Marquardt algorithm for nonlinear least-squares minimization // *Journal of Computational Physics*. 2012.

15. Sousa C. Neural network learning by the Levenberg-Marquardt algorithm with Bayesian regularization (part 2). 2009. URL: <http://crsouza.blogspot.com/2009/11/neural-networklearning-by-levenberg.html>.

Критерии авторства

Петухов Р.А., Сизганова Е.Ю., Сизганов Н.В., Филатов А.Н. проанализировали полученные результаты. Авторы несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Petukhov R.A., Sizganova E.Yu., Sizganov N.V., Filatov A.N. analyzed the obtained results. The authors bear the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.311

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-12-202-210>

СИНХРОНИЗАЦИЯ ВЕКТОРОВ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

© Э.Р. Пленков¹

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

РЕЗЮМЕ. В статье представлен и анализируется метод синхронизации векторов токов и напряжений по концам воздушной линии электропередачи при определении места повреждения для проверки его эффективности. Применено имитационное моделирование режимов коротких замыканий на воздушной линии электропередачи с использованием программного пакета Matlab. Используются методы определения места повреждения на линиях электропередачи по измерениям значений параметров аварийного режима. Разработан алгоритм, в котором реализован предложенный метод определения места повреждения с синхронизацией векторов токов и напряжений по концам воздушной линии электропередачи. Проведено тестирование разработанного алгоритма и метода. На имитационной модели воздушной линии электропередачи выполнена серия коротких замыканий в различных точках линии с целью получения значений векторов тока и напряжений, которые затем использованы для двухстороннего определения места повреждения с применением предлагаемого метода синхронизации векторов. Погрешность двухстороннего определения места повреждения вследствие несинхронизированности векторов токов и напряжений достигает наибольших значений при коротких замыканиях в крайних точках линии (в начале и конце), так как этому соответствует наибольший угол сдвига между измеренными векторами токов и напряжений. Для заданной модели воздушной линии электропередачи наибольшая погрешность составила 4,5% при угле сдвига 23° . Исследования, проведенные на математической модели воздушной линии электропередачи, показали, что использование представленного метода синхронизации векторов токов и напряжений позволяет существенно повысить точность в определении места повреждений на воздушных линиях электропередачи. Погрешность, вызванная несинхронизированностью измерений, сводится к нулю.

Ключевые слова: линия электропередачи; короткое замыкание; определение места повреждения; синхронизация векторов токов и напряжений

Информация о статье: Дата поступления 22 октября 2018 г.; дата принятия к печати 23 ноября 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2018 г.

Для цитирования: Пленков Э.Р. Синхронизация векторов токов и напряжений при определении места повреждения на воздушных линиях электропередачи. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(12):202–210. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-202-210

CURRENT AND VOLTAGE PHASOR SYNCHRONIZATION AT FAULT LOCALIZATION IN OVERHEAD POWER LINES

Eduard R. Plenkov

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

ABSTRACT: The article presents and analyzes the method of current and voltage phasors synchronization in the end points of the overhead power line when detecting fault location in order to test the efficiency of the method. Short circuit modes in the overhead transmission line are simulated using the Matlab software. The methods of fault localization in the overhead power line based on measuring the values of emergency condition parameters are applied. An algorithm implementing the proposed method of fault localization by synchronizing current and voltage phasors in the end points of the overhead power line is developed. The algorithm and the method have been tested. A series of short circuits is performed on the simulation model in the different points of the line in order to get the values of current and voltage phasors and use

¹Пленков Эдуард Русланович, аспирант, e-mail: Eduard.Plenkov@mail.ru
Eduard R. Plenkov, Postgraduate student, e-mail: Eduard.Plenkov@mail.ru

them for the two-end localization of the fault using the proposed method of phasor synchronization. The inaccuracy of the two-end localization of the fault resulting from asynchronized nature of current and voltage phasors reaches the highest values under short circuits in the end points of the line. It is attributable to the highest phase angle between the measured phasors of current and voltage. The maximum inaccuracy of the given model of the overhead power line is 4.5% at the phase angle of 23 degrees. The studies based on the mathematical model of the overhead power line have proved that the use of the introduced method of current and voltage phasor synchronization significantly increases the accuracy of fault localization in the overhead power lines while the error caused by asynchronized measurements is reduced to zero.

Keywords: power transmission line; short circuit; fault localization; current and voltage phasor synchronization

Information about the article: Received October 22, 2018; accepted for publication November 23, 2018; available online December 28, 2018.

For citation: Plenkov E.R. Current and voltage phasor synchronization at fault localization in overhead power lines. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018; 22(12):pp. 202–210. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-202-210

Введение

В настоящее время практически все объекты энергетики оснащены цифровыми устройствами регистрации аварийных процессов, которые имеют функцию определения места повреждения (ОМП) на воздушных линиях электропередачи (ВЛ)². Исследования³ [1–12] показывают, что двухсторонние методы ОМП обладают меньшей погрешностью, чем односторонние, поскольку позволяют исключить влияние переходного сопротивления в месте КЗ на точность ОМП.

На рис. 1 представлена поясняющая схема КЗ на ВЛ с двухсторонним питанием.

На схеме приведены следующие ве-

личины: $\dot{U}', \dot{U}''$ – напряжения, соответственно, в начале и в конце ВЛ; $\dot{I}', \dot{I}''$ – токи, соответственно, в начале и в конце ВЛ; $\dot{I}_K$ – ток в месте КЗ; Z_n – переходное сопротивление нулевой последовательности в месте КЗ; L – длина ВЛ; L_K – расстояние до точки КЗ от начала ВЛ.

Двухсторонние методы ОМП используются с 60-х годов прошлого века. В то время для практического применения отсутствовали устройства, которые позволяли регистрировать вектора токов и напряжений, поэтому для расчета использовались

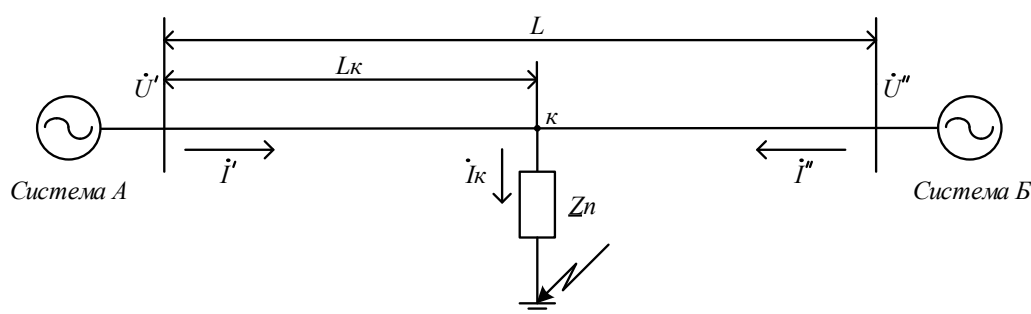


Рис. 1. Схема КЗ на ВЛ с двухсторонним питанием
Fig. 1. Diagram of a short circuit in the overhead power line with two-way power supply

²Шмурьев В.Я. Цифровая регистрация и анализ аварийных процессов в электроэнергетических системах: учеб. пособие. Санкт-Петербург: Изд-во ПЭИпк, 2006. 72 с. / Chmuriyev V. Ya. Digital registration and analysis of emergency processes in electric power systems: Learning aids. St. Petersburg: PEIpk Publ., 2006. 72 p.

³Висящев А.Н. Приборы и методы определения места повреждения на линиях электропередачи: учеб. пособие. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2001. Ч. 1. 188 с.; Ч. 2. 146 с. / Visyashchev A.N. Devices and methods for fault location on power transmission lines: Learning aids. Irkutsk: ISTU Publ., 2001. Part 1. 188 p.; Part 2. 146p.

модули токов и напряжений. При этом двухсторонние методы ОМП в эксплуатации показали достаточно высокую точность (расчетная погрешность не превышает 5%)³. В настоящее время регистрацию токов и напряжений осуществляют цифровые устройства, поэтому появилась возможность применения векторных измерений токов и напряжений. Однако опыт эксплуатации показал, что использование векторных измерений токов и напряжений не дало повышения точности в определении мест повреждений. Связано это с тем, что на каж-

дом конце ВЛ за начало отсчета принимается свой вектор (часто вектор напряжения фазы А). Так как угол сдвига между векторами начала отсчета по концам ВЛ не известен, то в расчетах использовались несинхронизированные вектора токов и напряжений, что приводило к погрешности ОМП. Поэтому для повышения точности двухсторонних методов ОМП необходимо применять синхронизированные измерения векторов токов и напряжений⁴ [2, 3, 13]. Таким образом, возникла задача в синхронизации измерений векторов токов и напряжений по концам ВЛ.

Метод синхронизации векторов токов и напряжений при определении места повреждения

На сегодняшний день синхронизация векторов токов и напряжений в разных узлах энергосистемы осуществляется на основе меток глобальной системы точного времени, позволившие привязать фазу сигнала к координированному мировому времени UTC (Coordinated Universal Time), полученной от спутниковой навигационной системы GPS (Global Positioning System) или ГЛОНАСС (Глобальная Навигационная Система). Начало интервала интегрирования

привязывается к метке точного времени и, вследствие этого, в разных устройствах и в разных узлах измерения получают коррелированные по фазе векторы тока и напряжения [4, 5, 14]. Более подробно про синхронизацию векторных измерений изложено в стандарте [6].

Структурная схема синхронизации векторных величин по концам ВЛ с помощью глобальной системы точного времени показана на рис. 2.

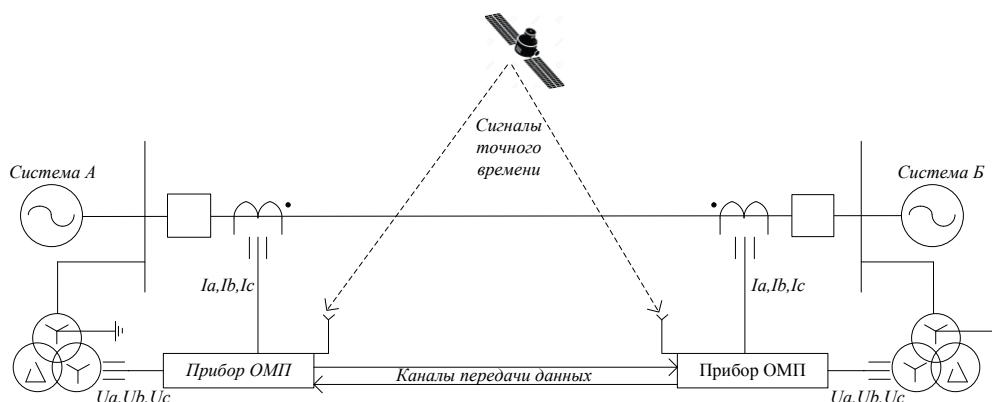


Рис. 2. Структурная схема синхронизации векторных величин по концам ВЛ с помощью GPS или ГЛОНАСС

Fig. 2. Structural diagram of phasor values synchronization in the end points of the overhead power line via GPS or GLONASS

⁴Гриб О.Г., Светелик А.А., Сендерович Г.А., Калужный Д.Н., Автоматизированные методы и средства определения мест повреждения линий электропередачи: учеб. пособ. Харьков: ХГАГХ, 2003. 146 с. / Grib O.G., Svetelik A.A., Senderovich G.A., Kaluzhny D.N. Automated methods and tools for power transmission line fault localization: Learning aids. Kharkov: HGIGH, 2003. 146 p.

Синхронизация векторов при ОМП с использованием глобальной системы точного времени пока не получила широкого распространения. В связи с этим возникла задача в разработке альтернативного метода синхронизации векторных измерений. Стоит отметить, что согласно источникам^{5,6}, оперативному персоналу эксплуатирующей организации на определение расстояния до места повреждения после отключения ВЛ от устройств релейной защиты отводится до 60 мин., поэтому в задаче ОМП по параметрам аварийного режима не требуется синхронизация векторов по концам ВЛ в режиме реального времени при КЗ.

На кафедре электрических станций, сетей и систем ИРНИТУ предложен метод синхронизации векторных измерений токов и напряжений по концам ВЛ при ОМП без использования глобальной системы точного времени [7]. Синхронизация векторов осуществляется в результате расчета с использованием электрических параметров аварийного режима по схемам замещения сети: нулевой, прямой или обратной последовательности.

Рассмотрим синхронизацию векторов на схеме замещения сети нулевой последовательности (рис. 3).

На схеме замещения ВЛ приведены следующие величины: $\dot{U}_{k0}$ – напряжение нулевой последовательности в точке КЗ; $\underline{Z}'_{c0}, \underline{Z}''_{c0}$ – сопротивления систем нулевой последовательности, соответственно, в начале и в конце ВЛ; $\underline{Z}_{л0}$ – сопротивление нулевой последовательности ВЛ; $n = L_K / L$ – расстояние до места повреждения в о.е.

Напряжение в точке КЗ можно определить по параметрам начала ВЛ:

$$\dot{U}'_{k0} = \dot{U}'_0 - \dot{I}'_0 \cdot n \cdot \underline{Z}_{л0}, \quad (1)$$

и по параметрам конца ВЛ

$$\dot{U}''_{k0} = \dot{U}''_0 - \dot{I}''_0 \cdot (1 - n) \cdot \underline{Z}_{л0}. \quad (2)$$

Угол между векторами $\dot{U}'_{k0}$ и $\dot{U}''_{k0}$ – это и есть угол сдвига между одноименными векторами по концам ВЛ вследствие несинхронизированности измерений:

$$\Delta\varphi = \arg\left(\frac{\dot{U}'_{k0}}{\dot{U}''_{k0}}\right) = \arg\left(\frac{\dot{U}'_0 - \dot{I}'_0 \cdot n \cdot \underline{Z}_{л0}}{\dot{U}''_0 - \dot{I}''_0 \cdot (1 - n) \cdot \underline{Z}_{л0}}\right). \quad (3)$$

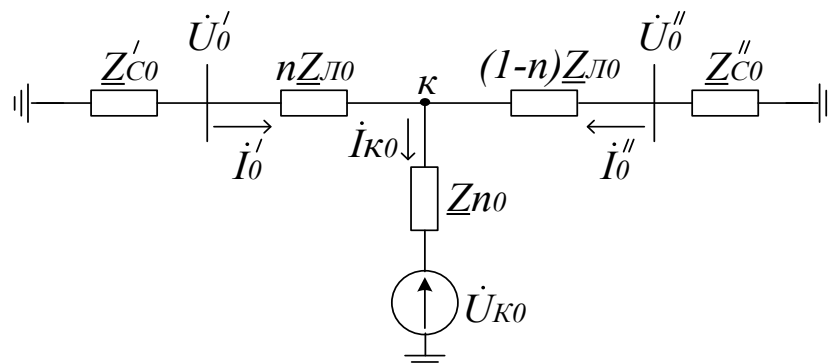


Рис. 3. Схема замещения сети нулевой последовательности при КЗ
Fig. 3. Equivalent circuit of a zero-phase-sequence transmission line under short circuits

⁵РД 34.20.563 Типовая инструкция по организации работ для определения мест повреждения воздушных линий электропередачи напряжением 110 кВ и выше с помощью фиксирующих приборов: от 01.07.85 г. до 31.12.90 г. / RD 34.20.563 Standard instruction on organization of works for fault localization in overhead power lines with the voltage of 110 kV and higher by means of clamping devices from 1 July 1985 to 31 December 1990.

⁶СТО ОАО «ФСК ЕЭС» 56947007-29.240.55.159-2013 от 28.11.2013. Типовая инструкция по организации работ для определения мест повреждений воздушных линий электропередачи напряжением 110 кВ и выше: введ. 28.11.2013; изм. 18.01.2016 / STO JSC Federal Grid Company of Unified Energy System 56947007-29.240.55.159-2013 from 28 November 2013. Standard instruction on the organization of works for fault localization in overhead power lines of 110 kV and higher: Introduced 28 November 2013; changed 18 January 2016.



Поскольку в формуле (3) расстояние до места повреждения n неизвестно, то предлагается синхронизировать векторы токов и напряжений и определять место повреждения n итерационным способом. При этом на каждой итерации будем корректировать углы сдвига векторов токов и напряжений в конце ВЛ, оставляя неизменными векторы в начале ВЛ.

1. На первой итерации ($i = 1$) принимаем векторы токов и напряжений в начале и конце ВЛ равными измеренным и рассчитываем расстояние до места повреждения одним из известных двухсторонних методов ОМП³ [1, 8], например, по выражению:

$$n_{(i)} = \frac{(\dot{U}_{o(i)}'' - \dot{U}_o') + \underline{Z}_{\text{Л0}} \cdot \dot{I}_{o(i)}''}{\underline{Z}_{\text{Л0}} \cdot (\dot{I}_o' + \dot{I}_{o(i)}'')} \quad (4)$$

На первой итерации измеренные векторы токов и напряжений по концам ВЛ не синхронизированы, следовательно, расстояние до места повреждения $n_{(i)}$ будет определено с некоторой погрешностью.

Подставим в формулу (3) найденное расстояние $n_{(i)}$ и рассчитаем угол сдвига:

$$\Delta\varphi_{(i)} = \arg \left(\frac{\dot{U}_o' - \dot{I}_o' \cdot n_{(i)} \cdot \underline{Z}_{\text{Л0}}}{\dot{U}_{o(i)}'' - \dot{I}_{o(i)}'' \cdot (1 - n_{(i)}) \cdot \underline{Z}_{\text{Л0}}} \right) \quad (5)$$

2. На последующих итерациях

($i = 2, 3, \dots$) корректируемые вектора токов и напряжений в конце ВЛ сдвигаем на угол $\Delta\varphi_{(i)}$:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{o(i)}'' &= \dot{U}_{o(i-1)}'' \cdot e^{j\Delta\varphi_{(i-1)}}; \\ \dot{I}_{o(i)}'' &= \dot{I}_{o(i-1)}'' \cdot e^{j\Delta\varphi_{(i-1)}}. \end{aligned} \quad (6)$$

и рассчитываем по формуле (4) более точное расстояние до места повреждения. Далее по формуле (5) вычисляем новый угол сдвига $\Delta\varphi_{(i)}$ между измеренными векторами токов и напряжений в начале ВЛ и скорректированными векторами в конце ВЛ.

На каждой итерации проверяем условие:

$$|\Delta\varphi_{(i)}| \leq \delta, \quad (7)$$

где $\delta = 0,01$ – допустимый угол сдвига в градусах.

Если на i -й итерации условие (7) выполняется, то итерационный процесс заканчивается и определяется расстояние до места повреждения в км:

$$L_K = n_{(i)} \cdot L. \quad (8)$$

На рис. 4 представлена блок-схема разработанного алгоритма двухстороннего ОМП с синхронизацией векторов токов и напряжений нулевой последовательности по концам ВЛ.

Тестирование метода синхронизации векторов токов и напряжений по концам ВЛ при ОМП

Для тестирования использовалась математическая модель ВЛ 110 кВ длиной 100 км с двухсторонним питанием, которая составлена из элементов библиотеки Simulink программного пакета Matlab⁷ [9] (рис. 5).

Модель ВЛ включает следующие элементы:

1. Three-Phase Source – трехфазный

источник энергии с заданным внутренним сопротивлением.

2. Three-Phase PI Section Line – П-образная схема замещения ВЛ.

3. Three-Phase Breaker – трехфазный выключатель.

4. Three-Phase Fault – моделирует КЗ на ВЛ.

⁷Новожилов М.А., Пионкевич В.А. MATLAB в электроэнергетике: учеб. пособие. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. 246 с. / Novozhilov M.A., Pionkevich V.A. MATLAB in power engineering: learning aids. Irkutsk: Publishing House of Irkutsk national research technical university, 2016, 246 p.

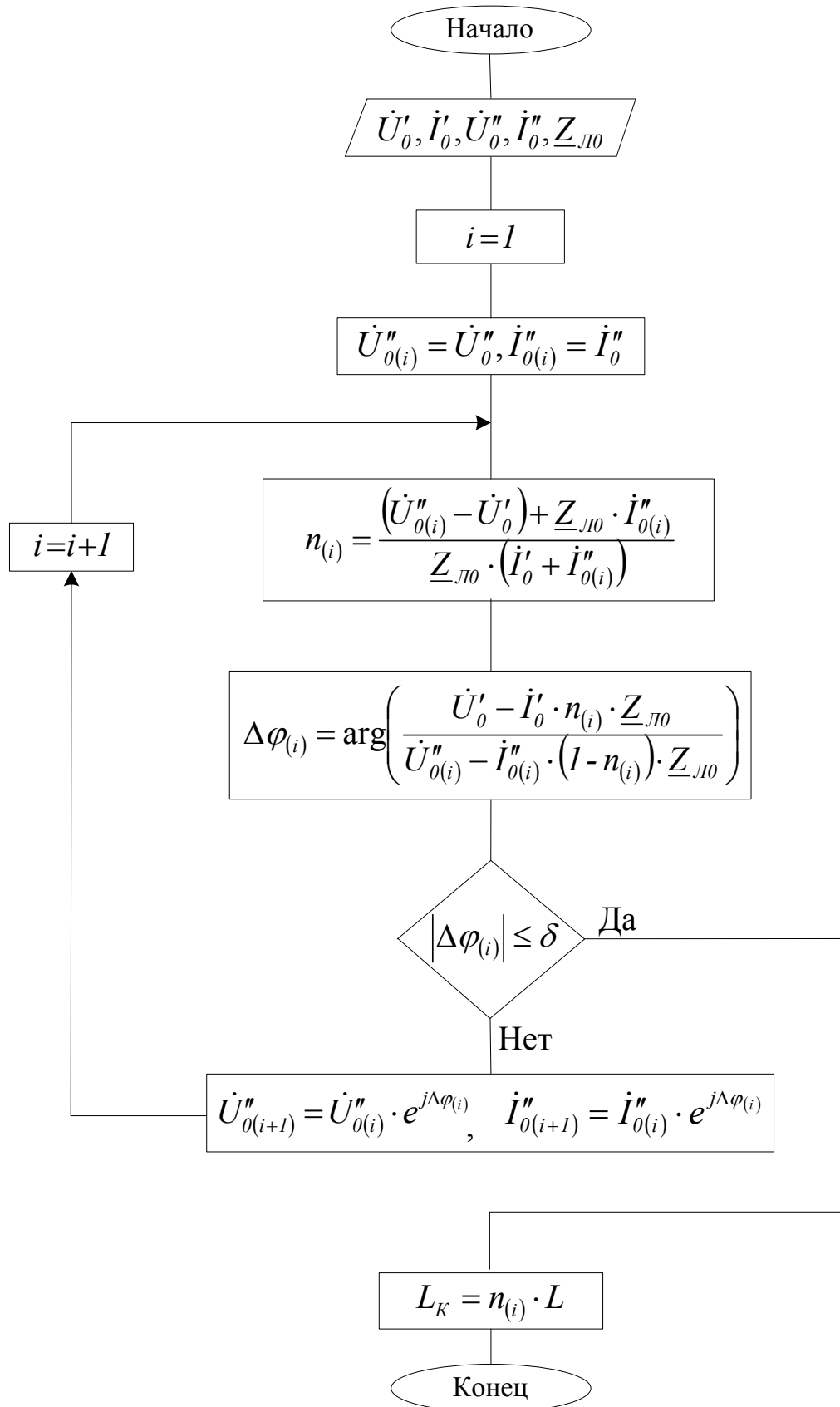


Рис. 4. Блок-схема алгоритма двухстороннего ОМП
с синхронизацией векторов токов и напряжений
Fig. 4. Block diagram of the algorithm of two-end fault localization
with synchronized current and voltage phasors

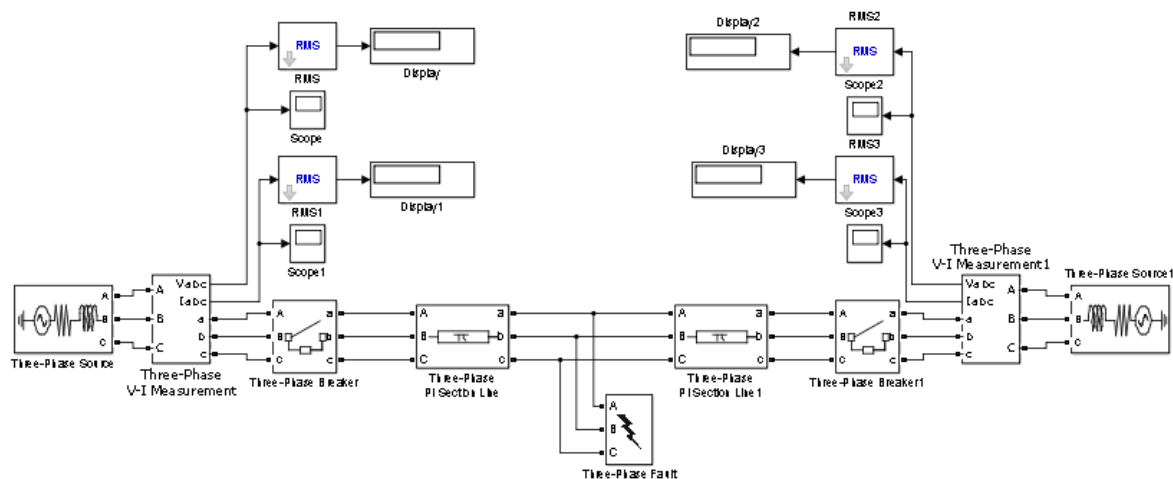


Рис. 5. Математическая модель ВЛ 110 кВ
Fig. 5. Mathematical model of 110 kV overhead power line

5. Three-Phase V-1 Measurement – элемент, осуществляющий измерения мгновенных значений тока и напряжения.

6. RMS – элемент, осуществляющий преобразование мгновенных значений токов и напряжений в комплексные значения.

Погонное сопротивление ВЛ прямой последовательности принято $\underline{Z}_{\text{ЛЛ}} = 0,2 + j0,4$ (Ом/км), погонное сопротивление ВЛ нулевой последовательности принято $\underline{Z}_{\text{Л0}} = 0,7 + j1,4$ (Ом/км), сопротивления систем в начале и конце ВЛ приняты $\underline{Z}'_{\text{C}} = \underline{Z}''_{\text{C}} = 40 + j40$ (Ом).

На модели ВЛ проведена серия однофазных КЗ через переходное сопротивление 30 Ом на различных участках ВЛ. Измеренные при имитационном моделировании КЗ векторные значения токов и напряжений по концам ВЛ использованы для определения расстояния до места повреждения по алгоритму, представленному на рис. 3. В каждом расчетном случае определена приведенная погрешность:

$$\Delta n = (n - n_{\text{факт}}) \cdot 100\%, \quad (9)$$

где n и $n_{\text{факт}}$ – соответственно, расчетное и фактическое расстояние от начала ВЛ до места повреждения в о.е.

Результаты расчетов сведены в таблицу.

Рассмотрим КЗ № 2, в котором фактическое расстояние до места КЗ составляет 0,25 о.е. от начала ВЛ. Как видно из таблицы, на первой итерации расчетное расстояние до места повреждения, вычисленное по несинхронизированным векторам токов и напряжений по концам ВЛ составляет 0,24 о.е., приведенная погрешность равна -1,0%. Определив угол сдвига между векторами токов и напряжений по концам ВЛ и повернув на этот угол вектора токов и напряжений в конце ВЛ, рассчитаем на второй итерации более точное расстояние до места повреждения 0,2497 о.е., погрешность равна -0,03%. Итерационный процесс заканчивается на третьей итерации, поскольку угол сдвига между векторами токов и напряжений по концам ВЛ на третьей итерации составил 0 градусов. При этом на третьей итерации расчетное расстояние до места повреждения составляет 0,25 о.е., что соответствует фактическому расстоянию до места КЗ.

При КЗ № 3 параметры сети «слева» и «справа» от точки КЗ равны. Поэтому угол сдвига между векторами токов и напряжений по концам ВЛ отсутствует и расчетное расстояние до места КЗ соответствует фактическому расстоянию.

В остальных случаях синхронизация векторов тока и напряжения при решении задачи ОМП на ВЛ достигается предложенным методом, согласно данным исследованиям, за три-четыре итерации.



**Результаты тестирования метода синхронизации векторов токов
и напряжений при ОМП на модели ВЛ**
**Results of testing the method of current and voltage phasors synchronization
at fault localization on the overhead power line model**

№	п _{факт.} о.е.	Расчетное расстояние до места повреждения (n) и угол сдвига (Δφ°) между векторами тока и напряжения по концам ВЛ								Суммар- ный угол сдвига векторов (Δφ _Σ ⁰)
		1 итерация		2 итерация		3 итерация		4 итерация		
		n, о.е. (Δn, %)	Δφ°	n, о.е. (Δn, %)	Δφ°	n, о.е. (Δn, %)	Δφ°	n, о.е. (Δn, %)	Δφ°	
1	0	-0,045 (-4,5)	20,3	-0,0038 (-0,38)	2,5	-0,0003 (-0,03)	0,192	0 (0)	0	22,992
2	0,25	0,24 (-1,0)	8,003	0,2497 (-0,03)	0,234	0,25 (0)	0	–	–	8,237
3	0,5	0,5 (0)	0	–	–	–	–	–	–	0
4	0,75	0,76 (1,0)	-8,003	0,7503 (0,03)	–0,234	0,75 (0)	0	–	–	-8,237
5	1	1,045 (4,5)	-20,3	1,0038 (0,38)	-2,5	1,0003 (0,03)	-0,192	1 (0)	0	-22,992

Выводы

1. Разработан метод синхронизации векторов токов и напряжений по концам ВЛ при определении места повреждения на воздушных линиях электропередачи.

2. Исследования на математической

модели ВЛ показали, что погрешность ОМП вследствие несинхронизированности измерений векторов токов и напряжений при использовании разработанного метода сводится к нулю.

Библиографический список

1. Alkim Capar and Aysen Basa Arsoy. Evaluating accuracy of fault location algorithms based on terminal current and voltage data. International journal of electronics and electrical engineering. June 2015. Vol. 3. No. 3. P. 202–206.
2. H. Al-Mohammed, Abido M.A. Fault location based on synchronized measurements: a comprehensive survey. Hindawi Publishing Corporation. The scientific world journal. 2014. Article ID 845307. 10 pages.
3. Куликов А.Л., Вуколов В.Ю., Шарыгин М.В., Бездушный Д.И., Темирбеков Ж. Алгоритм определения места повреждения линии электропередачи с ответвлениями // Вестник НГИЭИ. 2017. № 9 (76). С. 29–38.
4. Kamwa I., Grondin R. PMU configuration for system dynamic performance measurement in large multiarea power systems. IEEE transactions on power system. May 2002. Vol. 17. No. 2. P. 385–394.
5. Ваганов А.Б., Гельфанд А.М., Наровлянский В.Г. Алгоритм обработки синхронизированных векторных измерений параметров режима энергосистемы // Электрические станции. 2012. № 6. С. 47–51.
6. IEEE Std 37.118.1-2011. IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems (Revision of IEEE Std C37.118-2005).

7. Пат. № 2505827, Российская Федерация, МПК G01R31/08. Способ определения места короткого замыкания на воздушной линии электропередачи по замерам с двух ее концов (варианты) / А.Н. Ви-сящев, Э.Р. Пленков, С.Г. Тигунцев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «ИрГТУ». 2012121320/28; заявл. 23.05.2012, опубл. 27.01.2014. Бюл. № 3.
8. Gururajapathy S.S., Mokhlis H., Illias H.A. Fault location and detection techniques in power distribution systems with distributed generation: a review. Renewable and sustainable energy reviews. July 2017. Vol. 74. P. 949–958.
9. Guobing Song, Xu Chu, Shuping Gao, Xiaoning Kang, Zaibin Jiao and Jiale Suonan. Novel distance protection based on distributed parameter model for long-distance transmission lines. IEEE transactions on power delivery. October 2013. Vol. 28. No. 4. P. 2116–2123.
10. Козлов В.Н., Павлов А.О., Бычков Ю.В. Развитие микропроцессорных средств определения места повреждения на линиях электропередачи // Релейная защита и автоматизация. Чебоксары. 2014. № 02(15). С. 45–49.



11. Козлов В.Н., Павлов А.О., Ефимов Е.Б. Определение места повреждения на линиях ФСК ЕЭС. Релейная защита и автоматика энергосистем // Сборник докладов XX конференции (г. Москва, 1–4 июня, 2010 г.). Москва, 2010. С. 286–290.
12. Ефремов В.А. Виды погрешностей ОМП и их влияние на точность замера // Релейная защита и автоматизация. 2014. № 02(15). С. 54–58.
13. Подшивалин А.Н., Исмукко Г.Н., Адаптация методов определения места повреждения к современным

- требованиям эксплуатации линий электропередачи. Современные направления развития систем релейной защиты и автоматика энергосистем (г. Екатеринбург, 3–7 июня, 2013 г.). Екатеринбург, 2013.
14. Иванов И.Е., Мурзин А.Ю. Определение статистических свойств случайной ошибки, сопровождающей синхронизированные векторные измерения токов и напряжений в установившемся режиме // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2014. № 3. С. 29–38.

References

1. Alkim Capar and Aysen Basa Arsoy. Evaluating accuracy of fault location algorithms based on terminal current and voltage data. International journal of electronics and electrical engineering. June 2015, vol. 3, no. 3, pp. 202–206.
2. Al-Mohammed H., Abido M.A. Fault location based on synchronized measurements: a comprehensive survey. Hindawi Publishing Corporation. The scientific world journal. 2014. Article ID 845307. 10 pages.
3. Kulikov A.L., Vukolov V.Yu., Sharygin M.V., Bezdushnyj D.I., Temirbekov Zh. Fault location algorithm for a power line with taps. Vestnik NGIEI [Herald NGIEI], 2017, no. 9 (76), pp. 29–38. (In Russian)
4. Kamwa I., Grondin R. PMU configuration for system dynamic performance measurement in large multiarea power systems. IEEE transactions on power system. May 2002. vol. 17, no. 2, pp. 385–394.
5. Vaganov A.B., Gel'fand A.M., Narovlyanskij V.G. Processing algorithm of synchronized measurements of vector mode power. Elektricheskie stancii [Electrical Stations], 2012, no. 6, pp. 47–51. (In Russian)
6. IEEE Std 37.118.1-2011. IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems (Revision of IEEE Std C37.118-2005).
7. Visyashchev A.N., Plenkov E.R., Tiguncev S.G. Способ определения места короткого замыкания на воздушной линии электропередачи по замерам с двух ее концов (варианты) [Determination method for short circuit location on an overhead transmission line by measurements from its two ends (variants)]. Patent RF, no. 2505827, 2014.
8. Gururajapathy S.S., Mokhlis H., Illias H.A. Fault location and detection techniques in power distribution systems with distributed generation: a review. Renewable and sustainable energy reviews. July 2017, vol. 74, pp. 949–958.
9. Guobing Song, Xu Chu, Shuping Gao, Xiaoning Kang,

- Zaibin Jiao and Jiale Suonan. Novel distance protection based on distributed parameter model for long-distance transmission lines. IEEE transactions on power delivery. October 2013. vol. 28, no. 4, pp. 2116–2123.
10. Kozlov V.N., Pavlov A.O., Bychkov Yu.V. Development of microprocessor-based tools for fault localization on power lines. Relejnaya zashchita i avtomatizaciya [Relay Protection and Automation], 2014, no. 02(15), pp. 45–49. (In Russian)
 11. Kozlov V.N., Pavlov A.O., Efimov E.B. Opredelenie mesta povrezhdeniya na liniyah FSK EES. Relejnaya zashchita i avtomatika energosistem [Determining fault location on the lines of the Federal Grid Company of the Unified Energy System]. Sbornik dokladov XX konferencii [Collection of XX conference reports, Moscow, 1–4 June, 2010]. Moscow, 2010, pp. 286–290. (In Russian)
 12. Efremov V.A. Kinds of errors in line fault location and their influence to measurement accuracy. Relejnaya zashchita i avtomatizaciya [Relay Protection and Automation], 2014, no. 02(15), pp. 54–58. (In Russian)
 13. Podshivalin A.N., Ismuko G.N. Adaptaciya metodov opredeleniya mesta povrezhdeniya k sovremennym trebovaniyam ekspluatatsii linij elektroperechachi [Adaptation of fault localization methods to the modern requirements for power line operation]. Sovremennye napravleniya razvitiya sistem relejnoj zashchity i avtomatiki energosistem [Modern development trends of relay protection systems and power system automation, Ekaterinburg, 3–7 June, 2013]. Ekaterinburg, 2013. (In Russian)
 14. Ivanov I.E., Murzin A.Yu. Determination of statistical properties of a random error accompanying synchronized phasor measurements of currents and voltages in a steady state mode. Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta [Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University], 2014, no. 3, pp. 29–38. (In Russian)

Критерии авторства

Пленков Э.Р. самостоятельно разработал материал и подготовил рукопись. Несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Plenkov E.R. has independently developed the material and prepared the manuscript for publication. He bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.762.52

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-12-211-220>

ВЛИЯНИЕ УРОВНЯ СМАЧИВАЕМОСТИ КАРБИДОКРЕМНИЕВЫХ ЧАСТИЦ МАГНИЕМ В АЛЮМИНИЕВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ЛИГАТУРАХ НА ИХ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

© Е.М. Гутема¹, В.Ю. Бажин²

Санкт-Петербургский горный университет,
199106, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, о-в Васильевский, 21 линия, 2.

РЕЗЮМЕ: Рассмотрены возможности повышения эффективности технологии производства алюминиевых композиционных лигатур и сплавов на основе модифицирования частицами из карбида кремния, полученного из отходов боковой футеровки алюминиевых электролизеров, что обеспечивает получение заготовок и изделий с высоким уровнем механических свойств и пластичности. Выявлены рациональные условия смачиваемости частиц карбида кремния и покрытия их поверхности магнием, это влияет на равномерность распределения в алюминиевой матрице, а также обуславливает действие механизмов и кинетику формирования однородной структуры при получении композитной алюминиевой лигатуры. В работе использованы современные методы анализа с использованием современного аналитического оборудования, в частности анализатора площади поверхности Quantachrome Nova 3200e. Определен уровень смачиваемости и степень покрытия карбидокремниевых частиц после их механической обработки и после погружения в расплав магния. Равномерность распределения частиц в микрообъеме алюминиевой матрицы доказана при использовании рентгенофлуоресцентного спектрометра XRF-1800 (Shimadzu). Выполнены механические испытания образцов (предел прочности на растяжение, твердость, относительное удлинение) при согласовании структурных изменений на макро- и микроуровне, которые подтверждают улучшение характеристик при высоком значении смачиваемости частиц магнием в алюминиевой матрице. Результаты экспериментов показали, что разработанная технология является эффективной для получения равномерной дисперсии при внедрении армирующих частиц посредством магниевой лигатуры в алюминиевую матрицу. При повышении количества карбидокремниевых частиц наблюдается тенденция увеличения прочности и ударной вязкости, при этом наилучшие результаты получены при содержании магния 7–8% при наличии 18–20% карбидокремниевых частиц SiC.

Ключевые слова: композит, магниевый сплав, алюминиевая матрица, карбидокремниевые частицы, смачиваемость, механические свойства

Информация о статье: Дата поступления 28 октября 2018 г.; дата принятия к печати 30 ноября 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2018 г.

Для цитирования: Гутема Е.М., Бажин В.Ю. Влияние уровня смачиваемости карбидокремниевых частиц магнием в алюминиевых композиционных лигатурах на их механические свойства. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(12):211–220. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-211-220

EFFECT OF SILICON CARBIDE PARTICLES WETTING ABILITY BY MAGNESIUM IN ALUMINUM COMPOSITE LIGATURES ON THEIR MECHANICAL PROPERTIES

E.M. Gutema, V.Yu. Bazhin

St. Petersburg Mining University,
21, Vasilievsky Island, 21 line, St. Petersburg 199106, Russian Federation

¹Гутема Ендалкачев Мосиса, аспирант, e-mail: endalkem5@gmail.com
Endalkachew Mosisa Gutema, Postgraduate, e-mail: endalkem5@gmail.com

²Бажин Владимир Юрьевич, доктор технических наук, профессор, декан факультета переработки минерального сырья, e-mail: bazhin-alfail@mail.ru
Vladimir Yu. Bazhin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Dean of the Faculty of Mineral Raw Materials Processing, e-mail: bazhin-alfail@mail.ru



ABSTRACT: The paper deals with the possibilities to improve the efficiency of the production technology of aluminum composite ligatures and alloys modified by silicon carbide particles produced from waste sideling of aluminum electrolyzers. This enables the production of blanks and items with a high level of mechanical properties and plasticity. Rational wettability conditions of silicon carbide particles and their surface coating with magnesium are identified. The latter affects the distribution uniformity in the aluminum matrix as well as determines the mechanism action and formation kinetics of a homogeneous structure in the preparation of a composite aluminum ligature. The paper employs modern analysis methods using up-to-date analytical equipment, in particular Quantachrome Nova 3200e surface area analyzer. The level of wettability and the coating degree of silicon carbide particles is determined after their mechanical treatment and after their immersion in magnesium melt. The distribution uniformity of particles in the micro-volume of the aluminum matrix is proved by using XRF-1800 (Shimadzu) x-ray fluorescent spectrometer. Samples have been subjected to mechanical testing (tensile strength, hardness, specific elongation) when agreeing structural changes at the macro and micro level which confirm the improved performance at a high value of particle wettability by magnesium in the aluminum matrix. The results of the experiments show that the developed technology is effective for obtaining a uniform dispersion when introducing reinforcing particles in the aluminum matrix by means of magnesium ligatures. The higher the number of silicon carbide particles – the higher the strength and impact toughness. The best results were obtained with the magnesium content of 7–8 % in the presence of 18–20 % of silicon carbide particles SiC.

Keywords: composite, magnesium alloy, aluminum matrix, silicon carbide particles, wettability, mechanical properties

Information about the article: Received October 28, 2018; accepted for publication November 30, 2018; available online December 28, 2018.

For citation: Gutema E.M., Bazhin V.Yu. Effect of silicon carbide particles wetting ability by magnesium in aluminum composite ligatures on their mechanical properties. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018; 22(12):pp. 211–220. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-211-220

Введение

В настоящее время активно развиваются технологии производства высокопрочных алюминиевых сплавов с композиционными соединениями, обладающими улучшенными механическими характеристиками при заданном уровне пластичности. Существующие технологии модифицирования сплавов керамическими материалами (B_4C , AlC_3 , Al_2O_3) не обеспечивают необходимые эксплуатационные характеристики для литых заготовок. Высокий уровень ликвации частиц в алюминиевой матрице, неоднородность поверхности частиц композита, их низкая смачиваемость резко ухудшают литейные свойства сплавов, и, как следствие, приводят к уменьшению выхода годной продукции и снижают качество отливок.

Композиционные материалы твердых частиц создают в матрице армирующий каркас, который придает алюминиевому сплаву уникальные свойства (жесткость, прочность, теплофизические и электрические свойства), позволяющие его использовать взамен некоторых стальных изделий в машиностроении и автомобильной промышленности [1].

Единственным и эффективным способом повышения модуля упругости сплавов и их прочности является армирование их высокомодульными карбидокремневыми (SiC), боридными, углеродными компонентами [2].

Смачиваемость между алюминиевой матрицей и армированной частицей является основным фактором, определяющим структурные показатели лигатуры и в будущем – алюминиевого композиционного сплава, а также играет решающую роль в конечных механических свойствах композитов.

Для обеспечения высокого уровня смачиваемости частиц необходима максимальная адгезия между матрицей основного компонента сплава и поверхностью частицы [3]. Существует множество способов для повышения смачиваемости между матрицей алюминия и частицами карбида в процессе получения сплава. Основной причиной неудовлетворительного покрытия частиц и снижения адгезии является образование оксида алюминия при контакте матрицы с по-



верхностью, поэтому наравне с многокомпонентными флюсами вводят специальные добавки, которые повышают уровень смачиваемости [3–6]. Другим методом нейтрализации образования оксидов в объеме сплава является литье в нейтральной атмосфере в жидко-твердом состоянии, но такой вариант является затратным для технического обеспечения процесса [7–9]. Кроме этого, при многих способах обработки расплава не достигается равномерное распределение карбидокремниевых частиц в объеме алюминиевой матрицы.

Оборудование, материалы и методика проведения экспериментов

Предлагаемый технологический процесс проходит несколько этапов и состоит в предварительной подготовке карбидокремниевых частиц, полученных из промышленных отходов производства алюминия, а не использования дорогостоящих порошков. Для снижения себестоимости процесса и для рационального использования сырья предлагается дробление и измельчение карбидокремниевой футеровки из отключенных алюминиевых электролизеров, пропитанной фтористыми солями. В настоящее время после отключения электролизеров на капитальный ремонт боковая футеровка не регенерируется, а складывается на промышленных полигонах алюминиевых заводов.

Рентгенофазовый анализ состава боковой футеровки современного алюминиевого электролизера показал, что в ее состав входят AlF_3 , Na_3AlF_6 , MgF_2 , CaF_2 , которые могут быть использованы в виде флюсовой композиции для повышения уровня адгезии и вывода газовых и шлаковых включений из расплава.

Аналитическое исследование выявило [8–12], что наиболее подходящим вариантом для обеспечения высокого уровня смачиваемости карбидом кремния может быть использование магния на предварительной стадии подготовки расплава к литью. Представляет научно-технический интерес проведение серии опытов по получению композитного материала (чушковой лигатуры) с карбидокремниевыми частицами в смеси флюсов AlF_3 , Na_3AlF_6 , MgF_2 , CaF_2 , обработанных предварительно в магниевом расплаве.

После дробления кусков карбидокремниевой футеровки на щековой дробилке MES SGP-90, после измельчения в шаровых мельницах фирмы MESTO проводили классификацию частиц SiC с включениями фторсолей на стандартных ситах и отбирали для опытов только образцы порошка с размерами частиц 30–38 мкм.

Подготовку проводили в тигельной печи при температуре 650–690 °C в закрытом герметичном стальном стакане без доступа кислорода после смешивания частиц с магниевой стружкой. Средний размер полученных частиц SiC-Mg, используемый для подготовки армирующего материала, приведен в табл. 1 – после анализа на Mastersizer 2000 ver.5.60 при распределении частиц по размерам.

На заключительной стадии под слой расплава алюминия марки 6063 (алюминиевая матрица), имеющий химический состав, указанный в табл. 2, при температуре 690–720 °C вводили лигатуру SiC-Mg.

Таблица 1

Размер частиц для армирования

Table 1

Particle size for reinforcement

Армирующий материал		
Армирование	Средний размер частиц, мкм	Чистота
Карбид кремния и фтористые соли	31,5	89.7% + 10,15%
SiC-Mg и шлак	40,6	62,3%+26,3%+7.7%



Таблица 2

Химический состав алюминиевого сплава 6063

Table 2

Chemical composition of the aluminum alloy 6063

Сплав	Состав, % масс.								
Al6063	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
	0.35	0.21	0.02	0.05	0.45	0.10	0.10	0.02	98.7

После получения заготовки из алюмоматричного композиционного сплава проводили механические испытания на разрывных машинах марки MTS 810. Отлитые

образцы лигатуры, как показано на рис. 1, подготавливались согласно EN 10002-1 [13], и далее проходили стандартные механические испытания.

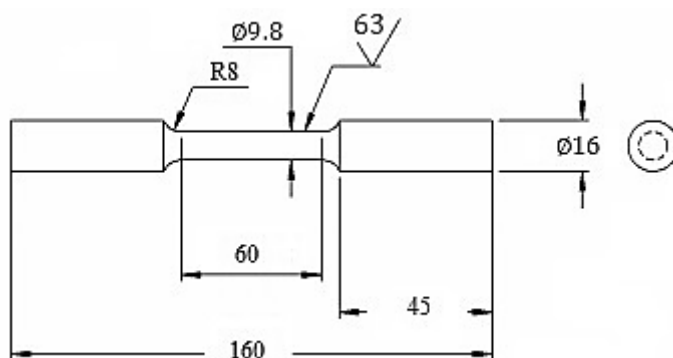


Рис. 1. Подготовка заготовки

Fig. 1. Sample preparation

Обсуждение результатов исследования

Известно, что при перемешивании композиционных материалов в жидко-твердой фазе частицы SiC, как правило, вступают в реакцию с магнием, что приводит к образованию промежуточных фаз [14, 15].

Данные измерения на Mastersizer 2000 размера частиц лигатуры SiC-Mg указывают на достаточный уровень адгезии частиц, поскольку общий размер частиц увеличился на 17,2%. После обработки в потоке магниевого расплава частиц SiC, полученных после обработки отходов карбидокремниевой футеровки, измерена удельная поверхность частиц карбида кремния и магния методом БЭТ (Брунауэра-Эммета-Теллера), определен уровень смачиваемости (с помощью анализатора площади поверхности Quantachrome Nova 3200e). Средний уровень смачиваемости составил 87,15%, что в дальнейшем гарантирует встраивание и выравнивание частиц в объеме алюми-

евой матрицы расплава. Это подтверждается результатами (рис. 2) полученных изображений участков лигатуры при помощи сканирующего рентгенофлуоресцентного спектрометра XRF-1800 (Shimadzu), определен уровень смачиваемости и покрытия частиц.

Кремний участвует в промежуточных реакциях при образовании интерметаллического соединения Mg_2Si . Межфазный слой образуется в результате реакции между материалом матрицы и армирующими материалами. Эта подтверждает тот факт, что добавка Mg улучшает смачиваемость и обеспечивает перемещение коагулированных частиц в объеме матрицы расплава. Измельченный порошок частиц SiC и магния при добавке небольшого количества (до 3,5%) флюса – фторидов кальция, алюминия и натрия – был проанализирован с помощью рентгеноструктурного анализа. Очевидно, что данная многокомпонентная



смесь повышает уровень смачиваемости и улучшает связи с материалом матрицы. Интенсивность пиков рентгеновского снимка (XRD) указывает на характерные пики как для SiC, так и для магния и фторидов (рис. 3). Ввод магния с флюсами в результате снижает температуру плавления материала матрицы и обеспечивает равномерное распределение частиц даже в условиях жидко-твердого литья.

После ввода композиционной лигатуры SiC-Mg под слой алюминиевого сплава

6063 доказано, что при перемешивании композиционных материалов в жидко-твердой фазе при 700–720°C частицы SiC, как правило, вступают в реакцию с алюминием, что приводит к образованию фаз Al_4C_3 и Si.

Данные рентгенофазового анализа (см. рис. 3) образцов показали, что существует несколько промежуточных фаз, и процесс может быть проведен только через серию последовательных реакций до образования соединения $MgAl_2O_4$.

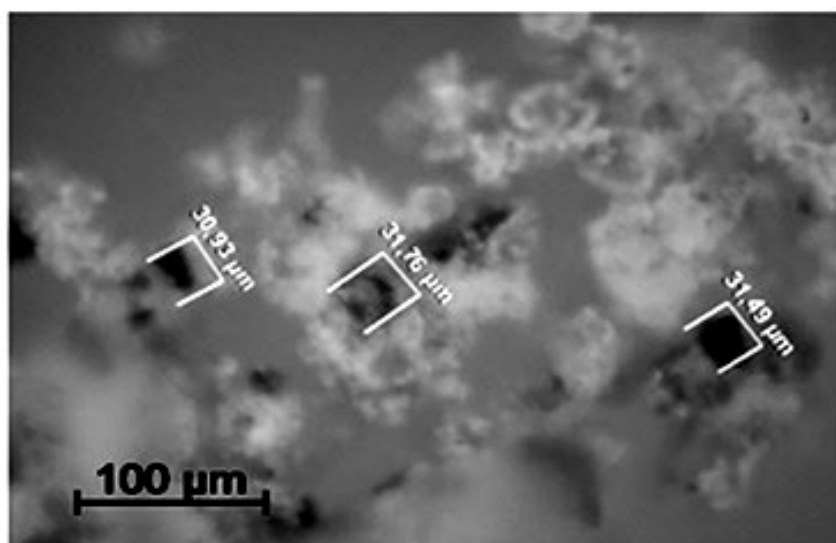


Рис. 2. Формы SiC частиц, покрытые магниевым расплавом
Fig. 2. Shapes of SiC particles coated with molten magnesium

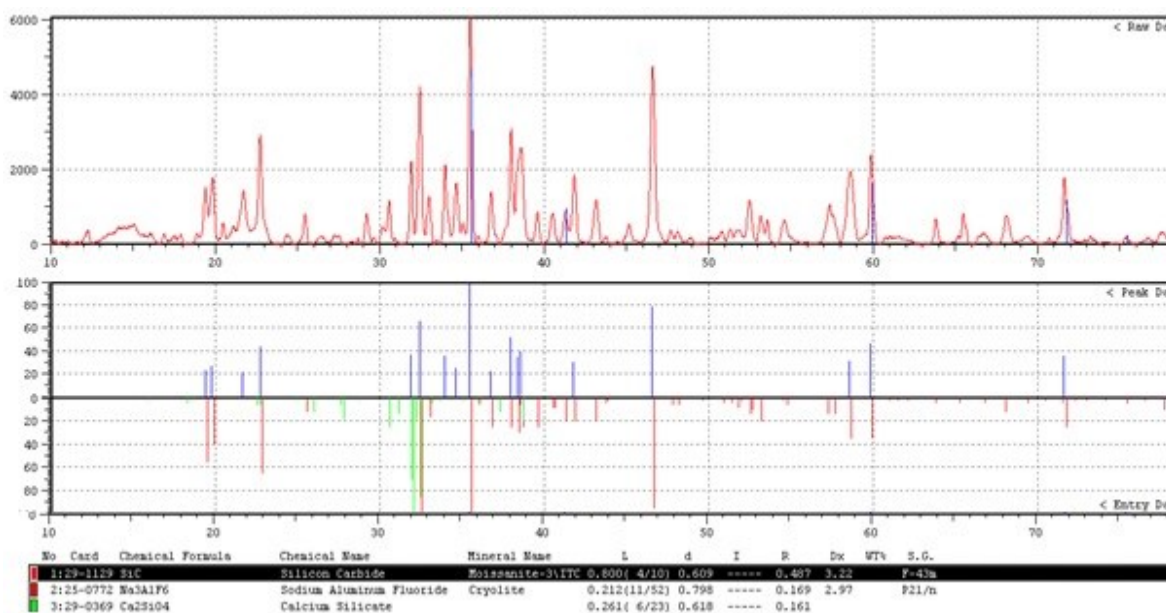


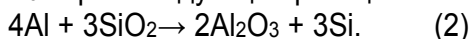
Рис. 3. Рентгеноструктурный анализ образца алюмоматричного сплава
Fig. 3. X-ray diffraction analysis of the aluminum matrix alloy sample



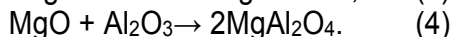
Анализ полученной рентгенограммы указывает на сложный характер взаимодействия компонентов лигатуры SiC-Mg в алюминиевой матрице:



Алюминий может реагировать с SiO₂ в виде Al₂O₃ через следующие реакции:



Магний, с другой стороны, при частичном образовании оксидных пленок на поверхности взаимодействует с Al₂O₃ по следующим реакциям:



Из анализа представленных выше реакций и структурного исследования образцов выявлено, что смачиваемость между расплавом Al и лигатурной составляющей Mg с частицами SiC снижается за счет изменения поверхностного натяжения в алюминиево-магниевом расплаве. Этот показатель особенно помогает в достижении однородного распределения частиц в матрице, и в создании высокой межфазной прочности сцепления, поскольку обеспечивает перемещение частиц внутри матрицы. В итоге этот фактор определяет прочность каркаса и создает условия для высоких механических характеристик. Таким образом, показатели растяжения твердости могут служить характерной оценкой уровня смачиваемости при согласовании со структурным анализом заготовки.

На заключительном этапе полученные после штамповки заготовки алюмоматричного сплава подвергались механическим испытаниям (предел прочности на растяжение, твердость, относительное удлинение) согласно стандарту ASTM E10-15 [16].

На рис. 4 представлены результаты определения прочности на растяжение при различном содержании карбидокремниевых частиц и магния в алюминиевой матрице. Видно, что при вводе магния с SiC повышается уровень прочности на 20%. Предел прочности на растяжение имеет минимум 126 МПа, поэтому можно заключить, что дальнейший ввод частиц SiC, также как и Mg более состава Al+16%SiC+2,5%Mg нецелесообразен, и приводит к снижению прочности и повышает уровень деформации разрушения.

Испытания на твердость по Бригеллю (ВН, Tinius Olsen FH9, 2000) проводили под нагрузкой 750 кг согласно стандарту ASTM E384-17 [17–22]. Выполнены измерения на различных площадях участках образцов и определено среднее значение твердости. Результат теста указывает на тенденцию повышения твердости с увеличением количества SiC. По значениям микротвердости можно дать оценку распределения частиц SiC в объеме, потому что в любом случае при затвердевании расплава они становятся центрами кристаллизации, обеспечивая плотный каркас.

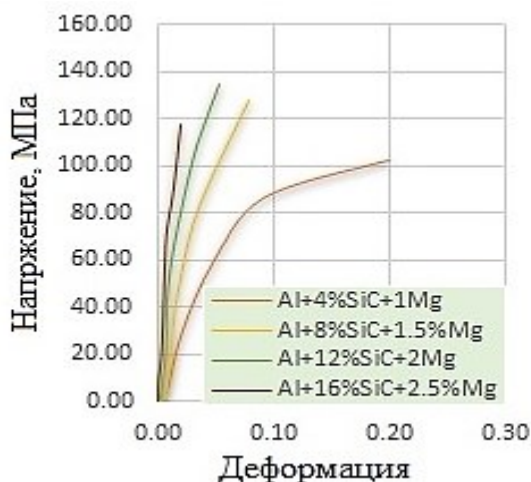


Рис. 4. Результаты испытаний на предел прочности при растяжении
Fig. 4. Tensile strength test results



Сравнение твердости композитов в сравнении со стандартными образцами для алюминиевого сплава 6063 показывает, что при добавлении Mg для улучшения уровня смачиваемости повышается значение твердости. Однако добавка частиц SiC–Mg с содержанием 16% SiC и 2.5% Mg приводит к уменьшению твердости из-за слипания частиц в микрообъемах.

Образцы для механических испытаний были подготовлены согласно ASTM-

E399-83 [18–25]. Проведено четыре измерения образцов размером $\varnothing 25 \times 160$ мм, которым соответствуют кривые нагруженного состояния для композитов различного состава, как показано на рис. 6. Результат теста показал улучшение прочности для смесей, усиленных частицами покрытыми магнием SiC. Установлено, что оптимальное содержание SiC–Mg, при котором готовые композиты проявляют высокие механические свойства, составляет Al+12% SiC.

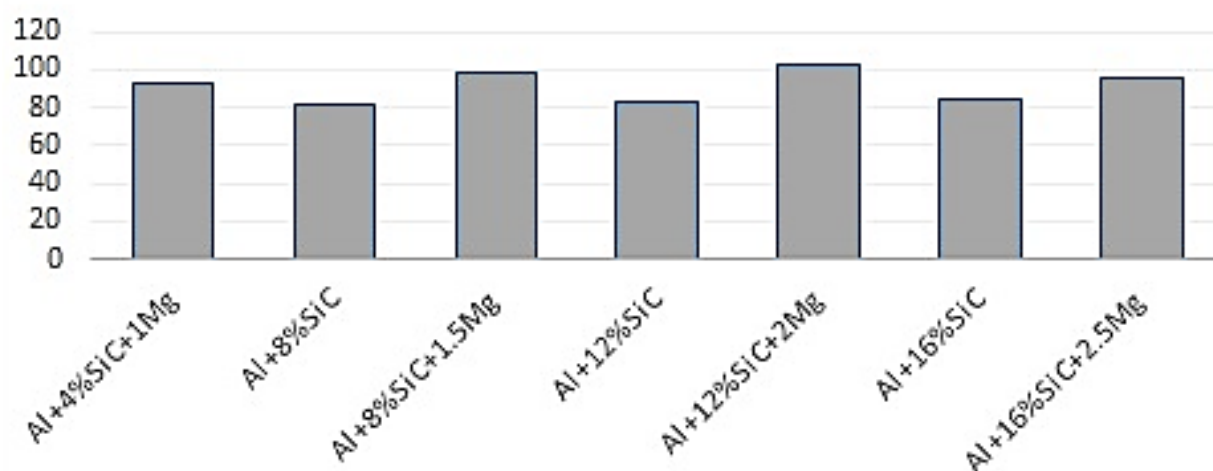


Рис. 5. Сравнения твердости образцов Al+SiC+Mg
Fig. 5. Comparisons of hardness of samples Al+SiC+Mg

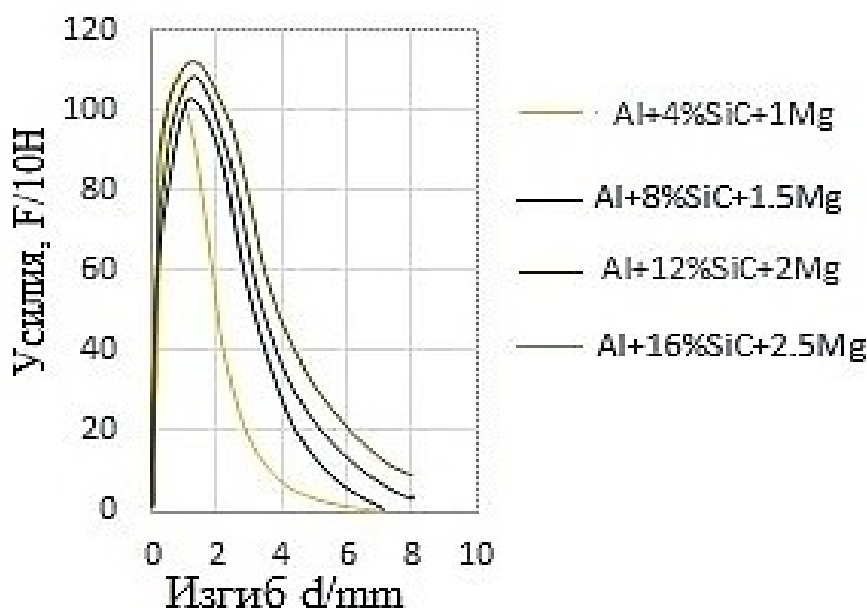


Рис. 6. Измерение усилия на изгиб
Fig. 6. Bending force measurement



Доказано, что матрицы в зависимости от состава армирующего материала, объема, расположения могут кардинально менять свойства изделия. Например, алюминиевый сплав со встроенными частицами карбида кремния может иметь величину модуля Юнга от 200 и 400 ГПа, коэффициент термического расширения 24×10^{-6} до $4 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ и предел текучести от 40 до 600 МПа. Соответственно, контролируя размер, количество и распределение частиц в алюминиевой матрице, а также условия обработки, эти свойства могут быть дополнительно улучшены.

По результатам механических испытаний наблюдается повышение общего уровня всех характеристик по сравнению с

отлитыми в тех же условиях образцами из сплава 6063. Можно заключить, что:

- добавление магния вместе с SiC увеличило значение прочности образцов на растяжение от 82 МПа до 135 МПа;

- предварительно покрытые магнием частицы SiC при армировании сплава 6063 показали более высокий уровень твердости при сохранении уровня пластичности;

- твердость образцов полученного композита по Бринеллю составляет 78ВН и 102ВН для композитов состава Al+16%SiC и Al+16%SiC+2%Mg соответственно;

- установлено, что оптимальное содержание SiC и Mg, при котором композитный материал имеет высокие механические свойства, составляет Al+12%SiC+2%Mg.

Заключение

Для получения алюмоматричных сплавов и лигатур выполнен комплекс лабораторных испытаний, заключающийся в предварительной подготовке, классификации частиц карбида кремния из отработанной футеровки электролизеров производства алюминия и подготовки магниевой лигатуры с внедренными частицами для получения изделия из композитного сплава Al–Mg–SiC.

Результаты экспериментов показали, что разработанная технология является эффективной для получения равномерной дисперсии при внедрении армирующих частиц посредством предварительно подготовленной магниевой лигатуры в алюминиевую матрицу. При повышении количества карбидокремниевых частиц наблюдается тенденция увеличения прочности и ударной вязкости, при этом наилучшие результаты получены при содержании магния

7–8% при наличии 18–20% карбидокремниевых частиц в составе алюминиевого сплава 6063.

Необходимость промежуточной операции смешения магния и карбидокремниевых частиц связана с высоким значением смачиваемости магния и частиц карбида кремния по сравнению с алюминием, на поверхности которого даже в диспергированном состоянии всегда присутствует прочная оксидная пленка, не позволяющая распределить равномерно частицы в микрообъеме.

Исследование комплекса механических свойств заготовок, полученных из сплава, модифицированного карбидокремниевыми частицами (прочность, пластичность, ударная вязкость и т.д.) подтверждает правильность выбранного решения по предварительной обработке частиц SiC в магниевом расплаве.

Библиографический список

1. Bazhin V.Y., Gutema E.M., Savchenkov S.A. Production Technology Features for Aluminum Matrix Alloys with a Silicon Carbide Framework // Metallurgist. 2017. Vol. 60. No. 11–12. P. 1267–1272.
2. Фридляндер И.Н. Алюминиевые деформируемые конструкционные сплавы. М.: Metallurgia. 1979. 208 с.
3. Фридляндер И.Н. Современные алюминиевые, магниевые сплавы и композиционные материалы на

- их основе // Металловедение и термическая обработка металлов. 2002. № 7. С. 24–29.
4. Квасов Ф.И., Фридляндер И.Н. Алюминиевые сплавы типа дуралюмин. М.: Metallurgia. 1984. 240 с.
5. Напалков В.И., Бондырев Б.И., Тарарышкин В.И., Чухров М.В. Лигатуры для производства алюминиевых и магниевых сплавов. М.: Metallurgia. 1983. 160 с.



6. Махов С.В. Научное и технологическое обоснование разработки и применения модифицирующих лигатур // *Металлургия машиностроения*. 2012. № 1. С. 10–15.

7. Платов Ю.М., Вотинов С.Н., Дриц М.Е. Исследование механических свойств сплавов на основе алюминия // *Физика и химическая обработка материалов*. 1981. № 1. С. 53–55.

8. Yang L. J. The effect of casting temperature on the properties of squeeze cast aluminum and zinc alloys// *Journal of Material Processing*. 2003. Vol. 68. No. 11. P. 61–63.

9. Casati R. and Vedani M. Metal Matrix Composites Reinforced by Nano-Particles-A Review // *Metals*. 2014. Vol. 4. No. 1. P. 65–83.

10. Gupta N., Satyanarayana K.G. Solidification Processing of Metal Matrix Composite// *Journal of Materials Science*. 2006. Vol. 58. No. 11. P. 91–93.

11. Wessel J.K. The Handbook of Advanced Materials. New Jersey, USA: John Wiley & Sons Inc. 2004. P. 120–160.

12. Zhou W. and Xu Z.M. Casting of SiC reinforced metal matrix composites // *Journal Material Processing Technology*. 1997. Vol. 63. Issue 1–3. P. 358–363.

13. Boi D. and Mitkov M. The influence of SiC particles on the compressive properties of metal matrix composites // *Materials Characterization*. 2001. Vol. 47. P. 129–138.

14. Dieter G. E. Mechanical Metallurgy. 2nd ed., New York, NY: McGraw-Hill Book Co., 1976. P. 282–293.

15. Hashim J., Looney L., Hashmi M.S.J. The wettability of SiC particles by molten aluminum alloy // *Journal of Material Processing*. 2001. Vol. 119. P. 324–328.

16. Baron H.G. Stress-Strain curves of some metals and alloys at low temperature and high rates of strain // *Journal of Iron and Steel Institute*. 1956. Vol. 182. P. 124–128.

17. Яценко С.П., Хохлова Н.А., Яценко А.С. Получение лигатур на основе алюминия методом высокотемпературных обменных реакций в расплавах солей I. рафинирование алюминия от натрия // *Расплавы*. 2008. № 5. С. 31–35.

18. Федотов И.Л., Ульянов Д.С. Особенности входного контроля модифицирующих алюминиевых лигатур // *Цветные металлы-2012: сб. научн. статей*. Красноярск, 2012. С. 710–714.

19. Jakes J.E., Frihart C.R., Beecher J.F., Moon R.J., and Stone D.S. Experimental method to account for structural compliance in Nano-indentation measurements // *Journal material Research*. 2008. Vol. 23. No. 4. P. 1113.

20. Lucas J.P., Stephens J.J., Greulich F.A. The effect of reinforcement stability on composition redistribution in cast aluminium metal matrix composites // *Material Science and Engineering*. 1991. Vol. 131 (2). P. 221–230.

21. ASTM Int., ASTM E10-15: Standard Test Method for Brinell hardness of Metallic Materials, ASTM Stand. 2012. P. 1–32.

22. ASTM-E399-83, Annual book of ASTM Standards, ASTM, and Philadelphia. 1989. P. 487.

23. Kala H., Mer K.K.S and Kumar S. A Review on Mechanical and Tribological Behaviors of Stir Cast Aluminum Matrix Composites// *Procedia Material Science*. 2014. Vol. 6. P. 1951–1960.

24. Canakci A. and Arslan F. Abrasive wear behavior of B₄C particle reinforced Al2024 metal matrix composites // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012. Vol. 63. P. 785–795.

25. Torralba J.P Aluminum Matrix Composites: An Overview // *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. Vol. 133. No. 1–2. P. 203–206.

References

1. Bazhin V.Y., Gutema E.M., Savchenkov S.A. Production Technology Features for Aluminum Matrix Alloys with a Silicon Carbide Framework. *Metallurgist*, 2017, vol. 60, no. 11–12, pp. 1267–1272.

2. Fridlyander I.N. *Alyuminievye deformiruemye konstrukcionnye splavy* [Aluminum deformable structural alloys]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1979, 208 p. (In Russian)

3. Fridlyander I.N. Modern aluminum, magnesium alloys and composite materials based on them. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal Science and Heat Treatment], 2002, no. 7, pp. 24–29. (In Russian)

4. Kvasov F.I., Fridlyander I.N. *Alyuminievye splavy tipa duralumin* [Aluminum alloys of the duralumin type]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1984, 240 p. (In Russian)

5. Napalkov V.I., Bondyrev B.I., Tararyshkin V.I., Chuhrov M.V. *Ligatury dlya proizvodstva alyuminievyh i magnievyh splavov* [Master alloys for the production of aluminum and magnesium alloys]. Moscow: Metallurgiya. Publ., 1983, 160 c. (In Russian)

6. Mahov S.V. Scientific and technological justification for

the development and use of the modifier alloys. *Metallurgiya mashinostroeniya* [Metallurgy of Machinery Building], 2012, no. 1, pp. 10–15. (In Russian)

7. Platov Yu.M., Votinov S.N., Dric M.E. Investigation of mechanical properties of aluminum-based alloys. *Fizika i himicheskaya obrabotka materialov* [Physics and Chemistry of Materials Treatment], 1981, no. 1, pp. 53–55. (In Russian)

8. Yang L.J. The effect of casting temperature on the properties of squeeze cast aluminum and zinc alloys. *Journal of Material Processing*, 2003, vol. 68, no. 11, pp. 61–63.

9. Casati R. and Vedani M. Metal Matrix Composites Reinforced by Nano-Particles-A Review. *Metals*, 2014, vol. 4, no. 1, pp. 65–83.

10. Gupta N., Satyanarayana K.G. Solidification Processing of Metal Matrix Composite. *Journal of Materials Science*, 2006, vol. 58, no. 11, pp. 91–93.

11. Wessel J.K. The Handbook of Advanced Materials. New Jersey, USA: John Wiley & Sons Inc, 2004, pp. 120–160.



12. Zhou W. and Xu Z.M. Casting of SiC reinforced metal matrix composites. *Journal Material Processing Technology*, 1997, vol. 63, issue 1–3, pp. 358–363.
13. Boi D. and Mitkov M. The influence of SiC particles on the compressive properties of metal matrix composites. *Materials Characterization*, 2001, Vol. 47, pp. 129–138.
14. Dieter G. E. *Mechanical Metallurgy*. 2nd ed., New York, NY: McGraw-Hill Book Co., 1976, pp. 282–293.
15. Hashim J., Looney L., Hashmi M.S.J. The wettability of SiC particles by molten aluminum alloy. *Journal of Material Processing*, 2001, vol. 119, pp. 324–328.
16. Baron H.G. Stress-Strain curves of some metals and alloys at low temperature and high rates of strain // *Journal of Iron and Steel Institute*, 1956, vol. 182, pp. 124–128.
17. Yacenko S.P., Hohlova N.A., Yacenko A.S. The producing of Al-based master-alloys by means of high-temperature exchange reactions insalt melts. I. Refinement of aluminium from solium. *Rasplavy* [Melts], 2008, no. 5, pp. 31–35. (In Russian)
18. Fedotov I.L., Ul'yanov D.S. *Osobennosti vhodnogo kontrolya modificiruyushchih alyuminievyh ligatur* [Features of input control of modifying aluminum ligatures]. *Cvetnye metally-2012* [Non-Ferrous metals-2012]. Krasnoyarsk, 2012, pp. 710–714. (In Russian)

Критерии авторства

Гутема Е.М., Бажин В.Ю. совместно изучили возможности повышения эффективности технологии производства алюминиевых композиционных лигатур и сплавов на основе модифицирования частицами из карбида кремния, полученных из отходов футеровки алюминиевых элетролизеров. Авторы проанализировали полученные результаты и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

19. Jakes J.E., Frihart C.R., Beecher J.F., Moon R.J., and Stone D.S. Experimental method to account for structural compliance in Nano-indentation measurements. *Journal material Research*, 2008, vol. 23, no. 4, pp. 1113.
20. Lucas J.P., Stephens J.J., Greulich F.A. The effect of reinforcement stability on composition redistribution in cast aluminium metal matrix composites. *Material Science and Engineering*, 1991, vol. 131 (2), pp. 221–230.
21. ASTM Int., ASTM E10-15: Standard Test Method for Brinell hardness of Metallic Materials, ASTM Stand, 2012, pp. 1–32.
22. ASTM-E399-83, Annual book of ASTM Standards, ASTM, and Philadelphia, 1989, 487 p.
23. Kala H., Mer K.K.S and Kumar S. A Review on Mechanical and Tribological Behaviors of Stir Cast Aluminum Matrix Composites. *Procedia Material Science*, 2014, vol. 6, pp. 1951–1960.
24. Canakci A. and Arslan F. Abrasive wear behavior of B4C particle reinforced Al2024 metal matrix composites. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, vol. 63, pp. 785–795.
25. Torralba J.P Aluminum Matrix Composites: An Overview. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, vol. 133, no. 1–2, pp. 203–206.

Authorship criteria

Gutema E.M., Bazhin V.Yu. have jointly studied the possibilities of improving the efficiency of production technology of aluminum composite ligatures and alloys modified by silicon carbide particles obtained from the waste lining of aluminum electrolyzers. The authors have analyzed the obtained results and bear the responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 536;546.650(8);621,7

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-12-221-230>

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ЭНТАЛЬПИИ ПЛАВЛЕНИЯ ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ СИСТЕМ АЛЮМИНИЙ – ЛАНТАНИДЫ, БОГАТЫХ АЛЮМИНИЕМ

© М. Чаманова¹, Ш.А. Ахмедов², Б.Б. Эшов³, А.Б. Бадалов⁴

^{1,4}Таджикский технический университет им. акад. М.С. Осими, 734042, Республика Таджикистан, г. Душанбе, просп. акад. Раджабовых, 10.

²Таджикский государственный аграрный университет им. Ш. Шотемура, 734017, Республика Таджикистан, г. Душанбе, просп. Рудаки, 146.

³Государственное научное учреждение «Центр исследований инновационных технологий» при Академии наук Республики Таджикистан, 734063, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Айни, 299/3.

РЕЗЮМЕ: Определены и уточнены термохимические характеристики – температуры и энтальпии плавления лантанидов и интерметаллидов систем Al–Ln составов Al₂Ln, Al₃Ln, α-Al₁₁Ln₃ и β-Al₁₁Ln₃; системный анализ и установление закономерности изменения термохимических характеристик объектов в зависимости от природы лантанидов. Системный анализ данных проведен полуэмпирическим методом, учитывающим особенности электронного строения ионов лантанидов. Методами сравнительного расчета и разностей определены отсутствующие в литературе термохимические характеристики интерметаллидов лантана, гадолиния и лютеция. По полученным величинам температур плавления интерметаллидов рассчитаны значения их энтальпии плавления по известной формуле. Математическое моделирование закономерностей проведено по программе Microsoft Excel. В результате проведенных теоретических исследований получены наиболее полные сведения по температуре и энтальпии плавления лантанидов и интерметаллидов систем Al–Ln составов Al₂Ln, Al₃Ln, α-Al₁₁Ln₃ и β-Al₁₁Ln₃. Также установлены закономерности изменения термохимических характеристик лантанидов и ИМ отмеченных составов и составлены их математические модели. Таким образом, установлено, что общим в полученных закономерностях изменения характеристик лантанидов и интерметаллидов изученных четырех составов является проявление «тетра-д-эффект»-а с четким разделением по цериевой и иттриевой подгруппам. Характеристики европия и иттербия и их интерметаллидов выпадают из общей закономерности. Математическим моделированием получены уравнения, которые с высокой достоверностью выражают установленные закономерности.

Ключевые слова: интерметаллиды, алюминий – лантаниды, температура и энтальпия плавления, системный анализ, моделирование закономерности, природа лантанидов

Информация о статье: Дата поступления 28 октября 2018 г.; дата принятия к печати 30 ноября 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2018 г.

Для цитирования: Чаманова М., Ахмедов Ш.А., Эшов Б.Б., Бадалов А.Б. Моделирование закономерности изменения температуры и энтальпии плавления интерметаллидов систем алюминий – лантаниды, богатых алюминием. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(12):221–230. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-221-230

¹Чаманова Мунира, ассистент кафедры технологии химических производств, e-mail: chamanova.munira@mail.ru
Munira Chamanova, Assistant Professor of the Department of Chemical Production Technology, e-mail: chamanova.munira@mail.ru

²Ахмедов Шарафджон Абдухалилович, ассистент кафедры электрификации и автоматизации сельского хозяйства, e-mail: sharafjon_89@mail.ru
Sharafdzhon A. Akhmedov, Assistant Professor of the Department of Electrification and Automation of Agriculture, e-mail: sharafjon_89@mail.ru

³Эшов Бахтиер Бадалович, доктор технических наук, директор государственного научного учреждения, e-mail: ishov1967@mail.ru
Bakhtier B. Eshov, Dr. Sci. (Eng.), Director of the public scientific institution, e-mail: ishov1967@mail.ru

⁴Бадалов Абдулхайр, доктор химических наук, профессор кафедры общей и неорганической химии, e-mail: badalovab@mail.ru
Abdulkhayr Badalov, Dr. Sci. (Chemistry), Professor of the Department of the General and Inorganic Chemistry, e-mail: badalovab@mail.ru



MODELING VARIATION REGULARITY OF MELTING TEMPERATURE AND ENTHALPY
OF INTERMETALLIC COMPOUNDS OF ALUMINIUM – LANTHANIDES SYSTEMS, RICH IN ALUMINUM

M. Chamanova, Sh.A. Akhmedov, B.B. Eshov, A.B. Badalov

Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi,
10, Acad. Radzhabovych Ave., Dushanbe 734042, Republic of Tajikistan
Tajik Agrarian University named after Shirinsho Shotemur,
146, Rudaki Ave., Dushanbe 734017, Republic of Tajikistan
Public scientific institution "Center for research and innovative technologies
at the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan,
299/3, Aini St., Dushanbe 734063, Republic of Tajikistan

ABSTRACT: The purpose of the article is determination and specification of thermochemical characteristics including melting temperature and enthalpy of lanthanides and intermetallic compounds of Al-Ln systems of Al_2Ln , Al_3Ln , $\alpha-Al_{11}Ln_3$ and $\beta-Al_{11}Ln_3$ composition as well as system analysis and determination of variation regularity of thermochemical characteristics of objects depending on the nature of lanthanides. The system analysis of data is carried out using a semi-empirical method considering the features of the electronic structure of lanthanide ions. The methods of comparative calculation and differences are used to determine the thermochemical characteristics of intermetallic compounds of lanthanum, gadolinium and lutetium, which are not presented in the literature sources. The received values of the melting temperature of intermetallic compounds are used to calculate the values of their melting enthalpy by the known formula. Mathematical modeling of regularities is carried out in the Microsoft Excel software. The fullest data on melting temperature and enthalpy of lanthanides and intermetallic compounds of Al-Ln systems of Al_2Ln , Al_3Ln , $\alpha-Al_{11}Ln_3$ and $\beta-Al_{11}Ln_3$ composition are received. The authors have found consistent variation patterns of thermochemical characteristics of lanthanides and intermetallic compounds of the named structures and developed their mathematical models also. Thus, it is established that the general feature of the determined variation regularities in the properties of lanthanides and intermetallic compounds of four studied structures is manifestation of a "tetrad effect" with clear classification by ceric and yttric subgroups. Characteristics of europium and ytterbium and their intermetallic compounds drop out of the general regularity. Mathematical modeling allowed to receive the equations that provide high reliability of determined regularity expression.

Keywords: intermetallic compounds, aluminum – lanthanide, melting temperature and enthalpy, system analysis, modeling of a regularity, nature of lanthanides

Information about the article: Received October 28, 2018; accepted for publication November 30, 2018; available online December 28, 2018.

For citation: Chamanova M., Akhmedov Sh.A., Eshov B.B., Badalov A.B. Modeling variation regularity of melting temperature and enthalpy of intermetallic compounds of Aluminium – lanthanides systems, rich in aluminum. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018; 22(12):pp. 221–230. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-221-230

Введение

Изучение термодинамических характеристик сплавов с добавкой различных элементов для улучшения их эксплуатационных свойств имеет важное значение для практического использования в различных отраслях промышленности [1–4].

Исследование физико-химических и термодинамических свойств исходных компонентов и продуктов их взаимодействия в бинарных и поликомпонентных металлических системах способствуют установлению их равновесных граничных состояний и фазового состава. Такие исследования имеют особое значение для сплавов на основе

алюминия, допированные лантанидами (Ln). Эти сплавы проявляют важные прикладные характеристики для атомной энергетики, полупроводниковой, лазерной, люминофорной и военной техники, для получения особых конструкционных и сверхпроводящих материалов с характеристиками, превосходящими используемые.

Обобщенные в работе [5] результаты исследования диаграммы состояния систем Al-Ln показывают образование многочисленных интерметаллидов (ИМ) составов $AlLn_3$, $AlLn_2$, Al_2Ln_3 , $AlLn$, Al_2Ln , Al_3Ln , $\alpha-Al_{11}Ln_3$ и $\beta-Al_{11}Ln_3$. Образование ИМ соста-



вов α -Al₁₁Ln₃ и β -Al₁₁Ln₃ установлено только для лантанидов цериевой подгруппы. Сопоставленные сведения о термодинамических характеристиках ИМ систем Al-Ln недостаточны для проведения их системного анализа. Наиболее полные сведения о температуре плавления ИМ этих систем (приведены в работах Ш.И. Мирзоева⁵) и энтальпии растворения и образования некоторых ИМ [6–8]. Сведения об энтальпии плавления ИМ вовсе отсутствуют.

Материал и методы исследования

Системный анализ имеющихся в литературных источниках сведений о температуре и энтальпии плавления лантанидов, обобщенных в работах [9–11], указывает на их различие. Эти сведения являются базисными для надежного системного анализа поликомпонентных металлических систем с участием лантанидов. Проведена обработка этих характеристик лантанидов с целью уточнения (табл. 1 а, б) и установления закономерности их изменения для всего ряда металлов.

Имеющиеся или уточненные величины температуры и энтальпии плавления лантанидов [8], алюминия⁷ и температуры плавления ИМ исследуемых составов [6–8] позволили рассчитать энтальпию плавления ($\Delta H^0_{пл., кДж/моль}$ атомов) ИМ систем Al-Ln, богатых алюминием по следующему уравнению (расчет-1):

$$\Delta H^0_{пл., Al_xLn_y} = T_{пл., ИМ} (y \Delta H^0_{пл., Ln} / T_{пл., Ln} + x \Delta H^0_{пл., Al} / T_{пл., Al}) / (x + y), \quad (1)$$

которое приведено в работе [10].

Отсутствующие значения температуры и энтальпии плавления указанных составов ИМ лантана, гадолиния и лютеция определены методами сравнительного расчета [11] и разностей [12]. Эти данные являются базисными для проведения системного анализа искомых характеристик ИМ.

Результаты расчетов значений энтальпии плавления ИМ составов Al₂Ln,

Целью исследования является определение и/или уточнение термодинамических характеристик – температуры и энтальпии плавления лантанидов (Ln) и ИМ систем Al-Ln составов Al₂Ln, Al₃Ln, α -Al₁₁Ln₃ и β -Al₁₁Ln₃. Системный анализ и установление закономерности изменения термодинамических характеристик объектов в зависимости от природы лантанидов и их математическое моделирование.

Al₃Ln, α -Al₁₁Ln₃ и β -Al₁₁Ln₃, проведенных по формуле (1), приведены в табл. 1 а, б. Для сопоставления результатов с помощью базисных величин рассчитаны энтальпии плавления ИМ также полуэмпирическим методом [13, 14] (расчет-2) по следующему уравнению:

$$\Delta H^0_{пл., Al_xLn_y} = \Delta H^0_{пл., Al_xLa_y} + \alpha n_f + \beta S + \gamma' S_{(Ce-Eu)} (\gamma'' L_{(Tb-Yb)}). \quad (2)$$

Коэффициенты уравнения (2), которые приведены в табл. 2, учитывают влияние: α – 4f – электронов, β и γ – спин (S) – и орбитальных (L) – моментов движения атомов и ионов лантанидов на определяемую величину энтальпии плавления ИМ. Коэффициенты относятся: γ' – к лантаноидам цериевой подгруппы, а γ'' – к металлам иттриевой подгруппы. Метод применен нами для расчета термодинамических характеристик других систем с участием лантанидов [15, 16].

Полученные полные сведения по температуре и энтальпии плавления изученных ИМ систем Al-Ln позволили провести математическое моделирование закономерности их изменения в зависимости от природы лантанидов. Моделирование результатов проведено по стандартной программе MICROSOFT EXCEL. Исходя из разного характера закономерностей в изменениях свойств ИМ, обработка данных прове-

⁵Мирзоев Ш.И. Окисление, термические и термодинамические свойства интерметаллидов систем Al-Ce, Al-Pr и Al-Nd: дис. ... канд. техн. наук: 02.00.04. Душанбе, 2009. 118 с. / Mirzoev Sh.I. Oxidation, thermal and thermodynamic properties of intermetallic compounds of Al-Ce, Al-Pr and Al-Nd systems: Candidate's Dissertation in technical sciences: 02.00.04. Dushanbe, 2009. 118p.



Таблица 1

Термохимические характеристики исследуемых веществ

Table 1

Thermochemical characteristics of the studied substances

a

Лантаниды			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu
Сплавы	Т _{пл.}	P-2*	1193	1198	1208	1245	1301	1385	1099
		Лит.*	1191	1071	1204	1294	1315	1347	1095
	$\Delta H^0_{пл.}$	P-2	6,20	6,38	6,91	7,20	7,75	8,56	9,21
		Лит	6,20	5,46	6,89	7,14	7,62	8,62	9,21
$\alpha - Al_{11}Ln_3$	Т _{пл.}	P-2	1188	1221	1229	1234	1228	1209	1116
		Лит	1188	1293	1238	1223	—	—	—
	$\Delta H^0_{пл.}$	P-1	12,11	12,40	12,67	12,68	12,70	12,59	12,15
		P-2	12,11	12,47	12,69	12,79	12,76	12,61	12,34
$\beta - Al_{11}Ln_3$	Т _{пл.}	P-2	1513	1510	1510	1507	1501	1491	1394
		Лит	1513	1508	1513	1508	—	1723	—
	$\Delta H^0_{пл.}$	P-1	15,43	15,34	15,57	15,48	15,53	15,53	15,17
		P-2	15,43	15,44	15,42	15,41	15,39	15,38	15,36
Al ₃ Ln	Т _{пл.}	P-2	1443	1405	1382	1368	1361	1363	1297
		Лит	1443	1408	1348	1478	—	1393	—
	$\Delta H^0_{пл.}$	P-1	14,39	13,94	13,96	13,76	13,80	13,94	13,97
		P-2	14,39	14,01	13,74	13,58	13,58	13,71	13,97
Al ₂ Ln	Т _{пл.}	P-2	1678	1721	1749	1771	1788	1800	1703
		Лит	1678	1753	1753	1733	—	1773	—
	$\Delta H^0_{пл.}$	P-1	15,84	16,14	16,82	16,93	17,29	17,61	17,90
		P-2	15,84	16,44	16,74	17,02	17,28	17,51	17,73

b

Лантаниды			Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Сплавы	Т _{пл.}	P-2	1585	1629	1683	1722	1770	1830	1094	1928
		Лит.	1586	1629	1685	1747	1802	1818	1092	1936
	$\Delta H^0_{пл.}$	P-2	10,04	10,79	11,11	11,89	13,15	14,87	7,66	18,83
		Лит.	10,04	10,79	11,06	17,00	19,92	16,86	7,66	22,00
$\alpha - Al_{11}Ln_3$	Т _{пл.}	P-2	1143	1166	1184	1189	1193	1164	1090	1098
		P-1	11,93	12,24	12,42	12,53	12,70	12,61	11,54	12,60
	$\Delta H^0_{пл.}$	P-2	11,93	12,10	12,23	12,31	12,36	12,37	11,41	12,60
		P-2	1468	1465	1463	1456	1447	1439	1378	1413
$\beta - Al_{11}Ln_3$	Т _{пл.}	P-2	1532	1538	1535	1535	1540	1559	1459	1578
		P-2	1532	15,11	14,98	14,94	15,00	15,17	14,44	15,78
	$\Delta H^0_{пл.}$	P-2	1398	1373	1364	1354	1348	1344	1263	1353
		Лит	1398	—	1363	1360	1343	—	1253	1353
Al ₃ Ln	Т _{пл.}	P-1	14,33	14,18	14,07	14,04	14,14	14,39	13,16	15,02
		P-2	14,33	13,81	13,47	13,35	13,44	13,76	13,01	15,02
	$\Delta H^0_{пл.}$	P-2	1798	1784	1769	1762	1763	1772	1663	1803
		Лит	1798	—	1773	1803	1718	—	1633	—
Al ₂ Ln	Т _{пл.}	P-1	17,65	17,69	17,52	17,57	17,87	18,48	16,70	19,74
		P-2	17,65	17,03	16,53	16,43	16,73	17,43	16,40	19,74

Примечание: P-2 – рассчитанные нами величины по уравнению (2); лит. – литературные величины⁷ [9–10].



дена отдельно для цериевой и иттриевой подгрупп лантанидов. При расчетах не учтены значения, термодинамические характеристики для ИМ европия и иттербия, так

как они выпадают из общих закономерностей. Отличие обусловлено особенностями электронного строения атомов данных металлов.

Результаты исследования и их обсуждение

Обобщенные в работах⁷ [9–10] сведения о термодинамических свойствах лантанидов и исследованных ИМ систем Al- Ln приведены в табл. 1.

При расчетах использованы уточненные нами значения термодинамических характеристик лантанидов [10–11], так как они оказывают существенное влияние на результаты. Соответствующие данные для алюминия взяты из работ^{6,7}. Хорошее сов-

падение литературных и расчетных значений температуры плавления лантанидов (табл. 1) (за исключением Nd и Pm) является доказательством достоверности полученных результатов и правомочности применяемого метода.

Для наглядности на рис. (1–3) изображены закономерности изменения температуры и энтальпии плавления лантанидов (рис. 1) и ИМ (рис. 2 и 3) в зависимости от природы лантанидов.

Таблица 2

Значение коэффициентов корреляционного уравнения (2)

Table 2

Value of correlation equation coefficients (2)

Вещества	Параметр	α	β	γ'	γ''	Примечание
Лантаниды	$T_{пл., K}$	52,51	7,02	-28,11	-10,63	$\gamma'_{Ce}=-74.8$ $\gamma''_{Tb}=-19.2$
	$\Delta H^0_{пл., кДж/моль}$	0,57	0,06	-0,61	-0,08	$\gamma'_{Ce}=-1,09$ $\gamma'_{Pm}=-0,28$ $\gamma''_{Dy}=+0,01$ $\gamma''_{Er}=-0,14$
α -Al ₁₁ Ln ₃	$T_{пл., K}$	-6,43	0	12,01	12,01	—
	$\Delta H^0_{пл. кДж/моль-атомов}$	-0,04	-0,13	0,10	0,11	—
β -Al ₁₁ Ln ₃	$T_{пл., K}$	-7,14	1,43	3,48	3,48	—
	$\Delta H^0_{пл. кДж/моль-атомов}$	0,06	-0,15	0,01	0,02	—
Al ₃ Ln	$T_{пл., K}$	-6,43	0	-8,31	-2,99	—
	$\Delta H^0_{пл. кДж/моль-атомов}$	-0,06	0,01	-0,18	-0,16	—
Al ₂ Ln	$T_{пл., K}$	8,93	16,41	5,47	-7,79	—
	$\Delta H^0_{пл. кДж/моль-атомов}$	0,23	0	-0,24	-0,33	—

⁶Глушко В.П., Медведев В.А. Термические константы веществ: справочник. Т. 10. М.: АН СССР, ВИНТИ, 1981. 297 с. / Glushko V.P., Medvedev V.A. Thermal constants of substances: a reference book. Vol. 10. Moscow: USSR Academy of Sciences, VINITI, 1981. 297 p.

⁷Волков А.И., Жарский И.М. Большой химический справочник. Минск: Современная школа, 2005. 608 с. / Volkov A.I., Zharskiy I.M., Large chemical reference book. Minsk: Modern school, 2005. 608 p.

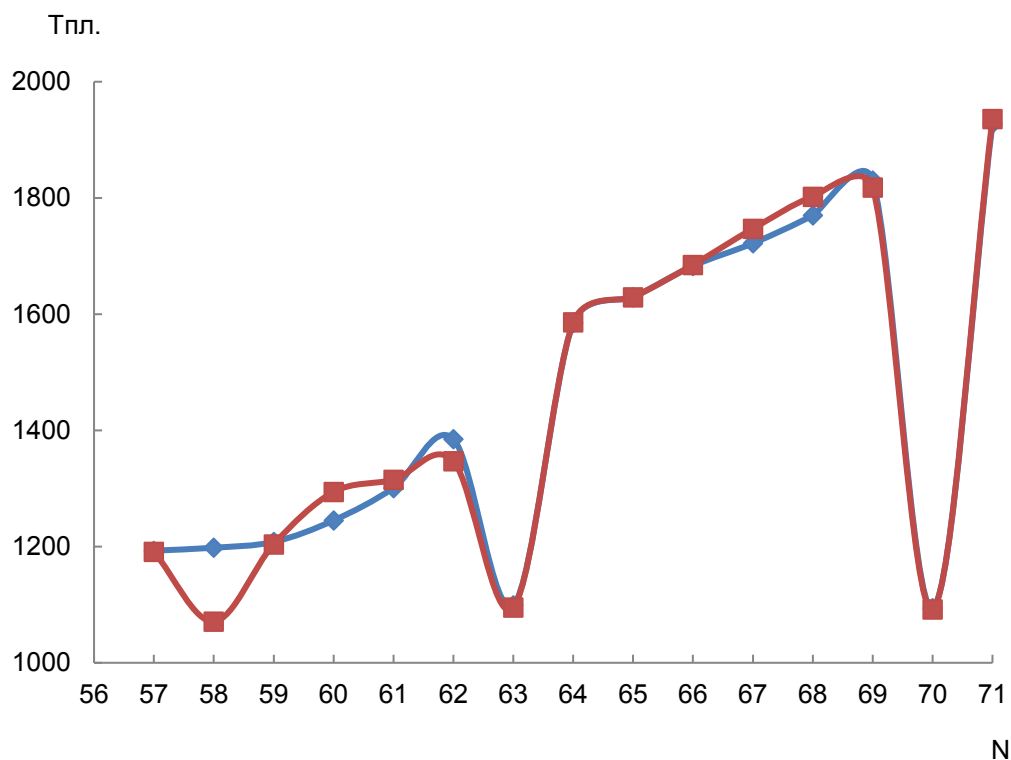


Рис. 1. Зависимость температуры плавления лантанидов от их порядкового номера (N): ■ – литература, ♦ – расчет
Fig. 1. Dependence of melting temperature of lanthanides on their serial number (N): ■ – literature, ♦ – calculation

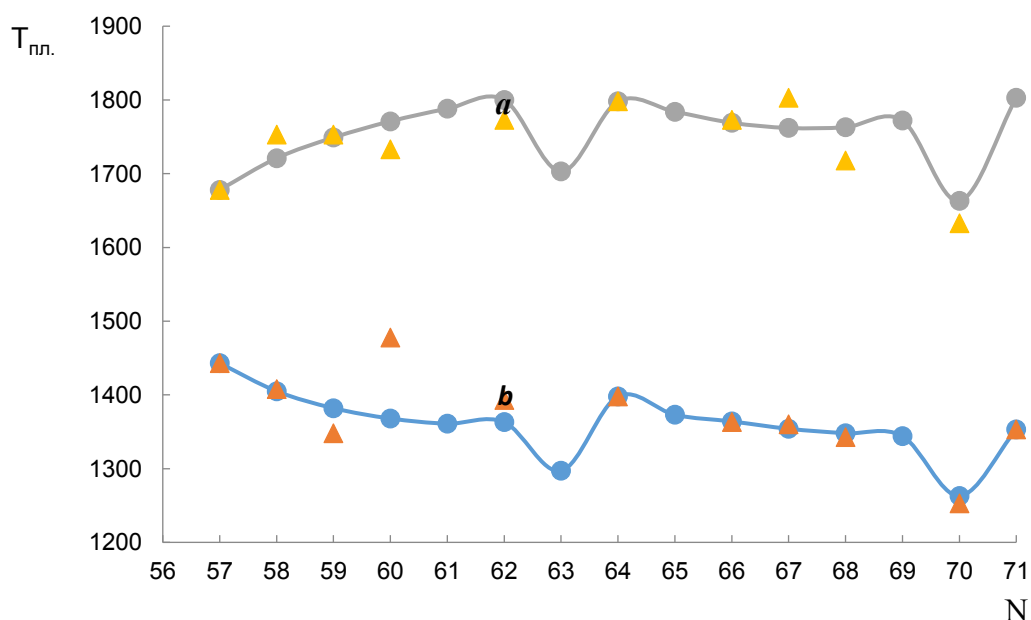


Рис. 2. Зависимости изменения $T_{пл.ИМ}$ составов Al_3Ln (a), Al_2Ln (b) от природы лантанидов (N): ▲ – литература, ● – расчет
Fig. 2. Dependences of $T_{пл}$ variation of intermetallic compounds of Al_3Ln (a), Al_2Ln (b) on the nature of lanthanides (N): ▲ – literature, ● – calculation

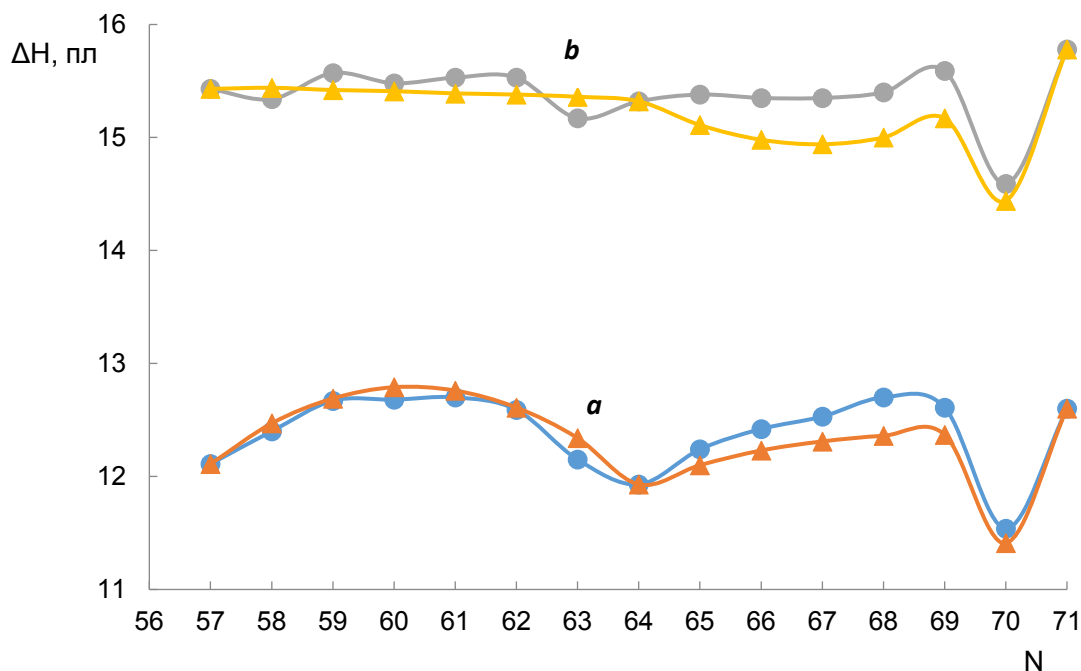


Рис. 3. Зависимости энтальпии плавления ИМ $\alpha\text{-Al}_{11}\text{Ln}_3$ (a), $\beta\text{-Al}_{11}\text{Ln}_3$ (b) от природы лантаноидов (N): ▲ – расчет 2, ● – расчет 1
Fig. 3. Dependences of melting enthalpy of intermetallic compounds $\alpha\text{-Al}_{11}\text{Ln}_3$ (a), $\beta\text{-Al}_{11}\text{Ln}_3$ (b) on the lanthanide nature (N): ▲ – calculation 2, ● – calculation 1

Заключение

Полученные наиболее полные сведения о термохимических свойствах температуры и энтальпии плавления лантанидов и ИМ систем Al–Ln, составов, богатых алюминием позволили установить характерные особенности закономерности их изменения в зависимости от природы Ln в пределах подгрупп лантанидов – цериевого и иттриевого и, в целом, в пределах всего ряда лантанидов с проявлением «тетрад-эффект»-а. Общим в установленных закономерностях изменения характеристиках лантанидов (рис. 1) и ИМ систем Al–Ln (рис. 2 и 3) заключается в четком разделении их по цериевой и иттриевой подгрупп и различного характера этих изменений в подгруппах. Металлы европия и иттербия и их ИМ выпадают из общей закономерности.

Для всего ряда индивидуальных лантанидов с ростом их порядкового номера наблюдается значительное повышение температуры плавления Ln на ($\Delta T = 775$ K) при незначительном повышении температуры в

первой половине каждой подгруппы лантанидов.

Закономерности изменения температуры (рис. 2) и энтальпии плавления (рис. 3) изученных ИМ систем Al–Ln от природы Ln являются идентичными. В них ярко проявляются индивидуальные особенности электронного строения лантанидов и их доминирующее влияние на свойства ИМ систем Al–Ln изученных составов. В ряду ИМ составов $\text{Al}_2\text{Ln} \rightarrow \text{Al}_3\text{Ln} \rightarrow \alpha\text{-Al}_{11}\text{Ln}_3$ с увеличением содержания алюминия наблюдается понижение их рассматриваемых характеристик, за исключением ИМ $\beta\text{-Al}_{11}\text{Ln}_3$. Для ИМ одинакового состава с ростом порядкового номера лантаноида наблюдается понижение температуры плавления (кроме Al_2Ln) и повышение энтальпии плавления ИМ.

Математическим моделированием получены уравнения (табл. 3), которые с высокой достоверностью выражают установленные закономерности по подгруппам лантанидов.



Таблица 3

Уравнения закономерности изменения термических характеристик лантанидов
и ИМ систем Al - Ln природы лантанидов

Table 3

Equations of variation regularity of thermal characteristics of
lanthanides and Al - Ln intermetallic compound systems of the lanthanide nature

Вещество	Функция	Вид уравнений	ЛТ	R ² *
Лантаниды	T _{пл.}	(а) $y = -7x^3 + 1262x^2 - 75750x + 2E+06$	П	0,897
		(б) $y = 49,078x - 1559,9$	Л	0,998
	$\Delta H^0_{пл.}$	(а) $y = -0,0551x^3 + 9,9096x^2 - 593,29x + 11830$	П	0,900
		(б) $y = 0,1571x^2 - 19,975x + 645,23$	П	0,997
α -Al ₁₁ Ln ₃	T _{пл.}	(а) $y = -5,6429x^2 + 675,24x - 18965$	П	0,978
		(б) $y = -5,7286x^2 + 767,31x - 24503$	П	0,985
	$\Delta H^0_{п.}$	(а) $y = -0,063x^2 + 7,5952x - 216,16$	П	1,000
		(б) $y = -0,02x^2 + 2,7434x - 81,828$	П	1,000
β -Al ₁₁ Ln ₃	T _{пл.}	(а) $y = -1,0536x^2 + 121,37x - 1983,5$	П	0,976
		(б) $y = -0,9663x^2 + 122,62x - 2421,7$	П	0,998
	$\Delta H^0_{п.}$	(а) $y = -0,002x^2 + 0,2294x + 8,944$	П	0,959
		(б) $y = 0,0481x^2 - 6,4299x + 229,8$	П	1,000
Al ₃ Ln	T _{пл.}	(а) $y = 4,7143x^2 - 576,6x + 18991$	П	0,998
		(б) $y = 2,0413x^2 - 281,67x + 11061$	П	0,996
	$\Delta H^0_{п.}$	(а) $y = 0,0646x^2 - 7,8305x + 250,73$	П	0,999
		(б) $y = 0,1065x^2 - 14,286x + 492,25$	П	1,000
Al ₂ Ln	T _{пл.}	(б) $y = 3,1357x^2 - 422,79x + 16014$	П	0,991
		(а) $y = -3,5536x^2 + 446,67x - 12235$	П	0,998
	$\Delta H^0_{п.}$	(а) $y = -0,0352x^2 + 4,5091x - 126,72$	П	0,993
		(б) $y = 0,1751x^2 - 23,352x + 794,87$	П	0,998

Примечание: (а) – цериевой; (б) – иттриевой подгруппы; R² – степень достоверности; x – порядковый номер лантанида; y – соответствующая характеристика веществ, ЛТ – линия тренда, П – полиномиальная, Л – линейная.

Библиографический список

- Горбунов Ю.А. Роль и перспективы редкоземельных металлов в развитии физико-механических характеристик и областей применения деформируемых алюминиевых сплавов // Журнал Сибирского федерального университета. Сер.: Техника и технологии. 2015. Т. 8. № 5. С. 636–645.
- Jiang C., Gleeson B. A combined first-principles/CALPHAD modeling of the Al–Ir system // Acta Materialia. 2006. Vol. 54. P. 4101–4110.
- Belov N.A., Dostaeva A.M., Shurkin P.K., Korotkova N.O., Yakovlev A.A. Influence of annealing on electrical resistance and hardness of hot-rolled aluminum alloy sheets containing up to 0,5% Zr // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2016. Vol. 57(5). P. 429–435.
- Zhang H., Gu D., Yang J., Dai D., Zhao T., Hong C., Gasser A., Poprawe R. Selective laser melting of rare earth element Sc modified aluminum alloy: Thermodynamics of precipitation behavior and its influence on mechanical properties // Additive Manufacturing. 2018.
- Лякишев Н.П. Диаграммы состояния двойных металлических систем. М.: Машиностроение, 2001. Т. 1–3. 1324 с.
- Бадалов А.Б., Мирзоев Ш.И. Термические свойства сплавов системы алюминий – лантаниды // Кишоварз, 2005. № 1. С. 42–47.
- Чаманова М.Ч., Эшов Б.Б., Мирзоев Ш.И., Бадалов



А. Температуры плавления и энтальпия растворения интерметаллидов систем Al-Ln составов $AlLn$, $AlLn_2$, Al_2Ln (Ln – лантаноиды) // Материалы XV Междунар. конф. по термическому анализу и калориметрии в России (RTAC 16) (г. Санкт-Петербург, 16–23 сентября, 2016 г.). Санкт-Петербург, 2016. Ч. 2. С. 112–115.

8. Чаманова М., Тсюан Т., Мирзоев Ш.И., Бадалов А. Закономерности изменения термохимических характеристик интерметаллидов состава $Al_{11}Ln_3$ и лантаноидов // Вестник Таджикского технического университета. 2016. № 3 (35). С. 38–45.

9. Панюшкин В.Т., Афанасьев Ю.А., Ханаев Е.И., Горновский А.Д., Осипов О.А. Лантаноиды. Простые и комплексные соединения. Ростов на Дону: Изд-во Ростовского государственного университета, 1980. 296 с.

10. Баянов А.П. Расчет энтальпии образования соединений редкоземельных элементов на основе кристаллохимических характеристик // Известия АН СССР. Неорганические материалы. 1973. Т. 9. № 6. С. 959–963.

11. Карапетьянц М.Х. Карапетьянц М.Л. Основные термодинамические константы неорганических и органических веществ. М.: Химия, 1968. 471 с.

12. Киреев В.А. Методы практических расчетов в термодинамике химических реакций. М.: Химия, 1975. 536 с.

13. Полуэктов Н.С., Мешкова С.Б., Коровин Ю.В., Оксиненко И.И. Корреляционный анализ в физико-химии соединений трехвалентных ионов лантаноидов // Доклады АН СССР. 1982. Т. 266. № 5. С. 1157 – 1159.

14. Мешкова З.Б., Полуэктов Н.С., Топилова З.М., Данилович М.М. Гадолиниевый излом в ряду трехвалентных лантаноидов // Координационная химия. 1986. Т. 12. Вып. 4. С. 481–484.

15. Badalov, A. B., Gafurov, I. U., Khakerov, I. the thermal stability and thermodynamic properties of the slanthanideborohydride of the Tris Tetra-hydrofuranate. International journal of hydrogen energy. 2011. Vol. 36. Issue 1. P. 1217–1219.

16. Ходжаев Ф.К., Эшов Б.Б., Бадалов Б.А. Закономерности изменения термохимических характеристик интерметаллидов систем «свинец – лантаноиды», богатых свинцом // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy. 2017. Т. 17. № 3. С. 21–27.

References

1. Gorbunov Yu.A. The role and prospects of rare-earth metals in the development of physical-mechanical characteristics and applications of deformable aluminum alloys. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta* [Journal of SibFU. Engineering and Technologies], 2015, vol. 8, no. 5, pp. 636–645. (In Russian).

2. Jiang C., Gleeson B. A combined first-principles/CALPHAD modeling of the Al–Ir system. *Acta Materialia*, 2006, vol. 54, pp. 4101–4110.

3. Belov N.A., Dostaeva A.M., Shurkin P.K., Korotkova N.O., Yakovlev A.A. Influence of annealing on electrical resistance and hardness of hot-rolled aluminum alloy sheets containing up to 0.5% Zr. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2016, vol. 57(5), pp. 429–435.

4. Zhang H., Gu D., Yang J., Dai D., Zhao T., Hong C., Gasser A., Poprawe R. Selective laser melting of rare earth element Sc modified aluminum alloy: Thermodynamics of precipitation behavior and its influence on mechanical properties. *Additive Manufacturing*, 2018.

5. Lyakishev N.P. *Diagrammy sostoyaniya dvoynykh metallicheskih system* [State diagrams of double metal systems]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2001, vol. 1–3, 1324 p. (In Russian).

6. Badalov A.B., Mirzoev Sh.I. Thermal properties of the alloys of the system aluminum – lanthanides. *Kishovar* [Kishovar], 2005, no. 1, pp. 42–47. (In Russian).

7. Chamanova M.Ch., Eshov B.B., Mirzoev Sh.I., Badalov A. *Temperatura plavleniya i ental'piya rastvoreniya intermetallidov sistem Al-Ln sostavov $AlLn$, $AlLn_2$, Al_2Ln (Ln – lantanoidy)* [Melting point and dissolution enthalpy of intermetallic compounds of Al-Ln system of $AlLn$, $AlLn_2$, Al_2Ln (Ln – lanthanides) compounds]. *Mater. XV*

Mezhdunar. konf. po termicheskomu analizu i kalorimetrii v Rossii (RTAC 16) [Materials of the XV International conference on thermal analysis and calorimetry in Russia (RTAC 16), Saint-Petersburg, 16–23 September, 2016]. Saint-Petersburg, 2016, part 2, pp. 112–115. (In Russian).

8. Chamanova M., Tsyuan T., Mirzoev Sh.I., Badalov A. Variation patterns of thermochemical characteristics of intermetallic compounds of $Al_{11}Ln_3$ composition and lanthanides. *Vestnik Tadzhikskogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tajik Technical University], 2016, no. 3 (35), pp. 38–45. (In Russian).

9. Panyushkin V.T., Afanas'ev Yu.A., Hanaev E.I., Gornovskij A.D., Osipov O.A. *Lanta-noidy. Prostye i kompleksnye soedineniya* [Lanthanides. Simple and complex compounds]. Rostov-na-Donu: Rostov state University Publ., 1980, 296 p. (In Russian).

10. Bayanov A.P. Calculation of the formation enthalpy of rare-earth element compounds on the basis of crystal-chemical characteristics. *Izvestiya AN SSSR. Neorganicheskie materialy* [Proceedings of USSR Academy of Sciences. Inorganic Materials], 1973, vol. 9, no. 6, pp. 959–963. (In Russian).

11. Karapet'yanc M.H. Karapet'yanc M.L. *Osnovnye termodinamicheskie konstanty neorganicheskikh i organicheskikh veshchestv* [Basic thermodynamic constants of inorganic and organic substances]. Moscow: Himiya Publ., 1968, 471 p. (In Russian).

12. Kireev V.A. *Metody prakticheskikh raschetov v termodinamike himicheskikh reakcij* [Methods of practical calculations in thermodynamics of chemical reactions]. Moscow: Himiya Publ., 1975, 536 p. (In Russian).



13. Poluektov N.S., Meshkova S.B., Korovin Yu.V., Oksinenko I.I. Correlation analysis in the physical chemistry of lanthanide trivalent ions compounds. *Doklady AN SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences], 1982, vol. 266, no. 5, pp. 1157–1159. (In Russian).

14. Meshkova Z.B., Poluektov N.S., Topilova Z.M., Danilovich M.M. Gadolinium kink in the series of trivalent lanthanides. *Koordinatsionnaya himiya* [Coordination Chemistry], 1986, vol. 12, Issue. 4, pp. 481–484. (In Russian).

15. Badalov, A. B., Gafurov, I. U., Khakerov, I. the thermal stability and thermodynamic properties of the slanthanideborohydride of the Tris Tetrahydrofuranate. *International journal of hydrogen energy*, 2011, vol. 36, issue 1, pp. 1217–1219.

16. Hodzhaev F.K., Eshov B.B., Badalov B.A. Regularity of changing of the thermochemical characteristics of lead-rich intermetallides in lead – lanthanide systems. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the South Ural State University], 2017, vol. 17, no. 3, pp. 21–27. (In Russian).

Критерии авторства

Чаманова М., Ахмедов Ш.А., Эшов Б.Б., Бадалов А.Б. подготовили рукопись и несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Chamanova M., Akhmedov Sh.A., Eshov B.B., Badalov A.B. prepared the manuscript for publication and bear the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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



АНАЛИЗ МЕТОДИК РАСЧЕТА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ПЕРЕСЕЧЕНИЙ В ОДНОМ УРОВНЕ

© А.Ю. Михайлов¹, Е.Л. Попова², И.Л. Гайворонский³

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

РЕЗЮМЕ: В данной работе проведено изучение методик расчета пропускной способности пересечений в одном уровне. В данной работе используется метод сравнительного анализа. Определение пропускной способности необходимо не только для выявления участков, требующих улучшения условий движения, но и для оценки экономичности и удобства движения всего потока автомобилей по маршруту, выбора эффективных средств организации движения. Любая дорога может работать при нагрузках различной интенсивности. При этом предельной будет интенсивность, соответствующая пропускной способности дороги. Эффективность транспортной работы дороги может характеризоваться как пропускной способностью, так и интенсивностью, при которой движение по дороге наиболее экономично и оптимально по условиям работы водителя. Последние десятилетия рыночных отношений в Российской Федерации ознаменовались резким увеличением количества автотранспорта в городах. Существуют основания полагать, что в российских городах предельный уровень автомобилизации достигнет уровня 550 авт./1000 чел. к 2020–2025 гг., что в полтора раза больше уровня, достигнутого сегодня в наиболее развитой Европейской части России. С увеличением уровня автомобилизации изменился и состав транспортных потоков, в которых теперь личный легковой автотранспорт составляет 80–90%. Индивидуальный автомобиль породил ряд проблем развития городов в части градостроительного проектирования и транспортного планирования. Увеличение объемов движения транспорта на дорогах общего пользования, городских улицах и дорогах делает наиболее актуальными задачи обеспечения пропускной способности, сокращения задержек и очередей. Одним из элементов сетей дорог общего пользования и улично-дорожных сетей городов, на котором возникают очереди и задержки транспортных потоков, являются нерегулируемые пересечения.

Ключевые слова: пропускная способность, улично-дорожная сеть, транспортные потери, уровень обслуживания, заторы

Информация о статье: Дата поступления 20 октября 2018 г.; дата принятия к печати 30 ноября 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2018 г.

Для цитирования: Михайлов А.Ю., Попова Е.Л., Гайворонский И.Л. Анализ методик расчета пропускной способности пересечений в одном уровне. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(12):231–238. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-231-238

ANALYSIS OF CALCULATION METHODS OF TRAFFIC CAPACITY OF INTERSECTIONS AT GRADE

Alexander Yu. Mikhailov, Ekaterina L. Popova, Ivan L. Gaivoronskiy

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

ABSTRACT: The paper studies the calculation methods of traffic capacity of intersections at grade using the method of comparative analysis. Determination of traffic capacity is needed for the identification of road sections where road conditions should be improved as well as for the assessment of traffic economy and convenience along the whole traffic route

¹Михайлов Александр Юрьевич, доктор технических наук, профессор кафедры автомобильного транспорта, e-mail: mikhaylov_ay@mail.ru

Alexander Yu. Mikhailov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Road Transport, e-mail: mikhaylov_ay@mail.ru

²Попова Екатерина Леонидовна, аспирант, e-mail: katerinapiskovets@mail.ru

Ekaterina L. Popova, Postgraduate, e-mail: katerinapiskovets@mail.ru

³Гайворонский Иван Леонидович, аспирант, e-mail: i_gaivoronskiy@mail.ru

Ivan L. Gaivoronskiy, Postgraduate, e-mail: i_gaivoronskiy@mail.ru



and selection of the most efficient means of traffic organization. Any road can operate at different workload intensity. In this case the intensity corresponding to the traffic capacity of a road will be limiting. The operation efficiency of a road can be defined by traffic capacity or intensity enabling the most economical and efficient traffic on the road in terms of driver's operating conditions. The last few decades of market relations in the Russian Federation feature a steep increase in the number of motor transport in cities. It is assumed that the critical level of motorization in Russia will achieve the level of 550 automobiles per 1000 people by 2020-2025, which is one and a half times as much as the current level in the more developed European part of Russia. The increased motorization level has affected the structure of traffic flows where the percentage of personal passenger cars is 80-90%. An individual motor vehicle has caused a number of problems in urban development in the part of city and transport planning. The increased volume of traffic on public roads and city streets and highways raises the relevance of the problems of ensuring traffic capacity and reduction of delays and queues. One of the components of public road network and urban road and street network featuring queues and delays of transport flows is uncontrolled intersections.

Keywords: road capacity, street and road network, transport losses, service level, road congestion

Information about the article: Received October 20, 2018; accepted for publication November 30, 2018; available online December 28, 2018.

For citation: Mikhailov A.Y., Popova E.L., Gaivoronskiy I.L. Analysis of calculation methods of traffic capacity of intersections at grade. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018; 22(12):pp. 231–238. (In Russ.). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-231-238

Введение

Установлено, что наиболее значимым отличием методики, представленной в ОДМ 218.2.020-2012⁴, от методики HCM 2000 является отсутствие в ней оценки качества организации дорожного движения на нерегулируемых и кольцевых пересечениях. Критерием оценки качества организации движения на нерегулируемых и кольцевых пересечениях является величина средней задержки транспортных средств второстепенных направлений движения, процедура расчета которой не рассмотрена в руководстве ОДМ 218.2.020-2012.

Плотные транспортные потоки – массовое явление для крупных и крупнейших городов России (в том числе г. Иркутска). Транспортное обслуживание населения и организация движения в городах по мере роста их территории, численности населения и увеличения уровня автомобилизации вырастают в важнейшую градостроительную проблему. Особенно это характерно в

последнее десятилетие для большинства крупных и крупнейших городов России, испытывавших в 90-х годах процесс «взрывной автомобилизации». На определенном этапе развития города возникает перенасыщение уличной сети транспортными средствами. Улично-дорожная сеть (УДС) городов России, сформировавшаяся в то время, когда уровень автомобилизации был 30–80 автомобилей на 1000 жителей, не удовлетворяет современным требованиям [1]. Перегрузка городских магистралей в «часы пик» приводит в крупнейших и крупных городах России к появлению заторов. Наблюдаемое в случае заторов снижение скорости транспортных средств приводит к перерасходу топлива, загрязнению воздушной среды и непроизводительным тратам времени. Все вышесказанное можно объединить общим понятием – транспортные потери пользователей улично-дорожной сети города [3–4].

⁴Отраслевой дорожный методический документ ОДМ 218.2.020-2012. Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог: издан на основании Распоряжения Федерального дорожного агентства от 17 февраля 2012 г. № 49. / Industry-based road guidance document ODM 218.2.020-2012. Guidelines for motor road capacity estimation: issued on the basis of the Order of the Federal road Agency of February 17, 2012, no. 49.



Цель исследования

В настоящее время современные зарубежные методики расчета пропускной способности пересечений получили теоретическое развитие, которое включило учет влияния нескольких конфликтных точек, которые проходит поток второстепенного направления. В этой связи в данной статье сравниваются методики расчетов, принятые в нашей стране⁵ [2–7] и используемые за рубежом.

В ОДМ 218.2.020-2012 для упрощения процедуры расчетов определяется максимальная допустимая интенсивность движения на второстепенном направлении. Соответственно, все потоки второстепенного направления сводятся к одному условному, значение которого используется в расчете максимальной допустимой интенсивности движения на второстепенном направлении.

Методика, приведенная в руководствах HCM 2000 и HCM 2010 (США), детально рассматривает процедуру расчета пропускной способности на любом из второстепенных направлений движения на перекрестке. При этом сами потоки на второстепенных направлениях ранжируются в зависимости от того, сколько конфликтных точек они пересекают при движении через перекресток. Сначала рассчитывается пропуск-

ная способность направления первой конфликтной точки, которую проходит поток второстепенного направления.

Полученное значение пропускной способности рассматривается как «потенциальное» и корректируется с использованием показателя вероятности отсутствия на перекрестке транспортных потоков, имеющих преимущество движения по отношению к рассматриваемым [8–11]. Такая техника расчета пропускной способности позволяет рассматривать нерегулируемые перекрестки любой геометрической конфигурации и схемы организации движения.

Наличие процедур расчета задержек и длины очередей также позволяет использовать эту методику для вариации результатов микро моделирования движения на нерегулируемых пересечениях, т.е. представляет возможность сравнивать значения пропускной способности, задержек и очередей, полученных в результате микро моделирования с расчетными значениями [12].

Наиболее значимым отличием методики, представленной в ОДМ 218.2.020-2012, от зарубежных аналогов является отсутствие в ней оценки качества организации дорожного движения на нерегулируемых и кольцевых пересечениях.

Методы исследования

За основу оценки качества организации дорожного движения на нерегулируемых и кольцевых пересечениях принят показатель уровня обслуживания движения (LOS-Level of Service) [13–17]. Оценочные градации уровней обслуживания разработаны в целом ряде стран. Например, в табл. 1 представлены границы уровней обслуживания, принятые в Германии (руководство HBS). Условия движения транспортных средств, которые соответствуют каждому из уровней обслуживания движения в руковод-

стве HBS, представлены ниже:

- Уровень А – Большая часть водителей беспрепятственно проезжает через перекресток. Задержка очень мала.
- Уровень В – Влияние потоков в главном направлении на возможность движения второстепенных потоков становится заметным. Задержка при этом все еще остается незначительной.
- Уровень С – Водители на второстепенном направлении вынуждены пропускать большое число транспортных средств,

⁵Лобанов Е.М. Исследование пропускной способности нерегулируемых узлов автомобильных дорог в одном уровне: дис. ... канд. техн. наук. М., 1965. / Lobanov E.M. Studying capacity of uncontrolled road junctions at the same level: Candidate's Dissertation in technical sciences. M., 1965.



движущихся в главном направлении. Задержка значительно возрастает. На подходе к перекрестку с второстепенного направления начинает образовываться очередь транспортных средств, которая все же с точки зрения занимаемого пространства и периода времени ее существования не представляет серьезной проблемы.

- Уровень D – Большая часть водителей на подъезде к перекрестку с второстепенного направления вынуждена совершать относительно длительные остановки более одного раза. Некоторые транспортные средства испытывают большие задержки. Но, несмотря на большую протяженность, очереди все же становятся меньше, и ситуация остается стабильной.

- Уровень E – С второстепенного направления образуется очередь, которая при постоянной транспортной ситуации не в состоянии уменьшаться. Транспортные средства испытывают большие задержки.

Увеличение интенсивности с второстепенного направления может привести к образованию затора. Пропускная способность перекрестка (подхода к перекрестку) истощена.

- Уровень F – Интенсивность прибытия транспортных средств к подходу на нерегулируемом перекрестке в течение значительного времени превышает пропускную способность подхода. Образуется очень длинная и постоянно увеличивающаяся очередь транспортных средств. Значения задержек при этом очень велики. Ситуация может быть разрешена лишь при значительном снижении интенсивности прибытия транспортных средств. Перекресток считается перегруженным (перенасыщение потоков).

С учетом всех составляющих, включая оценку качества организации дорожного движения, в зарубежных руководствах процедура расчета состоит из нескольких этапов, представленных на рис. 1 [18].

Таблица 1

Уровни качества обслуживания и соответствующие значения задержек, используемые в Германии [15–16]

Table 1

Service quality levels and corresponding values of delays used in Germany [15–16]

Уровень обслуживания движения (LOS)	Средняя задержка, с
A	≤ 10
B	≤ 20
C	≤ 30
D	≤ 45
E	> 45
F	- 1)

Примечание. Уровень F имеет место лишь при уровне загрузки более 1.

Результаты исследования

В настоящем исследовании было произведено сравнение следующих методик расчета пропускной способности нерегулируемых пересечений:

1. ОДМ 218.2.020-2012 «Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог». (Разд. 6. Пропускная способность пересечений; 6.1 Пропускная способность пересечений в одном уровне);

2. Руководство HCM 2000 (CHAPTER 17 UNSIGNALIZED INTERSECTION) [19].

В результате сравнения было выявлено, что:

Методика ОДМ 218.2.020-2012 учитывает интенсивность главного потока, состав потока, наличие продольных уклонов, наличие/отсутствие канализирования движения, состав потока второстепенного направления.



Рис. 1. Последовательность расчета пропускной способности, задержек и длины очередей на нерегулируемых и кольцевых пересечениях
Fig. 1. Calculation sequence of road capacity, delays and queue length at uncontrolled intersections and roundabouts

Методика руководства HCM 2000 учитывает эффект импеданса – дополнительных помех, создаваемых дополнительными конфликтными точками, следующими за первой конфликтной точкой главного и второстепенного транспортных потоков, а также конфликтные точки, создаваемые пешеходами.

Результаты сравнительного анализа приведены ниже на рис. 2 и табл. 2 Сравнение выполнено на примере Т-образного перекрестка при отсутствии пешеходного движения.

По результатам сравнительного анализа можно сделать вывод, что методика ОДМ 218.020-2012 дает завышенные значения пропускной способности второстепенных направлений движения по сравнению с методикой HCM 2000, когда второстепенный поток проходит несколько конфликтных точек (в данном случае направление 5). Соответственно, возникают ошибки оценки длины очереди, которая должна быть учтена при расчете геометрических параметров перекрестка (длины участков накопления).

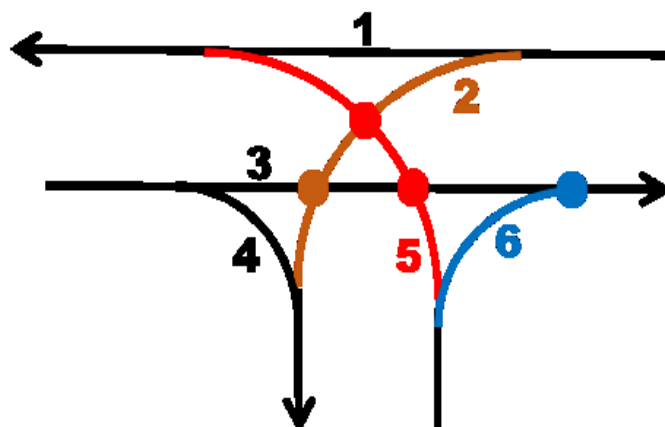


Рис. 2. Схема размещения конфликтных точек, рассматриваемых в методиках руководства HCM 2000 (направление 5 – поток 3 ранга, уступающий потокам 1 и 2)
Fig. 2. Location diagram of conflict points considered in the methodology of HCM 2000 manuals (direction 5 – 3^d rank flow inferior to the flows 1 and 2)

Таблица 2

Значения пропускной способности второстепенных направлений

Table 2

Capacity values of secondary roads

Интенсивность главного потока, авт/ч	Значения пропускной способности второстепенных направлений, авт/ч					
	Направление 2		Направление 5		Направление 6	
	HCM 2000	ОДМ 218.020-2012	HCM 2000	ОДМ 218.020-2012	HCM 2000	ОДМ 218.020-2012
100	1231	1428	731	1428	878	892
200	1095	1246	574	1246	792	846
300	973	1017	398	1017	714	804
400	865	907	230	907	644	758
500	768	835	67	835	579	693
600	682	794	исчерпана	794	521	641

Заключение

1. Выполнен сравнительный анализ методик расчета пропускной способности руководства ОДМ 218.2.020-2012 (Разд. 6.1 «Пропускная способность пересечений в одном уровне») и руководства HCM 2000.

2. Рассмотрены уровни качества обслуживания и соответствующие значения задержек, используемые в Германии.

3. Наиболее значимым отличием методики, представленной в ОДМ 218.2.020-

2012, от зарубежных методик является отсутствие в ней оценки качества организации дорожного движения на нерегулируемых и кольцевых пересечениях. Критерием оценки качества организации движения на нерегулируемых и кольцевых пересечениях является величина средней задержки транспортных средств на второстепенных направлениях движения, процедура расчета которой не рассмотрена в руководстве ОДМ 218.2.020-2012.



Библиографический список

1. Горбанев Р.В., Ваксман С.А., Глухарева Т.А. Проблемы загрузки сети магистральных улиц и дорог больших городов автомобильным транспортом: Проблемы больших городов. М.: ГОСИНТИ, 1979. Вып. № 21. 27 с.
2. Гохман В.А., Визгалов В.М., Поляков М.П. Пересечения и примыкания автомобильных дорог. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Высш. шк., 1989. 319 с.
3. Кременец Ю.А., Печерский М.П. Технические средства регулирования дорожного движения. М.: Транспорт, 1981. 252 с.
4. Лобанов Е.М. Пропускная способность автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1970. 152 с.
5. Лобанов Е.М., Визгалов В.М. Проектирование и изыскания пересечений автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1972. 232 с.
6. Лобанов Е.М. Транспортная планировка городов. М.: Транспорт, 1990. 240 с.
7. Маркуц В.М. Транспортные потоки автомобильных дорог и городских улиц (практические приложения). Ч. 1: Интенсивность и безопасность движения автомобилей, пропускная способность транспортных пересечений. Тюмень, 2008. 108 с.
8. Сильянов В.В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организация движения. М.: Транспорт, 1977. 303 с.
9. Brilon W. Roundabouts: A State of the Art in Germany. National Roundabout Conference (Vail, Colorado 22–25 May 2005). Vail, Colorado. 2005. 16 p.
10. Brilon W., Koenig R., Troutbeck R.J. Useful Estimation Procedures for Critical Gaps / Proc. of the third international Symposium on Intersections Without Traffic Signals. Portland, Oregon, U.S.A. 1997. P. 71–87.
11. Brilon W, Vendhey M. Roundabouts – The State of the Art in Germany, ITE Journal, November 1998. P. 48–54.
12. Capacity and Level of Service at Finnish Unsignalized Intersections // Finnra Reports. 2004. 214 p.
13. Functional intersection area // Oregon department of transportation, 1996. 27 p.
14. Highway Design Guide. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.yorktraffic.com/hdg>
15. Cowan R. J. Adams' formula revised // *Traffic Engineering and Control*. 1984. Vol. 25. No. 5. P. 272–274.
16. Highway Capacity Manual 2000 (HCM 2000) // Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., U.S.A. 2000. 1134 p.
17. Access Management [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.accessmanagement.info/10principles.html>
18. Kimber R.M., Marlow M., Hollis E.M. Flow/delay relationships for major/minor priority junctions // *Traffic Engineering and Control*. 1977. Vol. 18. No. 11. P. 516–519.
19. Luttinen R. T. Capacity at Unsignalized Intersections // TL Consulting Engineers Ltd., Lahti. 2003. 96 p.

References

1. Gorbanev R.V., Vaksman S.A., Gluhareva T.A. *Problemy zagruzki seti magistral'nyh ulic i dorog bol'shih gorodov avtomobil'nyim transportom: Problemy bol'shih gorodov* [Problems of big city road and street network loading with motor transport: Problems of big cities]. Moscow: GOSINITI Publ., 1979, no. 21, 27 p. (In Russian)
2. Gohman V.A., Vizgalov V.M., Polyakov M.P. *Peresecheniya i primykaniya avtomobil'nyh dorog* [Road intersections and junctions]. Moscow: Vysshaya Shkola, 1989, 319 p. (In Russian)
3. Kremenec Yu.A., Pecherskij M.P. *Tekhnicheskie sredstva regulirovaniya dorozhnogo dvizheniya* [Technical means of traffic control]. Moscow: Transport Publ., 1981, 252 p. (In Russian)
4. Lobanov E.M. *Propusknaya sposobnost' avtomobil'nyh dorog* [Highway capacity]. Moscow: Transport Publ., 1970, 152 p. (In Russian)
5. Lobanov E.M., Vizgalov V.M. *Proektirovanie i izyskaniya peresechenij avtomobil'nyh dorog* [Design and studies of road intersections]. Moscow: Transport Publ., 1972, 232 p. (In Russian)
6. Lobanov E.M. *Transportnaya planirovka gorodov* [Transport planning of cities]. Moscow: Transport Publ., 1990, 240 p. (In Russian)
7. Markuc V.M. *Transportnye potoki avtomobil'nyh dorog i gorodskih ulic* [Traffic flows on highways and city streets]. Tyumen', 2008, 108 p. (In Russian)
8. Sil'yanov V.V. *Teoriya transportnyh potokov v proektirovanii dorog i organizatsiya dvizheniya* [Theory of traffic flows in road design and traffic management]. Moscow: Transport Publ., 1977, 303 p. (In Russian)
9. Brilon W. Roundabouts: A State of the Art in Germany. National Roundabout Conference (Vail, Colorado 22–25 May 2005). Vail, Colorado, 2005, 16 p.
10. Brilon W., Koenig R., Troutbeck R.J. Useful Estimation Procedures for Critical Gaps / Proc. of the third international Symposium on Intersections Without Traffic Signals. Portland, Oregon, U.S.A., 1997, pp. 71–87.
11. Brilon W, Vendhey M. Roundabouts – The State of the Art in Germany, ITE Journal, November 1998, pp. 48–54.
12. Capacity and Level of Service at Finnish Unsignalized Intersections. Finnra Reports. 2004, 214 p.
13. Functional intersection area // Oregon department of transportation, 1996, 27 p.
14. Highway Design Guide. [Electronic resource] Accessed: <http://www.yorktraffic.com/hdg>
15. Cowan R. J. Adams' formula revised. *Traffic Engineering and Control*. 1984, vol. 25, no. 5, pp. 272–274.
16. Highway Capacity Manual 2000 (HCM 2000). Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., U.S.A., 2000, 1134 p.
17. Access Management [Electronic resource]. Ac-



cessed: <http://www.accessmanagement.info/10principles.html>

18. Kimber R.M., Marlow M., Hollis E.M. Flow/delay rela-

tionships for major/minor priority junctions // Traffic Engineering and Control, 1977, vol. 18, no. 11, pp. 516–519.

19. Luttinen R. T. Capacity at Unsignalized Intersections. TL Consulting Engineers Ltd., Lahti, 2003, 96 p.

Критерии авторства

Михайлов А.Ю., Попова Е.Л., Гайворонский И.Л. совместно подготовили рукопись и несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Mikhailov A.Yu., Popova E.L., Gaivoronskiy I.L. prepared the manuscript for publication and bear the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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



РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ АВТОМОБИЛЯ ПУТЕМ НАУЧНО ОБОСНОВАННОГО ВЫБОРА СЕРИИ ПРОФИЛЯ ШИН ПРИ ИХ ЗАМЕНЕ

© И.М. Рябов¹, К.В. Чернышов², А.В. Поздеев³, Ш.М. Мухучев⁴, Ю.М. Мухидинов⁵

^{1,2,3}Волгоградский государственный технический университет,
400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28.

^{4,5}Махачкалинский филиал Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета,
367026, Российская Федерация, г. Махачкала, пр. Акушинского, 13.

РЕЗЮМЕ: Цель исследования – разработка методики повышения безопасности автомобиля путем научно обоснованного выбора серии профиля шин при их замене, которую можно легко применить на практике при эксплуатации автотранспортных средств. Приведена расчетная схема и составлены уравнения динамики одноопорной двухмассовой колебательной системы эквивалентной автомобильной подвеске при кинематическом гармоническом возмущении. Выполнено математическое моделирование уравнений динамики колебательной системы. Получены аналитические решения уравнений динамики в виде коэффициентов динамичности колебаний кузова и колес автомобиля. Введен новый термин «относительная жесткость шины». Выбран критерий обеспечения безопасности – отсутствие отрывов колес от дороги. Наличие отрывов колес определяется по превышению динамических деформаций шины в цикле колебаний ее статической деформации под действием веса автомобиля. Представлены зависимости амплитуды деформации шин во втором резонансе от жесткости шины при различных уровнях демпфирования, зависимость относительной жесткости шины от ее серии. Основой разработанной методики является полученная диаграмма зависимости жесткости шин, при которой начинается отрыв от дороги во втором резонансе, от демпфирования в подвеске при различной жесткости подвески и высоте неровностей дороги. Рассмотрены примеры пользования полученной диаграммой, в частности, даны рекомендации по выбору серии шин различной жесткости при различной жесткости подвески и разной степени износа амортизаторов для легковых автомобилей, эксплуатируемых на малоизношенных и сильно изношенных дорогах. На основе изучения процесса колебаний колес и выбранного критерия обеспечения безопасности (отсутствие отрыва колес от дороги) разработана методика научно обоснованного выбора серии профиля шин автомобиля при их замене.

Ключевые слова: методика, автомобиль, колеса, отрыв колеса от дороги, амортизаторы, серия профиля шины, замена шин

Информация о статье: Дата поступления 07 июня 2018 г.; дата принятия к печати 30 октября 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 декабря 2018 г.

¹Рябов Игорь Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры автомобильных перевозок, e-mail: rjabov1603@mail.ru

Igor M. Ryabov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Automobile Transportation, e-mail: rjabov1603@mail.ru

²Чернышов Константин Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры технической эксплуатации и ремонта автомобилей, e-mail: chernykv@rambler.ru

Konstantin V. Chernyshov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Operation and Maintenance of Automobiles, e-mail: chernykv@rambler.ru

³Поздеев Алексей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматических установок, e-mail: pozdeev.vstu@gmail.com

Alexey V. Pozdeev, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Automatic Units, e-mail: pozdeev.vstu@gmail.com

⁴Мухучев Шамиль Магомедович, старший преподаватель кафедры организации перевозок и дорожного движения, e-mail: muhuch05@gmail.com

Shamil M. Mukhuchev, Senior Lecturer of the Department of Organization of Transport and Traffic, e-mail: muhuch05@gmail.com

⁵Мухидинов Юсуп Мухтарович, старший преподаватель кафедры организации перевозок и дорожного движения, e-mail: mfmadi@dgestan.ru

Yusup M. Mukhidinov, Senior Lecturer of the Department of Organization of Transport and Traffic, e-mail: mfmadi@dgestan.ru



Для цитирования: Рябов И.М., Чернышов К.В., Поздеев А.В., Мухучев Ш.М., Мухидинов Ю.М. Разработка методики повышения безопасности автомобиля путем научно обоснованного выбора серии профиля шин при их замене. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(12):239-251. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-239-251

DEVELOPMENT OF THE METHODS OF IMPROVING THE SAFETY OF THE VEHICLE BY THE SCIENTIFICALLY BASED SELECTION OF THE TIRE PROFILE SERIES AT THEIR REPLACEMENT

Igor M. Ryabov, Konstantin V. Chernyshov, Alexey V. Pozdeev, Shamil M. Mukhuchev, Yusup M. Mukhidinov

Volgograd State Technical University,
28 Lenin Avenue, Volgograd 400005, Russian Federation
Makhachkala branch of Moscow State Automobile and Road Technical University,
13 Akushinsky Avenue, Makhachkala 367026, Russian Federation

ABSTRACT: In this paper, the task is to develop methods for increasing the safety of a car by scientifically justified choice of tire profile series when replacing them. It should be easily applied in practice when operating vehicles. The calculation scheme is presented in the article and the equations of dynamics of a single-bearing two-mass oscillatory system equivalent to an automobile suspension under kinematic harmonic perturbation are compiled. Mathematical modeling of the dynamics equations of the oscillatory system is performed. Analytical solutions of the dynamics equations are obtained in the form of the dynamism coefficients of body and wheel vibrations. The new term "relative stiffness of tire" is introduced. The criterion for ensuring safety is chosen. It is the absence of breakaways of wheels from the road. The presence of wheels' breakaways is determined by the excess of tire dynamic deformations in the cycle of oscillations of its static deformation under the influence of the weight of the car. Dependences of the amplitude of tire deformation in the second resonance on the tire stiffness at different levels of damping are presented. The dependence of relative stiffness of the tire on its series is also shown. The basis of the developed methods is the obtained diagram of the dependence of the tire stiffness at which the breakaway from the road starts in the second resonance, from damping in the suspension with different suspension stiffness and the height of road irregularities. Examples of using the obtained diagram are considered. Particularly recommendations on the choice of a series of tires of different stiffness with different stiffness of the suspension and different degree of wear of shock absorbers for cars operated on low-worn and heavily worn-out roads are given. **Conclusions.** On the basis of the study of the process of wheel vibrations and the chosen safety criterion (absence of wheel breakaways from the road), methods for scientifically based selection of the car tire profile series when replacing them has been developed.

Keywords: *methods, car, wheels, wheel breakaway from the road, shock absorbers, tire profile series, tire replacement*

Information about the article: Received June 7, 2018; accepted for publication 30 October, 2018; available online 28 December, 2018.

For citation: Igor M. Ryabov, Konstantin V. Chernyshov, Alexey V. Pozdeev, Shamil M. Mukhuchev, Yusup M. Mukhidinov Development of the methods of improving the safety of the vehicle by the scientifically based selection of the tire profile series at their replacement. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2018;22(12):pp. 239–251. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-12-239-251

Введение

Вопросы влияния шин на эксплуатационные свойства автомобиля достаточно подробно исследованы⁶ [1–3]. Проблема повышения безопасности движения автомобиля на основе рационального выбора шин рассматривалась авторами данной статьи в работах [4–10], в которых были определены условия отрыва шин от опорной поверхности. Однако методика повышения безопасности автомобиля путем научно обоснованного выбора серии профиля шин при их замене, которую можно легко применить на практике, не была разработана.

⁶Савельев В.В. Совершенствование автосервиса интенсификацией профилактической стратегии: На примере переднеприводных автомобилей ВАЗ: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.10. Волгоград, гос. техн. ун-т. Волгоград, 2005. 163 с. / Savelyev V.V. Improvement of car service by intensification of preventive strategy: On the example of front-wheel drive cars VAZ: the abstract of the dissertation of Candidate of technical sciences: 05.22.10, Volgograd, 2005, 163 p.



В действующем в настоящее время в Российской Федерации ГОСТ Р 51709-2001⁷, устанавливающим требования к техническому состоянию автотранспортных средств (АТС) и методам их проверки при допуске к эксплуатации, требования к амортизаторам и другим элементам подвески отсутствуют, а амортизаторы при техническом осмотре автомобиля не проверяются. Требования к рациональному сочетанию характеристик амортизаторов и высоты профиля шин (определяется серией профиля шин) отсутствуют. Актуальные требования к техническому состоянию автомобилей отражены также в Техническом регламенте Таможенного союза (ТР ТС 018/2011) «О безопасности колесных транспортных средств»⁸, в котором есть требования к шинам, но при этом, также как и в ГОСТ отсутствуют требования к амортизаторам. Таким образом, в РФ не запрещена эксплуатация автомобилей, имеющих изношенные амортизаторы, а контроль за выполнением требований к шинам очень слабый. Поэтому при замене штатных шин часто устанавливают шины низкопрофильные и сверхнизкопрофильные, без учета состояния амортизаторов. Таких автомобилей в России становится все больше, что снижает безопасность подвижного состава автомобильного транспорта страны, повышает число ДТП и связанные с ними затраты.

Математическое моделирование

Для разработки такой методики используем математическую модель одноопорной двухмассовой колебательной системы, эквивалентной автомобильной подвеске при кинематическом гармоническом возмущении, расчетная схема которой приведена на рис. 1.

Применение синусоидальных воздействий с изменяемой частотой и амплитудой, соответствующей высоте неровностей различных дорог, на наш взгляд, целесообразно, поскольку позволяет выявить наличие резонансов и других особенностей колебательного процесса. Случайные воздействия планируется применить при дальнейшем совершенствовании методики. Для получения методики, пригодной для различных автомобилей при исследовании изменялись параметры подвески (жесткость упругого элемента подвески и коэффициент сопротивления амортизатора), а также жесткость шины.

Разработанная методика должна позволять оперативно осуществлять научно обоснованный выбор серии шин при их замене с учетом условий эксплуатации, жесткости подвески и износа амортизаторов. Она также должна позволять оперативно осуществлять научно обоснованный выбор амортизаторов, обеспечивающих отсутствие отрывов колес при движении автомобиля в различных дорожных условиях.

В соответствии с расчетной схемой (рис. 1) уравнения динамики системы имеют следующий вид:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{z}_1 + k_1 (\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + c_1 (z_1 - z_2) = 0; \\ m_2 \ddot{z}_2 + k_2 (\dot{z}_2 - \dot{q}) + c_2 (z_2 - q) - k_1 (\dot{z}_1 - \dot{z}_2) - c_1 (z_1 - z_2) = 0. \end{cases} \quad (1)$$

⁷ГОСТ Р 51709-2001. Автотранспортные средства. Требования безопасности к техническому состоянию и методы проверки. Изм. № 1 от августа 2005 г. Введ. 01.01.2002 г. М.: Стандартиформ, 2010. 44 с. / GOST R 51709-2001. Motor vehicles. Safety requirements for the technical condition and verification methods. Moscow, Standartinform Publ., 2010, 44 p.

⁸О безопасности колесных транспортных средств: технический регламент Таможенного союза № ТР ТС 018/2011. Комиссия таможенного союза. (15.12.2011). / Technical regulations of the Customs Union "On the safety of wheeled vehicles" No. TR TC 018/2011): The official website of the Commission of the Customs Union. 15.12.201.

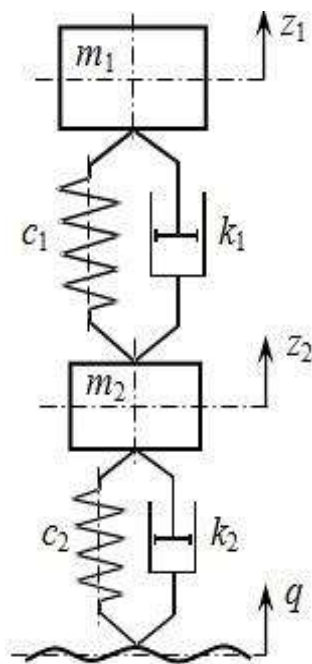


Рис. 1. Расчетная схема, эквивалентная автомобильной подвеске: m_1 – поддрессоренная масса; m_2 – неподдрессоренная масса; c_1 – жесткость рессоры; c_2 – жесткость шины; k_1 – коэффициент демпфирования подвески; k_2 – коэффициент демпфирования шины; z_1 – перемещение поддрессоренной массы; z_2 – перемещение неподдрессоренной массы; q – кинематическое возмущение колебаний

Fig. 1. The design scheme equivalent to an automobile suspension bracket: m_1 – sprung mass; m_2 – unsprung mass; c_1 – stiffness of spring; c_2 – stiffness of tire; k_1 – damping coefficient of suspension; k_2 – damping coefficient of tire; z_1 – displacement of sprung mass; z_2 – displacement of unsprung mass; q – kinematic perturbation of oscillations

Разделим первое и второе уравнения на m^1 и m^2 соответственно:

$$\begin{cases} \ddot{z}_1 + \frac{k_1}{m_1} z_1 - \frac{c_1}{m_1} z_2 = 0; \\ \ddot{z}_2 + \frac{k_2}{m_2} z_2 - \frac{c_2}{m_2} z_1 = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Введем обозначения: $\frac{m_1}{m_2} = \mu$ – относительная масса; $\frac{k_1}{m_1} = 2h_1$ – удвоенное значение

парциального относительного коэффициента демпфирования подвески; $\frac{k_2}{m_2} = 2h_2$ – удвоенное значение парциального относительного коэффициента демпфирования поддрессоренной массы; $\frac{c_2}{m_2} = \omega_{02}^2$ – квадрат парциальной собственной частоты колебаний неподдрессоренной массы. Тогда

$$\frac{k_1}{m_2} = \frac{k_1}{m_1} \cdot \frac{m_1}{m_2} = 2h_1 \mu, \quad \frac{c_1}{m_2} = \frac{c_1}{m_1} \cdot \frac{m_1}{m_2} = \omega_{01}^2 \mu. \quad (3)$$



С учетом введенных обозначений получим:

$$\begin{cases} \ddot{z}_1 + \dots + h_2 \dot{z}_1 = \dots \\ \ddot{z}_2 + \dots = \dots \end{cases} \quad (4)$$

Решение этой системы уравнений (4) можно представить в виде коэффициентов динамичности. Для колебаний кузова:

$$K_{z_1} = \frac{z_{01}}{q_0} = \frac{(\omega_{01}^2 \omega_{02}^2 - 2h_1 2h_2 \omega^2)^2 + (2h_1 \omega_{02}^2 + 2h_2 \omega_{01}^2)^2 \cdot \omega^2}{\sqrt{[\omega_{01}^2 \omega_{02}^2 - (2h_1 2h_2 + \omega_{01}^2 + \omega_{02}^2 \mu + \omega_{02}^2) \cdot \omega^2 + \omega^4]^2 + [(2h_1 \omega_{02}^2 + 2h_2 \omega_{01}^2) \cdot \omega - (2h_1 + 2h_1 \mu + 2h_2) \cdot \omega^3]^2}}, \quad (5)$$

для колебаний колес:

$$K_{z_2} = \frac{z_{02}}{q_0} = \frac{(\omega_{01}^2 \omega_{02}^2 - 2h_1 2h_2 \omega^2 - \omega_{02}^2 \omega^2)^2 + (2h_1 \omega_{02}^2 \omega + 2h_2 \omega_{01}^2 \omega - 2h_2 \omega^3)^2}{\sqrt{[\omega_{01}^2 \omega_{02}^2 - (2h_1 2h_2 + \omega_{01}^2 + \omega_{02}^2 \mu + \omega_{02}^2) \cdot \omega^2 + \omega^4]^2 + [(2h_1 \omega_{02}^2 + 2h_2 \omega_{01}^2) \cdot \omega - (2h_1 + 2h_1 \mu + 2h_2) \cdot \omega^3]^2}}. \quad (6)$$

В этих выражениях z_{01} и z_{02} – амплитуды колебаний подрессоренной и недрессоренной масс соответственно. По выражениям (5) и (6) можно построить графики амплитудно-частотных характеристик перемещений подрессоренной и недрессоренной масс.

Для получения закона деформации шины введем в уравнение (1) следующие обозначения: $z_1 - z_2 = x$ – деформация подвески; $z_2 - q = y$ – деформация шины.

Получим:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x} + \dots = \dots \\ m_2 \ddot{y} + \dots = \dots \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \ddot{x} + \dots = \dots \\ \ddot{y} + \dots = \dots \end{cases} \quad (8)$$

Решения этой системы уравнений в виде коэффициентов динамичности получаются в следующем виде:

$$K_x = \frac{x_0}{q_0} = \frac{\omega_{02}^4 \omega^4 + 4h_2^2 \omega^6}{\sqrt{[\omega_{01}^2 \omega_{02}^2 - (2h_1 2h_2 \omega^2 + \omega_{02}^2 \omega^2 + \omega_{01}^2 \omega^2 + \omega_{01}^2 \omega^2 \mu) + \omega^4]^2 + [2h_1 \omega_{02}^2 \omega + 2h_2 \omega_{01}^2 \omega - (2h_1 \omega^3 + 2h_1 \omega^3 \mu + 2h_2 \omega^3)]^2}}, \quad (9)$$



$$K_y = \frac{y_0}{q_0} = \sqrt{\frac{(\omega_{01}^2 \omega^2 + \omega_{01}^2 \omega^2 \mu - \omega^4)^2 + (2h_1 \omega^3 + 2h_1 \omega^3 \mu)^2}{(\omega_{01}^2 \omega_{02}^2 - 2h_1 2h_2 \omega^2 - \omega_{01}^2 \omega^2 - \omega_{01}^2 \omega^2 \mu - \omega_{02}^2 \omega^2 + \omega^4)^2 + (2h_1 \omega \omega_{02}^2 + 2h_2 \omega \omega_{01}^2 - 2h_1 \omega^3 - 2h_1 \omega^3 \mu - 2h_2 \omega^3)^2}}. \quad (10)$$

Здесь x_0 и y_0 – амплитуды деформаций подвески и шины соответственно.

Разработка методики повышения безопасности автомобиля путем научно обоснованного выбора серии профиля шин при их замене

Для разработки методики нужно сначала определить критерий отрыва колеса от опорной поверхности. При колебаниях колеса, которое катится по гармоническому профилю, радиальная деформация шины периодически то увеличивается, то уменьшается. Критерием отрыва колеса от опорной поверхности примем превышение амплитуды деформации шины ее статической деформации под силой тяжести, приходящейся на колесо:

$$y_0 \geq y_{ст}, \quad (11)$$

где y_0 – амплитуда деформации шины, $y_{ст}$ – статическая деформация шины под силой тяжести, приходящейся на колесо.

Далее, используя выражения (9) и (10), путем математического моделирования в приложении SIMULINK программного комплекса MATHEMATICS MATLAB, построим диаграмму зависимостей амплитуды деформации шин во втором резонансе от жесткости шины при различных уровнях демпфирования (рис. 2).

Для этого при постоянных значениях поддрессоренной и неподдрессоренной масс определяли максимальное значение амплитуды деформаций шин различной жесткости (во втором резонансе). В расчетах принимались жесткости шины из следующего ряда: 100, 200, 300, ..., 1000 кН/м). На диаграмму (рис. 2) наносили точки, соответствующие полученным максимальным значениям амплитуды деформаций шин и, соединяя точки, получили кривую 1. Затем значение относительного коэффициента затухания ψ в подвеске ступенчато увеличивали из следующего ряда: 0,25, 0,3, 0,35, 0,5 и аналогично построили кривые 2–5. Амплитуду эквивалентной гармонической неровности для малоизношенной дороги принимали $q_{01} = 10$ мм, а кривые 1–5 строили по левой вертикальной шкале. Для учета в разрабатываемой методике более жестких условий эксплуатации автомобиля, например, преимущественно на сильноизношенных дорогах, у которых амплитуда эквивалентной гармонической неровности $q_{02} = 15$ мм (в 1,5 раза больше), на диаграмме построена правая вертикальная шкала, значения которой в 1,5 раза больше, чем левой шкалы.

На следующем этапе на диаграмме (рис. 2) строим зависимости изменения статической деформации от жесткости шины. Примем допущение, что статическая деформация шины $y_{ст}$ изменяется обратно пропорционально ее жесткости c_2 по уравнению:

$$y_{ст} = (m_1 + m_2) \frac{g}{c_2}, \quad (12)$$

где g – ускорение свободного падения.

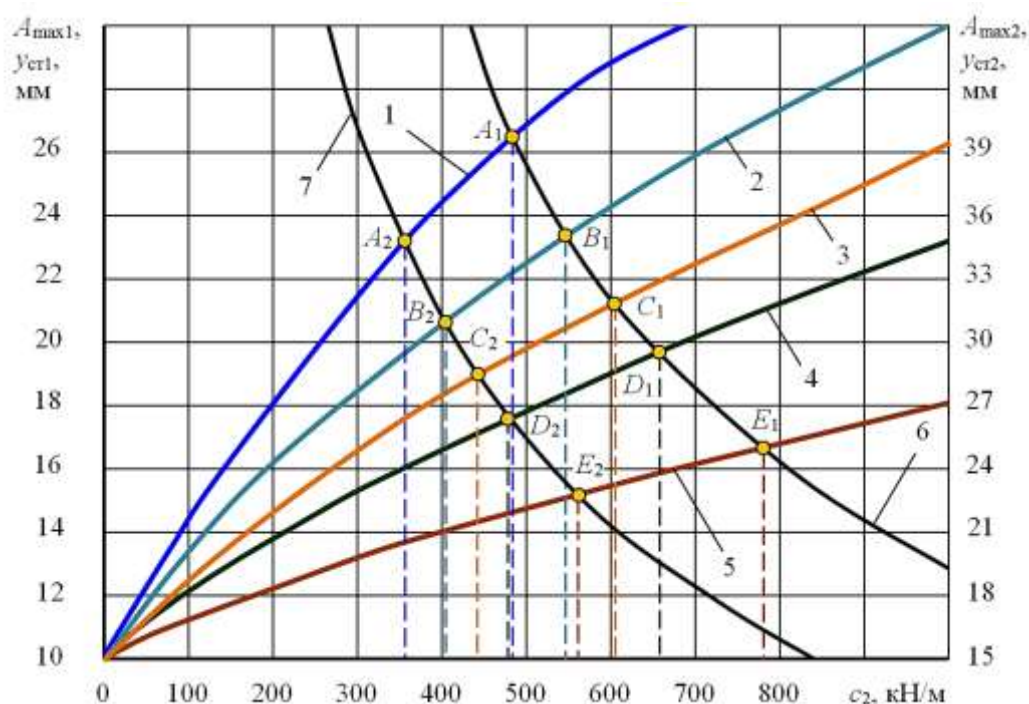


Рис. 2. Зависимости амплитуды деформации шин во втором резонансе от жесткости шины при различных уровнях демпфирования k и следующих параметрах: $m_1 = 1200$ кг, $m_2 = 120$ кг, $c_1 = 47374$ Н/м ($\omega_{01} = 2\pi$ рад/с), амплитудах эквивалентной гармонической неровности $q_{01} = 10$ мм и $q_{02} = 15$ мм: 1 – $k = 3016$ Н*с/м ($\psi = 0,2$); 2 – $k = 3770$ Н*с/м ($\psi = 0,25$); 3 – $k = 4524$ Н*с/м ($\psi = 0,3$); 4 – $k = 5278$ Н*с/м ($\psi = 0,35$); 5 – $k = 7540$ Н*с/м ($\psi = 0,5$); 6 – статическая деформация шины по левой шкале (для определения граничной жесткости шин при амплитуде эквивалентной гармонической неровности $q_{01} = 10$ мм, соответствующей малоизношенной дороге); 7 – статическая деформация шины по правой шкале (для определения граничной жесткости шин при амплитуде эквивалентной гармонической неровности $q_{02} = 15$ мм, соответствующей сильно изношенной дороге)

Fig. 2. Dependences of the amplitude of tire deformation in the second resonance on the tire stiffness at different levels of damping k and the following parameters: $m_1 = 1200$ kg, $m_2 = 120$ kg, $c_1 = 47374$ N/m ($\omega_{01} = 2\pi$ rad/sec), amplitudes of equivalent harmonic irregularity $q_{01} = 10$ mm and $q_{02} = 15$ mm: 1 – $k = 3016$ N*sec/m ($\psi = 0,2$); 2 – $k = 3770$ N*sec/m ($\psi = 0,25$); 3 – $k = 4524$ N*sec/m ($\psi = 0,3$); 4 – $k = 5278$ N*sec/m ($\psi = 0,35$); 5 – $k = 7540$ N*sec/m ($\psi = 0,5$); 6 – static tire deformation on the left scale (for determining boundary stiffness of tire at an amplitude of an equivalent harmonic irregularity $q_{01} = 10$ mm, corresponding to poorly worn road); 7 – static tire deformation on the right scale (for determining boundary stiffness of tire at an amplitude of an equivalent harmonic irregularity $q_{02} = 15$ mm, corresponding to badly worn road)

Поскольку переменной является жесткость шины c_2 , то зависимость статической деформации шины от ее жесткости графически представляет собой гиперболу. Такая гипербола построена для левой и правой вертикальных шкал (кривые 6 и 7 соответственно). Кривая 6 соответствует амплитуде эквивалентной гармонической неровности $q_{01} = 10$ мм (левая шкала), а кривая 7 – амплитуде эквивалентной гармонической неровности $q_{02} = 15$ мм (правая шкала). Опуская перпендикуляры из точек пересечения A_1, B_1, C_1, D_1, E_1 гиперболы 6 с кривыми 1–5 определяют граничную жесткость выбираемой шины, при превышении которой начинаются отрывы колеса на дороге с амплитудой эквивалентной гармонической неровности $q_{01} = 10$ мм. Аналогично опуская перпендикуляры из точек пересечения A_2, B_2, C_2, D_2, E_2 гиперболы 7 с кривыми 1–5 определяют граничную жесткость выбираемой шины, при превышении которой начинаются отрывы колеса на дороге с амплитудой эквивалентной гармонической неровности $q_{01} = 15$ мм.

Таким образом, получена диаграмма, по которой, зная состояние амортизаторов (обеспечиваемый ими коэффициент относительного затухания колебаний ψ , который определяется различными способами, в том числе на специальных стендах) можно оперативно определить гра-



ничную жесткость выбираемых шин при их замене, обеспечивающую отсутствие отрывов колес от дороги с различной высотой неровностей.

Для определения зависимости жесткости шины от серии ее профиля введем новый показатель «*относительная жесткость шины*»:

$$c_{\text{отн}} = \frac{c_{2H}}{c_{2C}}, \quad (13)$$

где c_{2H} – жесткость новой (выбираемой или выбранной для замены) шины; c_{2C} – жесткость подлежащей замене шины. С учетом того, что статическая деформация шины составляет 10% от высоты профиля, с использованием формул 12 и 13 строим зависимость, показывающую рост относительной жесткости шин более низкой серии (65...40) при замене ими шин серии 70, распространенной в настоящее время (рис. 3).

Анализ рис. 3 показывает, что при снижении серии заменяемых шин с 70-й до 40-й их жесткость увеличивается в 1,75 раза по экспоненциальной зависимости.

Для удобства практического использования построим универсальную диаграмму зависимости относительной жесткости шины от ее серии (рис. 4).

Графиком на рис. 3 удобно пользоваться только тогда, когда необходимо заменить шины серии 70 (для нее $c_{\text{отн}} = 1,0$) на шины более низкого профиля, поскольку по нему можно сразу определить во сколько раз увеличится жесткость шины. Например, при замене шин серии 70 на шины серии 50 их жесткость увеличится в 1,4 раза.

Однако в случае, когда требуется заменить шину серии 70 на шину более высокой серии, а также если заменяемая шина имеет серию отличную от 70-й, то данный график не позволяет получить нужную информацию по изменению ее относительной жесткости.

Поэтому для удобства практического использования методики построим универсальную диаграмму, содержащую совокупность зависимостей относительной жесткости шины от ее серии в широком диапазоне изменения серии заменяемой шины от 40 до 100 (рис. 4).

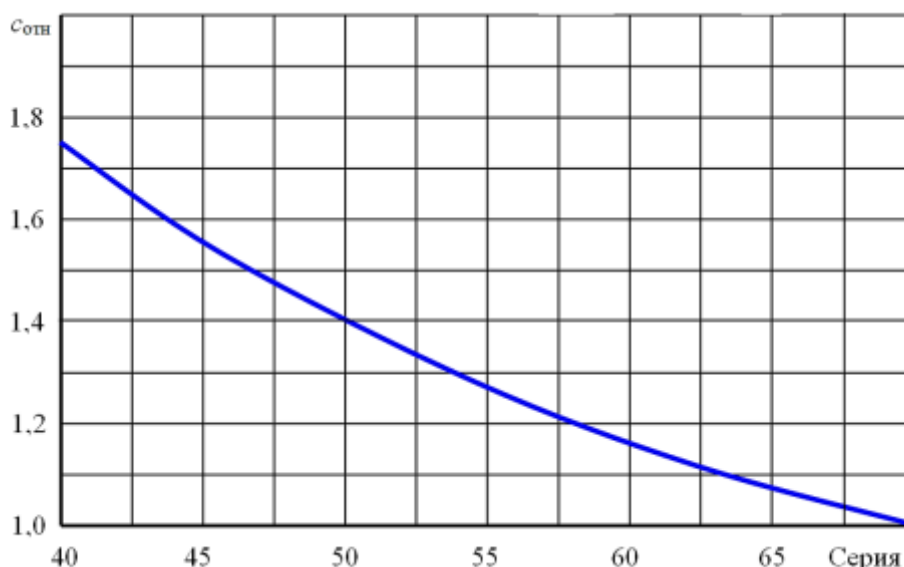


Рис. 3. Зависимость, показывающая рост относительной жесткости шин более низкой серии (65–40) при замене ими шин серии 70 (распространенной в настоящее время)

Fig. 3. Dependence showing the increase in the relative stiffness of the tires of the lower series (65–40) when replacing them with the tires of 70 Series (currently in use)

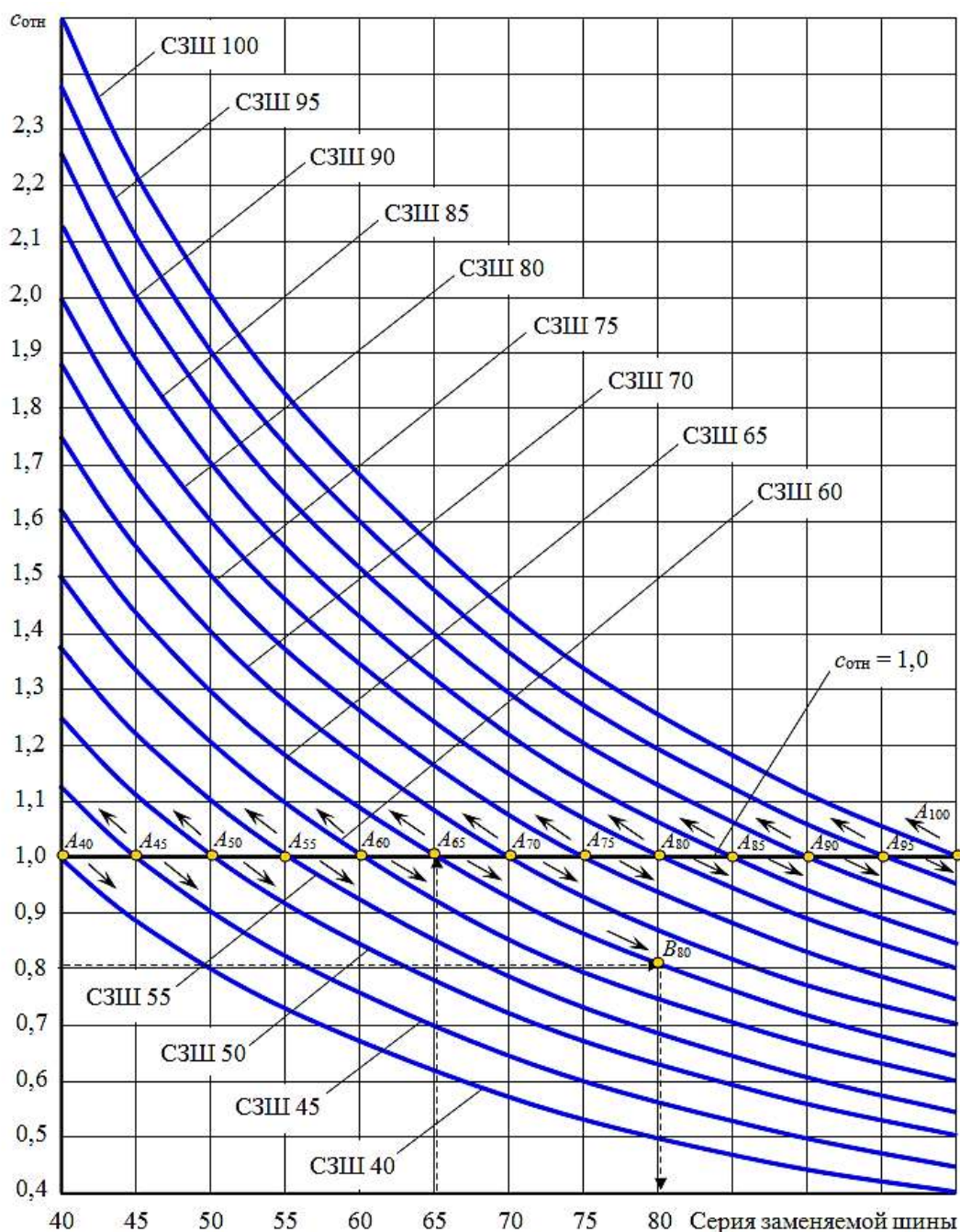


Рис. 4. Универсальная диаграмма для определения серии новой шины по граничному значению $C_{отн}$ ее эквивалентной жесткости $C_{отн}$ и серии заменяемой шины: C3Ш 40...C3Ш 100 – кривые серий заменяемых шин; $C_{отн} = 1,0$ – горизонтальная линия, с которой начинается процесс замены серии шин; $A_{40}...A_{100}$ – точки пересечения кривых C3Ш 40–C3Ш 100 с прямой $C_{отн} = 1,0$; B_{40} – CНШ 80 при $C_{отн} = 0,8$

Fig. 4. Universal diagram for determining a series of a new tire at the boundary value of its equivalent stiffness $C_{отн}$ and a series of replaceable tire: C3Ш 40–C3Ш 100 – curves of the series of replaceable tires; $C_{отн} = 1,0$ – horizontal line from which the process of replacing a series of tires begins; $A_{40}...A_{100}$ – points of intersection of curves C3Ш 40...C3Ш 100 with a straight line $C_{отн} = 1,0$; B_{40} – CНШ 80 at $C_{отн} = 0,8$

При использовании универсальной диаграммы на ней находится кривая с обозначением серии заменяемой шины (C3Ш), например, C3Ш 65. Перпендикуляр, опущенный на ось абсцисс из точки пересечения A_{65} данной кривой с горизонтальной линией, соответствующей $C_{отн} = 1,0$ подтверждает правильный выбор C3Ш. Далее, для нахождения по универсальной



диаграмме серии новой шины (СНШ) из точки на вертикальной оси, соответствующей граничному значению эквивалентной жесткости шины (например, $c_{\text{отн}} = 0,8$) проводится горизонталь (штриховая линия) до пересечения с найденной кривой СЗШ 65, и из точки пересечения B_{80} опускается перпендикуляр на ось абсцисс, который указывает искомую СНШ (в данном примере это серия 80).

Для более удобного и точного нахождения граничной жесткости заменяемой шины в случае замены амортизаторов на автомобилях с различной жесткостью упругого элемента подвески на базе диаграммы (рис. 2) построим диаграмму (рис. 5).

На этой диаграмме построены зависимости жесткости шин, при которой начинается их отрыв от дороги (во втором резонансе) от уровня демпфирования в подвеске при различной жесткости упругого элемента подвески и амплитуде неровностей. Кривая 1 соответствует малоизношенной асфальтированной дороге с $q_{01} = 10$ мм. Кривая 3 соответствует сильно изношенной дороге с $q_{02} = 15$ мм. Кривые 1 и 3 построены для мягкой подвески. Кривая 2 построена для более жесткой (в 2 раза) подвески при амплитуде эквивалентной гармонической неровности $q_{01} = 10$ мм.

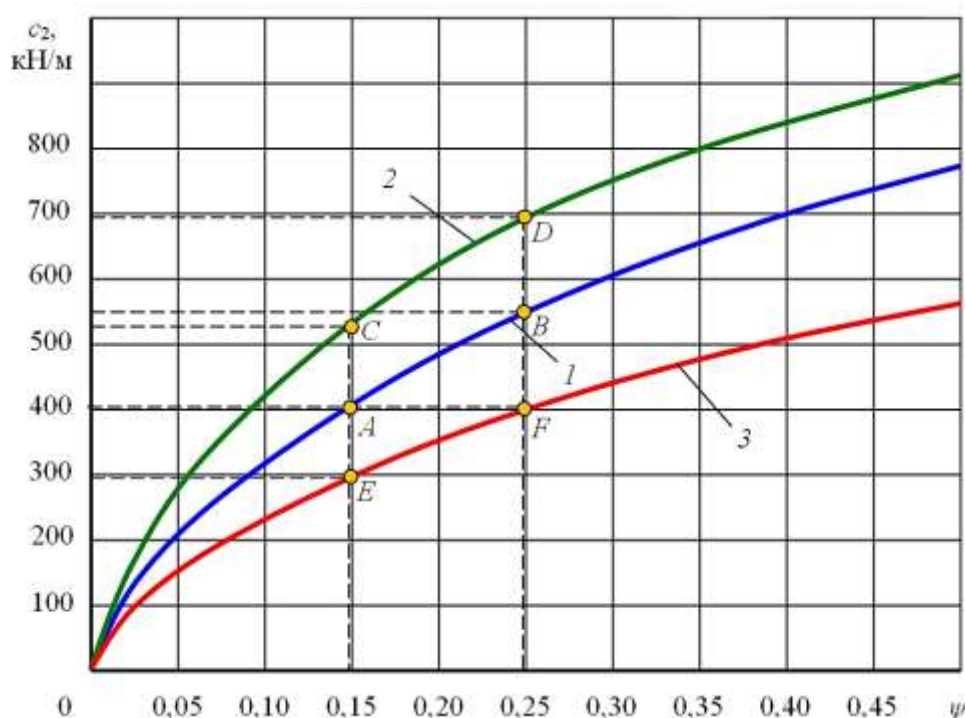


Рис. 5. Зависимость жесткости шин, при которой начинается отрыв от дороги во втором резонансе, от демпфирования в подвеске при различных жесткости подвески и высоте неровностей при следующих параметрах: поддрессоренная масса $m_1 = 1200$ кг; неподдрессоренная масса $m_2 = 120$ кг; кривая 1 – при амплитуде эквивалентной гармонической неровности $q_{01} = 10$ мм и жесткости подвески: $c_1 = 47374$ Н/м ($\omega_{01} = 2\pi$ рад/с, $\nu_{01} = 1$ Гц); кривая 2 – при амплитуде эквивалентной гармонической неровности $q_{01} = 10$ мм и большей жесткости подвески $c_1 = 106592$ Н/м ($\omega_{01} = 3\pi$ рад/с, $\nu_{01} = 1,5$ Гц); кривая 3 построена при тех же параметрах, что кривая 1, но при амплитуде эквивалентной гармонической неровности $q_{02} = 15$ мм

Fig. 5. Dependence of tire stiffness at which the breakaway from the road starts in the second resonance, from damping in the suspension with different suspension stiffness and the height of irregularities with the following parameters: sprung mass $m_1 = 1200$ kg; unsprung mass $m_2 = 120$ kg; curve line 1 – for the amplitude of the equivalent harmonic irregularity $q_{01} = 10$ mm and stiffness of suspension: $c_1 = 47374$ N/m ($\omega_{01} = 2\pi$ rad/sec, $\nu_{01} = 1$ Hz); curve line 2 – for the amplitude of the equivalent harmonic irregularity $q_{01} = 10$ mm and greater stiffness of suspension $c_1 = 106592$ N/m ($\omega_{01} = 3\pi$ rad/sec, $\nu_{01} = 1,5$ Hz); curve line 3 is constructed for the same parameters as curve line 1, but for the amplitude of the equivalent harmonic irregularity $q_{02} = 15$ mm



Примеры применения методики повышения безопасности автомобиля

Рассмотрим примеры пользования полученной диаграммой (рис. 5), которая является основной в разработанной методике.

Пример 1. Рекомендации по научно обоснованному выбору серии профиля заменяемых шин для легкового автомобиля с мягкой подвеской, эксплуатируемого на малоизношенных дорогах (рис. 5, кривая 1) и шинами, имеющими жесткость 400 кН/м (рис. 5, горизонтальная пунктирная линия).

Возможны следующие случаи.

1. Автомобиль имел амортизаторы, обеспечивающие $\psi = 0,25$, но к моменту замены они износились и обеспечивают только $\psi = 0,15$.

Рекомендации по выбору шин при замене:

1) поскольку кривая 1 проходит через точку А ($\psi = 0,15$, $c_2 = 400$ кН/м), то по условиям безопасности (безотрывного качения колес) нельзя устанавливать шины более жесткие (более низкой серии), чем были, но можно поставить такие же и планировать заменить амортизаторы;

2) лучше установить более мягкие шины большей серии, чем были, поскольку при дальнейшем износе и снижении эффективности амортизатора шины, которые стояли на автомобиле окажутся слишком жесткими, начнутся отрывы колес и снизится безопасность автомобиля.

2. Автомобиль имел амортизаторы высокого качества, обеспечивающие $\psi = 0,25$, которые к моменту замены шин практически не износились.

Рекомендации по выбору шин при замене:

1) значению $\psi = 0,25$ на кривой 1 соответствует жесткость шины $c_2 = 550$ кН/м (точка В), поэтому при замене можно выбрать шины более низкой серии (большей жесткости), желательно не больше 500 кН/м, чтобы остался запас на износ амортизаторов и необходимо следить за их состоянием;

2) лучше установить при замене такие же шины той же серии.

Пример 2. Рекомендации по научно обоснованному выбору серии профиля заменяемых шин для легкового автомобиля с жесткой подвеской, эксплуатируемого на малоизношенных дорогах (рис. 5, кривая 2) и шинами, имеющими жесткость 400 кН/м (рис. 5, горизонтальная пунктирная линия).

Возможны следующие случаи.

1. Автомобиль имел амортизаторы, обеспечивающие $\psi = 0,25$, но к моменту замены они износились и обеспечивают только $\psi = 0,15$.

Рекомендации по выбору шин при замене:

1) поскольку кривая 2 проходит через точку С ($\psi = 0,15$, $c_2 = 530$ кН/м), поэтому при замене можно выбрать шины более низкой серии (большей жесткости), желательно не больше 500 кН/м, чтобы остался запас на износ амортизаторов и следить за их состоянием;

2) лучше установить при замене такие же шины той же серии.

2. Автомобиль имел амортизаторы высокого качества, обеспечивающие $\psi = 0,25$, которые к моменту замены шин практически не износились.

Рекомендации по выбору шин при замене:

1) значению $\psi = 0,25$ на кривой 2 соответствует жесткость шины $c_2 = 700$ кН/м (точка D), поэтому при замене можно выбрать шины более низкой серии (большей жесткости), желательно не больше 600 кН/м, чтобы остался запас на износ амортизаторов и следить за их состоянием.

Пример 3. Рекомендации по научно обоснованному выбору шин при замене для легкового автомобиля с мягкой подвеской и шинами с жесткостью 400 кН/м, эксплуатируемого на сильно изношенных дорогах (рис. 5, кривая 3).

Возможны следующие случаи.

1. Автомобиль имел амортизаторы, обеспечивающие $\psi = 0,25$, но к моменту замены они износились и обеспечивают только $\psi = 0,15$.



Рекомендации по выбору шин при замене:

1) поскольку кривая 3 проходит через точку E ($\psi = 0,15$, $c_2 = 300$ кН/м), то по условиям безопасности (безотрывного качения колес) нельзя устанавливать шины более жесткие (более низкой серии), чем были, и нельзя поставить такие же шины без замены амортизаторов;

2) лучше установить при замене шины более высокой серии с жесткостью меньшей $c_2 = 250$ кН/м.

2. Автомобиль имел амортизаторы высокого качества, обеспечивающие $\psi = 0,25$, которые к моменту замены шин амортизаторы не износились.

Рекомендации по выбору шин при замене такие же, как в первом случае. При этом кривая 3 проходит через точку F ($\psi = 0,25$, $c_2 = 400$ кН/м).

Выводы

1. Предложен новый показатель «относительная жесткость шины», показывающий, во сколько раз жесткость новой шины больше жесткости старой шины при ее замене.

2. Выбран критерий обеспечения безопасности автомобиля – отсутствие отрывов колес от дороги, который определяется по превышению динамических деформаций шины в цикле колебаний ее статической деформации под действием веса автомобиля.

3. Получены универсальная диаграмма зависимости относительной жесткости шины от ее серии и удобная для практического использования диаграмма научно обоснованного выбора жесткости шин, по которой можно определить допустимую по безопасности серию шин с учетом параметров подвески и микропрофиля дорог, на которых предполагается его эксплуатировать.

4. Приведены конкретные примеры применения методики повышения безопасности автомобиля путем научно обоснованного выбора серии профиля шин при их замене.

Таким образом, в статье на основе критерия безотрывного качения колес разработана методика повышения безопасности автомобиля путем научно обоснованного выбора серии профиля шин при их замене и приведены примеры ее практического применения.

Библиографический список

1. Евзович В.Е., Райбман П.Г. Автомобильные шины, диски и ободья. М.: Автополис-плюс, 2010. 144 с.
2. Хачатуров А.А., Афанасьев Л.В., Васильев В.С. Динамика системы «дорога – шина – автомобиль – водитель». М.: Машиностроение, 1976. 535 с.
3. Ротенберг Р.В. Подвеска автомобиля. Колебания и плавность хода. 3-е изд. М.: Машиностроение, 1972. 392 с.
4. Рябов И.М., Чернышов К.В., Гасанов М.М., Мухучев Ш.М. Повышение безопасности автомобиля за счет рационального выбора шин с учетом характеристик амортизаторов // Известия ВолгГТУ. Серия: Наземные транспортные системы. 2015. Вып. 10. № 4 (162). С. 45–49.
5. Рябов И.М., Чернышов К.В., Поздеев А.В., Мухучев Ш.М., Мухидинов Ю.М. Методика определения условий и продолжительности отрывов колес автомобиля от дороги // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2017. № 3 (20). С. 36–43.
6. Рябов И.М., Чернышов К.В., Гасанов М.М., Мухучев Ш.М. О проблеме безопасности при эксплуатации автомобилей с неисправными амортизаторами // Известия ВолгГТУ. Сер.: Наземные транспортные системы. 2014. Вып. 9, № 19 (146). С. 103–106.
7. Поздеев А.В., Похлебин А.В., Чернышов К.В., Мухидинов Ю.М., Мухучев Ш.М. Определение неисправностей гидравлических амортизаторов при стендовых испытаниях // Известия ВолгГТУ. Сер. Наземные транспортные системы. Вып. 12. Волгоград, 2015. № 6 (166). С. 71–76.
8. Рябов И.М., Поздеев А.В., Муртузов М.М., Мухучев Ш.М., Мухидинов Ю.М. Особенности формирования нагрузочной характеристики шины // Актуальные вопросы развития транспортной системы : сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Махачкала, 14–15 мая 2016 г.). Махачкала, 2016. С. 38–43.
9. Рябов И.М., Муртузов М.М., Мухидинов Ю.М., Мамакурбанов М.М. Исследование и анализ изменения давления в шинах автомобиля «Газель» при эксплуатации на междугородном маршруте // Известия ВолгГТУ. Сер.: Наземные транспортные системы. Вып. 9. 2014. № 19 (146). С. 100–102.
10. Рябов И.М., Новиков В.В., Чернышов К.В., Поздеев А.В., Мухучев Ш.М. Гидравлический амортизатор с повышенной эффективностью // Современные железные дороги: достижения, проблемы, образование. Вып. 8: матер.



8-й Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию Победы в Великой Отечественной войне (26 мая 2015 г.) / науч. ред.: В.В. Артемьева, Ю.С. Бахрачева ; Московский гос. ун-т путей сообщения (МИИТ), Волгоградский филиал. Волгоград, 2015. С. 125–129.

References

1. Evzovich V.E., Reibman P.G. *Avtomobil'nye shiny, diski i obod'ya* [Car tires, wheels and rims]. Moscow: Avtopoliplyus Publ, 2010, 144 p. (in Russian)
2. Khachaturov A.A., Afanasiev L.V., Vasilyev V.S. *Dinamika sistemy «doroga – shina – avtomobil' – voditel'»* [Dynamics of the "road-tire-car-driver" system]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976, 535 p. (In Russian)
3. Rotenberg R.V. *Podveska avtomobilya. Kolebaniya i plavnost' hoda* [Suspension of the car. Fluctuations and smooth running]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972, 392 p. (In Russian)
4. Ryabov I.M., Chernyshov K.V., Gasanov M.M., Mukhuchev Sh.M. *Povyshenie bezopasnosti avtomobilya za schet racional'nogo vybora shin s uchetom harakteristik amortizatorov* [Improving the safety of the car due to the rational choice of tires, taking into account the characteristics of shock absorbers]. *Izvestiya VolgGTU. Seriya "Nazemnye transportnye sistemy"* = News of VSTU. Series "Ground transportation systems". 2015, vol. 10, no. 4 (162), pp. 45–49. (In Russian)
5. Ryabov I.M., Chernyshov K.V., Pozdeev A.V., Mukhuchev Sh.M., Mukhidinov Yu.M. *Metodika opredeleniya uslovij i prodolzhitel'nosti otryvov koles avtomobilya ot dorogi* [Methods for determining the conditions and duration of separation of the wheels of a car from the road]. *Ehnergo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport* [Energy and Resource Saving: Industry and Transport]. 2017, no. 3(20), pp. 36–43. (in Russian)
6. Ryabov I.M., Chernyshov K.V., Gasanov M.M., Muhuchev Sh.M. *O probleme bezopasnosti pri ehkspluatacii avtomobilej s neispravnymi amortizatorami* [On the problem of safety in the operation of cars with faulty shock absorbers]. *Izvestiya VolgGTU. Seriya "Nazemnye transportnye sistemy"* [News of VSTU. Series "Ground transportation systems"]. Volgograd, VSTU Publ., 2014, vol. 9, no. 19 (146), pp. 103–106. (in Russian)
7. Pozdeev A.V., Pokhlebin A.V., Chernyshov K.V., Mukhidinov Yu.M., Mukhuchev Sh.M. *Opredelenie neispravnostej gidravlicheskih amortizatorov pri stendovyh ispytaniyah* [Determination of faults of hydraulic shock absorbers during bench tests]. *Izvestiya VolgGTU. Seriya "Nazemnye transportnye sistemy"* [News of VSTU. Series "Ground transportation systems"]. Volgograd, VSTU Publ., 2015, vol. 12, no. 6 (166), pp. 71–76. (in Russian)
8. Ryabov I.M., Pozdeev A.V., Murtuzov M.M., Mukhuchev Sh.M., Mukhidinov Yu.M. *Osobennosti formirovaniya nagruzochnoj harakteristiki shiny* [Features of forming the load characteristic of the tire]. *Aktual'nye voprosy razvitiya transportnoj sistemy: sbornik nauchnyh trudov mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Actual questions of the development of the transport system: a collection of scientific papers of the international scientific and practical conference], Makhachkala, 2016, pp. 38–43. (in Russian)
9. Ryabov I.M., Murtuzov M.M., Mukhidinov Yu.M., Mamakurbanov M.M. *Issledovanie i analiz izmeneniya davleniya v shinah avtomobilya «GAZel'» na mezhdugorodnom marshrute* [Research and analysis of pressure changes in the tires of the "GAZelle" car on the intercity route]. *Izvestiya VolgGTU. Seriya "Nazemnye transportnye sistemy"* [News of VSTU. Series "Ground transportation systems"]. Volgograd, VSTU Publ., 2014, vol. 9, no. 19 (146), pp. 100–102. (in Russian)
10. Ryabov I.M., Novikov V.V., Chernyshov K.V., Pozdeev A.V., Mukhuchev Sh.M. *Gidravlicheskij amortizator s povyshennoj ehfektivnost'yu* [Hydraulic shock absorber with increased efficiency]. *Sovremennye zheleznye dorogi: dostizheniya, problemy, obrazovanie: materialy 8-j mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 70-letiyu Pobedy v Velikoj Otechestvennoj vojne* [Modern railways: achievements, problems, education: materials of the 8th International Scientific and Practical Conference dedicated to the 70th anniversary of the Victory in the Great Patriotic War]. Feniks, Volgograd, 2015, vol. 8, pp. 125–129.

Критерии авторства

Рябов И.М., Чернышов К.В., Поздеев А.В., Мухучев Ш.М., Мухидинов Ю.М. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Ryabov I.M., Chernyshov K.V., Pozdeev A.V., Mukhuchev Sh.M., Mukhidinov Yu.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.

СПАСИБО РЕЦЕНЗЕНТАМ:

Акишину Л.А., к.т.н.,
Арсентьеву О.В., к.т.н.,
Аршинскому В.Л., к.т.н.,
Ахатову Р.Х., к.т.н.,
Бахвалову С.В., к.т.н.,
Беломестных А.С., к.т.н.,
Бельскому С.С., к.т.н.,
Бочкареву В.А., к.т.н.,
Воропаю Н.И., д.т.н., член-корр. РАН
Бучневу О.С., к.т.н.,
Гусеву И.Н., к.т.н.,
Димову Ю.В., к.т.н.,
Дорофееву А.С., к.т.н.,
Дубицкому М.А., к.т.н.,
Дунаеву М.П., д.т.н.,
Жмуровой В.В.,
Зайдесу С.А., д.т.н.,
Кирию В.Г., к.т.н.,
Колганову С.В., к.т.н.,
Кольцову В.П., д.т.н.,
Коновалову Н.П., д.т.н.,
Константинову Г.Г., к.т.н.,
Крюкову А.В., д.т.н., академику Российской
академии транспорта, член-корр. АН ВШ РФ
и Российской инженерной академии, заслуженному энергетике Республики Бурятия,

Кузьминой М.Ю., к.х.н.,
Кузьмину М.П., к.т.н.,
Кузнецову Н.К., д.т.н.,
Лапшину В.Л., к.т.н.,
Лукиной Г.В., к.т.н.,
Лукьянову Н.Д., к.т.н.,
Маломыжеву О.Л., к.т.н.,
Немчиновой Н.В., д.т.н.,
Пашкову А.Е., д.т.н.,
Петрову А.В., д.т.н.,
Печкину В.А., к.т.н.,
Портнягину Е.М., к.т.н.,
Потапову А.С., к.т.н.,
Рыжикову И.Н., к.т.н.,
Савилову А.В., к.т.н.,
Сартакову В.Д., к.т.н.,
Свинину В.М., д.т.н.,
Солеру Я.И., к.т.н.,
Суслову К.В., к.т.н.,
Тютрину А.А., к.т.н.,
Федосову Д.С., к.т.н.,
Федотову А.И., д.т.н.,
Янчуковской Е.В., к.т.н.

Спасибо за время, уделенное работе над статьями, и полезные замечания. Ваши усилия повышают уровень опубликованных материалов и делают возможным существование научного журнала.

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).

«Вестник ИрГТУ» включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, в международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», EBSCO, в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлены в Научной электронной библиотеке «КиберЛенинка» (CYBERLENINKA), рассылается в Российскую книжную палату, ВИНТИ РАН.

Статьи, опубликованные в журнале «Вестник ИрГТУ», реферируются и рецензируются.

Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям.

По вопросам публикации статей обращаться: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Д-215.

Телефон: **(3952) 40-57-56** – Привалова Галина Петровна, ответственный за выпуск,

(3952) 40-58-57.

Факс: **(3952) 405-100**, e-mail: pqp@istu.edu

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Научный журнал
№ 12 (143) 2018

Редактор Я.В. Макшанцева
Художественный редактор Е.В. Хохрин
Ответственный за выпуск Г.П. Привалова
Перевод на английский язык В.В. Батицкой
Верстка Н.П. Дзюндзя

Выход в свет 28.12.2018 г. Формат 60х90/8.
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 32,5.
Тираж 500 экз. Заказ 284. Поз. плана 3н.

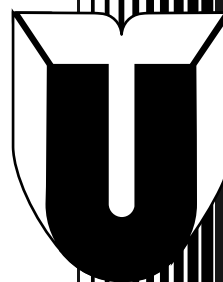
Издание распространяется **бесплатно**

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

