

## Редколлегия

Главный редактор

Радченко С.Ю. д-р техн. наук, проф.

Заместители главного редактора:

Барсуков Г.В. д-р техн. наук, проф.

Гордон В.А. д-р техн. наук, проф.

Подмастерьев К.В. д-р техн. наук, проф.

Поляков Р.Н. д-р техн. наук, проф.

Шоркин В.С. д-р физ.-мат. наук, проф.

Члены редколлегий:

Бухач А. д-р техн. наук, проф. (Польша)

Голенков В.А. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Дьяконов А.А. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Емельянов С.Г. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Запонец Я. д-р техн. наук, проф. (Чехия)

Зубачин В.Г. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Киричек А.В. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Копылов Ю.Р. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Кузичкин О.Р. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Кухарь В.Д. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Лавриненко В.Ю. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Ли Шэнбо, канд. техн. наук, доц. (Китай)

Мирсаидов В.М. д-р физ.-мат. наук, проф. (Азербайджан)

Мулюкин О.П. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Осадчий В.Я. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Пилипенко О.В. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Распопов В.Я. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Савин Л.А. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Смоленцев В.П. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Солдаткин В.М. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Старовойтов Э.И. д-р физ.-мат. наук, проф. (Беларусь)

Степанов Ю.С. д-р техн. наук, проф. (Россия)

Хейфец М.Л. д-р техн. наук, проф. (Беларусь)

Ответственный секретарь:

Тюхтя А.В. канд. техн. наук

Адрес редакции

302030, г. Орел, ул. Московская, 34

+7(920)2806645, +7(906)6639898

http://oreluniver.ru

E-mail: radsu@rambler.ru

Зарег. в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство ПИ № ФС77-67029 от 30 августа 2016 года

Подписной индекс 29504 по объединенному каталогу «Пресса России»

© ОГУ имени И.С. Тургенева, 2021

## Содержание

### Теоретическая механика и ее приложения

- Дологоян А.В., Матвеев В.Т. Управление генерацией тепла в циклах микрогазотурбинных установок с регенерацией теплоты..... 3

### Механика деформируемого твердого тела, динамика и прочность

- Бохонский А.И., Варминская Н.И., Рыжков А.И. Принцип и теоремы реверсионного исчисления..... 12  
Варминская Н.И. Динамика антропоморфного манипулятора с упругими звеньями при использовании оптимальных управлений движением ..... 21

### Машиностроительные технологии и оборудование

- Харченко А.О., Владецкий Е.А. Анализ и исследование эксплуатационной и технологической надежности оборудования для внутренней мелкоразмерной резьбообработки..... 30  
Песчанский А.И., Харченко А.О., Братан С.М. Двухкомпонентная восстанавливаемая инструментальная система многоцелевого станка с мгновенно пополняемым временным резервом ..... 40  
Неменко А.В., Никитин М.М. Предотвращение технологической усталости при финишной обработке детали ..... 49  
Гоголев Г.В. Выбор тепловых труб для охлаждения форм при литье пластмасс под давлением ..... 57  
Сафаров Д.Т., Кондрашов А.Г. Уменьшение погрешностей профиля зубьев зубчатых колес в процессах зубофрезерования червячными фрезами..... 63  
Неменко А.В., Никитин М.М. Компенсация упругих перемещений при механической обработке детали ..... 73  
Кудрявцев С.В., Селеменов М.Ф., Просолов Е.А., Панков Г.Б., Тарапанов А.С. Управление температурой контактных поверхностей режущей части разверток с нанопокрывом ..... 78  
Аблаев А.Р., Хромов Е.В., Аблаев Р.Р., Поляков А.П. Оптимизация цифрового проектирования сложной технологической системы..... 85  
Кожус О.Г., Барсуков Г.В., Шоркин В.С., Степанов Ю.С., Фроленкова Л.Ю. Повышение эффективности работы установки для нанесения полимерной оболочки на абразив при критических технологических режимах..... 91  
Головин В.И., Радченко С.Ю. Теоретическое исследование влияния износа инструмента на параметры динамической системы при обработке отверстий сверлением ..... 100

### Машиноведение и мехатроника

- Дорофеев О.В., Воробьев В.И., Борзенков М.И., Злобин С.Н., Измеров О.В. Методы безынерционного управления свойствами узлов экипажа транспортного средства ..... 107  
Хвостов А.А., Дорняк О.Р., Журавлев А.А., Татаренков Е.А., Ткачев О.А. Термогидродинамический анализ работы валковой формирующей машины кондитерского производства на основе CFD-подхода..... 117  
Корнаева Е.П., Попов С.Г., Стебаков И.Н., Дрёмин В.В., Ставцев Д.Д. Экспериментальная установка для исследования реологических свойств физиологических жидкостей ..... 131  
Бондаренко М.Э., Поляков Р.Н., Горин А.В., Родичева И.В. Обоснование последовательности проектирования комбинированных опор с изменяемыми характеристиками ..... 139  
Родичев А.Ю., Токамова М.А., Внуков С.С., Грядунцова М.А. Изучение механических свойств филамента в зависимости от процента заполнения при прототипировании деталей мехатронных комплексов..... 146  
Сытин А.В., Киричек А.А., Токамов Н.В., Яковленко О.В. Расчет лепесткового подшипника с ферромагнитной жидкостью турбогенераторов систем энергораспределения..... 153

### Приборы, биотехнические системы и технологии

- Марков О.И. Влияние формы импульса тока на динамику температурного поля ветви термоэлектрического охладителя ..... 161  
Егоров А.Г., Глуховский Е.М. Разработка технологии изготовления и производство импортозамещающей многофункциональной системы кохлеарной имплантации для реабилитации пациентов с сенсоневральной тугоухостью..... 166

### Контроль, диагностика, испытания и управление качеством

- Гостенков Е.В., Мишин В.В., Четвериков Д.А. Метод контроля температуры IGBT кристалла в режиме реального времени ..... 178

## Editorial Committee

Editor-in-chief

Radchenko S.Yu. Doc. Sc. Tech., Prof.

Editor-in-chief Assistants:

Barsukov G.V. Doc. Sc. Tech., Prof.

Gordon V.A. Doc. Sc. Tech., Prof.

Podmasteryev K.V. Doc. Sc. Tech., Prof.

Polyakov R.N. Doc. Sc. Tech., Prof.

Shorkin V.S. Doc. Sc. Ph. – Math., Prof.

Member of editorial board:

Bukhach A. Doc. Sc. Tech., Prof. (Poland)

Golenkov V.A. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Dyakonov A.A. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Emelyanov S.G. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Zapomel Ya. Doc. Sc. Tech., Prof. (Czech Republic)

Zubchaninov V.G. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Kirichek A.V. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Kopylov Yu.R. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Kuzichkin O.R. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Kukhar V.D. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Lavrynenko V.Yu. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Li Shengbo. Cand. Sc. Tech., Assist. Prof. (China)

Mirsalimov V.M. Doc. Sc. Ph. – Math., Prof. (Azerbaijan)

Mulyukin O.P. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Osadchy V.Ya. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Pilipenko O.V. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Raspopov V.Ya. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Savin L.A. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Smolenzhev V.P. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Soldatkin V.M. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Starovoitov A.I. Doc. Sc. Ph. – Math., Prof. (Belarus)

Stepanov Yu.S. Doc. Sc. Tech., Prof. (Russia)

Heifets M.I. Doc. Sc. Tech., Prof. (Belarus)

Executive secretary:

Tyukhta A.V. Candidate Sc. Tech.

Address

302030, Oryol, st. Moskovskaya, 34  
+7(920)2806645, +7(906)6639898  
http://oreluniver.ru

E-mail: radsu@rambler.ru

Journal is registered in Federal Agency of supervision in sphere of communication, information technology and mass communications. The certificate of registration PI № FS77-67029 from 30.08.2016

Index on the catalogue of the

«Pressa Rossii» 29504

© Orel State University, 2021

## Contents

### Theoretical mechanics and its applications

- Dologlonyan A.V., Matvienko V.T. Heat generation control in microgas turbine plants with warmth regeneration ..... 3

### Mechanics of deformable solids, dynamics and strength

- Bokhonsky A.I., Varminskaya N.I., Ryzhkov A.I. Principle and theorems of reversional calculation ..... 12  
Varminskaya N.I. Dynamics of anthropomorphic manipulator with elastic links in use optimum motion control ..... 21

### Machine-building technologies and equipment

- Kharchenko A.O., Vladetskaya E.A. Analysis and research of operational and technological reliability of equipment for internal small-sized threading ..... 30  
Peschansky A.I., Kharchenko A.O., Bratan S.M. Two-component restorable tool system multi-purpose machine with an instantly refilled time reserve ..... 40  
Nemenko A.V., Nikitin M.M. Preventing process fatigue when finishing a part ..... 49  
Gogolev G.V. Option of heat pipes for cooling of molds during injection molding plastics ..... 57  
Safarov D.T., Kondrashov A.G. Reduction of errors in the profile of the teeth of gears in the processes of gear milling with worm cutters ..... 63  
Nemenko A.V., Nikitin M.M. Compensation of elastic movement when mechanical processing of the parts ..... 73  
Kudryavtsev S.V., Selemenov M.F., Prosolov E.A., Pankov G.B., Tarapanov A.S. Temperature control of the cutting surfaces of the cutting part of nano-coated scans ..... 78  
Ablaev A.R., Khromov E.V., Ablaev R.R., Polyakov A.P. Digital design optimization of a complex technological system ..... 85  
Kozhus O.G., Barsukov G.V., Shorkin V.S., Stepanov Yu.S., Frolenkova L.Yu. Improving the efficiency of the installation for applying the polymer shell to the abrasive under critical technological conditions ..... 91  
Golovin V.I., Radchenko S.Yu. Theoretical research of the tool wear influence on the parameters of the drilling dynamic system ..... 100

### Machine Science and Mechatronics

- Dorofeev O.V., Vorobyev V.I., Borzenkov M.I., Zlobin S.N., Izmerov O.V. Methods for inertia-free control of node properties vehicle crew ..... 107  
Hvostov A.A., Dorniyak O.R., Zhuravlev A.A., Tatarenkov E.A., Tkachev O.A. Thermohydrodynamic analysis of the work roll forming machine confectionery production based on the CFD approach ..... 117  
Kornaeva, I.N. Stebakov, S.G. Popov, E.P. Dremin V.V., Stavtsev D.D. The test rig for studying the rheological properties of physiological fluids ..... 131  
Bondarenko M.E., Polyakov R.N., Gorin A.V., Rodicheva I.V. Justification of the design sequence combined supports with variable characteristics ..... 139  
Rodichev A.Yu., Tokmakova M.A., Vnuykov S.S., Gryadunova M.A. Study of the mechanical properties of the filament depending on the percentage of filling when prototyping the parts of mechatronic complexes ..... 146  
Sytin A.V., Kirichek A.A., Tokmakov N.V., Yakovlenko O.V. Calculation of floor bearing with ferromagnetic liquid of turbogenerators of power distribution systems ..... 153

### Devices, biotechnical systems and technologies

- Markov O.I. Influence of the current pulse shape on the dynamics of the temperature field of the thermoelectric cooler branch ..... 161  
Egorov A.I., Glukhovskiy E.M. Development of manufacturing technology and production of an import-substituting multifunctional cochlear implantation system for the rehabilitation of patients with sensorineural hearing loss ..... 166

### Monitoring, Diagnostics, Testing and Quality Management

- Gostenkov E.V., Mishin V.V., Chetverikov D.A. IGBT chip temperature control method in real time ..... 178

А.В. ДОЛОГЛОНЯН, В.Т. МАТВЕЕНКО

## УПРАВЛЕНИЕ ГЕНЕРАЦИЕЙ ТЕПЛА В ЦИКЛАХ МИКРОГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК С РЕГЕНЕРАЦИЕЙ ТЕПЛОТЫ

**Аннотация.** Предметом рассмотрения в статье является математическая модель расчета основных параметров регенеративных МГТД при использовании байпасирования циклового воздуха мимо регенератора для управления генерацией тепла для когенерационных МГТУ. Установлено, что использование байпасирования воздуха мимо регенератора позволяет менять количество генерируемого когенерационной МГТУ тепла в широких пределах (до 75...80 %). Это позволяет обеспечивать потребности локальных объектов в теплоте при циклической или переменной тепловой нагрузке, обеспечивая стабильность поставки электроэнергии. Эта модель может быть использована при упрощенных и предварительных расчетах МГТУ.

**Ключевые слова:** байпасирование циклового воздуха, микрогазотурбинная установка, микротурбина, регенерация теплоты, турбина перерасширения, турбокомпрессорный утилизатор.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матвеев В.Т. Гибкие когенерационные технологии в газотурбинной установке сложного цикла с турбиной перерасширения / В.Т. Матвеев, В.А. Очеретяный // Промышленная теплотехника. – 2007. – Т. 29. – № 7. – С. 97–101.
2. Матвеев В.Т. Глубокая утилизация теплоты в газотурбинных двигателях с турбиной перерасширения / В.Т. Матвеев // Промышленная теплотехника. – 1997. – Т. 19. – № 4–5. – С. 81–85.
3. Matviienko V. Variable regimes operation of cogenerative gas –turbine engines with overexpansion turbine/ V.Matviienko, V. Ocheretianiy// Prococoligs of ASME Turbo Expo 2010: Power of Land, Sea and Air ‘GT2010, June 14–18, 2010, Glasgow, UK, GT2010–22029.
4. Matviienko V. Gas Turbine Plant with Overexpansion Turbine and Heat Regeneration in the Ship Propulsion Complex / V. Matviienko, O. Andriets, V. Ochretianjy // Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: June 16–20, 2014, Dusseldorf, Germany.
5. Matviienko V. Working Process Control in a Ship Gas Turbine Engine of Complex Cycle / V/ Matviienko, V. Ocheretianiy // Prococoling of ASME Turbo Expo 2016: June 13–17, 2016, Seoul, South Korea.
6. Diener OF, van der Spuy SJ, von Backström TW, Hildebrandt T. Multi-Disciplinary Optimization of a Mixed-Flow Compressor Impeller. ASME. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, Volume 8: Microturbines, Turbochargers and Small Turbomachines; Steam Turbines ():V008T23A021. doi:10.1115/GT2016–57008.
7. Deng, Qing-Hua & Shao, Shuai & Fu, Lei & Luan, Hai-Feng. (2018). An Integrated Design and Optimization Approach for Radial Inflow Turbines – Part I: Automated Preliminary Design. Applied Sciences. 8. 2038. 10.3390/app8112038.
8. Арбеков А.Н. Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок / А.Н. Арбеков, А.Ю. Вараксин, Э.А. Мнушин, В.Е и др. – М. Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 678 с.
9. Vick, Michael & Young, Trent & Kelly, Matthew & Tuttle, Steven & Hinnant, Katherine. (2016). A Simple Recuperated Ceramic Microturbine: Design Concept, Cycle Analysis, and Recuperator Component Prototype Tests. V008T23A030. 10.1115/GT2016–57780.
10. Дологлонян А.В. Оптимизация степени регенерации для циклов микрогазотурбинных установок / А.В. Дологлонян, В.Т. Матвеев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2020. – № 3 (341). – С. 59–66.
11. Маньковский О.М. Теплообменная аппаратура химических производств /О.М. Маньковский, А.Р. Толчинский, М.В. Александров. – Л.: Химия, 1976. – 368 с.
12. Аронсон К.Э. Теплообменники энергетических установок / К.Э. Аронсон, С.Н. Блинков, В.И. Брезгин и др.// Екатеринбург: Издательство УрФУ, 2015. – Электронный формат: html. Объем: 733 Mb
13. Вукалович М.П. Термодинамика / М.П. Вукалович, И.И. Новиков. – М.: Машиностроение, 1972. – 672 с.

ФГБНУ Институт природно–технических систем  
Российской Федерации, г. Севастополь  
Кандидат технических наук, зав. лабораторией  
E-mail: dologlonyan@hotmail.com

ФГБНУ Институт природно–технических систем  
Российской Федерации, г. Севастополь  
Доктор технических наук, профессор  
E-mail: mvt3900@mail.ru

---

A.V. DOLOGLONYAN, V.T. MATVIENKO

## **HEAT GENERATION CONTROL IN MICROGAS TURBINE PLANTS WITH WARMTH REGENERATION**

**Abstract.** *The subject of consideration in the article is a mathematical model for calculating the main parameters of regenerative MGTPs when using bypassing cyclic air past the regenerator to control heat generation for cogeneration MGTPs. It has been established that the use of air bypassing past the regenerator makes it possible to change the amount of heat generated by the cogeneration MGTP over a wide range (up to 75...80%). This makes it possible to meet the needs of local facilities for heat at cyclic or variable heat load, ensuring the stability of the supply of electricity. This model can be used for simplified and preliminary calculations of MGTP.*

**Keywords:** *cycle air bypass, microgas turbine plant, microturbine warmth regeneration, overexpansion turbine, turbocompressor utilizer.*

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Matveenko V.T. Gibkie kogeneracionnye tekhnologii v gazoturbinnoj ustanovke slozhnogo cikla s turbinoj pererasshireniya / V.T. Matveenko, V.A. Ocheretyanyj // Promyshlennaya teplotekhnika. – 2007. – Т. 29. – № 7. – С. 97–101.
2. Matveenko V.T. Glubokaya utilizatsiya teploty v gazoturbinnyh dvigatelyah s turbinoj pererasshireniya / V.T. Matveenko // Promyshlennaya teplotekhnika. – 1997. – Т. 19. – № 4–5. – С. 81–85.
3. Matviinko V. Variable regimes operation of cogenerative gas –turbine engines with overexpansion turbine/ V.Matviinko, V. Ocheretianiy// Procecoligs of ASME Turbo Expo 2010: Power of Land, Sea and Air ‘GT2010, June 14–18, 2010, Glasgow, UK, GT2010–22029.
4. Matviienko V. Gas Turbine Plant with Overexpansion Turbine and Heat Regeneration in the Ship Propulsion Complex / V. Matviienko, O. Andriets, V. Ochretianij // Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: June 16–20, 2014, Dusseldorf, Germany.
5. Matviienko V. Working Process Control in a Ship Gas Turbine Engine of Complex Cycle / V/ Matviienko, V. Ocheretianiy // Procecoling of ASME Turbo Expo 2016: June 13–17, 2016, Seoul, South Korea.
6. Diener OF, van der Spuy SJ, von Backström TW, Hildebrandt T. Multi-Disciplinary Optimization of a Mixed-Flow Compressor Impeller. ASME. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, Volume 8: Microturbines, Turbochargers and Small Turbomachines; Steam Turbines ():V008T23A021. doi:10.1115/GT2016–57008.
7. Deng, Qing-Hua & Shao, Shuai & Fu, Lei & Luan, Hai-Feng. (2018). An Integrated Design and Optimization Approach for Radial Inflow Turbines – Part I: Automated Preliminary Design. Applied Sciences. 8. 2038. 10.3390/app8112038.
8. Arbekov A.N. Teoriya i proektirovanie gazoturbinnyh i kombinirovannyh ustanovok / A.N. Arbekov, A.YU. Varaksin, E.A. Mnushin, V.E i dr. – M.: Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Baumana, 2017. – 678 s.
9. Vick, Michael & Young, Trent & Kelly, Matthew & Tuttle, Steven & Hinnant, Katherine. (2016). A Simple Recuperated Ceramic Microturbine: Design Concept, Cycle Analysis, and Recuperator Component Prototype Tests. V008T23A030. 10.1115/GT2016–57780.
10. Dologlonyan A.V. Optimizatsiya stepeni regeneratsii dlya ciklov mikrogazoturbinnyh ustanovok / A.V. Dologlonyan, V.T. Matveenko // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – Orel: OGU im. I.S. Turgeneva, 2020. – № 3 (341). – С. 59–66.
11. Man'kovskij O.M. Teploobmennaya apparatura himicheskikh proizvodstv /O.M. Man'kovskij, A.R. Tolchinskij, M.V. Aleksandrov. – L.: Himiya, 1976. – 368 s.
12. Aronson K.E. Teploobmenniki energeticheskikh ustanovok / K.E. Aronson, S.N. Blinkov, V.I. Brezgin i dr.// Ekaterinburg: Izdatel'stvo UrFU, 2015. – Elektronnyj format: html. Ob'em: 733 Mb
13. Vukalovich M.P. Termodinamika / M.P. Vukalovich, I.I. Novikov. – M.: Mashinostroenie, 1972. – 672 s.

**Dologlonyan Andrey Vartazarovich**  
FSBSI Institute of nature and technical systems,  
Russian Federation, Sevastopol  
Candidate of Technical Sciences, Chief of Laboratory,  
E-mail: dologlonyan@hotmail.com

**Matviienko Valerii Timofeevich**  
FSBSI Institute of nature and technical systems,  
Russian Federation, Sevastopol  
Doctor of Technical Sciences, Professor  
E-mail: mvt3900@mail.ru

# **МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА, ДИНАМИКА И ПРОЧНОСТЬ**

УДК 519.3:05.011.56:621.865.8

DOI: 10.33979/2073-7408-2021-347-3-12-20

А.И. БОХОНСКИЙ, Н.И. ВАРМИНСКАЯ, А.И. РЫЖКОВ

## **ПРИНЦИП И ТЕОРЕМЫ РЕВЕРСИОННОГО ИСЧИСЛЕНИЯ**

**Аннотация.** Сформулирован реверсионный принцип оптимальности (РПО), описан алгоритм его использования для конструирования оптимальных переносных ускорений объектов. На примере проверены достаточные условия экстремальности восстановленных функционалов–критериев при конструировании оптимального управления типа «разгон–торможение». Сформулированы и доказаны теоремы: о численном равенстве интегралов с различными под интегральными функциями, о минимальной энергии для достижения цели оптимально управляемого движения «разгон–торможение». На основании обобщения результатов конструирования оптимальных управлений типа «разгон–торможение» найдена универсальная аналитическая функция управления (переносного ускорения), из которой следуют известные частные случаи. Аналитически и численно подтверждено существование предельной минимальной энергии управления, для которой осуществимо перемещение объекта из исходного состояния покоя в новое состояние покоя при фиксированном расстоянии и времени движения.

**Ключевые слова:** реверсионное конструирование управлений, экстремум функционала, теорема о минимальной энергии.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Бидерман В.П. Прикладная теория механических колебаний. – М.: Высш. шк., 1972. – 416 с.
2. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. – Л.: Машиностроение, 1976. – 320 с.
3. Бабаков И.М. Теория колебаний. – М.: Наука, 1968. – 560 с.
4. Василенко Н.В. Теория колебаний. – К.: Вища шк., 1992. – 430 с.
5. Светлицкий В.А. Сборник задач по теории колебаний / В.А. Светлицкий, И.В. Стаценко. – М.: Высш. шк., 1973. – 456 с.
6. Солодовников В.В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования / В.В. Солодовников, В.Н. Плотников, А.В. Яковлев. – М.: Машиностроение, 1985. – 536 с.
7. Троицкий А.И. Оптимальные процессы колебаний механических систем. – Л.: Машиностроение, 1976. – 248 с.
8. Черноусько Ф.Л. Управление колебаниями / Ф.Л. Черноусько, Л.Д. Акуленко, Б.Н. Соколов. – М.: Наука, 1980. – 384 с.
9. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: линейные модели. – М.: Наука, 1987. – 304 с.
10. Красовский Н.Н. Теория оптимального управления. – М.: Наука, 1968. – 476 с.
11. Теория автоматического регулирования. Ч II. Теория нелинейных систем автоматического регулирования/ Под ред. А.А. Воронова. – М.: Госиздат, 1955. – 248с.
12. Карновский И.А. Методы оптимального управления колебаниями деформируемых систем / И.А. Карновский, Ю.М. Почтман. – К.: Высш. шк., 1982. – 416 с.
13. Бохонский А.И. Оптимальное управление переносным движением деформируемых объектов: теория и технические приложения / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, М.И. Мозолевский; Под общ. ред. А.И. Бохонского. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. – 296 с.
14. Бохонский А.И. Вариационное и реверсионное исчисления в механике / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская; Под общ. ред. А.И. Бохонского. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2012. – 212 с.
15. Бохонский А.И. Актуальные задачи вариационные исчисления. – Palmarium Academic Publishing, 2013. – 77 p.
16. Бохонский А.И. Реверсионный принцип оптимальности. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2016. – 174 с.
17. Bokhonsky A. Modelling and analysis of elastic system in motion / A. Bokhonsky, S. Zolkiewsky. – Gliwice: Wydawnictwo Politechniki, 2011. – 171 p.
18. Bokhonsky A. Modelling and investigation of discrete–continuous vibrating mechatronic systems with damping / Andrzej Buchacz, Aleksandr Bokhonsky, Marek Placzek, Andrzej Wrobel. – Gliwice: ydawnictwo Politechniki, 2013. – 207 p.

19. Бохонский А.И. Оптимальное перемещение упругого объекта с учетом в относительном движении линейно-вязкого сопротивления / А.И. Бохонский, М.М. Майстришин, А.И. Рыжков // Современные проблемы теории машин. – 2017. – №5. – С. 7–9.

20. Бохонский А.И. Конструирование управляемого движения объекта / А.И. Бохонский, А.И. Рыжков // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2017. – №1. – С. 64–69.

**Бохонский Александр Иванович**  
ФГАОУ ВО «Севастопольский  
государственный университет», г.  
Севастополь  
Профессор, доктор технических  
наук, профессор кафедры  
«Техническая механика и  
машиноведение»  
299053, г. Севастополь г, ул.  
Университетская 33  
Тел. 8 (978) 739–39–68  
E-mail: bohon.alex@mail.ru

**Варминская Наталья Ивановна**  
Черноморское Высшее военно–  
морское ордена красной звезды  
Училище имени П.С. Нахимова, г.  
Севастополь  
Доцент, кандидат технических наук,  
зав. кафедрой «Физика и  
общетехнические дисциплины»  
299028, г. Севастополь, ул.  
Дыбенко, д. 1а  
Tel. 8 (978) 832–83–44  
E-mail: nvarminska@gmail.com

**Рыжков Александр Игоревич**  
ФГАОУ ВО «Севастопольский  
государственный университет»,  
г. Севастополь  
Ассистент кафедры  
«Техническая механика и  
машиноведение»  
299053, г. Севастополь г, ул.  
Университетская 33  
Тел. 8 (978) 847–37–49  
E-mail: ryzhkov2206@mail.ru

---

A.I. BOKHONSKY, N.I. VARMINSKAYA, A. I. RYZHKOV

## PRINCIPLE AND THEOREMS OF REVERSIONAL CALCULATION

**Abstract.** A reverse optimality principle (ROP) is formulated and an algorithm for its use for constructing optimal portable object movements is presented. Using an example, sufficient conditions for the extremality of the restored criterion functional are verified when constructing an optimal control of the «acceleration–deceleration» type. The following theorems were formulated and proved: on the numerical equality of integrals with different integral functions, on the minimum energy to achieve the goal of optimally controlled motion in the form of «acceleration–deceleration». Basing on the generalization of the results for optimal controls designing of the «acceleration–deceleration» type of motion, whence the known special cases follow, universal analytical control function (translational acceleration) was found. Analytically and numerically was confirmed the existence of the limiting minimum control energy at which the movement of an object from the initial state of rest to a new state of rest is possible at a fixed distance and time of motion.

**Keywords:** reverse design of controls, extremum of a functional, minimum energy theorem.

## BIBLIOGRAPHY

1. Biderman V.P. Applied theory of mechanical vibrations. – M.: Higher. shk., 1972.– 416p.
2. Panovko Ya.G. Foundations of the applied theory of vibrations and impact. – L.: Mechanical engineering, 1976. – 320 p.
3. Babakov I.M. Oscillation theory. – M.: Nauka, 1968. – 560 p.
4. Vasilenko N.V. Oscillation theory. – K.: Vischa shk., 1992. – 430 p.
5. Svetlitskiy V.A. Collection of problems on the theory of oscillations / V.A. Svetlitskiy, I.V. Statsenko. – M.: Higher. shk., 1973.– 456 p.
6. V.V. Solodovnikov Fundamentals of theory and elements of automatic control systems / V.V. Solodovnikov, V.N. Plotnikov, A.V. Yakovlev. – M.: Mashinostroenie, 1985.– 536 p.
7. Troitsky A.I. Optimal vibration processes of mechanical systems. – L.: Mechanical engineering, 1976.– 248 p.
8. Chernousko F.L. Oscillation control / F.L. Chernousko, L.D. Akulenko, B.N. Sokolov. – Moscow: Nauka, 1980.– 384 p.
9. Krutko P.D. Inverse problems of dynamics of controlled systems: linear models. – Moscow: Nauka, 1987.– 304 p.
10. Krasovsky N.N. Optimal control theory. – M.: Nauka, 1968.– 476p.
11. Theory of automatic regulation. II. Theory of nonlinear automatic control systems / Ed. A.A. Voronova. – M.: Gosizdat, 1955.– 248p.
12. Karnovsky I.A. Methods of optimal control of oscillations of deformable systems / I.A. Karnovsky, Yu.M. Postman. – K.: Higher. shk., 1982.– 416 p.

13. Bohonskiy A.I. Optimal control of portable motion of deformable objects: theory and technical applications / A.I. Bokhonskiy, N.I. Warminskaya, M.I. Mozolevsky; Under total. ed. A.I. Bokhonskiy. – Sevastopol: Publishing house SevNTU, 2007. – 296 p.
14. Bokhonskiy A.I. Variational and reversion calculus in mechanics / A.I. Bokhonskiy, N.I. Warminskaya; Under total. ed. A.I. Bokhonskiy. – Sevastopol: SevNTU Publishing House, 2012. – 212 p.
15. Bokhonskiy A.I. Actual problems calculus of variations. – Palmarium Academic Publishing, 2013. – 77 p.
16. Bokhonskiy A.I. Reversible principle of optimality. – M.: University textbook: INFRA-M, 2016. – 174 p.
17. Bokhonskiy A. Modeling and analysis of elastic system in motion / A. Bokhonskiy, S. Zolkiewsky. – Gliwice: Wydawnictwo Politechniki, 2011. – 171 p.
18. Bokhonskiy A. Modeling and investigation of discrete–continuous vibrating mechatronic systems with damping / Andrzej Buchacz, Aleksandr Bokhonskiy, Marek Placzek, Andrzej Wrobel. – Gliwice: ydawnictwo Politechniki, 2013. – 207 p.
19. Bokhonskiy A.I. Optimal displacement of an elastic object taking into account linear–viscous resistance in relative motion / A.I. Bokhonskiy, M.M. Maistrishin, A.I. Ryzhkov // Modern problems of machine theory. – 2017. – No. 5. – pp. 7–9.
20. Bokhonskiy AI Designing the controlled movement of an object. Bokhonskiy, A.I. Ryzhkov // Mechatronics, Automation and Robotics. – 2017. – No. 1. – pp. 64–69.

**Bokhonskiy Alexander Ivanovich**

Sevastopol State University,  
Sevastopol  
Professor, Doctor of Technical  
Sciences, Professor of the  
Department of «Technical  
Mechanics and Engineering  
Science»  
299053, Sevastopol, st.  
Universitetskaya 33  
Tel. 8 (978) 739–39–68  
E–mail: bohon.alex@mail.ru

**Varminskaya Natalia Ivanovna**

Black Sea Higher Naval Order of the  
Red Star School named after P.S.  
Nakhimov, Sevastopol  
Associate Professor, Candidate of  
Technical Sciences, Head of the  
Department of Physics and General  
Technical Disciplines  
299028, Sevastopol, st. Dybenko, 1a  
Tel. 8 (978) 832–83–44  
E–mail: nvarminska@gmail.com

**Ryzhkov Aleksandr Igorevich**

Sevastopol State University,  
Sevastopol  
Assistant of the Department  
«Technical Mechanics and  
Engineering Science»  
299053, Sevastopol, st.  
Universitetskaya 33  
Tel. 8 (978) 847–37–49  
E–mail: ryzhkov2206@mail.ru

УДК 517.97: 51–74: 621.865.8

DOI: 10.33979/2073-7408-2021-347-3-21-29

Н.И. ВАРМИНСКАЯ

## ДИНАМИКА АНТРОПОМОРФНОГО МАНИПУЛЯТОРА С УПРУГИМИ ЗВЕНЬЯМИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОПТИМАЛЬНЫХ УПРАВЛЕНИЙ ДВИЖЕНИЕМ

**Аннотация.** *Исследовано оптимальное движение руки антропоморфного манипулятора с упругими звеньями из исходного в конечное состояние абсолютного покоя при использовании конструируемых кососимметричных управлений типа «разгон–торможение». Движение разделено на переносное, обеспечивающее цель движения манипулятора с недеформируемыми звеньями, и относительное (упругие колебания звеньев). Абсолютный покой в конце движения достигается как сумма переносного и относительного покоя.*

**Ключевые слова:** *антропоморфный манипулятор, звенья конечной жесткости, переносное и относительное движение, достижение абсолютного покоя, оптимальное управление.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пантелеев А.В. Методы оптимизации в примерах и задачах: учеб. пособие / А.В. Пантелеев, Т.А. Летова. – М.: Высш. шк., 2002. – 544с.
2. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление / Л.Э. Эльсгольц. – М.: Наука, 1965. – 424 с.
3. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. Пер. с нем. – М.: Наука, 1981. – 720 с.
4. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики управляемых систем: линейные модели / П.Д. Крутько. – М.:

Наука, 1987. – 304 с.

5. Солодовников В.В. Основы теории и элементы систем автоматического регулирования: учеб. пособие для вузов / В.В. Солодовников, В.Н. Плотников, А.В. Яковлев. – М.: Машиностроение, 1985. – 536 с.

6. Карновский Н.А. Методы оптимального управления колебаниями деформируемых систем / И.А. Карновский, Ю.М. Почтман. – К.: Высш. шк., 1982. – 116 с.

7. Черноушко Ф.П. Управление колебаниями / Ф.П. Черноушко, Л.Д. Акуленко, Б.Н. Соколов. – М.: Наука, 1980. – 384 с.

8. Черноушко Ф.П. Манипуляционные роботы: Динамика, управление, оптимизация / Ф.П. Черноушко, Н.Н. Болотник, В.Г. Градецкий. – М.: Наука, 1989. – 368 с.

9. Акуленко Л.Д. Динамические модели упругих манипуляционных роботов / Л.Д. Акуленко, С.А. Михайлов, О.Л. Сатовская. – М.: Изд-во Инст. проблем механики АН СССР, 1988. – 46 с.

10. Дорф Г. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бимоп. Пер. с англ. Б.И. Крылова. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.

11. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле / С.П. Тимошенко, Д.Х. Янг, У. Уивер. – М.: Наука, 1985. – 496 с.

12. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара / Я.Г. Пановко. – Л.: Машиностроение, 1976. – 320 с.

13. Бидерман В.Л. Прикладная теория механических колебаний / В.Л. Бидерман. – М.: Высшая школа, 1972. – 416 с.

14. Карновский И.А. Методы оптимального управления колебаниями деформируемых систем / И.А. Карновский, Ю.И. Почтман. – К.: Вища шк., 1982. – 116 с.

15. Бохонский А.И. Расчет и проектирование исполнительных органов манипуляторов: учеб. пособие / А.И. Бохонский, Г.Г. Макухина, Ю.А. Хащин. – К.: УМК ВО, 1989. – 132 с.

16. Бохонский А.И., Варминская Н.И., Мозолевский М.И. Оптимальное управление переносным движением деформируемых объектов: теория и технические приложения / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, М.И. Мозолевский. Под общ. ред. А.И. Бохонского. – Севастополь: Изд-во Сев ГТУ, 2007. – 296 с.

17. Бохонский А.И., Варминская Н.И. Вариационное и реверсионное исчисления в механике / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская. Под общ. ред. А.И. Бохонского. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2012. – 212 с.

18. Бохонский А.И. Актуальные задачи вариационные исчисления / А.И. Бохонский. – Palmarium Academic Publishing, 2013. – 77 p.

19. Bokhonsky A.I. Modelling and investigation of discrete-continuous vibrating mechatronic systems with damping / Andrzej Buchacz, Aleksandr Bokhonsky, Marek Placzek, Andrzej Wrobel. – Gliwice: Wydawnictwo Politechniki, 2013. – 207 p.

20. Бохонский А.И. Реверсионный принцип оптимальности / А.И. Бохонский. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2016. – 174 с.

21. Bokhonsky A.I. Modelling and analysis of elastic system in motion / A.I. Bokhonsky, S.Y. Zolkiewski. – Gliwice: Wydawnictwo Politechniki, 2011. – 171 p.

22. Воронов А.А. Теория автоматического управления. Ч.П. Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления / А.А. Воронов. – М.: Высш. шк., 1977. – 288 с.

23. Бохонский А.И. Энергоемкость управления перемещением объектов / А.И. Бохонский // Фундаментальные основы механики: материалы международной научно-практической конференции. – Новокузнецк: НИЦ МС, 2017. – №2. – С. 38 – 41.

24. Бохонский А.И., Рыжков А.И. Конструирование управляемого движения объекта / А.И. Бохонский, А.И. Рыжков // Мехатроника, автоматика и робототехника: матер. междунар. науч.-технич. конф. – Новокузнецк: НИЦ МС, 2017. – С. 64 – 69.

25. Бохонский А.И. Управление движением системы с заданными частотами / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская, Т.В. Мозолевская // Мехатроника, автоматика и робототехника: матер. междунар. науч.-технич. конф. – Новокузнецк: НИЦ МС, 2018. – №2. – С. 7 – 13.

26. Бохонский А.И. Динамика антропоморфного упругого манипулятора при оптимальном управляемом движении / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская // Автоматизированное проектирование в машиностроении: материалы VII междунар. науч.-практич. конф. – Новокузнецк: НИЦ МС, 2019. – №7. – С. 62 – 70.

27. Варминская Н.И. Динамика трехзвеного антропоморфного упругого манипулятора при оптимальном управлении движением / Н.И. Варминская // Морской вестник: науч.-технич. журнал. – Санкт-Петербург: СПбГМТУ, 2020. – №1 (73). С. 82 – 85.

28. Бохонский А.И. Формы движения антропоморфного манипулятора / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская // Journal of Advanced Research in Technical Science. – North Charleston, USA: SRC MS, CreateSpace, 2019. – Issue 14, Vol. 1. – P. 58 – 63.

29. Варминская Н.И. Анализ форм движения антропоморфного манипулятора / Н.И. Варминская // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. – Севастополь: Изд-во СГУ, 2019. – № 2(6). – С. 10 – 19.

30. Бохонский А.И., Варминская Н.И. Конструирование оптимальных управлений перемещением упругих объектов / А.И. Бохонский, Н.И. Варминская. – Санкт-Петербург: НИЦ МС, 2020. – 120 с.



**Варминская Наталья Ивановна**

Черноморское Высшее военно–морское ордена красной звезды Училище имени П.С. Нахимова,  
г. Севастополь

Доцент, кандидат технических наук, заведующая кафедрой физики и общетехнических дисциплин  
299028, г. Севастополь, ул. Дыбенко, д. 1а

Tel. 8 (978) 832–83–44

E–mail: nvarminska@gmail.com

---

N.I. VARMINSKAYA

## **DYNAMICS OF ANTHROPOMORPHIC MANIPULATOR WITH ELASTIC LINKS IN USE OPTIMUM MOTION CONTROL**

**Abstract.** *The optimal rotational motion of the anthropomorphic manipulator with elements of finite rigidity is investigated from the initial to the final state of absolute quiescence using skew–symmetric controls of the "acceleration–deceleration" type. The motion of the links is divided into figurative (providing the purpose of the movement) and relative (elastic oscillations of the links). Absolute quiescence at the end of motion is achieved as a sum of figurative and relative quiescence.*

**Keywords:** *anthropomorphic manipulator, finite rigidity links, figurative and relative motion, absolute quiescence achieving, optimal control.*

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Panteleev A.V. Metody optimizacii v primerah i zadachah: ucheb. posobie / A.V. Panteleev, T.A. Letova. – M.: Vyssh. shk., 2002. – 544 p.
2. El'sgol'ts L.E. Differencial'nye uravneniya i variacionnoe ischislenie / L.E. El'sgol'ts. – M.: Nauka, 1965. – 424 p.
3. Bronshtejn I.N., Semendyaev K.A. Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchihsya vtuzov / I.N. Bronshtejn, K.A. Semendyaev. Per. s nem. – M.: Nauka, 1981. – 720 s.
4. Krut'ko P.D. Obratnye zadachi dinamiki upravlyaemyh sistem: linejnye modeli / P.D. Krut'ko. – M.: Nauka, 1987. – 304 p.
5. Solodovnikov V.V. Osnovy teorii i elementy sistem avtomaticheskogo regulirovaniya: ucheb. posobie dlya vuzov / V.V. Solodovnikov, V.N. Plotnikov, A.V. YAKovlev. – M.: Mashinostroyeniye, 1985. – 536 p.
6. Karnovskij N.A. Metody optimal'nogo upravleniya kolebaniyami deformiruemyh sistem / I.A. Karnovskij, YU.M. Pochtman. – K.: Vyssh. shk., 1982. – 116 p.
7. CHernous'ko F.P. Upravlenie kolebaniyami / F.L. CHernous'ko, L.D. Akulenko, B.N. Sokolov. – M.: Nauka, 1980. – 384 p.
8. CHernous'ko F.P. Manipulyacionnye roboty: Dinamika, upravlenie, optimizaciya / F.P. CHernous'ko, N.N. Bolotnik, V.G. Gradeckij. – M.: Nauka, 1989. – 368 p.
9. Akulenko L.D. Dinamicheskie modeli uprugih manipulyacionnyh robotov / L.D. Akulenko, S.A. Mihajlov, O.L. Satovskaya. – M.: Izd–vo Inst. problem mekhaniki AN SSSR, 1988. – 46 p.
10. Dorf G. Sovremennyye sistemy upravleniya / R. Dorf, R. Bimop. Per. s angl. B.I. Krylova. – M.: Laboratoriya bazovyh znaniy, 2002. – 832 p.
11. Timoshenko S.P. Kolebaniya v inzhenerenom dele / S.P. Timoshenko, D.H. YAng, U. Uiver. – M.: Nauka, 1985. – 496 p.
12. Panovko YA.G. Osnovy prikladnoj teorii kolebanij i udara / YA.G. Panovko. – L.: Mashinostroyeniye, 1976. – 320 p.
13. Biderman V.L. Prikladnaya teoriya mekhanicheskikh kolebanij / V.L. Biderman. – M.: Vysshaya shkola, 1972. – 416 p.
14. Karnovskij I.A. Metody optimal'nogo upravleniya kolebaniyami deformiruemyh sistem / I.A. Karnovskij, YU.I. Pochtman. – K.: Vishcha shk., 1982. – 116 p.
15. Bohonskij A.I. Raschet i proektirovaniye ispolnitel'nyh organov manipulyatorov: ucheb. posobie / A.I. Bohonskij, G.G. Makuhina, YU.A. Hashchin. – K.: UMK VO, 1989. – 132 p.
16. Bohonskij A.I., Varminskaya N.I., Mozolevskij M.I. Optimal'noye upravlenie perenosnym dvizheniem deformiruemyh ob'ektov: teoriya i tekhnicheskie prilozheniya / A.I. Bohonskij, N.I. Varminskaya, M.I. Mozolevskij. Pod obshch. red. A.I. Bohonskogo. – Sevastopol': Izd–vo Sev GTU, 2007. – 296 p.
17. Bohonskij A.I., Varminskaya N.I. Variacionnoe i reversionnoe ischisleniya v mekhanike / A.I. Bohonskij, N.I. Varminskaya. Pod obshch. red. A.I. Bohonskogo. – Sevastopol': Izd–vo SevNTU, 2012. – 212 p.
18. Bohonskij A.I. Aktual'nye zadachi variacionnyye ischisleniya / A.I. Bohonskij. – Pabmarium Academic Publishing, 2013. – 77 p.

19. Bokhonsky A.I. Modelling and investigation of discrete–continuous vibrating mechatronic systems with damping / Andrzej Buchacz, Aleksandr Bokhonsky, Marek Placzek, Andrzej Wrobel. – Gliwice: Wydawnictwo Politechniki, 2013. – 207 p.
20. Bohonskij A.I. Reversionnyj princip optimal'nosti / A.I. Bohonskij. – M.: Vuzovskij uchebnik: INFRA–M, 2016. – 174 p.
21. Bokhonsky A.I. Modelling and analysis of elastic system in motion / A.I. Bokhonsky, S.Y. Zolkiewski. – Gliwice: Wydawnictwo Politechniki, 2011. – 171 p.
22. Voronov A.A. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. CH.II. Teoriya nelinejnyh i special'nyh sistem avtomaticheskogo upravleniya / A.A. Voronov. – M.: Vyssh. shk., 1977. – 288 p.
23. Bohonskij A.I. Energoemkost' upravleniya peremeshcheniem ob"ektov / A.I. Bohonskij // Fundamental'nye osnovy mekhaniki: materialy mezhdunarodnoj nauchno–prakticheskoy konferencii. – Novokuzneck: NIC MS, 2017. – №2. – P. 38 – 41.
24. Bohonskij A.I., Ryzhkov A.I. Konstruirovanie upravlyaemogo dvizheniya ob"ekta / A.I. Bohonskij, A.I. Ryzhkov // Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika: mater. mezhdunar. nauch.–tekhnich. konf. – Novokuzneck: NIC MS, 2017. – P. 64 – 69.
25. Bohonskij A.I. Upravlenie dvizheniem sistemy s zadannymi chastotami / A.I. Bohonskij, N.I. Varminskaya, T.V. Mozolevskaya // Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika: mater. mezhdunar. nauch.–tekhnich. konf. – Novokuzneck: NIC MS, 2018. – №2. – P. 7 – 13.
26. Bohonskij A.I. Dinamika antropomorfного uprugogo manipulyatora pri optimal'nom upravlyaemom dvizhenii / A.I. Bohonskij, N.I. Varminskaya // Avtomatizirovannoe proektirovanie v mashinostroenii: materialy VII mezhdunar. nauch.–praktich. konf. – Novokuzneck: NIC MS, 2019. – №7. – P. 62 – 70.
27. Varminskaya N.I. Dinamika trekhzvennogo antropomorfного uprugogo manipulyatora pri optimal'nom upravlenii dvizheniem / N.I. Varminskaya // Morskoy vestnik: nauch.–tekhnich. zhurnal. – Sankt–Peterburg: SPbGMTU, 2020. – №1 (73). – P. 82 – 85.
28. Bohonskij A.I. Formy dvizheniya antropomorfного manipulyatora / A.I. Bohonskij, N.I. Varminskaya // Journal of Advanced Research in Technical Science. – North Charleston, USA: SRC MS, CreateSpace, 2019. – Issue 14, Vol. 1. – P. 58 – 63.
29. Varminskaya N.I. Analiz form dvizheniya antropomorfного manipulyatora / N.I. Varminskaya // Avtomatizatsiya i izmereniya v mashino– priborostroenii. – Sevastopol': Izd–vo SGU, 2019. – № 2(6). – P. 10 – 19.
30. Bohonskij A.I., Varminskaya N.I. Konstruirovanie optimal'nyh upravlenij peremeshcheniem uprugih ob"ektov / A.I. Bohonskij, N.I. Varminskaya. – Sankt–Peterburg: NIC MS, 2020. – 120 p.

**Varminskaya Natalia Ivanovna**

Black Sea Higher Naval School named after P.S.Nakhimov, Sevastopol

Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Physics and General Technical Disciplines

299028, Sevastopol, st. Dybenko, 1a

Tel. 8 (978) 832–83–44

E–mail: nvarminska@gmail.com

## **МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ**

УДК 621.923

DOI: 10.33979/2073-7408-2021-347-3-30-39

**А.О. ХАРЧЕНКО, Е.А. ВЛАДЕЦКАЯ**

### **АНАЛИЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ВНУТРЕННЕЙ МЕЛКОРАЗМЕРНОЙ РЕЗЬБООБРАБОТКИ**

**Аннотация.** В статье представлены результаты анализа и исследований в направлении совершенствования технологического оборудования для внутренней резьбообработки деталей в условиях гибкого автоматизированного производства. Рассмотрены методы оценки эксплуатационной и технологической надежности гибкого производственного модуля (ГПМ) резьбообработки, которые могут быть положены в основу разрабатываемой методики синтеза его элементов. Технологическую систему гибкого производственного модуля (ГПМ) резьбообработки предложено рассматривать как систему, в которой переходы из состояния в состояние происходят под действием простейших потоков с параметрами вероятностей перехода непрерывной марковской цепи. Разработанная математическая модель, описывающая

состояния ГПМ с учетом отказов функционирования его элементов, параметрических отказов, а также с учетом восстановлений после этих видов отказов позволяет отразить влияние на работу модуля параметров потоков отказов и восстановлений инструмента, станка, приспособления, загрузочного устройства. Решение полученных систем уравнений финальных вероятностей позволяет для заданных (или полученных экспериментально) интенсивностей потоков отказов (функционирования и параметрических) для ГПМ резьбообработки получить значения вероятности безотказной работы, а также вероятностей нахождения системы в нерабочем состоянии по причине соответствующих отказов. Проведенные мероприятия позволяют решить задачу синтеза на уровне структурно-компоновочной оптимизации, чтобы на этапе параметрического синтеза определить уязвимые по выработанному критерию элементы, усовершенствование которых приведет к созданию наиболее эффективной системы.

**Ключевые слова:** эксплуатационная и технологическая надежность, внутренняя мелкоразмерная резьбообработка, технологические элементы модуля, гибкий производственный модуль (ГПМ) резьбообработки, простейший поток, марковская цепь, вероятность безотказной работы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проников А.С. Металлорежущие станки и автоматы / А.С. Проников. – М.: Машиностроение, 1981. – 479 с.
2. Пуш В.Э. Автоматические станочные системы / В.Э. Пуш, Р. Пигерт, В.Л. Сосонкин. – М.: Машиностроение, 1982. – 319 с.
3. Вопросы теории и техники гибких автоматизированных производственных систем // Сборник научных трудов: Труды ЛПИ, 1984. – №400. – 104 с.
4. Вентцель Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Высшая школа, 2000. – 480 с.
5. Григорьян Г.Д. Элементы надежности технологических процессов / Г.Д. Григорьян. – Киев–Одесса: Вища школа, 1984. – 214 с.
6. Маталин А.А. Точность механической обработки и проектирование технологических процессов / А.А. Маталин. – М.: Машиностроение, 1970. – 380 с.
7. Проников А.С. Точность и надежность станков с числовым программным управлением / А.С. Проников. – М.: Машиностроение, 1982. – 279 с.
8. Матвеев В.В. Нарезание точных резьб / В.В. Матвеев. – М.: Машиностроение, 1978. – 88 с.
9. Фрумин Ю.Л. Высокопроизводительный резьбообразующий инструмент / Ю.Л. Фрумин. – М.: Машиностроение, 1977. – 183 с.
10. Ямников А.С. Определение динамических погрешностей при нарезании резьб мерным инструментом / А.С. Ямников // Исследования в области технологии образования наружных и внутренних резьб, резьбообразующих инструментов, станков и методов контроля резьб: Межвуз. сб. – Тула: ТПИ, 1974. – С.68–72.
11. Грудов А.А. Пути увеличения точности нарезаемой резьбы и стойкости метчиков / А.А. Грудов. – М.: МСИП, ВНИИ, 1971. – 128 с.
12. Меньшаков В.М. Бесстружечные метчики / В.М. Меньшаков, Г.П. Урлапов, В.С. Середа. – М.: Машиностроение, 1976. – 167 с.
13. Якухин В.Г. Оптимальная технология изготовления резьб / В.Г. Якухин. – М.: Машиностроение, 1985. – 184 с.
14. Меламед Г.И. Гибкое автоматическое производство. Станки с ЧПУ и роботы / Г.И. Меламед, Б.М. Турсунов. – Минск: Беларусь, 1986. – 159 с.
15. Братан С.М. Повышение точности формообразования мелкоразмерных резьб метчиками в алюминиевых сплавах: монография / С.М. Братан, Ф.Н. Канареев, П.А. Новиков, А.О. Харченко. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2017. – 164 с.
16. Рыжов Э.В. Раскатывание резьб / Э.В. Рыжов, О.С. Андрейчиков, А.Е. Шешков. – М.: Машиностроение, 1974. – 122 с.
17. Novoselov, Yu.K., Kharchenko A.O. Choice of the Optimal Structure of a Flexible Production Cell / Novoselov, Yu.K., Kharchenko A.O. // Soviet engineering research, 1987. – 7(2), P. 48–52.
18. Харченко А.О. Разработка гибких производственных модулей с учетом надежности технологических систем / А.О. Харченко. – К.: Общество «Знание», 1989. – 20 с.
19. Нахапетян Е.Г. Диагностирование оборудования гибкого автоматизированного производства / Е.Г. Нахапетян. – М.: Наука, 1985. – 224 с.
20. Харченко А.О. Анализ и синтез структур современных многооперационных станков: практикум / А.О. Харченко, С.М. Братан, Е.А. Владецкая, С.И. Рошупкин. – М.: Центркаталог, 2018. – 144 с.
21. Долгин В.П. Надежность технических систем: учеб. пособие / В.П. Долгин, А.О. Харченко. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2015. – 167 с.
22. Харченко А.О. Структурно-компоновочный синтез подсистем модулей для внутренней резьбообработки / А.О. Харченко, А.А. Харченко // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», 2020. – № 4–2 (342). – С.85–94. DOI: 10.33979/2073–7408–2020–342–4–2–85–94.

Харченко Александр Олегович  
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный  
университет», г. Севастополь  
Кандидат технических наук, профессор кафедры  
«Технология машиностроения»  
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33  
Тел. +7 (8692) 54–05–57  
E-mail: khao@list.ru

Владецкая Екатерина Александровна  
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный  
университет», г. Севастополь  
Кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Технология машиностроения»  
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33  
Тел. +7 (8692) 54–05–57  
E-mail: vladetska@rambler.ru

---

A.O. KHARCHENKO, E.A. VLADETSKAYA

## ANALYSIS AND RESEARCH OF OPERATIONAL AND TECHNOLOGICAL RELIABILITY OF EQUIPMENT FOR INTERNAL SMALL-SIZED THREADING

**Abstract.** *The article presents the results of analysis and research in the direction of improving technological equipment for internal threading of parts in a flexible automated production. Methods for assessing the operational and technological reliability of a flexible manufacturing module (FMM) of thread processing are considered, which can be used as the basis for the developed method of synthesis of its elements. It is proposed to consider the technological system of the flexible manufacturing module (FMM) of thread processing as a system in which transitions from state to state occur under the action of the simplest flows with parameters of the transition probabilities of a continuous Markov chain. The developed mathematical model describing the state of the FMM taking into account the failures of the functioning of its elements, parametric failures, as well as taking into account the recovery after these types of failures, makes it possible to reflect the influence on the operation of the module of the parameters of the flows of failures and restorations of the tool, machine tool, fixture, loading device. The solution of the obtained systems of equations of final probabilities allows for given (or experimentally obtained) intensities of failure streams (functioning and parametric) for FMM threading to obtain the values of the probability of failure-free operation, as well as the probabilities of finding the system in an inoperative state due to corresponding failures. The measures taken make it possible to solve the synthesis problem at the level of structural and layout optimization, so that at the stage of parametric synthesis to determine the elements that are vulnerable according to the developed criterion, the improvement of which will lead to the creation of the most efficient system.*

**Keywords:** *operational and technological reliability, internal small-sized thread processing, technological elements of the module, flexible manufacturing module (FMM) for thread processing, simplest flow, Markov chain, probability of failure-free operation.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Pronikov A.S. *Metallorazreshchiye stanki i avtomaty (Metal-cutting machines and automatic machines)* / A.S. Pronikov. – M.: Mashinostroyeniye, 1981. – 479 s.
2. Push V.E. *Avtomaticheskiye stanochnyye sistemy (Automatic machine tools)* / V.E. Push, R. Pigert, V.L. Sosonkin. – M.: Mashinostroyeniye, 1982. – 319 s.
3. *Voprosy teorii i tekhniki gibkikh avtomatizirovannykh proizvodstvennykh sistem (Questions of theory and technology of flexible automated production systems)* // Sbornik nauchnykh trudov: Trudy LPI, 1984. – №400. – 104 s.
4. Venttsel' Ye.S. *Teoriya veroyatnostey i yeye inzhenernyye prilozheniya (Probability theory and its engineering applications)* / Ye.S. Venttsel', L.A. Ovcharov. – M.: Vysshaya shkola, 2000. – 480 s.
5. Grigor'yan G.D. *Elementy nadezhnosti tekhnologicheskikh protsessov (Elements of reliability of technological processes)* / G.D. Grigor'yan. – Kiyev–Odessa: Vishcha shkola, 1984. – 214 s.
6. Matalin A.A. *Tochnost' mekhanicheskoy obrabotki i proyektirovaniye tekhnologicheskikh protsessov (Accuracy of mechanical processing and design of technological processes)* / A.A. Matalin. – M.: Mashinostroyeniye, 1970. – 380 s.
7. Pronikov A.S. *Tochnost' i nadezhnost' stankov s chislovym programmnyy upravleniyem (Accuracy and reliability of numerical control machines)* / A.S. Pronikov. – M.: Mashinostroyeniye, 1982. – 279 s.
8. Matveyev V.V. *Narezaniye tochnykh rez'b (Precision thread cutting)* / V.V. Matveyev. – M.: Mashinostroyeniye, 1978. – 88 s.
9. Frumin Yu.L. *Vysokoproizvoditel'nyy rez'boobrazuyushchiy instrument (High-performance thread-forming tool)* / Yu.L. Frumin. – M.: Mashinostroyeniye, 1977. – 183 s.
10. Yamnikov A.S. *Opredeleniye dinamicheskikh pogreshnostey pri narezanii rez'b mernym instrumentom (Determination of dynamic errors when cutting threads with a measuring instrument)* / A.S. Yamnikov // Issledovaniya v oblasti tekhnologii obrazovaniya naruzhnykh i vnutrennykh rez'b, rez'boobrazuyushchikh instrumentov, stankov i metodov kontrolya rez'b: Mezhd. sb. – Tula: TPI, 1974. – S.68–72.

11. Grudov A.A. Puti uvelicheniya tochnosti narezayemoy rez'by i stoykosti metchikov (*Ways of increasing the accuracy of the cut thread and the resistance of taps*) / A.A. Grudov. – M.: MSIP, VNII, 1971. – 128 s.
12. Men'shakov V.M. Besstruzhechnyye metchiki (*Shaving taps*) / V.M. Men'shakov, G.P. Uralpov, V.S. Sereda. – M.: Mashinostroyeniye, 1976. – 167 s.
13. Yakukhin V.G. Optimal'naya tekhnologiya izgotovleniya rez'b (*Optimal technology for the manufacture of threads*) / V.G. Yakukhin. – M.: Mashinostroyeniye, 1985. – 184 s.
14. Melamed G.I. Gibkoye avtomaticheskoye proizvodstvo. Stanki s CHPU i roboty (*Flexible automatic production. CNC machines and robots*) / G.I. Melamed, B.M. Tursunov. – Minsk: Belarus', 1986. – 159 s.
15. Bratan S.M. Povysheniye tochnosti formoobra-zovaniya melkorazmernykh rez'b metchikami v al-yuminiyevykh splavakh: monografiya (*Improving the accuracy of forming small-sized threads with taps in aluminum alloys*) / S.M. Bratan, F.N. Kanareyev, P.A. Novikov, A.O. Kharchenko. – M.: Vuzovskiy uchebnik: INFRA-M, 2017. – 164 s.
16. Ryzhov E.V. Raskatyvaniye rez'b (*Thread rolling*) / E.V. Ryzhov, O.S. Andreychikov, A.Ye. Steshkov. – M.: Mashinostroyeniye, 1974. – 122 s.
17. Novoselov, Yu.K., Kharchenko A.O. Choice of the Optimal Structure of a Flexible Production Cell / Novoselov, Yu.K., Kharchenko A.O. // Soviet engineering research, 1987. – 7(2), P. 48–52.
18. Kharchenko A.O. Razrabotka gibkikh proizvodstvennykh moduley s uchetom nadezhnosti tekhnologicheskikh sistem (*Development of flexible production modules taking into account the reliability of technological systems*) / A.O. Kharchenko. – K.: Obshchestvo «Znaniye», 1989. – 20 s.
19. Nakhapetyan Ye.G. Diagnostirovaniye oborudovaniya gibkogo avtomatizirovannogo proizvodstva (*Diagnosing Equipment for Flexible Automated Production*) / Ye.G. Nakhapetyan. – M.: Nauka, 1985. – 224 s.
20. Kharchenko A.O. Analiz i sintez struktur sovremennykh mnogooperatsionnykh stankov: praktikum (*Analysis and synthesis of the structures of modern multioperational machines: practical*) / A.O. Kharchenko, S.M. Bratan, Ye.A. Vladetskaya, S.I. Roshchupkin. – M.: Tsentrkatalog, 2018. – 144 s.
21. Dolgin V.P. Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem (*Reliability of technical systems*) / V.P. Dolgin, A.O. Kharchenko. – M.: Vuzovskiy uchebnik: INFRA-M, 2015. – 167 s.
22. Kharchenko A.O. Strukturno-komponovochnyy sintez podsystem moduley dlya vnutenney rez'boobrabotki (*Structural-layout synthesis of subsystems of modules for internal thread processing*) / A.O. Kharchenko, A.A. Kharchenko // Fundamental'nyye i priklad'nyye problemy tekhniki i tekhnologii. – Orel: FGBOU VO «OGU imeni I.S. Turgeneva», 2020. – № 4–2 (342). – S.85–94. DOI: 10.33979/2073-7408-2020-342-4-2-85-94.

**Kharchenko Alexander Olegovich**  
 Sevastopol State University, Sevastopol  
 Ph.D., professor of the department  
 "Technology of mechanical engineering"  
 299053, Sevastopol, Universitetskaya St., 33  
 Tel. +7 (8692) 54-05-57  
 E-mail: khao@list.ru

**Vladetskaya Ekaterina Aleksandrovna**  
 Sevastopol State University, Sevastopol  
 Ph.D., Associate Professor of the department  
 "Technology of mechanical engineering"  
 299053, Sevastopol, Universitetskaya St., 33  
 Tel. +7 (8692) 54-05-57  
 E-mail: vladetska@rambler.ru

УДК 621.9–219.1–752

DOI: 10.33979/2073-7408-2021-347-3-40-48

А.И. ПЕСЧАНСКИЙ, А.О. ХАРЧЕНКО, С.М. БРАТАН

## ДВУХКОМПОНЕНТНАЯ ВОССТАНАВЛИВАЕМАЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ СИСТЕМА МНОГОЦЕЛЕВОГО СТАНКА С МГНОВЕННО ПОПОЛНЯЕМЫМ ВРЕМЕННЫМ РЕЗЕРВОМ

**Аннотация.** Объектом исследования является техническая система многоцелевого станка, инструменты которой могут выходить из строя и восстанавливаться. Вышедший из строя инструмент остается некоторое время функционально работоспособным за счет временного резерва до наступления параметрического отказа, величина которого имеет случайный характер. Все случайные величины, описывающие систему, имеют распределения общего вида. Аппаратом для построения математической модели описанной системы является полумарковский процесс с дискретно-непрерывным фазовым пространством состояний. В явном виде находится стационарное распределение вложенной цепи Маркова. Для систем с параллельным соединением, последовательным соединением с отключением и без отключения элементов находятся стационарное время наработки системы на отказ, стационарное время пребывания в состоянии отказа и стационарный коэффициент готовности системы. На численном примере показана зависимость стационарных характеристик системы от величины временного резерва.

**Ключевые слова:** техническая система многоцелевого станка, инструментальное резервирование временной резерв, стационарное распределение вложенной цепи Маркова, стационарный коэффициент готовности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черкесов Г.Н. Надежность технических систем с временной избыточностью. – М.: Сов. радио, 1974. – 296 с.
2. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности.— 2-е изд., перераб. и доп.— СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 704 с.
3. Ushakov I.A. Probabilistic Reliability Models. – San Diego: Wiley, 2012. – 248 p.
4. Креденцер Б.П. Прогнозирование надежности систем с временной избыточностью. – К.: Наук. Думка, 1978. – 240 с.
5. Копп, В.Я. Стохастические модели автоматизированных производственных систем с временным резервированием / В.Я. Копп, Ю.Е. Обжерин, А.И. Песчанский. – Севастополь: Изд-во СевГУ, 2000. – 286 с.
6. Песчанский А.И. Полумарковская модель ненадежной восстанавливаемой резервированной одноканальной системы обслуживания с потерями / А.И. Песчанский // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та, сер. Техн. науки. – 2017. – №1(53). – С. 31–41.
7. Долгин В.П. Надежность технических систем: Учеб. пособие / В.П. Долгин, А.О. Харченко. – М: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2017. – 167 с.
8. Харченко А.О. Металлообрабатывающие станки и оборудование машиностроительных производств: Учеб. пособие / А.О. Харченко – М: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2017. – 260 с.
9. Харченко А.О. Анализ и синтез структур современных многооперационных станков: практикум / А.О. Харченко, С.М. Братан, Е.А. Владецкая, С.И. Рошупкин. – М.: Центркаталог, 2018. – 144 с.
10. Королюк В.С., Турбин А.Ф. Процессы марковского восстановления в задачах надежности систем. – К.: Наук. думка, 1982. – 236 с.
11. Корлат А.Н. Полумарковские модели восстанавливаемых систем и систем массового обслуживания / А.Н. Корлат, В.Н. Кузнецов, М.И. Новиков, А.Ф. Турбин. – Кишинев: Штиинца, 1991. – 276 с.

**Песчанский Алексей Иванович**  
ФГАОУ ВО «Севастопольский  
государственный университет»,  
г. Севастополь  
Доктор технических наук,  
профессор кафедры «Высшая  
математика»  
299053, г. Севастополь, ул.  
Университетская, 33  
Тел. 43–50–01  
E-mail: peschansky\_sntu@mail.ru

**Харченко Александр Олегович**  
ФГАОУ ВО «Севастопольский  
государственный университет»,  
г. Севастополь  
Кандидат технических наук,  
профессор кафедры «Технология  
машиностроения»  
299053, г. Севастополь, ул.  
Университетская, 33  
Тел. 54–05–57  
E-mail: khao@list.ru

**Братан Сергей Михайлович**  
ФГАОУ ВО «Севастопольский  
государственный университет», г.  
Севастополь  
Доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Технология  
машиностроения»  
299053, г. Севастополь, ул.  
Университетская, 33  
Тел. 54–05–57  
E-mail: serg.bratan@gmail.com

---

A.I. PESCHANSKY, A.O. KHARCHENKO, S.M. BRATAN

## TWO-COMPONENT RESTORABLE TOOL SYSTEM MULTI-PURPOSE MACHINE WITH AN INSTANTLY REFILLED TIME RESERVE

**Abstract.** *The object of the research is the technical system of a multipurpose machine tool, the tools of which can fail and be restored. A failed tool remains functional for some time due to a temporary reserve until a parametric failure occurs, the magnitude of which is random. All random variables describing the system have general distributions. The apparatus for constructing a mathematical model of the described system is a semi-Markov process with a discrete-continuous phase space of states. The stationary distribution of the embedded Markov chain is found explicitly. For systems with parallel connection, series connection with disconnection and without disconnection of elements, the stationary time between failures of the system, the stationary time spent in the state of failure and the stationary system availability factor are found. A numerical example shows the dependence of the stationary characteristics of the system on the size of the time reserve.*

**Keywords:** *technical system of a multi-purpose machine, instrumental redundancy, time reserve, stationary distribution of the nested Markov chain, stationary availability factor.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Cherkosov G.N. Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem s vremennoy izbytochnost'yu (Reliability of technical systems with temporary redundancy). – M: Sov. radio, 1974. – 296 s.
2. Polovko A.M., Gurov S.V. Osnovy teorii nadezhnosti (Fundamentals of reliability theory). – 2-e izd., pererab. i dop.— SPb.:BHV–Peterburg, 2006. – 704 s.
3. Ushakov, I.A. Probabilistic Reliability Models. – San Diego: Wiley, 2012. – 248 p.
4. Kredentser B.P. Prognozirovaniye nadezhnosti sistem s vremennoy izbytochnost'yu (Predicting the reliability of systems with temporary redundancy). – Kiev: Nauk. dumka, 1978. – 240 s.

5. Kopp, V.YA. Stokhasticheskiye modeli avtomatizirovannykh proizvodstvennykh sistem s vremennym rezervirovaniyem (Stochastic models of automated production systems with time redundancy) / V.Ya. Kopp, Yu.E. Obzherin, A.I. Peschanskiy. – Sevastopol: Izd-vo SevNTU, 2000. – 286 s.
6. Peschanskiy A.I. Polumarkovskaya model' nenadezhnoy vosstanavlivayemoy rezervirovannoy odnokanal'noy sistemy obsluzhivaniya s poteryami (Semi-Markov model of unreliable redundant single-channel service system with losses) / A.I. Peschanskiy // Vestn. Samar. Gos. Tehn. un-ta, ser. Tehn. nauki. – 2017. – №1(53). – S. 31–41.
7. Dolgin V.P. Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem (Reliability of technical systems) / V.P. Dolgin, A.O. Kharchenko. – M: Vuzovskiy uchebnik: INFRA–M, 2017. – 167 s.
8. Kharchenko A.O. Metalloobrabatывayushchiye stanki i oborudovaniye mashinostroitel'nykh proizvodstv (Metalworking machines and equipment engineering industries) / A.O. Kharchenko – M: Vuzovskiy uchebnik: INFRA–M, 2017. – 260 s.
9. Kharchenko A.O. Analiz i sintez struktur sovremennykh mnogooperatsionnykh stankov (Analysis and synthesis of the structures of modern multioperational machines): practical / A.O. Kharchenko, S.M. Bratan, Ye.A. Vladetskaya, S.I. Roshchupkin. – M.: Tsentrkatalog, 2018. – 144 s.
10. Korolyuk V.S., Turbin A.F. Protsesty markovskogo vosstanovleniya v zadachakh nadezhnosti sistem (Markov recovery processes in system reliability problems). – Kiev: Nauk. dumka, 1982. – 236 s.
11. Korlat A.N. Polumarkovskiy modeli vosstanavlivayemykh sistem i sistem massovogo obsluzhivaniya (Semi-Markov models of recoverable systems and Queuing systems) / A.N. Korlat, V.N. Kuznetsov, M.I. Novikov, A.F. Turbin. – Kishinev: Shtiintsa, 1991. – 276 s.

**Peschansky Alersev Ivanovich**  
 "Sevastopol State University",  
 Sevastopol  
 Doctor of Engineering, professor  
 of the department " Higher  
 mathematics "  
 299053, Sevastopol,  
 Universitetskaya St., 33  
 Тел. 43–50–01  
 E-mail: peschansky\_sntu@mail.ru

**Kharchenko Alexander Olegovich**  
 "Sevastopol State University",  
 Sevastopol  
 Ph.D., professor of the department  
 "Technology of mechanical  
 engineering"  
 299053, Sevastopol,  
 Universitetskaya St., 33  
 Тел. 54–05–57  
 E-mail: khao@list.ru

**Bratan Sergey Mikhaylovich**  
 "Sevastopol State University", Sevastopol  
 Doctor of Engineering, professor, head of  
 the department "Technology of  
 mechanical engineering"  
 299053, Sevastopol,  
 Universitetskaya St., 33  
 Тел. 54–05–57  
 E-mail: serg.bratan@gmail.com

УДК 658.512.011.56

DOI:10.33979/2073-7408-2021-347-3-49-56

А.В. НЕМЕНКО, М.М. НИКИТИН

## ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАЛОСТИ ПРИ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛИ

**Аннотация.** Рассмотрены возможности предотвращения появления усталостных трещин при финишной обработке детали по изменению упруго–механических характеристик материала изделия. Исследования проводятся в предположении, что материал изотропен и характеризуется при этом модулем упругости и сдвига. Исследования проводятся с использованием уравнения колебаний, возникающих в процессе производственных нагружений объекта. Полученные последовательности оценок механических характеристик материала представлены временными рядами, по которым производится дальний прогноз и вычисление предельных значений при неограниченном возрастании времени. Критерием усталости принимается изменение этих величин в настоящий или будущие моменты времени с выходом установленной области допустимых значений. В зависимости от степени отклонения может быть принято решение об отбраковке детали либо о коррекции технологического процесса с изменением закона движения обрабатываемого инструмента. Предлагаемый способ контроля может применяться при построении гибких производственных систем.

**Ключевые слова:** гибкие производственные системы, технологическая линия, финишная обработка, технологическая выносливость.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Выжигин А.Ю. Гибкие производственные системы/А.Ю. Выжигин – М. Машиностроение, 2009 – 288 с.
2. Трощенко В.Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов. Справочник. Часть 1./В.Т. Трощенко, Л.А.Сосновский//К.: Наукова Думка, 1987 – 346 с.
3. Иванова В. С. Природа усталости металлов/ В.С. Иванова, В.Ф. Терентьев//М.: Металлургия, 1975. – 456 с.
4. Lee Y.–L. Fatigue testing and analysis. Theory and practice./Y.–L. Lee, J. Pan, R. Hathaway, M. Barkey – Elsevier, 2004. – 416 p.
5. Справочник по строительной механике корабля./Бойцов Г.В., Палий О.М., Постнов В.А., Чувиковский В.С. – В трех томах. Том 2. Пластины. Теория упругости, пластичности и ползучести. Численные методы. – Л.: Судостроение, 1982г. – 464 с.
6. Неменко А.В. Анализ инструментальных искажений при снятии индикаторной диаграммы судового дизеля/ А.В. Неменко, М.М. Никитин // м–лы межд. науч. техн. конф. “Надежность и долговечность механизмов,

элементов конструкций и биомеханических систем”, Севастополь, 4 – 7 сент. 2007 г. Севастополь, СевНТУ, 2006. С. 253 – 258.

7. Неменко А.В. Прикладные вопросы оценки технического состояния судовых механических систем/А.В. Неменко, М.М. Никитин – М.: Инфра-М, 2017 – 172 с.

8. Prudnikov A., Brychkov Y., Marichev O. Integrals and series. Volume 4. Direct Laplace Transforms/Gordon and Breach Science Publishers, 1992. — 637 p.

9. Неменко А.В. Предотвращение перегрева при обработке металлов резанием/ А.В. Неменко, М.М. Никитин //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2018. № 4–1 (330). С. 52–57.

10. Неменко А.В. Применение асимптотических методов к задаче прогнозирования тепловых переходных процессов в судовой энергетической установке/ А.В. Неменко, М.М. Никитин // Вестник СевНТУ. Сер. Механика, энергетика, экология: сб. науч. тр. – Севастополь, 2011. – вып. 119 – с. 66 – 70.

**Неменко Александра Васильевна**

ФГАОУ «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая механика и машиноведение»

299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

Тел. +79788330519

E-mail: valesan@list.ru

**Никитин Михаил Михайлович**

ФГАОУ «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь

Преподаватель кафедры «Высшая математика»

299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

Тел. +79788150316

E-mail: m.nikitin.1979@gmail.com

---

A.V. NEMENKO, M.M. NIKITIN

## **PREVENTING PROCESS FATIGUE WHEN FINISHING A PART**

**Abstract.** Possibilities of preventing the appearance of fatigue cracks during finishing processing of a part by changing the elastic–mechanical characteristics of the workpiece due to the accumulation of fatigue defects preceding the appearance of a crack are considered. Modules of elasticity and shear are considered as characteristics to be controlled under the assumption that the material of the part is isotropic. To control these values, the equation of vibrations of the part is used, which is solved by the numerical method, and the values of  $E$  and  $G$  are selected, corresponding to the measured displacements of surface points that occur during a given movement of the processing tool. The movements are proposed to be measured remotely. The obtained sequences of estimates of the elasticity and shear moduli form two time series, according to which a long-range forecast is made, and the limiting values of the sequences are calculated with an unlimited increase in time. The fatigue criterion is the reduction of these values at the present or future points in time below a preset value. Depending on the degree of reduction, a decision can be made to reject the part or to correct the technological process with a change in the law of the machining tool motion. The proposed control method can be used in the construction of flexible production systems.

**Keywords:** robotic technology systems, technology line, latent failures, predictive recovery, artificial intelligence.

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Vyzhigin A.Ju. Gibkie proizvodstvennye sistemy/A.Ju. Vyzhigin – М. Mashinostroenie, 2009 – 288 s.
2. Troshhenko V.T. Soprotivlenie ustalosti metallov i splavov. Spravochnik. Chast' 1./V.T. Troshhenko, L.A.Sosnovskij//K.: Naukova Dumka, 1987 – 346 s.
3. Ivanova V. S. Priroda ustalosti metallov/ V.S. Ivanova, V.F. Terent'ev//M.: Metallurgija, 1975. – 456 s.
4. Lee Y.–L. Fatigue testing and analysis. Theory and practice./Y.–L. Lee, J. Pan, R. Hathaway, M. Barkey – Elsevier, 2004. – 416 p.
5. Spravochnik po stroitel'noj mehanike korablja./Bojcov G.V., Palij O.M., Postnov V.A., Chuvikovskij V.S. – V treh tomah. Tom 2. Plastiny. Teorija uprugosti, plastichnosti i polzuchesti. Chislennyye metody. – L.: Sudostroenie, 1982g. – 464 s.
6. Nemenko A.V. Analiz instrumental'nyh iskazhenij pri snjatii indikatornoj diagrammy sudovogo dizelja/ A.V. Nemenko, M.M. Nikitin // m–ly mezhd. nauch. tehn. konf. “Nadezhnost' i dolgovechnost' mekhanizmov, jelementov konstrukcij i biomechanicheskikh sistem”, Sevastopol', 4 – 7 sent. 2007 g. Sevastopol', SevNTU, 2006. S. 253 – 258.
7. Nemenko A.V. Prikladnye voprosy ocenki tehničeskogo sostojanija sudovyh mekhanicheskikh sistem/A.V. Nemenko, M.M. Nikitin – М.: Infra–М, 2017 – 172 s.
8. Prudnikov A., Brychkov Y., Marichev O. Integrals and series. Volume 4. Direct Laplace Transforms/Gordon and Breach Science Publishers, 1992. — 637 p.
9. Nemenko A.V. Predotvrashhenie peregreva pri obrabotke metallov rezaniem/ A.V. Nemenko, M.M. Nikitin //Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. 2018. № 4–1 (330). S. 52–57.



10. Nemenko A.V. Primenenie asimptoticheskikh metodov k zadache prognozirovaniya teplovykh perehodnykh processov v sudovoy jenergeticheskoy ustanovke/ A.V. Nemenko, M.M. Nikitin // Vestnik SevNTU. Ser. Mehanika, jenergetika, jekologija: sb. nauch. tr. – Sevastopol', 2011. – vyp. 119 – s. 66 – 70.

**Nemenko Alexandra Vasilievna**

FSAEI HE Sevastopol State University, Sevastopol  
Ph.D. in Tech Science, assistant professor of chair  
«Technical Mechanics and Machine Science»  
Universitetskaya st, 33, Sevastopol, Russian Federation,  
299053  
Phone. +79788330519  
E-mail: valesan@list.ru

**Nikitin Mikhail Mikhailovich**

FSAEI HE Sevastopol State University, Sevastopol  
Lecturer of chair «Higher Mathematics »  
Universitetskaya st, 33, Sevastopol, Russian Federation,  
299053  
Phone +79788150316  
E-mail: m.nikitin.1979@gmail.com

УДК [621.436:681.5]: 629.5

DOI: 10.33979/2073-7408-2021-347-3-57-62

Г.В. ГОГОЛЕВ

## ВЫБОР ТЕПЛОВЫХ ТРУБ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ФОРМ ПРИ ЛИТЬЕ ПЛАСТМАСС ПОД ДАВЛЕНИЕМ

**Аннотация.** Выполнен анализ возможностей применения использования низкотемпературных тепловых труб и двухфазных термосифонов при производстве пластмасс литьем под давлением и кокильном литье цинковых сплавов. Такие преимущества тепловых труб, как высокая эффективная теплопроводность, надежность, позволяют использовать их для отвода теплоты из труднодоступных мест в литейных формах сложной конфигурации вместо применяемых для этой цели металлических стержней. Приведены результаты сравнительных экспериментальных исследований различных типов тепловых труб, в характерном диапазоне рабочих температур. Даны рекомендации по выбору капиллярно–пористых структур и рабочих жидкостей тепловых труб в температурных диапазонах характерных для охлаждения литейных форм. Приведена конструкция артериальной низкотемпературной трубы, определена оптимальные геометрические характеристики сеточной капиллярно–пористой структуры.

**Ключевые слова:** литье пластмасс под давлением, охлаждение литейных форм, тепловые трубы, капиллярно–пористые структуры, двухфазные термосифоны, рабочие жидкости ТТ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 23073. Трубы тепловые. Термины. Определения и буквенные обозначения. – М.: Стандартинформ, 2005. – 4 с.
2. P. D. Dunn Heat Pipes / P.D. Dunn, D.A. Reay. – Pergamon Press Oxford, New York, Toronto, Sydney, Paris, 1976.
3. Безродный М.К. Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах: монография / М.К. Безродный, И.Л. Пиоро, Т.О. Костюк. – К.: Факт, 2003. – 480 с.
4. Освальд Т. Литье пластмасс под давлением / Т. Освальд, Л.Ш. Турнг, П.Дж. Грэмман; под ред. Э.Л. Калиничева. – СПб.: ЦОП Профессия, 2005. – 712 с.
5. Авери Дж. Специальные технологии литья под давлением / Дж. Авери, Кельвин Т. Окамото: пер. с англ.; под ред. В.В.Абрамова, Т.М. Лебедевой. – М.: Изд. Профессия, 2016. – 314 с.
6. Ложечко Ю.П. Литье под давлением термопластов / Ю.П. Ложечко. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Профессия, 2018. – 240 с.
7. Костылев И.И. Судовые системы / И.И. Костылев., В.А. Петухов. – СПб.: Изд. ГМА, 2010. – 420 с.
8. Ивановский М.Н. Технологические основы тепловых труб / М.Н. Ивановский [и др.]. – М.: Атомиздат, 1980. – 160 с.
9. Васильев Л.Л. Тепловые трубы и термосифоны как инновации [Электронный ресурс]. – 2015. – URL: <https://www.youtube.com/watch?v=fMANzd7hYLc> (29.03.2021).
10. А.с. 1108324 СССР. F 28 D 15/00. Тепловая труба [Текст] / Г.В. Гоголев, А.И. Лиморенко (СССР). – 3619439/24–06; заявлено 08.04.83; опубл.15.08.84, Бюл. 30. – с.3.

**Гоголев Геннадий Вениаминович**

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,  
г. Севастополь

Кандидат технических наук, доцент кафедры энергоустановки морских судов и сооружений  
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33  
Тел.: +79787817383  
E-mail: ggogolevsgu@mail.ru

G.V. GOGOLEV

## OPTION OF HEAT PIPES FOR COOLING OF MOLDS DURING INJECTION MOLDING PLASTICS

**Abstract.** *In the article analyzed possibility using of heat pipes and two-phase thermal siphons in production plastic injection molding and die casting of zinc alloys. The advantages of heat pipes make it possible to use them to remove heat from hard-to-reach place of casting molds. Results of the comparative analyses of the work of various heat pipes are presented. The experimental researches were in the real temperature range of work carried out. The article gives recommendations on the option of capillary-porous structures and working fluids of heat pipes. The arterial heat pipe design proposed. The optimal geometric characteristics of mesh porous structure of this heat pipe are determined.*

**Keywords:** *plastic injection molding, cooling of forms for casting, heat pipes, two-phase thermal siphons, capillary-porous structures, working fluids of heat pipes.*

## BIBLIOGRAPHY

1. GOST 23073–78. Truby teplovye. Terminy. Opredeleniya i bukvennye oboznacheniya. – M.: Standartinform, 1978 – 7 s.
2. P. D. Dunn, D. A. Reay Heat Pipes. Pergamon Press, Oxford, New York, Toronto, Sydney, Paris, 1976.
3. Bezrodniy M.K., Protsessy perenosa v dvuhfaznykh termosifonnykh sistemah: Monograph /M.K. Bezrodniy, I.L. Pioro, T.O. Kostyuk – K.: Fact, 2003. – 480 s.
4. Ossvald T. Liteye plastmass pod davleniem / T. Ossvald, L. Turng, P.D. Gramann; pod red. E.L. Kalinicheva. – SPb.: Professiya, 2005. – 712 s.
5. Avery D. Spezialnye tehnologii litya pod davleniem / D. Avery, Kelvin T. Okamoto: per. s angl.; pod red. V.V. Abramova, T.M. Lebedevoy. – M.: Izd. Professya, 2016. – 314 s.
6. Loszechko Y. P. Liteye pod davleniem termoplastov / Y.P. Loszechko. – 2-e izd., pererab. I dop. – SPb.: Professya, 2018. – 240 s.
7. Kostylev I. I. Sudovye systemy / I. I. Kostylev, V.A. Petuhov. – SPb.: Izd. GMA, 2010. – 420 s.
8. Ivanovskiy M. N. Tekhnologicheskie osnovy teplovykh trub / M. N. Ivanovskiy [i dr.]. – M.: Atomizdat, 1980. – 160 s.
9. Vasiliev L. L. Teplovye truby i termosifony kak innovazii [Elektronnyi resurs]. – 2015. – URL: <https://www.youtube.com/watch?v=fMANzd7hYLc> (29.03.2021).
10. A.s. 1108324 SSSR. F 28 D 15/00. Teplovaya truba [Tekst] / G.V. Gogolev, A.I. Limorenko (SSSR). – 3619439/24–06; zayavleno 08.04.83; opubl.15.08.84, Byul. 30. – s.3.

**Gogolev Gennadiy Veniaminovich**

Sevastopol State University

PhD, Associate Professor of the Department «Ship power plants and structures»,

299053, Sevastopol, Universitetskaya, 33

Tel.: +79787817383

E-mail: ggogolevsgu@mail.ru

УДК: 621.9

DOI: 10.33979/2073-7408-2021-347-3-63-72

Д.Т. САФАРОВ, А.Г. КОНДРАШОВ

## УМЕНЬШЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРОФИЛЯ ЗУБЬЕВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС В ПРОЦЕССАХ ЗУБОФРЕЗЕРОВАНИЯ ЧЕРВЯЧНЫМИ ФРЕЗАМИ

**Аннотация.** *В статье рассмотрен подход к уменьшению погрешностей эвольвентного и продольного профилей зубчатых колес. Уменьшение погрешности профиля выполняется из нескольких шагов – оценки показателей относительно предельных значений, выявление технологической структуры, экспертного анализа профилограмм в результате которого формируется содержание корректирующих действий. Постоянное повторение шагов приводит к постоянному уменьшению наиболее значимых погрешностей профиля, что значительно снижает риски изготовления колес с несоответствующими погрешностями профилей. Схема*

универсальна и применима для любых операций зубообработки. В статье рассматривается уменьшение погрешности профилей на примере зубофрезерования цилиндрических косозубых колес червячной зуборезной фрезой.

**Ключевые слова:** цилиндрическое зубчатое колесо, зубофрезерование, червячная фреза, погрешность профиля, улучшение.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ ISO 1328–1–2017 Передачи зубчатые цилиндрические. Система ISO. Классификация допусков на боковые поверхности зубьев. Часть 1. Определения и допускаемые значения отклонений на боковые поверхности зубьев зубчатого колеса / Москва Стандартиформ 2017 г. 42 с.
2. Маликов А.А., Малахов Г.В. Михайлов А.В. Определение параметров зубчатого венца заготовок с предварительно оформленными зубьями Известия ТулГУ, Технические науки 2017 Вып. 8 ч.1 с. 344–353.
3. Расулов Н.М. Шабиев Е.Т. Нестабильность глубины резания при шлифовании зубьев зубчатых колес методом копирования / Известия высших учебных заведений 2016 №12 (681) с.79–86.
4. Расулов Н.М., Шабиев Е.Т. Повышение эффективности шлифования зубьев зубчатых колес методом копирования на основе управления глубиной резания / Известия высших учебных заведений 2017 №2 (683) с.90–97.
5. Парфенов В.Э., Хандожко А.В., Киричек А.В. Конструкция черновой червячной фрезы для обработки зубчатого колеса крупного модуля / Вестник БГТУ 2019 №7 (80) с. 23–29
6. Гречников Ф.В., Яковишин А.С., Захаров О.В. Минимизация объема измерений при контроле цилиндрических поверхностей на основе статистического моделирования / Вестник ПНИПУ 2017 т.19 №4 с. 101–110.
7. Евтушенко Т.Л., Ыксан А.И., Шумейко И.А. Анализ формирования радиального биения зубчатого венца / Наука и техника Казахстана 2017 № 3–4 с. 19–25.
8. Абрамчук М.В. Вероятностный метод расчета параметров точности эвольвентных цилиндрических зубчатых передач / Известия вузов. Приборостроение 2016 т. 59 №8 с. 619–624.
9. Виноградов В.М., Черепахин А.А. Зависимость точности изготовления цилиндрических зубчатых передач от точности изготовления их основных деталей и сборки / Известия МГТУ «МАМИ» 2014 т.2 №1(19) с. 157–163.
10. J F Delavy, J Cadisch, W Thyssen, P Schacke, R Schwaighofer Шлифование зубчатых колес Reishauer AG 1993 г. с. 121.

### Сафаров Дамир Тамасович

ФГБАУ ВПО «Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского федерального университета)», г. Набережные Челны  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Материалов, технологий и качества»  
423812, Республика Татарстан  
г. Набережные Челны, пр. Мира 68/18  
Тел. 8 (8552) 58–95–49  
E-mail: Safarov-dt@mail.ru

### Кондрашов Алексей Геннадьевич

ФГБАУ ВПО «Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского федерального университета)», г. Набережные Челны  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»  
423812, Республика Татарстан, пр. Мира 68/18  
г. Набережные Челны,  
Тел. 8 (8552) 58–95–49  
E-mail: Kondrahov@mail.ru

---

D.T. SAFAROV, A.G. KONDRASHOV

## REDUCTION OF ERRORS IN THE PROFILE OF THE TEETH OF GEARS IN THE PROCESSES OF GEAR MILLING WITH WORM CUTTERS

**Abstract.** The article considers an approach to reducing the errors of the involute and longitudinal profiles of gears. The reduction of the profile error consists of several steps – evaluation of indicators relative to the limit values, identification of the technological structure, expert analysis of profilograms, which results in the content of corrective actions. Constant repetition of steps leads to a constant reduction of the most significant profile errors, which significantly reduces the risks of manufacturing wheels with inappropriate profile errors. The scheme is universal and can be used for any tooth processing operations. The article deals with the reduction of the error of profiles on the example of gear milling of cylindrical skew-toothed wheels with a worm gear cutter.

**Keywords:** cylindrical gear, gear milling, worm milling, profile error, improvement.

## BIBLIOGRAPHY

1. GOST ISO 1328–1–2017 Cylindrical gear gears. The ISO system. Classification of tolerances on the side surfaces of the teeth. Part 1. Definitions and permissible values of deviations on the side surfaces of the teeth of the gear wheel / Moscow Standartinform 2017 42 p.
2. Malikov A. A., Malakhov G. V. Mikhailov A.V. Determination of the parameters of the toothed crown of blanks with preformed teeth Izvestiya TUSU, Technical Sciences 2017 Issue 8 h. 1 p. 344–353.
3. Rasulov N. M., Shabiev E. T. Instability of the cutting depth when grinding teeth of gear wheels by copying method / Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy 2016 No. 12 (681) p. 79–86.
4. Rasulov N. M., Shabiev E. T. Improving the efficiency of grinding teeth of gear wheels by copying method based on cutting depth control / Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy 2017 No. 2 (683) p. 90–97.
5. Parfenov V. E., Khandozhko A.V., Kirichek A.V. Construction of a rough worm mill for processing a gear wheel of a large module / Bulletin of BSTU 2019 No. 7 (80) pp. 23–29.
6. Grechnikov F. V., Yakovishin A. S., Zakharov O. V. Minimization of the measurement volume in the control of cylindrical surfaces on the basis of statistical modeling / Bulletin of PNRPU 2017 vol. 19 No. 4 pp. 101–110.
7. Yevtushenko T. L., Yksan A. I., Shumenyok I. A. Analiz formirovaniya radialnogo bieniya zubchatogo ventsa [Analysis of the formation of the radial beat of the toothed crown]. Nauka i tekhnika Kazakhstana 2017, no. 3–4, pp. 19–25.
8. Abramchuk M. V. Probabilistic method for calculating the accuracy parameters of involute cylindrical gears / Izvestiya vuzov. Instrument making 2016 vol. 59 No. 8 p. 619–624.
9. Vinogradov V. M., Cherepakhin A. the dependence of the accuracy of manufacturing cylindrical gears, precision of manufacture of their basic components and Assembly / Izvestiya MGTU "MAMI" 2014, vol. 2 No. 1(19) pp. 157–163.
10. J F Delavy, J Cadisch, W Thyssen, P Schacke, R Schwaighofer Grinding gears Reishauer AG 1993, p. 121.

**Safarov Damir Tamasovich**

"Naberezhnye Chelny Institute  
(филиал) Казанского (Volga Federal  
University)», Naberezhnye Chelny  
Ph.D., Associate Professor of the Department  
of "Materials, Technologies and Quality"  
423812, Republic of Tatarstan  
Naberezhnye Chelny, Mira ave. 68/18  
Ph.: 8 (8552) 58–95–49  
E-mail: Safarov-dt@mail.ru

**Kondrashov Alexey Gennadyevich**

ФГБАУ ВПО «Naberezhnye Chelny Institute  
(branch) Kazan (Volga Federal  
University)», Naberezhnye Chelny  
Ph.D., Associate Professor of the Department  
«Design and technological support  
of machine–building industries»  
423812, Republic of Tatarstan,  
Naberezhnye Chelny, Mira ave. 68/18  
Ph.: 8 (8552) 58–95–49  
E-mail: Kondrahov@mail.ru

УДК 658.512.011.56

DOI: 10.33979/2073-7408-2021-347-3-73-77

А.В. НЕМЕНКО, М.М. НИКИТИН

## **КОМПЕНСАЦИЯ УПРУГИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛИ**

**Аннотация.** Рассмотрены возможности компенсации ошибки позиционирования при механической обработке тонкостенной детали за счет сообщения обрабатываемому инструменту движения в противофазе колебанию заготовки. Предложен способ установления ожидаемого амплитудного спектра колебаний заготовки исходя из разложения решения дифференциального уравнения колебаний детали в ряд по степеням времени. Рассмотрены возникающие переходные процессы для коэффициентов двух рядов по методу Крамера. Предлагаемый способ применим к плоской обработке преимущественно на её финишных стадиях, но может быть расширен и на другие виды обработки путем рассмотрения вынужденных колебаний заготовки в соответствующих плоскостях.

**Ключевые слова:** гибкие производственные системы, технологическая линия, финишная обработка, оболочечная конструкция, прецизионные поверхности, обработка в подвижных осях.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Выжигин А.Ю. Гибкие производственные системы/А.Ю. Выжигин – М. Машиностроение, 2012 – 288 с.
2. H. Xie and S. Régnier, "Development of a Flexible Robotic System for Multiscale Applications of Micro/Nanoscale Manipulation and Assembly," in *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 16, no. 2, pp. 266–276, April 2011, doi: 10.1109/TMECH.2010.2040483.
3. Хромов В.Г. Оптимизация кольцевой разгрузки при изготовлении деталей с поверхностями второго порядка/ В.Г. Хромов, А.В. Неменко, М.М. Никитин //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2019. № 4–2 (336). С. 208–213.

4. Неменко А.В. Применение упругих деформаций к формообразованию параболического зеркала/ А.В. Неменко, М.М. Никитин //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2020. № 3 (341). С. 11–19.

5. Неменко А.В. Управление процессом получения поверхностей второго порядка при финишной обработке/ А.В. Неменко, М.М. Никитин //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2020. № 4 (342). С. 52–58.

6.Справочник по строительной механике корабля./Бойцов Г.В., Палий О.М., Постнов В.А.,Чувиковский В.С. – В трех томах. Том 3. Динамика и устойчивость корпусных конструкций. – Л.: Судостроение,1982г. – 318 с.

7. Неменко А.В. Прикладные вопросы оценки технического состояния судовых механических систем/А.В. Неменко, М.М Никитин – М.: Инфра–М, 2017 – 172 с.

**Неменко Александра Васильевна**

ФГАОУ «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь  
Кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Техническая механика и машиноведение»  
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33  
Тел. +79788330519  
E-mail: valesan@list.ru

**Никитин Михаил Михайлович**

ФГАОУ «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь  
Преподаватель кафедры «Высшая математика»  
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33  
Тел. +79788150316  
E-mail: m.nikitin.1979@gmail.com

---

A.V. NEMENKO, M.M. NIKITIN

## COMPENSATION OF ELASTIC MOVEMENT WHEN MECHANICAL PROCESSING OF THE PARTS

**Abstract.** *The possibilities of compensating for distortions during the machining of a thin-walled part by communicating to the processing tool movement in antiphase to the oscillation of the workpiece are considered. A method is proposed for establishing the expected amplitude spectrum of oscillations of the workpiece based on the expansion of the solution of the differential equation of oscillations of the part in a series in powers of time. The emerging transient determinants are considered and formulas for their fast calculation are obtained for solving the transient system of equations for the coefficients of two series by Cramer's method. The proposed method is applicable to flat processing mainly at its finishing stages, but it can be extended to other types of processing by considering the forced vibrations of the workpiece in the corresponding planes.*

**Keywords:** *robotic technology systems, technology line, finishing, shell construction, precision surfaces, machining in moving axes.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Vyzhigin A.Ju. Gibkie proizvodstvennyye sistemy/A.Ju. Vyzhigin – M. Mashinostroenie, 2012 – 288 s.

2. H. Xie and S. Régnier, "Development of a Flexible Robotic System for Multiscale Applications of Micro/Nanoscale Manipulation and Assembly," in IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 16, no. 2, pp. 266–276, April 2011, doi: 10.1109/TMECH.2010.2040483.

3. Hromov V.G. Optimizacija kol'cevoj razgruzki pri izgotovlenii detalej s poverhnostjami vtorogo porjadka/ V.G. Hromov, A.V. Nemenko, M.M. Nikitin //Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. 2019. № 4–2 (336). S. 208–213.

4. Nemenko A.V. Primenenie uprugih deformacij k formoobrazovaniju parabolicheskogo zerkala/ A.V. Nemenko, M.M. Nikitin //Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. 2020. № 3 (341). S. 11–19.

5. Nemenko A.V. Upravlenie processom poluchenija poverhnostej vtorogo porjadka pri finishnoj obrabotke/ A.V. Nemenko, M.M. Nikitin //Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. 2020. № 4 (342). S. 52–58.

6.Справочник по stroitel'noj mehanike korablja./Bojcov G.V., Palij O.M., Postnov V.A.,Chuvikovskij V.S. – V treh tomah. Tom 3. Dinamika i ustojchivost' korpusnyh konstrukcij. – L.: Sudostroenie, 1982g. – 318 s.

7. Nemenko A.V. Prikladnye voprosy ocenki tehniceskogo sostojanija sudovyh mehanicheskikh sistem/A.V. Nemenko, M.M Nikitin – М.: Infra–М, 2017 – 172 s.

**Nemenko Alexandra Vasilievna**

FSAEI HE Sevastopol State University, Sevastopol  
Ph.D. in Tech Science, assistant professor of chair  
«Technical Mechanics and Machine Science»  
Universitetskaya st, 33, Sevastopol, Russian Federation,  
299053  
Phone. +79788330519

**Nikitin Mikhail Mikhailovich**

FSAEI HE Sevastopol State University, Sevastopol  
Lecturer of chair «Higher Mathematics »  
Universitetskaya st, 33, Sevastopol, Russian Federation,  
299053  
Phone +79788150316  
E-mail: m.nikitin.1979@gmail.com

С.В. КУДРЯВЦЕВ, М.Ф. СЕЛЕМЕНЕВ, Е.А. ПРОСОЛОВ,  
Г.Б. ПАНКОВ, А.С. ТАРАПАНОВ

## УПРАВЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРОЙ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ РЕЖУЩЕЙ ЧАСТИ РАЗВЕРТОК С НАНОПОКРЫТИЕМ

**Аннотация.** Проведен анализ изменения температур контактных поверхностей режущей части развертки и теоретический расчет при различных условиях обработки для процесса развертывания. Представлена блок-схема установки позволяющая фиксировать изменение температур в зоне резания на компьютере в режиме реального времени. Установлено, что при эффективном применении нанопокровтий (эпиламов) снижается коэффициент трения, тем самым уменьшая температуру процесса развертывания и повышая ресурс инструмента.

**Ключевые слова:** резание, развертывание, низкоскоростные процессы механической обработки, температура резания, автоматизированный комплекс, теплообменник, высокотемпературный теплоноситель, методы определения температуры, нопокровтия, эпиламы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эпиламы, терминология и применение в промышленности [Электронный ресурс]: режим доступа: <https://termosmazki.ru/stati/epilamy.-terminologiya-i-primenenie>
2. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах. – М.: Машиностроение, 288 с.
3. Патент РФ № 2017101479 17.01.2017. Устройство стендового автоматизированного лабораторного комплекса для изучения политропного процесса и комбинированного теплообмена // Патент России №2656196. 2018. / Бодров В.К., Ванин В.С., Кудрявцев С.В. [и др].
4. Патент РФ № 2017111455 14.06.2016. Устройство стендового автоматизированного лабораторного комплекса для изучения процессов теплообмена // Патент России №2668415. 2018. / Бодров В.К., Ванин В.С., Кудрявцев С.В. [и др.].
5. Кудрявцев С.В. Определение относительных изменений температуры параметров процесса развертывания при применении нанопокровтий на режущую часть инструмента/ Тарапанов А.С., Селеменев М.Ф. // Фундаментальные и прикладные проблемы науки и технологии. – 2019.– № 6 (338). – 53–58 с.
6. Эпиламы [Электронный ресурс] режим доступа: <https://www.ftorpolymer.ru/>
7. Новиков А.Д. Роль нанопокровтий в повышении стойкости метчиков/ Тарапанов А.С., Селеменев М.Ф. // Фундаментальные и прикладные проблемы науки и технологии. – 2019.– № 3 (335). – 34–39 с.

#### Кудрявцев Сергей Васильевич

Орловский государственный университет  
имени И.С. Тургенева, аспирант  
г. Орёл ул. Московская д. 34  
Тел.: +79208181016  
E-mail: sla1der123@yandex.ru

#### Селеменев Михаил Федорович

Орловский государственный университет  
имени И.С. Тургенева, кандидат технических наук,  
доцент кафедры машиностроение  
г. Орёл ул. Московская д. 34  
Тел.: +79102670717  
E-mail: selemenev2007@yandex.ru

#### Просолов Егор Александрович

Орловский государственный университет  
имени И.С. Тургенева, магистр  
г. Орёл ул. Московская д. 34  
Тел.: +79038813935  
E-mail: prasolovegor@mail.ru

#### Панков Григорий Борисович

Орловский государственный университет  
имени И.С. Тургенева, магистр  
г. Орёл ул. Московская д. 34  
Тел.: +79208261723

#### Тарапанов Александр Сергеевич

Орловский государственный университет  
имени И.С. Тургенева, доктор технических  
наук, профессор кафедры машиностроение  
г. Орёл ул. Московская д. 34  
Тел.: +79202877774

---

S.V. KUDRYAVTSEV, M.F. SELEMENEV, E.A. PROSOLOV,  
G.B. PANKOV, A.S. TARAPANOV

## TEMPERATURE CONTROL OF THE CUTTING SURFACES OF THE CUTTING PART OF NANO-COATED SCANS

**Abstract.** The analysis of the temperature change of the contact surfaces of the cutting part of the reamer and the theoretical calculation under various processing conditions for the reaming process are carried out. A block diagram of the installation is presented, which allows recording the temperature change in the cutting zone on a computer in real time. It was found that with the effective use of nanocoatings (epilams), the friction coefficient decreases, thereby decreasing the temperature of the deployment process and increasing the tool life.

**Keywords:** cutting, reaming, low-speed machining processes, cutting temperature, automated complex, heat exchanger, high-temperature coolant, methods for determining temperature, but coatings, epilams.

### BIBLIOGRAPHY

1. Epilamy, terminology and application in industry [Electronic resource]: access mode: <https://termosmazki.ru/stati/epilamy.-terminologiya-i-primenenie>
2. Reznikov A.N., Reznikov L.A. Thermal processes in technological systems. – M.: Mechanical engineering, 288 p.
3. RF patent No. 2017101479 01/17/2017. The device of a bench automated laboratory complex for studying the polytropic process and combined heat transfer // Patent of Russia №2656196. 2018. / Bodrov V.K., Vanin V.S., Kudryavtsev S.V. [and etc].
4. RF patent No. 2017111455 14.06.2016. The device of a bench automated laboratory complex for the study of heat transfer processes // Patent of Russia №2668415. 2018. / Bodrov V.K., Vanin V.S., Kudryavtsev S.V. [and etc].
5. Kudryavtsev S.V. Determination of relative changes in temperature of the parameters of the deployment process when applying nanocoatings to the cutting part of the tool / Tarapanov A.S., Selemenev M.F. // Fundamental and applied problems of science and technology. – 2019.– No. 6 (338). – 53–58 p.
6. Epilams [Electronic resource] access mode: <https://www.ftorpolymer.ru/> 7. Novikov A.D. The role of nanocoatings in increasing the resistance of taps / Tarapanov A.S., Selemenev M.F. // Fundamental and applied problems of science and technology. – 2019.– No. 3 (335). – 34–39 p.

**Kudryavtsev Sergey Vasilievich**  
Oryol State University named after  
I.S. Turgeneva, postgraduate student  
Tel.: +79208181016  
E-mail: sla1der123@yandex.ru

**Selemenev Mikhail Fedorovich**  
Oryol State University named after I.S.  
Turgeneva, candidate of technical sciences,  
associate professor of mechanical engineering  
Tel: +79102670717  
Selemenev2007@yandex.ru

**Prosolov Egor Alexandrovich**  
Oryol State University named after I.S.  
Turgenev, master  
Oryol st. Moscow, 34  
Tel.: +79038813935  
E-mail: prasolovegor@mail.ru

**Pankov Grigory Borisovich**  
Oryol State University named after  
I.S. Turgeneva, master  
Oryol st. Moscow, 34  
Tel.: +79208261723

**Tarapanov Alexander Sergeevich**  
Oryol State University named after  
I.S. Turgeneva, Doctor of Technical Sci.,  
Professor of the Department  
of Mechanical Engineering Oryol st. Moscow, 34  
Tel.: + 79202877774

УДК 67.05

DOI: 10.33979/2073-7408-2021-347-3-85-90

А.Р. АБЛАЕВ, Е.В. ХРОМОВ, Р.Р. АБЛАЕВ, А.П. ПОЛЯКОВ

## ОПТИМИЗАЦИЯ ЦИФРОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЛОЖНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

**Аннотация.** В статье исследован вопрос оптимизации сложной технической системы на стадии ее проектирования с применением эвристико–феноменологического подхода. Проведен анализ принципов комплексной оптимизации сложных технических систем. Предложена четырехуровневая структура синтеза методического, информационного и программного обеспечения комплексной оптимизации сложных технических систем, которая позволит управлять программируемыми параметрами сложных технических систем на каждом этапе их проектирования.

**Ключевые слова:** техническая система, объект, проектирование, оптимизация, эвристико–эволюционный феноменологический подход.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аблаев А.Р. Критерии эффективности оборудования (элементов систем) // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2019. – №4–1 (336). – С. 59–65.
2. Аблаев Р.Р. Постановка задачи оптимальной ресурсоэффективной компоновки механизированных объектов / Р.Р. Аблаев, А.Р. Аблаев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2020. – №1 (339). С. 70–74. DOI: 10.33979/2073–7408–2020–339–1–70–74.
3. Берлин М.А. Методические основы комплексной оптимизации технологических систем / М.А. Берлин. – Химическая технология, 1981. – № I. – С. 39–41.
4. Демиденко, Н.Д. Моделирование и оптимизация технических систем с распределенными параметрами: учеб. пособие для вузов/Н.Д. Демиденко, Л.В. Кулагина. –Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. –210 с.
5. Демиденко, Н.Д. Моделирование и оптимизация технологических систем с распределенными параметрами/Н.Д. Демиденко, Л.В. Кулагина//Вестн. Сиб. аэрокосм. ун–та. –2014. –<sup>1</sup> 3(55). –С. 55–63.
6. Зайцев С.В. Оптимизация технических систем: учеб. пособие / С.В. Зайцев, М.Ю. Тимофеев. – М.: МАДИ, 2019. – 124 с
7. Каневец Г. Е. Обобщенные методы расчета теплообменников / Г. Е. Каневец. – К.: Наук. думка, 1979. – 352 с.
8. Каневец Г. Е. Принципы создания синтезатора алгоритмов и программ оптимизации пластинчатых теплообменных аппаратов / Г. Е. Каневец, О. В. Алтухова // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2014. – № 12. – С. 35–39.
9. Каневец Г.Е., Берлин М.А. Принципы автоматизированного проектирования и оптимизации химико–технологических производств. Киев: Общество «Знание» УССР, 1981. 30 с.

**Аблаев Алим Рустемович**  
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергоустановок морских судов и сооружений»  
299053, г. Севастополь,  
ул. Университетская, 33  
Тел. 8978–810–05–64  
E-mail: alim\_ablaev@mail.ru

**Хромов Егор Владимирович**  
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Энергоустановок морских судов и сооружений»  
299053, г. Севастополь,  
ул. Университетская, 33  
Тел. 8978–744–64–65  
E-mail: EVHromov@sevsu.ru

**Аблаев Ремзи Рустемович**  
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь  
Кандидат экономических наук, доцент кафедры «Экономика предприятий»  
299053, г. Севастополь,  
ул. Университетская, 33  
Тел. 8978–801–91–41  
E-mail: ablaev.expert@mail.ru

**Поляков Антон Павлович**  
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь  
Старший преподаватель кафедры «Экономика предприятия»  
299053, г. Севастополь,  
ул. Университетская, 33  
Тел. 8978–730–36–78  
E-mail: anton\_pol9kov@mail.ru

---

A.R. ABLAEV, E.V. KHRMOV, R.R. ABLAEV, A.P. POLYAKOV

### DIGITAL DESIGN OPTIMIZATION OF A COMPLEX TECHNOLOGICAL SYSTEM

**Abstract.** The article investigates the issue of optimization of a complex technical system at the stage of its design using a heuristic–phenomenological approach. The analysis of the principles of complex optimization of complex technical systems is carried out. A four–level structure for the synthesis of methodological, informational and software



support for complex optimization of complex technical systems is proposed, which will allow controlling the programmable parameters of complex technical systems at each stage of their design.

**Keywords:** technical system, object, design, optimization, heuristic and phenomenological approach.

## BIBLIOGRAPHY

1. Ablaev A.R. Kriterii effektivnosti oborudovaniya (elementov sistem) // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2019. – №4–1 (336).
2. Ablaev R.R. Postanovka zadachi optimal'noj resursoeffektivnoj komponovki mekhanizirovannykh ob"ektov / R.R. Ablaev, A.R. Ablaev // Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2020. – №1 (339). DOI: 10.33979/2073-7408-2020-339-1-70-74.
3. Berlin M.A. Metodicheskie osnovy kompleksnoy optimizatsii tekhnologicheskikh sistem / M.A. Berlin. – Himicheskaya tekhnologiya, 1981. – № I.
4. Demidenko, N.D. Modelirovanie i optimizatsiya tekhnicheskikh sistem s raspredelennymi parametrami: ucheb. posobie dlya vuzov / N.D. Demidenko, L.V. Kulagina. – Krasnoyarsk: IPC KGTU, 2006.
5. Demidenko, N.D. Modelirovanie i optimizatsiya tekhnologicheskikh sistem s raspredelennymi parametrami / N.D. Demidenko, L.V. Kulagina // Vestn. Sib. aerokosm. un-ta. – 2014. – 3(55).
6. Zajcev S.V. Optimizatsiya tekhnicheskikh sistem: ucheb. posobie / S.V. Zajcev, M.YU. Timofeev. – M.: MADI, 2019.
7. Kanevec G. E. Obobshchennyye metody rascheta teploobmennikov / G. E. Kanevec. – K.: Nauk. dumka, 1979.
8. Kanevec G. E. Principy sozdaniya sintezatora algoritmov i programm optimizatsii plastinchatykh teploobmennikov / G. E. Kanevec, O. V. Altuhova // Energobezopasnost. Energetika. Energoaudit. – 2014. – № 12.
9. Kanevec G.E., Berlin M.A. Principy avtomatizirovannogo proektirovaniya i optimizatsii himiko-tekhnologicheskikh proizvodstv. Kiev: Obshchestvo «Znanie» USSR, 1981.

**Ablaev Alim Rustemovich**  
Ph.D., Associate Professor  
Sevastopol State University  
299053, Sevastopol, Universitetskaya Str. 33  
Ph.: 8978-810-05-64  
E-mail: alim\_ablaev@mail.ru

**Khromov Egor Vladimirovich**  
Ph.D., Associate Professor  
Sevastopol State University  
299053, Sevastopol, Universitetskaya Str. 33  
Ph.: 8978-744-64-65  
E-mail: EVHromov@sevsu.ru

**Ablaev Remzi Rustemovich**  
Ph.D., Associate Professor  
Sevastopol State University  
299053, Sevastopol, Universitetskaya Str. 33  
Ph.: 8978-801-91-41  
E-mail: ablaev.expert@mail.ru

**Polyakov Anton Pavlovich**  
Senior Lecturer  
Sevastopol State University  
299053, Sevastopol, Universitetskaya Str. 33  
Ph.: 8978-730-36-78  
E-mail: anton\_pol9kov@mail.ru

УДК: 621.9

DOI: 10.33979/2073-7408-2021-347-3-91-99

О.Г. КОЖУС, Г.В. БАРСУКОВ, В.С. ШОРКИН, Ю.С. СТЕПАНОВ, Л.Ю. ФРОЛЕНКОВА

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ УСТАНОВКИ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ПОЛИМЕРНОЙ ОБОЛОЧКИ НА АБРАЗИВ ПРИ КРИТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ

**Аннотация.** В статье решаются вопросы повышения производительности процесса нанесения полимерной оболочки на абразив. Установлено, что производительность инкапсуляции абразива в псевдооживленном слое достигается за счет подбора оборудования, типа полимера, параметров распыления и свойств абразивного материала. Авторами разработана методика получения абразивного зерна с полимерным покрытием с использованием установки, позволяющей обрабатывать исходные частицы в псевдооживленном слое.

**Ключевые слова:** абразив, гидроабразивное резание, псевдооживленный слой, полимерное покрытие, покрытие, критические режимы.

*Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 20-79-00347*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Barsukov, G., Zhuravleva, T., & Kozhus, O. (2017, January). Increasing of efficiency of environmentally friendly technology of AWJ of a glass fiber plastic. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 50, No. 1, p. 012001). IOP Publishing.
2. Barsukov, G., T. Zhuravleva, and O. Kozhus. «Quality of Hydroabrasive Waterjet Cutting Machinability.» Procedia Engineering 206 (2017): 1034–1038.

3. Барсуков, Г.В. Расчет контакта композитного абразива со стенками сопла, обеспечивающий снижение износа фокусирующей трубки гидроабразивной установки [Текст] / Г.В. Барсуков, В.С. Шоркин, О.Г. Кожус, Т.А. Журавлева // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2020. – №. 2. – С. 62–68.
4. Псевдооживление [Текст] / под ред. В.Г. Айнштейна, А.П. Баскакова. – М.: Химия, 1991. – 400 с.
5. Азизов Р. О., Саидов М. Х. Технологические процессы нанесения покрытий из полимерных порошковых материалов // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2014. – Т. 57. – №. 6.
6. Маковская Ю. В. Моделирование процесса инкапсуляции в псевдооживленном слое и прогнозирование качества покрытий // дисс. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. – 2011. – Т. 5. – №. 08.
7. Меньшутина, Н. В. Технологии инкапсуляции [Текст] / Н.В. Меньшутина // Фармацевтические технологии и упаковка. – 2014. – №. 5. – С. 30.
8. Азизов Р. О. и др. Разработка оборудования для термоструйного нанесения полимерных покрытий, исключающего деструкцию напыляемого материала // Известия Академии наук Республики Таджикистан. Отделение физико–математических, химических, геологических и технических наук. – 2007. – №. 2. – С. 61–72.
9. Гранатовый абразив. Технические условия. ТУ 3988–002–76245879–2011. – АО «Р–Гарнет», Москва, 2011.

**Кожус Ольга Геннадьевна**  
ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева»  
г. Орел  
вед. инж.  
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95  
Тел.: + 7 (4862) 413295  
E-mail: okozhus@mail.ru

**Барсуков Геннадий Валерьевич**  
ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева»  
г. Орел  
доктор технических наук, профессор кафедры  
машиностроения  
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95  
Тел.: + 7 (4862) 413295  
E-mail: awj@list.ru

**Шоркин Владимир Сергеевич**  
ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева»  
г. Орел  
доктор физико–математических наук, профессор,  
профессор кафедры технической физики и математики  
Тел. +7 (960) 655–00–77  
E-mail: VSorkin@yandex.ru

**Степанов Юрий Сергеевич**  
доктор технических наук, профессор,  
Тел. +7 (4862) 413295  
E-mail: yury057@yandex.ru

**Фроленкова Лариса Юрьевна**  
ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева»  
г. Орел  
доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой  
машиностроения  
Тел. +7 (910) 301–73–20  
E-mail: LaraFrolenkova@yandex.ru

---

O.G. KOZHUS, G.V. BARSUKOV, V.S. SHORKIN, Yu. S. STEPANOV, L.Yu. FROLENKOVA

## **IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE INSTALLATION FOR APPLYING THE POLYMER SHELL TO THE ABRASIVE UNDER CRITICAL TECHNOLOGICAL CONDITIONS**

**Abstract.** *The article deals with the issues of increasing the productivity of the process of applying the polymer shell to the abrasive. It is established that the performance of the abrasive encapsulation in the fluidized bed is achieved due to the selection of equipment, the type of polymer, the spray parameters and the properties of the abrasive material. The authors have developed a method for producing abrasive grain with a polymer coating using an installation that allows processing the initial particles in a fluidized bed.*

**Keywords:** *abrasive, waterjet cutting, fluidized bed, polymer coating, coating, critical modes.*

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Barsukov, G., Zhuravleva, T., & Kozhus, O. (2017, January). Increasing of efficiency of environmentally friendly technology of AWJ of a glass fiber plastic. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 50, No. 1, p. 012001). IOP Publishing.
2. Barsukov, G., T. Zhuravleva, and O. Kozhus. «Quality of Hydroabrasive Waterjet Cutting Machinability» Procedia Engineering 206 (2017): 1034–1038.

3. Barsukov G. V., Shorkin V. S., Kozhus O. G., Zhuravleva T. A. Calculation of the contact of a composite abrasive with the nozzle walls, providing a reduction in the wear of the focusing tube of a hydroabrasive installation. – 2020. – No. 2. – pp. 62–68.
4. Fluidization [Text] / ed. by V. G. Ainstein, A. P. Baskakov. – M.: Khimiya, 1991. – 400 p.
5. Azizov R. O., Saidov M. Kh. Technological processes of coating of polymer powder materials // Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan. – 2014. – Vol. 57. – No. 6.
6. Makovskaya Yu. V. Modeling of the encapsulation process in a fluidized bed and forecasting the quality of coatings. on the screen. learned. step. Candidate of Technical Sciences. – 2011. – Vol. 5. – no. 08.
7. Menshutina, N. V. Technologies of encapsulation [Text] / N. V. Menshutina // Pharmaceutical technologies and packaging. – 2014. – No. 5. – p. 30.
8. Azizov P. O. et al. Development of equipment for heat-jet application of polymer coatings, eliminating the destruction of the sprayed material // Proceedings of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan. Department of Physical and Mathematical, Chemical, Geological and Technical Sciences. – 2007. – №. 2. – Pp. 61–72.
9. Garnet abrasive. Technical conditions. TU 3988–002–76245879–2011.–JSC "R-Garnet", Moscow, 2011.

**Kozhus Olga Gennadiyevna**

Orel State University, Orel  
Leading Engineer  
302026, Orel, Komsomolskaya st, 95  
Ph.: + 7 (4862) 413295  
E-mail: okozhus@mail.ru

**Barsukov Gennady Valeryevich**

Orel State University, Orel  
Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department  
of Mechanical Engineering  
302026, Orel, Komsomolskaya st, 95  
Ph.: + 7 (4862) 413295  
E-mail: awj@list.ru

**Shorkin Vladimir Sergeevich**

Orel State University, Orel  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor,  
Professor of the Department of Technical Physics and  
Mathematics  
302026, Orel, Komsomolskaya st, 95  
Ph.: +7 (960) 655–00–77  
E-mail: VSorkin@yandex.ru

**Stepanov Yuri Sergeevich**

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Tel. +7 (4862) 413295  
E-mail: yury057@yandex.ru

**Frolenkova Larisa Yuryevna**

Orel State University, Orel  
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head.  
Department of Mechanical Engineering  
302026, Orel, Komsomolskaya st, 95  
Ph.:+7 (910) 301–73–20  
E-mail: LaraFrolenkova@yandex.ru

УДК 621.9+51–74

DOI: 10.33979/2073-7408-2021-347-3-100-106

В.И. ГОЛОВИН, С.Ю. РАДЧЕНКО

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗНОСА ИНСТРУМЕНТА НА ПАРАМЕТРЫ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ОБРАБОТКЕ ОТВЕРСТИЙ СВЕРЛЕНИЕМ

**Аннотация.** *Качество предварительных сверлильных операций напрямую зависит от устойчивости процесса обработки. В работе исследуется взаимосвязь между предельным износом инструмента и виброустойчивостью системы, которая в свою очередь зависит от ряда собственных параметров системы и условий процесса резания. Для установления указанных взаимосвязей использованы научные положения теории динамики станков, проведен анализ процессов в динамической системе при сверлении отверстий. Получено выражение износа, при достижении которого динамическая система начинает терять устойчивость.*

**Ключевые слова:** *устойчивость системы, износ инструмента, сверление, динамические параметры.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Армарего И. Дж. А., Браун Р.Х. Обработка, металлов резанием: Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1277. – 325с.

2. Григорьев В.Ф., Мурашкин С.Л. Влияние технологических параметров на виброустойчивость системы СПИД при сверлении // Повышение надежности технологических процессов изготовления изделий машиностроения: Сб. науч. трудов Кузбас. политехн. ин-та. – Кемерово, 1979. – С. 121 – 127.
3. Вульф А.М. Резание металлов. – М.: Машиностроение, 1973. – 496 с.
4. Кудинов В.А. Динамика станков. – М.: Машиностроение, 1967. – 359 с.
5. Основы теории колебаний / Под ред. В.В.Мигулина. – М.: Наука, 1978. – 392 с.
6. Попов В.И., Локтев В.И. Динамика станков. – К.: Техника, 1975. – 136 с.
7. Солодовников В.В. Статистическая динамика линейных систем автоматического управления. – М.: Физматгиз, 1960. – 656 с.
8. Смирнов В.З. Влияние износа инструмента на колебания в динамической системе станка // Изв. вузов. Машиностроение. – 1983. – № 2. – С. 153 – 155.

**Головин Василий Игоревич**

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь  
Кандидат технических наук, доцент, директор  
Политехнического института  
299000, г. Севастополь, ул. Университетская, 33  
Тел. (8692) 55-00-77  
E-mail: golovin@sevsu.ru

**Радченко Сергей Юрьевич**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
Доктор технических наук, профессор, проректор по  
научно-технологической деятельности и аттестации  
научных кадров  
302026, Орловская область, г. Орел,  
ул. Комсомольская, д. 95  
Тел. (4862) 47-50-71  
E-mail: radsu@rambler.ru

---

V.I. GOLOVIN, S.YU. RADCHENKO

**THEORETICAL RESEARCH OF THE TOOL WEAR INFLUENCE  
ON THE PARAMETERS OF THE DRILLING DYNAMIC SYSTEM**

**Abstract.** *The quality of pre-drilling operations directly depends on the stability of the mechanical process. The paper examines the relationship between the ultimate tool wear and the vibration resistance of the system, which in turn depends on a number of the system's own parameters and the conditions of the cutting process. To establish these relationships, the scientific provisions of the theory of machine tool dynamics are used, and the analysis of processes in the dynamic system when drilling holes is carried out. An expression of wear is obtained, at which the dynamic system begins to lose stability.*

**Keywords:** *system stability, tool wear, drilling, dynamic parameters.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Armarego I. Dzh. A., Braun R.H. Obrabotka, metallov rezaniem: Per. s angl. – М.: Mashinostroyeniye, 1277. – 325s.
2. Grigor'ev V.F., Murashkin S.L. Vliyaniye tekhnologicheskikh parametrov na vibroustojchivost' sistemy SPID pri sverlenii // Povysheniye nadezhnosti tekhnologicheskikh processov izgotovleniya izdelij mashinostroyeniya: Sb. nauch. trudov Kuzbas. politekhn. in-ta. – Kemerovo, 1979. – S. 121 – 127.
3. Vul'f A.M. Rezanie metallov. – M.: Mashinostroyeniye, 1973. – 496 s.
4. Kudinov V.A. Dinamika stankov. – M.: Mashinostroyeniye, 1967. – 359 s.
5. Osnovy teorii kolebaniy / Pod red. V.V.Migulina. – M.: Nauka, 1978. – 392 s.
6. Popov V.I., Loktev V.I. Dinamika stankov. – K.: Tekhnika, 1975. – 136 s.
7. Solodovnikov V.V. Statisticheskaya dinamika linejnyh sistem avtomaticheskogo upravleniya. – M.: Fizmatgiz, 1960. – 656 s.
8. Smirnov V.Z. Vliyaniye iznosa instrumenta na kolebaniya v dinamicheskoy sisteme stanka // Izv. vuzov. Mashinostroyeniye. – 1983. – № 2. – S. 153 – 155.

**Golovin Vasily Igorevich**

FGAOU VO "Sevastopol State University", Sevastopol  
Candidate of Engineering Sciences, Docent, Director of  
Polytechnic Institute.  
299000, Sevastopol, Universitetskaya str., 33  
Ph. 55-00-77  
E-mail: golovin@sevsu.ru

**Radchenko Sergey Yuryevich**

FGBOU VO «OGU im. I.S. Turgeneva», Orel  
Doctor of Engineering Sciences, Professor, Vice-rector  
for scientific and technological activities and  
certification of scientific personnel  
302026, Орловская область, г. Орел,  
ул. Комсомольская, д. 95

## **МАШИНОВЕДЕНИЕ И МЕХАТРОНИКА**

УДК 629.4.027.4: 656.2

DOI:10.33979/2073-7408-2021-347-3-107-116

О.В. ДОРОФЕЕВ, В.И. ВОРОБЬЕВ, М.И. БОРЗЕНКОВ, С.Н. ЗЛОБИН, О.В. ИЗМЕРОВ

### **МЕТОДЫ БЕЗЫНЕРЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ СВОЙСТВАМИ УЗЛОВ ЭКИПАЖА ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА**

**Аннотация.** *Представлены результаты исследования методов развития конструкции экипажа железнодорожных локомотивов с использованием безынерционного управления свойствами узлов и деталей. Для улучшения динамических свойств тягового привода и оптимизации режимов его работы путем безынерционного регулирования могут быть использованы такие физические эффекты, как изменение коэффициента трения путем воздействия электрического тока или магнитного поля на зону контакта пар трения. Использование принципа безынерционного регулирования для оптимизации свойств узлов, влияющих на динамические свойства экипажа, позволило получить ряд патентов, предложенных авторами.*

**Ключевые слова:** *тяговый привод локомотива, экипажная часть локомотива, динамика, коэффициент сцепления, физические эффекты, теория управления.*

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Кибернетические аспекты методов синтеза электромеханических систем: монография / О.В. Измеров [и др.]; под ред. академика Академии электротехн. наук Рос. Федерации, д-ра техн. наук, проф. А.С. Космодамианского. – Орел: Госуниверситет – УНПК, 2015. – 234 с.
2. Пат. 156444 Российская Федерация, МПК В61С 15/08. Устройство для предотвращения буксования локомотива / Воробьев В.И., Антипин Д.Я., Пугачев А.А., Измеров О.В., Бондаренко Д.А., Корчагин В.О.; опубл. 10.11.2015, Бюл. № 31.
3. Пат. 161336 Российская Федерация, МПК В61С 15/08. Устройство для предотвращения буксования локомотива / Воробьев В.И., Антипин Д.Я., Измеров О.В., Пугачев А.А., Бондаренко Д.А., Новиков А.С.; опубл. 20.04.2016, Бюл. № 11.
4. Автоколебательные процессы в транспортных системах: монография / Воробьев В.И., Дорофеев О.В., Измеров О.В., Борзенков М.И., Пугачев А.А., Злобин С.Н., Копылов С.О. – Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2016. – 127 с.
5. Пат. 2529066 Российская Федерация, В61F5/06, В61G11/14, F16F11/00. Фрикционный гаситель колебаний / Луков Н.М., Ромашкова О.Н., Космодамианский А.С., Попов Ю.В., Стрекалов Н.Н., Серин С.А., Измеров О.В., Михальченко Г.С., Воробьев В.И., Пугачев А.А., Новиков В.Г.; опубл. 27.09.2014.
6. Пат. 2586435 Российская Федерация, F16F7/08, В61F5/12. Фрикционный гаситель колебаний. / В.Г. Новиков, О.В. Измеров, В.И. Воробьев, А.А. Пугачев, Д.А. Бондаренко, А.С. Новиков, А.А. Борисов, В.Н. Козловский; опубл. 10.06.2016.
7. Пат. 2587195 Российская Федерация, В61F5/12, F16F7/08. Фрикционный гаситель колебаний / Воробьев В.И., Измеров О.В., Новиков В.Г., Пугачев А.А., Бондаренко Д.А., Михальченко Г.С., Новиков А.С., Борисов А.А., Козловский В.Н.; опубл. 20.06.2016.
8. Пат. 153297 Российская Федерация, МПК В61F5/12. Дисковый фрикционный гаситель колебаний / Волохов С.Г., Пугачев А.А., Борзенков М.И., Злобин С.Н., Дорофеев О.В., Измеров О.В., Воробьев В.И.; опубл. 10.12.2014.
9. Пат. 2529305 Российская Федерация, В61F5/14, В61F5/24. Боковая опора кузова на тележку / Луков Н.М., Ромашкова О.Н., Космодамианский А.С., Попов Ю.В., Стрекалов Н.Н., Серин С.А., Михальченко Г.С., Измеров О.В., Воробьев В.И., Пугачев А.А.; опубл. 27.09.2014.
10. Пат. 156680 Российская Федерация, МПК В61F 5/14. Боковая опора кузова на тележку / Воробьев В.И., Антипин Д.Я., Новиков В.Г., Пугачев А.А., Бондаренко Д.А., Измеров О.В.; опубл. 10.11.2015, Бюл. № 31.
11. Пат. 156950 Российская Федерация, МПК В61F 5/14. Боковая опора кузова на тележку / Воробьев В.И., Михальченко Г.С., Измеров О.В., Новиков В.Г., Пугачев А.А., Бондаренко Д.А., Авдащенко В.С., Козловский В.Н. Опубл. 20.11.2015, Бюл. № 32.
12. Пат. 156447 Российская Федерация, МПК В61F 5/24. Устройство для управления наклоном кузова железнодорожного транспортного средства / Воробьев В.И., Антипин Д.Я., Измеров О.В., Михальченко Г.С., Бондаренко Д.А.. Опубл. 10.11.2015, бюл. № 31.

**Дорофеев Олег Васильевич**  
Орловский государственный  
университет имени И.С.  
Тургенева, г. Орел  
Кандидат технических наук,  
доцент,  
директор Бизнес-парка  
E-mail: da\_shy@inbox.ru

**Воробьев Владимир Иванович**  
Брянский государственный  
технический университет, г.  
Брянск  
Кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Подвижной  
состав железных дорог»  
E-mail: vladimvorobiev@yandex.ru

**Борзенков Михаил Иванович**  
Орловский государственный  
университет имени И.С.  
Тургенева, г. Орел  
Кандидат технических наук,  
доцент, начальник отдела научных  
изданий  
E-mail: bim5155@yandex.ru

**Злобин Сергей Николаевич**  
Орловский государственный  
университет имени И.С.  
Тургенева, г. Орел  
Кандидат технических наук,  
доцент кафедры машиностроения  
E-mail: zsn2@rambler.ru

**Измеров Олег Васильевич**  
Брянский государственный  
технический университет, г.  
Брянск  
Соискатель по кафедре  
«Подвижной состав железных  
дорог»  
E-mail: izmerov@yandex.ru

---

O.V. DOROFEEV, V.I. VOROBYEV, M.I. BORZENKOV, S.N. ZLOBIN, O.V. IZMEROV

## METHODS FOR INERTIA-FREE CONTROL OF NODE PROPERTIES VEHICLE CREW

**Abstract.** *The results of the study of methods for the development of the construction of the crew of railway locomotives using inertialess control of the properties of units and parts are presented. To improve the dynamic properties of the traction drive and optimize the modes of its operation by means of inertialess control, such physical effects as a change in the friction coefficient by the action of an electric current or a magnetic field on the contact zone of friction pairs can be used. The use of the principle of inertialess control to optimize the properties of nodes that affect the dynamic properties of the crew, has made it possible to obtain a number of patents proposed by the authors.*

**Keywords:** *traction drive of a locomotive, undercarriage of a locomotive, dynamics, coefficient of adhesion, physical effects, control theory.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Cybernetic aspects of methods of synthesis of electromechanical systems: monograph / O.V. Izmerov [and others]; ed. Academician of the Academy of Electrical Engineering. Sciences Ros. Federation, Dr. Sciences, prof. A.S. Cosmodamiansky. – Oryol: State University – UPPK, 2015.— 234 p.
2. Pat. 156444 Russian Federation, IPC B61C 15/08. Device for preventing locomotive slipping / Vorobyov V.I., Antipin D.Ya., Pugachev A.A., Izmerov O.V., Bondarenko D.A., Korchagin V.O.; publ. 10.11.2015, Bul. No. 31.
3. Pat. 161336 Russian Federation, IPC B61C 15/08. Device for preventing locomotive slipping / Vorobyov V.I., Antipin D.Ya., Izmerov O.V., Pugachev A.A., Bondarenko D.A., Novikov A.S.; publ. 04/20/2016, Bul. No. 11.
4. Autooscillatory processes in transport systems: monograph / Vorobyov VI, Dorofeev OV, Izmerov OV, Borzenkov MI, Pugachev AA, Zlobin SN, Kopylov S.O.... – Oryol: OSU im. I.S. Turgeneva, 2016.— 127 p.
5. Pat. 2529066 Russian Federation, B61F5 / 06, B61G11 / 14, F16F11 / 00. Frictional vibration damper / Lukov N.M., Romashkova O.N., Kosmodamiansky A.S., Popov Yu.V., Strekalov N.N., Serin S.A., Izmerov O.V., Mikhilchenko G.S., Vorobyov V.I., Pugachev A.A., Novikov V.G.; publ. 09/27/2014.
6. Pat. 2586435 Russian Federation, F16F7 / 08, B61F5 / 12 Friction damper. / V.G. Novikov, O.V. Izmerov, V.I. Vorobiev, A.A. Pugachev, D.A. Bondarenko, A.S. Novikov, A.A. Borisov, V.N. Kozlovsky; publ. 10.06.2016.
7. Pat. 2587195 Russian Federation, B61F5 / 12, F16F7 / 08. Frictional vibration damper / Vorobiev V.I., Izmerov O.V., Novikov V.G., Pugachev A.A., Bondarenko D.A., Mikhilchenko G.S., Novikov A.S., Borisov A.A., Kozlovsky V.N.; publ. 06/20/2016.
8. Pat. 153297 Russian Federation, IPC B61F5 / 12. Disc frictional vibration damper / Volokhov SG, Pugachev AA, Borzenkov MI, Zlobin SN, Dorofeev OV, Izmerov OV, Vorobiev VI; publ. 10.12.2014.
9. Pat. 2529305 Russian Federation, B61F5 / 14, B61F5 / 24. Side support of the body on the bogie / Lukov N.M., Romashkova O.N., Kosmodamiansky A.S., Popov Yu.V., Strekalov N.N., Serin S.A., Mikhilchenko G.S., Izmerov O.V., Vorobyov V.I., Pugachev A.A.; publ. 09/27/2014.
10. Pat. 156680 Russian Federation, IPC B61F 5/14. Side support of the body on the bogie / Vorobyov V.I., Antipin D.Ya., Novikov V.G., Pugachev A.A., Bondarenko D.A., Izmerov O.V.; publ. 10.11.2015, Bul. No. 31.
11. Pat. 156950 Russian Federation, IPC B61F 5/14. Side support of the body on the bogie / Vorobyev V.I., Mikhilchenko G.S., Izmerov O.V., Novikov V.G., Pugachev A.A., Bondarenko D.A., Avdashchenko V.S., Kozlov– V.N. Publ. 20.11.2015, Bul. No. 32.

12. Pat. 156447 Russian Federation, IPC B61F 5/24. A device for controlling the tilt of the body of a railway vehicle / Vorobyov V.I., Antipin D.Ya., Izmerov O.V., Mikhilchenko G.S., Bondarenko D.A. Publ. 10.11.2015, bul. No. 31.

**Dorofeev Oleg Vasilevich**  
Orel State university, Orel  
Candidate of technical sciences,  
Associate Professor at the  
Department of "Mechanical  
engineering"  
E-mail: olegdor57@gmail.com

**Vorobyev Vladimir Ivanovich**  
Bryansk State Technical University,  
Bryansk  
Candidate of Engineering Sciences,  
Associate Professor at the Department  
of «Railroad rolling stock»  
E-mail: vladimvorobiev@yandex.ru

**Borzenkov Mikhail Ivanovich**  
Orel State university, Orel  
Candidate of technical sciences,  
Associate Professor, head of the  
department of scientific publications  
E-mail: bim5155@yandex.ru

**Zlobin Sergey Nikolaevich**  
Orel State university, Orel  
Candidate of technical sciences,  
Associate Professor at the  
Department of "Mechanical  
engineering"  
E-mail: zsn2@rambler.ru

**Izmerov Oleg Vasilevich**  
Bryansk State Technical University,  
Bryansk  
Competitor of the Department  
«Railroad rolling stock»  
E-mail: izmerov@yandex.ru

УДК 62–932.2

DOI: 10.33979/2073-7408-2021-347-3-117-130

А.А. ХВОСТОВ, О.Р. ДОРНЯК, А.А. ЖУРАВЛЕВ, Е.А. ТАТАРЕНКОВ, О.А. ТКАЧЕВ

## ТЕРМОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ ВАЛКОВОЙ ФОРМУЮЩЕЙ МАШИНЫ КОНДИТЕРСКОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ CFD-ПОДХОДА

**Аннотация.** На основании уравнений сохранения массы, энергии и импульса составлена математическая модель установившегося неизотермического ламинарного течения нелинейно-вязкой среды в зазоре между двумя вращающимися валками формующей машины кондитерского производства. В качестве реологического уравнения использована модифицированная четырехпараметрическая модель Карро, в которую включена температурная поправка к вязкости. Модель учитывает геометрические параметры валкового зазора формующей машины, кинематические режимы ее работы, реологические и теплофизические параметры конфетной массы и их температурные зависимости. С использованием вычислительного пакета мультифизического моделирования Comsol Multiphysics проведен вычислительный эксперимент, позволивший оценить поля температур, скорости и вязкости конфетной массы, характеризующие протекание гидродинамических и теплообменных процессов при формировании конфетных масс на валковых машинах. Установлено, что при определенном кинематическом режиме работы формующей машины в межвалковом зазоре образуется область циркуляционного течения со значительными и разнонаправленными сдвиговыми деформациями, что позволяет использовать валковые машины для смешивания, пластификации и диспергирования.

**Ключевые слова:** степенной закон Оствальда–де Вилля, модель Карро, валковый зазор, вычислительная гидродинамика, CFD-модель, формирование, циркуляционное течение.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев А.Н. Ресурсосбережение как основа совершенствования технологий и аппаратов в производстве хлебобулочных изделий / А.Н. Андреев, Г.В. Алексеев // Хлебопродукты. – 2010. – № 3. С. 52 – 54.
2. Антипов С.Т. Инновационное развитие техники пищевых технологий / С.Т. Антипов, А.В. Журавлев, Д.А. Казарцев, А.Г. Мордасов и др.; под ред. акад. РАН В.А. Панфилова. – СПб.: Издательство «Лань», 2016. – 660 с.
3. Березовский Ю.М. Формирование структур пищевых масс и формирование готовых изделий / Ю.М. Березовский, В.Н. Андреев. – Москва: ООО «НИПКЦ Восход-А», 2017. – 162 с.
4. Мачихин Ю.А. Формование пищевых масс / Ю.А. Мачихин, Г.К. Берман, Ю.В. Клаповский. – М.: Колос, 1992. – 271 с.
5. Андреев А.Н. Математическое моделирование течения неньютоновской жидкости в зазоре вращающихся валков и методика расчёта энергосиловых параметров раскатки теста / А.Н. Андреев // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: «Процессы и аппараты пищевых производств», 2011. – № 2. – С. 64 – 74.
6. Клинов А.С. Автоматизированное проектирование валковых машин для переработки полимерных материалов / А.С. Клинов, М.В. Соколов, В.И. Кочетов, П.С. Беляев, В.Г. Однолько. – М.: «Издательство Машиностроение-1», 2005. – 320 с.

7. Шаповалов В.М. Валковые течения неньютоновских жидкостей / В.М. Шаповалов. – Москва: Физматлит, 2011. – 168 с.
8. Воскресенский А.М. Каландрование полимеров. Компьютерные модели / А.М. Воскресенский. – СПб.: СПбГИ (ТУ), 2008. – 92 с.
9. Харитонов В.Н. Валковое течение жидкости Оствальда–де Вилия при значительной фрикции / В.Н. Харитонов, В.М. Шаповалов // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом–Алейхема, 2016. – № 4(25). – С. 87 – 91.
10. Litvinov K.V. Modelling of Non-isothermal Flow Abnormally Viscous Fluid in the Channels with Various Geometry of Boundaries. Modeling and Analysis of Information Systems. 2016;23(3):326–333. (In Russ.) <https://doi.org/10.18255/1818-1015-2016-3-326-333>.
11. Воскресенский А.М. Компьютерная модель каландрования листовых термопластов с высоким размерным качеством / А.М. Воскресенский, Г.В. Сыкалов, А.А. Пантелеев // Известия Санкт–Петербургского государственного технологического института (технического университета), 2014. – № 25 (51). – С. 56 – 61.
12. Кирсанов Е.А. Неньютоновское поведение структурированных систем / Е.А. Кирсанов, В.Н. Матвеев. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016. – 384 с.
13. Муратова Е.И. Реология кондитерских масс: монография / Е. И. Муратова, П. М. Смолихина. – Тамбов: ТГТУ, 2013. – 187 с.
14. Шульман З.П. Конвективный теплоперенос реологически сложных жидкостей. М: Энергия. 1975. 352с.
15. Polymer rheology fundamentals and applications by Osswald, Tim A. Rudolph, Natalie (2015).
16. Rheology of Fluid, Semisolid, and Solid Foods Principles and Applications by M. Anandha Rao (2014).
17. Шаповалов В.М. Влияние реологической модели на решение задачи диссипативного разогрева неньютоновской жидкости / В.М. Шаповалов // Энерго– и ресурсосбережение: промышленность и транспорт, 2017. – № 1 (18). – С. 50 – 53.
18. Красников Г.Е. Моделирование физических процессов с использованием пакета Comsol Multiphysics / Г.Е. Красников, О.В. Нагорнов, Н.В. Старостин. – М.: НИЯУ МИФИ, – 2012. – 184 с.
19. Пашенко Д.И. CFD–моделирование характеристик парового эжектора для разогрева нефти и нефтепродуктов ANSYS / Д.И. Пашенко, И.С. Наплеков // Экспозиция Нефть Газ, 2018. – № 2(62). – С. 54 – 56.
20. Алексеев В.С. Применение программного комплекса Comsol Multiphysics для моделирования процесса сушки влажных капиллярно–пористых материалов / В.С. Алексеев // Вопросы электротехнологии, 2015. – № 1(6). – С. 10 – 15.
21. Математическое моделирование гидродинамики и теплообмена в движущих жидкостях [Текст]: монография / И. В. Кудинов [и др.]; под ред. Э. М. Карташова. – СПб: Лань, 2014. – 208 с.

**Хвостов Анатолий Анатольевич**  
ФГБОУ ВО «Воронежский  
государственный технический  
университет», доктор технических  
наук, профессор, кафедра  
прикладной математики и  
механики  
394026, г. Воронеж, Московский  
пр., 14  
Тел. +7 (473) 207–22–20  
E–mail: Khvtol1974@yandex.ru

**Дорняк Ольга Роальдовна**  
ФГБОУ ВО "Воронежский  
государственный  
лесотехнический университет  
им. Г.Ф. Морозова"  
доктор технических наук,  
доцент, кафедра  
электротехники, теплотехники  
и гидравлики  
394087, г. Воронеж, ул.  
Тимирязева, д.8  
Тел. +7 (473) 253–78–47  
E–mail: ordornyak@mail.ru

**Журавлев Алексей Александрович**  
ВУНЦ ВВС «Военно–воздушная  
академия имени профессора Н.Е.  
Жуковского и Ю.А. Гагарина»  
кандидат технических наук, доцент,  
кафедра 206 математики  
394064, г. Воронеж, ул. Старых  
Большевиков, 54а Тел. (473) 244–78–  
30  
E–mail: zhuraa1@rambler.ru

**Татаренков Евгений Анатольевич**  
ВУНЦ ВВС «Военно–воздушная  
академия имени профессора Н.Е.  
Жуковского и Ю.А. Гагарина»  
кандидат технических наук,  
преподаватель, кафедра 208  
общепрофессиональных  
дисциплин  
394064, г. Воронеж, ул. Старых  
Большевиков, 54а Тел. (473) 244–  
78–30  
E–mail: tea\_86@mail.ru

**Ткачев Олег Александрович**  
ВУНЦ ВВС «Военно–  
воздушная академия имени  
профессора Н.Е. Жуковского и  
Ю.А. Гагарина»  
кандидат технических наук,  
преподаватель, кафедра 208  
общепрофессиональных  
дисциплин  
394064, г. Воронеж, ул.  
Старых Большевиков, 54а Тел.  
(473) 244–78–30  
E–mail: tkachinyan@bk.ru



## THERMOHYDRODYNAMIC ANALYSIS OF THE WORK ROLL FORMING MACHINE CONFECTIONERY PRODUCTION BASED ON THE CFD APPROACH

**Abstract.** *On the basis of the equations of conservation of mass, energy and momentum, a mathematical model of the steady non-isothermal laminar flow of a nonlinear viscous medium in the gap between two rotating rolls of the forming machine of confectionery production is compiled. As a rheological equation, a modified four-parameter Carro model is used, which includes a temperature correction to the viscosity. The model takes into account the geometric parameters of the roll gap of the forming machine, the kinematic modes of its operation, the rheological and thermophysical parameters of the candy mass and their temperature dependences. A computational experiment was carried out using the Comsol Multiphysics multiphysics computational modeling package, which made it possible to estimate the temperature, velocity, and viscosity fields of the candy mass that characterize the flow of hydrodynamic and heat exchange processes during the molding of candy masses on roller machines. It is established that at a certain kinematic mode of operation of the rolls in the inter-roll gap, a region of circulating flow with significant and multidirectional shear deformations is formed, which allows the use of roll machines for mixing, plasticizing and dispersing.*

**Keywords:** *Ostwald-de Ville power law, Carreau model, roll gap, computational fluid dynamics, CFD-model, forming, circulation flow.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Andreev A.N. Resursosberezhenie kak osnova sovershenstvovaniya tekhnologij i appa-ratov v proizvodstve hlebobulochnyh izdelij / A.N. Andreev, G.V. Alekseev // Hleboprodukty. – 2010. – № 3. S. 52 – 54.
2. Antipov S.T. Innovacionnoe razvitie tekhniki pishchevyh tekhnologij / S.T. Antipov, A.V. Zhuravlev, D.A. Kazar-cev, A.G. Mordasov i dr.; pod red. akad. RAN V.A. Panfilova. – SPb.: Izdatel'stvo «Lan», 2016. – 660 s.
3. Berezovskij Yu.M. Formirovanie struktur pishchevyh mass i formovanie gotovyh izdelij / Yu.M. Berezovskij, V.N. Andreev. – Moskva: OOO «NIPKC Voskhod-A», 2017. – 162 s.
4. Machihin Yu.A. Formovanie pishchevyh mass / Yu.A. Machihin, G.K. Berman, Yu.V. Klapovskij. – M.: Kolos, 1992. – 271 s.
5. Andreev A.N. Matematicheskoe modelirovanie techeniya nen'yutonovskoj zhidkosti v zazore vrashchayu-shchihsya valkov i metodika raschyota energosilovyh parametrov raskatki testa / A.N. Andreev // Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Seriya: «Processy i apparaty pishchevyh proizvodstv», 2011. – № 2. – S. 64 – 74.
6. Klinkov A.S. Avtomatizirovannoe proektirovanie valkovykh mashin dlya pererabotki polimernykh materialov / A.S. Klinkov, M.V. Sokolov, V.I. Kochetov, P.S. Belyaev, V.G. Odnol'ko. – M.: «Izdatel'stvo Mashinostroenie-1», 2005. – 320 s.
7. Shapovalov V.M. Valkovye techeniya nen'yutonovskikh zhidkostej / V.M. Shapovalov. – Moskva: Fiz-matlit, 2011. – 168 s.
8. Voskresenskij A.M. Kalandrovanie polimerov. Komp'yuternye modeli / A.M. Voskresenskij. – SPb.: SPbGTI (TU), 2008. – 92 c.
9. Haritonov V.N. Valkovoe techenie zhidkosti Ostval'da-de Vilya pri znachitel'noj frikcii / V.N. Haritonov, V.M. Shapovalov // Vestnik Priamurskogo gosudarstvennogo universiteta im. Sholom-Alejhema, 2016. – № 4(25). – S. 87 – 91.
10. Litvinov K.V. Modelling of Non-isothermal Flow Abnormally Viscous Fluid in the Channels with Various Geometry of Boundaries. Modeling and Analysis of Information Systems. 2016;23(3):326–333. (In Russ.) <https://doi.org/10.18255/1818-1015-2016-3-326-333>.
11. Voskresenskij A.M. / A.M. Voskresenskij, G.V. Sykalov, A.A. Panteleev / Komp'yuternaya model' kalandrovaniya listovykh termoplastov s vysokim razmernym kachestvom // Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta), 2014. – № 25 (51). – S. 56 – 61.
12. Kirsanov E.A. Nen'yutonovskoe povedenie strukturirovannykh sistem / E.A. Kirsanov, V.N. Matveenko. – M.: TEHNOSFERA, 2016. – 384 s.
13. Muratova E.I. Reologiya konditerskikh mass: monografiya / E. I. Muratova, P. M. Smolihina. – Tambov: TGTU, 2013. – 187 s.
14. Shulman Z.P. Convective heat and mass transfer of rheologically complex fluids. M: Energia. 1975. 352 S.
15. Polymer rheology fundamentals and applications by Osswald, Tim A. Rudolph, Natalie (2015).
16. Rheology of Fluid, Semisolid, and Solid Foods Principles and Applications by M. Anandha Rao (2014).
17. Shapovalov V.M. Vliyanie reologicheskoy modeli na reshenie zadachi dissipativnogo razonreva nen'yutonovskoj zhidkosti / V.M. Shapovalov // Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport, 2017. – № 1 (18). – S. 50 – 53.
18. Krasnikov G.E. Modelirovanie fizicheskikh processov s ispol'zovaniem paketa Comsol Multiphysics / G.E. Krasnikov, O.V. Nagornov, N.V. Starostin. – M.: NIYaU MIFI, – 2012. – 184 s.
19. Pashchenko D.I. CFD-modelirovanie harakteristik parovogo ezhektora dlya razogreva nefi i nefteproduktov ANSYS / D.I. Pashchenko, I.S. Naplekov // Ekspozitsiya Neft' Gaz, 2018. – № 2(62). – S. 54 – 56.

20. Alekseev V.S. Primenenie programmnoy kompleksa Comsol Multiphysics dlya modelirovaniya pro-cessa sushki vlazhnykh kapillyarno-poristyykh materialov / V.S. Alekseev // Voprosy elektrotekhnologii, 2015. – № 1(6). – S. 10 – 15.

21. Matematicheskoe modelirovanie gidrodinamiki i teploobmena v dvizhushchih zhidkostyah [Tekst]: monografiya / I. V. Kudinov [i dr.]; pod red. E. M. Kartashova. – SPb: Lan', 2014. – 208 s.

**Khvostov Anatoly Anatolievich**  
Voronezh State Technical University  
Doctor of Technical Sciences,  
Professor, Department of Applied  
Mathematics and Mechanics  
394026, Voronezh, Moskovsky av.,  
14,  
Тел. +7 (473) 207–22–20  
E-mail: Khvtol1974@yandex.ru

**Dorniyak Olga Roal'dovna**  
Voronezh State University of  
Forestry and Technologies named  
after G.F. Morozov  
Doctor of Technical Sciences,  
assistant professor, Department of  
electrical engineering, heat  
engineering and hydraulics  
394087, Voronezh, Timiryazeva Str.,  
8,  
Тел. +7 (473) 253–78–47  
E-mail: ordorniyak@mail.ru

**Zhuravlev Alexey Alexandrovich**  
Military Training and Research  
Center of the Air Force «Air Force  
Academy ft. Professor N.E.  
Zhukovsky and Y.A. Gagarin»  
Candidate of Engineering Sciences,  
assistant professor, Department of  
Math  
394064, Voronezh, Staryh  
Bol'shevikov Street, 54a Phone:  
(473) 244–78–30  
E-mail: zhuraa1@rambler.ru

**Tatarenkov Evgeny Anatolievich**  
Military Training and Research  
Center of the Air Force «Air Force  
Academy ft. Professor N.E.  
Zhukovsky and Y.A. Gagarin»  
Candidate of Engineering Sciences,  
teacher, Department of General  
Professional Disciplines  
394064, Voronezh, Staryh  
Bol'shevikov Street, 54a Phone:  
(473) 244–78–30  
E-mail: tea\_86@mail.ru

**Tkachev Oleg Alexandrovich**  
Military Training and Research  
Center of the Air Force «Air Force  
Academy ft. Professor N.E.  
Zhukovsky and Y.A. Gagarin»  
Candidate of Engineering Sciences,  
teacher, Department of General  
Professional Disciplines  
394064, Voronezh, Staryh  
Bol'shevikov Street, 54a Phone:  
(473) 244–78–30  
E-mail: tkachinyan@bk.ru

УДК 612.117

DOI: 10.33979/2073-7408-2021-347-3-131-138

Е.П. КОРНАЕВА, С.Г. ПОПОВ, И.Н. СТЕБАКОВ, В.В. ДРЁМИН, Д.Д. СТАВЦЕВ

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ**

**Аннотация.** Работа посвящена разработке экспериментальной установки для исследования кинематических характеристик физиологических жидкостей. Представлена программно-аппаратная составляющая основных частей экспериментальной установки. Приведены результаты тестирования установки с определением движения частиц внутри канала с жидкостью методом лазерной спекл-контрастной визуализации.

**Ключевые слова:** реология, измерение вязкости, физиологические жидкости, лазерная спекл-контрастная визуализация.

*Работа подготовлена в рамках выполнения проекта РНФ №20–79–00332 «Математические модели и инструментальные средства анализа свойств физиологических жидкостей». Авторы выражают благодарность фонду за оказанную поддержку.*

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Xu J. Phase-field model of vascular tumor growth: Three-dimensional geometry of the vascular network and integration with imaging data / J. Xu, G. Vilanova, H. Gomez // Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. – Vol. 359. – 2020. – P. 1 – 19.

2. Semenov A. N. Applying Methods of Diffuse Light Scattering and Optical Trapping for Assessing Blood Rheological Parameters: Erythrocytes Aggregation in Diabetes Mellitus / Semenov A. N., Lugovtsov A. E., Lee K., Fabrichnova A. A., Kovaleva Yu. A., Priezzhev A. V. // Izv. Saratov Univ. (N.S.), Ser. Physics. – 2017. – Vol. 17. – Iss. 2. – P. 85–97 (in Russian). DOI: 10.18500/1817–3020–2017–17–2–85–97.

3. Yeow N. Atomic force microscopy: From red blood cells to immunohaematology / N. Yeow, R. Tabor, G. Garnier // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2017. Vol. 249. – P. 149–162. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cis.2017.05.011>
4. Dremmin V.V., Zhrebtsov E.A., Makovik I.N., Kozlov I.O., Sidorov V.V., Krupatkin A.I., Dunaev A.V., Rafailov I.E., Litvinova K.S., Sokolovski S.G., Rafailov E.U. Laser Doppler flowmetry in blood and lymph monitoring, technical aspects and analysis, *Proc. SPIE* 10063, 2017, 1006303.
5. Stavtsev D.D. Investigation of blood microcirculation parameters in patients with rheumatic diseases by videocapillaroscopy and laser Doppler flowmetry during cold pressor test / D.D. Stavtsev, M.V. Volkov, N.B. Margaryants, A.V. Potemkin, V.V. Dremmin, et al. // *Proceedings of SPIE*. – 2019. – Vol. 11065. – P. 110650T.
6. Potapova E., Seryogina E., Dremmin V., Stavtsev D., Kozlov I., Zhrebtsov E., Mamoshin A., Ivanov Yu., Dunaev A. Laser speckle contrast imaging of blood microcirculation in pancreatic tissues during laparoscopic interventions, *Quantum Electronics*, 2020, 50 (1):33
7. Kornaeva, E. Theoretical premises of a vibro-inertial method of viscosity measurement / E. Kornaeva, A. Kornaeva, L. Savin, A. Galichev, A. Babin // *Vibroengineering Procedia*. – 2016. – Vol. 8. – Pp. 440 – 445.
8. A. A. Süzen, B. Duman, B. Şen. Benchmark Analysis of Jetson TX2, Jetson Nano and Raspberry PI using Deep-CNN // 2020 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA), Ankara, Turkey. – 2020. – C. 1–5.
9. NVidia Jetson Nano Datasheet // [nvidia.com URL:https://developer.download.nvidia.com/assets/embedded/secure/jetson/Nano/docs/JetsonNano\\_DataSheet\\_DS09366001v1.0.pdf?](https://developer.download.nvidia.com/assets/embedded/secure/jetson/Nano/docs/JetsonNano_DataSheet_DS09366001v1.0.pdf) (дата обращения: 15.03.2021).
10. Datasheet – Production Data STM32G071x8/xB // <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32g071kb.pdf> (дата обращения: 15.03.2021)
11. General-purpose timer cookbook for STM32 microcontrollers // [https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application\\_note/group0/91/01/84/3f/7c/67/41/3f/DM00236305/files/DM00236305.pdf](https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/group0/91/01/84/3f/7c/67/41/3f/DM00236305/files/DM00236305.pdf) (дата обращения: 15.03.2021)

#### **Корнаева Елена Петровна**

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орел  
кандидат физико-математических наук, доцент  
кафедры информационных систем и цифровых технологий  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел. 8 (4862) 41 98 49  
E-mail: lenoks\_box@inbox.ru

#### **Попов Сергей Георгиевич**

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орел  
аспирант, младший научный сотрудник НОЦ  
Интеллектуальных технологий мониторинга и  
диагностики энергогенерирующего оборудования  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел. 8 906 568 65–01  
E-mail: sg.popov@pm.me

#### **Стебаков Иван Николаевич**

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орел  
аспирант, стажер-исследователь НОЦ  
Интеллектуальных технологий мониторинга и  
диагностики энергогенерирующего оборудования  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел. 8 953 618 08–66  
E-mail: chester50796@yandex.ru

#### **Дрёмин Виктор Владимирович**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
Кандидат технических наук, научный сотрудник  
Научно-технологического центра биомедицинской  
фотоники  
302020, Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел.: +7–953–612–77–13  
E-mail: dremmin\_viktor@mail.ru

#### **Ставец Дмитрий Дмитриевич**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
Ассистент кафедры приборостроения, метрологии и  
сертификации, стажер-исследователь Научно-  
технологического центра биомедицинской фотоники  
302020, Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел.: +7–953–611–80–23  
E-mail: stavtsev.dmitry@gmail.com

---

I.N. KORNAEVA, S.G. STEBAKOV, E.P. POPOV, V.V. DREMIN, D.D. STAVTSEV

## **THE TEST RIG FOR STUDYING THE RHEOLOGICAL PROPERTIES OF PHYSIOLOGICAL FLUIDS**

**Abstract.** This article presents the results of work on the rig for studying the rheological properties of physiological fluids. The hardware and software components of the test rig is described. The test results of the fluid flow detection in the capillary were obtained on the basis of the laser speckle contrast visualization method.

**Keywords:** rheology, viscosity measurement, test rig, physiological fluids, laser speckle contrast imaging.

## BIBLIOGRAPHY

1. Xu J. Phase-field model of vascular tumor growth: Three-dimensional geometry of the vascular network and integration with imaging data / J. Xu, G. Vilanova, H. Gomez // *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* – Vol. 359. – 2020. – P. 1 – 19.
2. Semenov A. N. Applying Methods of Diffuse Light Scattering and Optical Trapping for Assessing Blood Rheological Parameters: Erythrocytes Aggregation in Diabetes Mellitus / Semenov A. N., Lugovtsov A. E., Lee K., Fabrichnova A. A., Kovaleva Yu. A., Priezzhev A. V. // *Izv. Saratov Univ. (N.S.), Ser. Physics.* – 2017. – Vol. 17. – Iss. 2. – P. 85–97 (in Russian). DOI: 10.18500/1817-3020-2017-17-2-85-97.
3. Yeow N. Atomic force microscopy: From red blood cells to immunohaematology / N. Yeow, R. Tabor, G. Garnier // *Advances in Colloid and Interface Science.* – 2017. Vol. 249. – P. 149–162. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cis.2017.05.011>
4. Dremine V.V., Zherebtsov E.A., Makovik I.N., Kozlov I.O., Sidorov V.V., Krupatkin A.I., Dunaev A.V., Rafailov I.E., Litvinova K.S., Sokolovski S.G., Rafailov E.U. Laser Doppler flowmetry in blood and lymph monitoring, technical aspects and analysis, *Proc. SPIE* 10063, 2017, 1006303.
5. Stavtsev D.D. Investigation of blood microcirculation parameters in patients with rheumatic diseases by videocapillaroscopy and laser Doppler flowmetry during cold pressor test / D.D. Stavtsev, M.V. Volkov, N.B. Margaryants, A.V. Potemkin, V.V. Dremine, et al. // *Proceedings of SPIE.* – 2019. – Vol. 11065. – P. 110650T
6. Potapova E., Seryogina E., Dremine V., Stavtsev D., Kozlov I., Zherebtsov E., Mamoshin A., Ivanov Yu., Dunaev A. Laser speckle contrast imaging of blood microcirculation in pancreatic tissues during laparoscopic interventions, *Quantum Electronics*, 2020, 50 (1):33
7. Kornaeva, E. Theoretical premises of a vibro-inertial method of viscosity measurement / E. Kornaeva, A. Kornaeve, L. Savin, A. Galichev, A. Babin // *Vibroengineering Procedia.* – 2016. – Vol. 8. – Pp. 440 – 445.
8. A. A. Süzen, B. Duman, B. Şen. Benchmark Analysis of Jetson TX2, Jetson Nano and Raspberry PI using Deep-CNN // 2020 International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA), Ankara, Turkey. – 2020. – C. 1–5.
9. NVidia Jetson Nano Datasheet // [nvidia.com URL:https://developer.download.nvidia.com/assets/embedded/secure/jetson/Nano/docs/JetsonNano\\_DataSheet\\_DS09366001v1.0.pdf](https://developer.download.nvidia.com/assets/embedded/secure/jetson/Nano/docs/JetsonNano_DataSheet_DS09366001v1.0.pdf)? (дата обращения: 15.03.2021).
10. Datasheet – Production Data STM32G071x8/xB // <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32g071kb.pdf> (дата обращения: 15.03.2021)
11. General-purpose timer cookbook for STM32 microcontrollers // [https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application\\_note/group0/91/01/84/3f/7c/67/41/3f/DM00236305/files/DM00236305.pdf](https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/group0/91/01/84/3f/7c/67/41/3f/DM00236305/files/DM00236305.pdf) (дата обращения: 15.03.2021)

### **Kornaeva Elena Petrovna**

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel  
Candidate of Sciences, Associate Professor at the  
Department of Information Systems and Digital  
Technologies,  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
Ph. 8 (4862) 41 98 49  
E-mail: lenoks\_box@mail.ru

### **Popov Sergey Georgievich**

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel  
Graduate student, Junior Researcher of Scientific  
Educational Center Intelligent technologies for  
monitoring and diagnostics of power generating  
equipment  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
Ph. 8 906 568 65–01  
E-mail: sg.popov@pm.me

### **Stebakov Ivan Nikolaevich**

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel  
Student, trainee researcher of Scientific Educational  
Center Intelligent technologies for monitoring and  
diagnostics of power generating equipment  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
Ph. 8 953 618 08–66  
E-mail: chester50796@yandex.ru

### **Dremine Viktor Vladimirovich**

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel  
Ph.D., researcher of Research and Development Center  
of Biomedical Photonics  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
Ph.: +7–953–612–77–13  
E-mail: dremine\_viktor@mail.ru

### **Stavtsev Dmitry Dmitrievich**

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel  
Assistant of the Department of Instrumentation,  
Metrology and Certification, research assistant of  
Research and Development Center of Biomedical  
Photonics  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
Ph.: +7–953–611–80–23  
E-mail: stavtsev.dmitry@gmail.com

УДК 621.822

DOI: 10.33979/2073-7408-2021-347-3-139-145

М.Э. БОНДАРЕНКО, Р.Н. ПОЛЯКОВ, А.В. ГОРИН, И.В. РОДИЧЕВА

## **ОБОСНОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ОПОР С ИЗМЕНЯЕМЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

**Аннотация.** В статье представлена последовательность расчета комбинированной опоры с изменяемыми параметрами в виде алгоритма. Дано описание применение графического редактора CAE–системы APM Win Shaft для моделирования ротора, вращающегося в комбинированных опорах с изменяемыми характеристиками. Приведены результаты расчетного модуля. Рассмотрены полученные диаграммы Кембела. Дан анализ диаграммам переключения комбинированной опоры с изменяемыми характеристиками при работе в переходных процессах по определенному алгоритму. Представленный алгоритм исключает возможность увеличения амплитуды колебаний при прохождении критических частот. Сделаны выводы об эффективности применения указанной последовательности расчета. Даны рекомендации по использованию предложенной последовательности расчета для проектирования аналогичных комбинированных опор с изменяемыми характеристиками.

**Ключевые слова:** комбинированная опора, изменяемая характеристика, последовательность расчета, диаграмма, процесс переключения, динамические характеристики.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Позняк, Э.Л. Колебания роторов. Вибрации в технике. В 6 т. Том 3. Колебания машин, конструкций и их элементов: Под ред. Ф.М. Диментберга, К.С. Колесникова. М.: Машиностроение, 1980. С. 130–189.
2. Захарова, Н.Е. Экспериментальное исследование упругой податливости лепестковых газодинамических подпятников / Захарова Н.Е., Брагин А.Н. – М.: Машиноведение, 1984. №1. С. 99–105.
3. Балувев А.Е. Повышение прочностных и антифрикционных свойств газотермических покрытий на подшипниках скольжения: дис. канд. тех. наук: 05.16.01 / Балувев Алексей Евгеньевич. М., 1999. 130 с.
4. Редклиф В. Гидростатические подшипники криогенных турбокомпрессоров ракетных двигателей / Редклиф В. // Проблемы трения и смазки. 1970, №3, с. 206 – 227.
5. Anderson W.J. The series hybrid bearing – A new high speed bearing concept / W.J. Anderson, D.P. Fleming, R.J. Parker // J. Lubr. Technol. Pp. 117–123.
6. Пелевина Д.А. Изучение деформаций поверхности магнитной жидкости в магнитном поле, вызывающих направленное движение / Д.А. Пелевина, дисс. канд. физ.–мат. наук. М., 2014. 131 с.
7. Бушуева К. А. Деформация горизонтального слоя феррожидкости на жидкой подложке в магнитном поле: дис. ... канд. физ.–мат. наук / К.А. Бушуева, Пермь, 2014. 109 с.
8. Ghaffari Ali. A review on the simulation and modeling of magnetorheological fluids / Ali Ghaffari, Seyed Hassan Hashemabadi, Mashid Ashtiani // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2015. Vol. 26 (8). P. 881 – 904.

**Бондаренко Максим Эдуардович**  
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»  
кандю. техн. наук, старший преподаватель кафедры  
мехатроники, механики и робототехники  
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29  
Тел. +79538174922  
E-mail: maxbondarenko22@yandex.ru

**Горин Андрей Владимирович**  
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
мехатроника, механика и робототехника  
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29  
Тел. +79102600267  
E-mail: gorin57@mail.ru

**Поляков Роман Николаевич**  
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»  
доктор. технических наук, доцент кафедры  
мехатроника, механика и робототехника  
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29  
Тел. +79038819381  
E-mail: romanpolak@mail.ru

**Родичева Ирина Владимировна**  
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»  
студент  
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29  
Тел. +7910 26000267  
E-mail: rodfox@yandex.ru

---

M.E. BONDARENKO, R.N. POLYAKOV, A.V. GORIN, I.V. RODICHEVA

## JUSTIFICATION OF THE DESIGN SEQUENCE COMBINED SUPPORTS WITH VARIABLE CHARACTERISTICS

**Abstract.** The article presents the sequence of calculating a combined support with variable parameters in the form of an algorithm. The application of the graphical editor of the CAE–system APM Win Shaft for modeling a rotor rotating in combined supports with variable characteristics is described. The results of the calculation module are presented. The obtained Kembel diagrams are considered. An analysis is given to the switching diagrams of a combined support with variable characteristics during operation in transient processes according to a certain algorithm. The

*presented algorithm eliminates the possibility of increasing the amplitude of oscillations when passing through critical frequencies. Conclusions are drawn about the effectiveness of using the specified sequence of calculations. Recommendations are given on the use of the proposed calculation sequence for the design of similar combined supports with variable characteristics.*

**Keywords:** combined support, variable characteristic, calculation sequence, diagram, switching process, dynamic characteristics.

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Poznyak, E.L. Oscillations of the rotors. Vibrations in technology. In 6 volumes. Volume 3. Oscillations of machines, structures and their elements: Ed. F.M. Diementberg, K.S. Kolesnikov. Moscow: Mechanical Engineering, 1980. S. 130–189.
2. Zakharova, N.E., Bragin A.N. Experimental study of elastic compliance of petal gas–dynamic thrust bearings / Zakharova N.E., Bragin A.N. M.: Mashinovedenie, 1984. №1. S. 99–105.
3. Baluev A.E. Improvement of strength and antifriction properties of thermal gas coatings on plain bearings: dis. Cand. those. Sciences: 05.16.01 / Baluev Aleksey Evgenovich. M., 1999.130 p.
4. Redcliffe V. Hydrostatic bearings of cryogenic turbopumps of rocket engines / Redcliffe V. // Problems of friction and lubrication. 1970, no. 3, p. 206 – 227.
5. Anderson W.J. The series hybrid bearing – A new high speed bearing concept / W.J. Anderson, D.P. Fleming, R.J. Parker // J. Lubr. Technol. Pp. 117–123.
6. Pelevina D.A. Study of deformations of the surface of a magnetic fluid in a magnetic field causing directional movement / D.A. Pelevin, diss. Cand. phys.–mat. sciences. M., 2014.131 p.
7. Bushueva KA Deformation of a horizontal layer of ferro–liquid on a liquid substrate in a magnetic field: dis.... Cand. phys.–mat. Sciences / K.A. Bushueva, Perm, 2014.109 p.
8. Ghaffari Ali. A review on the simulation and modeling of magnetorheological fluids / Ali Ghaffari, Seyed Hassan Hashemabadi, Mashid Ashtiani // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2015. Vol. 26 (8). P. 881 – 904.

### **Bondarenko Maxim Eduardovich**

Orel State University named after I.S. Turgenev  
candidate of technical Sciences, associate Professor of  
the Department mechatronics, mechanics and robotics  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
Ph.: +79538174922  
E-mail: maxbondarenko22@yandex.ru

### **Polyakov Roman Nikolaevich**

Orel State University  
doktor of technical Sciences, associate Professor of the  
Department mechatronics, mechanics and robotics  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
Ph: +79038819381  
E-mail: romanpolak@mail.ru

### **Gorin Andrey Vladimirovich**

Orel State University  
candidate of technical Sciences, associate Professor of  
the Department mechatronics, mechanics and robotics  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
Ph.: +79102600267  
E-mail: gorin57@mail.ru

### **Rodicheva Irina Vladimirovna**

Orel State University named after I.S. Turgenev  
student  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
Ph.: +79122600267  
E-mail: rodfox@yandex.ru

УДК 691.175.2

DOI: 10.33979/2073-7408-2021-347-3-146-152

**А.Ю. РОДИЧЕВ, М.А. ТОКМАКОВА, С.С. ВНУКОВ, М.А. ГРЯДУНОВА**

## **ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ФИЛАМЕНТА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПРОЦЕНТА ЗАПОЛНЕНИЯ ПРИ ПРОТОТИПИРОВАНИИ ДЕТАЛЕЙ МЕХАТРОННЫХ КОМПЛЕКСОВ**

**Аннотация.** *Статья содержит анализ применяемых термопластов применяемых при прототипировании деталей мехатронных комплексов. Представлено несколько видов экспериментальных образцов различного процента заполнения. Показано оборудование, на котором проводились экспериментальные исследования. Во время проведения экспериментов применялась специализированная разрывная машина. Экспериментальные образцы устанавливались в разработанное центрирующее приспособление. Во время испытаний соблюдались нормальные условия. Представлены результаты экспериментального исследования образцов из PLA– пластика на растяжение. Описана характерная диаграмма растяжения экспериментального образца, описывающая зависимость напряжения от относительной деформации. Составлено уравнение линейной зависимости предела прочности от процента заполнения филамента, которое позволяет определить предел прочности изделия при любом процентом заполнении*

пластикового филамента. Оценка адекватности проверена по критерию Фишера. Даны рекомендации по заполнению филаментом при прототипировании деталей машин.

**Ключевые слова:** механические характеристики, 3D печать, термопластик, послойное наплавление, филамент.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1.. Хейфец, М.Л. Классификация полимерных композиционных материалов, используемых в FDM технологии //М.Л.Хейфец, Н.Л.Грецкий, Д.С. Ратуцкая, Ф.Л. Баранов, А.И. Гутковский /Перспективы развития аддитивных технологий в Республике Беларусь. сборник докладов международного научно–практического симпозиума. Национальная академия наук Беларуси, ГНПО порошковой металлургии. Минск, 2020. С. 141–149.
2. Дожделев, А.М., Лаврентьев, А.Ю. Обзор расходных материалов для 3D печати методом послойного наплавления //Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2019. № 8–2. С. 16–18.
- 3..Дожделев, А.М. Оптимальный выбор пластика для 3D печати // А.М. Дожделев, А.Ю. Лаврентьев / Гарантия успеха –2019. Сборник научных трудов 6–й Международной молодежной научной конференции. Юго–Западный государственный университет. 2019. С. 180–183.
- 4 Ильясова, А.В., Белицкая, О.А Исследование современного рынка пластиков, используемых для 3D печати// Концепции, теория, методики фундаментальных и прикладных научных исследований в области инклюзивного дизайна и технологий: сборник научных трудов по итогам Международной научно–практической заочной конференции (25–27 марта 2020 г.). Часть 1 – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2020. С. 36–41.
5. Балашов, А.В Исследование структуры и свойств изделий, полученных 3D–печатью // А.В. Балашов, М.И. Маркова / Инженерный вестник Дона, 2019. С.56–63.
6. Ерофеев, В.Т Исследование физико–механических характеристик образцов из полиактида в аддитивной технологии// В.Т.Ерофеев, Т.Ф. Ельчишева, Е.М.Преображенская/ Строительные материалы и изделия №3(40), 2019, С. 92–101.
7. Агишева, Д. К. Математическая статистика: учеб. пособие /Д.К. Агишева, С.А. Зотова, Т.А. Матвеева, В.Б. Светличная; ВПИ (филиал) ВолгГТУ. – Волгоград, 2010 – 159 с.
8. Межецкий, Г.Д. Сопротивление материалов: Учебник / Г.Д. Межецкий, Г.Г. Загребин, Н.Н. Решетник; под общ. Ред. Г.Д. Межецкого–го, Г.Г. Загребина.– 5–е изд., – М. 2016.– 432 с.

**Родичев Алексей Юрьевич**  
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»  
канд. техн. наук, доцент кафедры сервиса и  
ремонта машин  
Тел. +79534145257  
E–mail: rodfox@yandex.ru

**Токмакова Мария Андреевна**  
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»,  
аспирант  
Тел. +7910 2600267  
E–mail: stalker.20122@yandex.ru

**Внуков Сергей Сергеевич**  
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»  
студент  
Тел. +79606489922  
E–mail: stalker.20122@yandex.ru

**Грядунцова Мария Андреевна**  
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
студент  
Тел. +79534702550  
E–mail: gryadunova6565@mail.ru

---

A.Yu. RODICHEV, M.A. TOKMAKOVA, S.S. VNUYKOV, M.A. GRYADUNOVA

## STUDY OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE FILAMENT DEPENDING ON THE PERCENTAGE OF FILLING WHEN PROTOTYPING THE PARTS OF MECHATRONIC COMPLEXES

**Abstract.** The article contains an analysis of the applied thermoplastics used in prototyping parts of mechatronic complexes. Several types of experimental samples with different percent of filling are presented. Shown is the equipment on which the experimental studies were carried out. During the experiments, a specialized tensile testing machine was used. Experimental samples were installed in the developed centering device. Normal conditions were observed during the tests. The results of an experimental tensile study of PLA–plastic samples are presented. A characteristic stress–strain diagram of an experimental sample is described, which describes the dependence of stress on relative deformation. An equation of the linear dependence of the tensile strength on the percentage of filament filling has been compiled, which makes it possible to determine the ultimate strength of the product at any percentage of the filling of the plastic filament. Adequacy assessment is verified by Fisher's criterion. Recommendations are given on filament filling when prototyping machine parts.

**Keywords:** mechanical properties, 3D printing, thermoplastic, fused deposition, filament.

## BIBLIOGRAPHY

1. Kheifets, M.L. Classification of polymer composite materials used in FDM technology // M.L. Kheifets, N.L. Gretskiy, D.S. Ratutskaya, F.L. Baranov, A.I. Gutkovsky / Prospects for the development of additive technologies in the Republic of Belarus. collection of reports of the international scientific and practical symposium. National Academy of Sciences of Belarus, State Scientific and Production Association of Powder Metallurgy. Minsk, 2020.S. 141–149.
2. Dozhdelev, A.M., Lavrent'ev, A.Yu. Review of consumables for 3D printing by layer-by-layer deposition // International Journal of Humanities and Natural Sciences. 2019. No. 8–2. S. 16–18.
3. Dozhdelev, A.M. Optimal choice of plastic for 3D printing // A.M. Dozhdelev, A. Yu. Lavrentiev / Guarantee of success –2019. Collection of scientific papers of the 6th International Youth Scientific Conference. Southwest State University. 2019.S. 180–183.
4. Ilyasova, A.V., Belitskaya, O.A. Research of the modern market of plastics used for 3D printing // Concepts, theory, methods of fundamental and applied scientific research in the field of inclusive design and technologies: a collection of scientific papers based on the results of the International scientific and practical correspondence conference (March 25–27, 2020). Part 1 – M.: RSU im. A.N. Kosygin, 2020.S. 36–41.
5. Balashov, A. Investigation of the structure and properties of products obtained by 3D printing. Balashov, M.I. Markova / Engineering Bulletin of the Don, 2019, pp. 56–63.
6. Erofeev, VT Investigation of physical and mechanical characteristics of polyactide samples in additive technology // VT Erofeev, T.F. Elchisheva, E.M. Preobrozhenskaya / Building materials and products No. 3 (40), 2019, pp. 92–101.
7. Agisheva, DK Mathematical statistics: textbook. manual / D.K. Agisheva, S.A. Zotova, T.A. Matveeva, V.B. Svetlichnaya; VPI (branch) VolgSTU. – Volgograd, 2010 – 159 p.
8. Mezheritsky, G.D. Resistance of materials: Textbook / G.D. Mezheritsky, G.G. Zagrebin, N.N. Lattice; under total. Ed. G. D. Mezheritsky, G.G. Zagrebin. – 5th ed., – M. 2016.– 432s

**Rodichev Alexey Yurevich**

Orel State University named after I.S. Turgenev  
candidate of technical Sciences, associate Professor of  
the Department service and repair of cars  
Ph.: +79534145257  
E-mail: rodfox@yandex.ru

**Tokmakova Maria Andreevna**

Orel State University named after I.S. Turgenev  
graduate student  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
Ph.: +79102600267  
E-mail: gorin57@mail.ru

**Vnukov Sergei Sergeevich**

Orel State University named after I.S. Turgenev  
student  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
Ph.: +79102606508  
E-mail: stalker.20122@yandex.ru

**Gryadunova Maria Andreevna**

Orel State University named after I.S. Turgenev  
student  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
Ph.: +79534702550  
E-mail: gryadunova6565@mail.ru

УДК 62–251, 621.822.114

DOI: 10.33979/2073-7408-2021-347-3-153-160

А.В. СЫТИН, А.А. КИРИЧЕК, Н.В. ТОКМАКОВ, О.В. ЯКОВЛЕНКО

## **РАСЧЕТ ЛЕПЕСТКОВОГО ПОДШИПНИКА С ФЕРРОМАГНИТНОЙ ЖИДКОСТЬЮ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ СИСТЕМ ЭНЕРГОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ**

**Аннотация.** В статье рассмотрены способы решения проблемы износа опор роторов турбоагрегатов в моменты пуска и останова. Предложена концепция нового вида упруго-демпферных комбинированных опор скольжения, объединяющая в себе применение ферромагнитных жидкостей в конструкции многолепестковых подшипников. На основании этого предложена конструкция лепесткового подшипника с электромагнитным воздействием на упругие элементы и ферромагнитный смазочный материал. Описаны свойства и особенности применения ферромагнитных жидкостей в прецизионной технике в качестве смазочного материала. Предложена математическая модель электромагнитного лепесткового подшипника с ферромагнитной жидкостью на основании уравнения Рейнольдса из курса магнитной гидродинамики, уравнений Максвелла для магнитного поля, системы уравнений в перемещениях на основании теории цилиндрических оболочек. Приведен алгоритм работы опоры ротора во время пуска, останова, а также при отключении питания электромагнитов.

**Ключевые слова:** многолепестковый подшипник скольжения, магнитная гидродинамика, ферромагнитная жидкость, минимизация износа, магнитная вязкость, динамические характеристики.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Позняк, Э.Л. Колебания роторов. Вибрации в технике. В 6 т. Том 3. Колебания машин, конструкций и их элементов: Под ред. Ф.М. Диментберга, К.С. Колесникова. М.: Машиностроение, 1980. С. 130–189.
2. Захарова, Н.Е. Экспериментальное исследование упругой податливости лепестковых газодинамических подпятников / Захарова Н.Е., Брагин А.Н. – М.: Машиноведение, 1984. №1. С. 99–105.
3. Балувев А.Е. Повышение прочностных и антифрикционных свойств газотермических покрытий на подшипниках скольжения: дис. канд. тех. наук: 05.16.01 / Балувев Алексей Евгеньевич. М., 1999. 130 с.



- 4 Редклиф В. Гидростатические подшипники криогенных турбокомпрессоров ракетных двигателей / Редклиф В. // Проблемы трения и смазки. 1970, №3, с. 206 – 227.
5. Anderson W.J. The series hybrid bearing – A new high speed bearing concept / W.J. Anderson, D.P. Fleming, R.J. Parker // J. Lubr. Technol. Pp. 117–123.
6. Пелевина Д.А. Изучение деформаций поверхности магнитной жидкости в магнитном поле, вызывающих направленное движение / Д.А. Пелевина, дисс. канд. физ.–мат. наук. М., 2014. 131 с.
7. Бушуева К. А. Деформация горизонтального слоя феррожидкости на жидкой подложке в магнитном поле: дис. ... канд. физ.–мат. наук /К.А. Бушуева, Пермь, 2014. 109 с.
8. Ghaffari Ali. A review on the simulation and modeling of magnetorheological fluids / Ali Ghaffari, Seyed Hassan Hashemabadi, Mashid Ashtiani // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2015. Vol. 26 (8). P. 881 – 904.
9. Kordonsky W. Elements and devices based on magnetorheological effect / W. Kordonsky // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 1993. Vol. 4. P. 65 – 69.
10. Tipei, N. Theory of lubrication with ferrofluids: Application to short bearings / Nicolae Tipei / Journal of Lubrication technology. 1982. Vol. 103. P. 510 – 515.
11. Keith D. Weiss Viscoelastic properties of magneto– and electro–rheological fluids / Keith D. Weiss, J. David Carlson, Donald A. Nixon // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 1994. Vol. 5. P. 772 – 775.
12. Osman, T. Static and dynamic characteristics of magnetized journal bearings lubricated with ferrofluids / T.A. Osman, G.S. Nada, Z.S. Safar // Tribology Int. 2001. Vol. 34. P. 369 – 380.
13. Григолюк, Э. И. Контактные задачи теории пластин и оболочек / Э. И. Григолюк, В. М. Толкачев – М.: Машиностроение, 1980. 411 с.
14. Журавлев, Ю.Н. Активные магнитные подшипники: теория, расчет, применение / Ю.Н. Журавлев – СПб.: Политехника, 2003. 206 с.

**Сытин Антон Валерьевич**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»  
кандю. техн. наук, доцент кафедры мехатроники,  
механики и робототехники  
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29  
Тел. +79192046050  
E-mail: sytin@mail.ru

**Киричек Алексей Андреевич**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»  
студент  
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29  
Тел. +79606489922  
E-mail: stalker.20122@yandex.ru

**Токмаков Никита Владимирович**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»  
студент  
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29  
Тел. +79606489922  
E-mail: stalker.20122@yandex.ru

**Яковленко Оксана Владимировна**

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»  
студент  
302020, г.Орёл, Наугорское шоссе, 29  
Тел. +7910 26000267  
E-mail: gorin57@mail.ru

---

A.V. SYTIN, A.A. KIRICHEK, N.V. TOKMAKOV, O.V. YAKOVLENKO

## CALCULATION OF FLOOR BEARING WITH FERROMAGNETIC LIQUID OF TURBOGENERATORS OF POWER DISTRIBUTION SYSTEMS

**Abstract.** *The article discusses ways to solve the problem of wear of the rotor bearings of turbine units at the moments of start-up and shutdown. The concept of a new type of elastic-damping combined sliding bearings, which combines the use of ferromagnetic fluids in the design of multi-blade bearings, is proposed. On the basis of this, a design of a petal bearing with an electromagnetic effect on elastic elements and a ferromagnetic lubricant has been proposed. The properties and features of the use of ferromagnetic fluids in precision engineering as a lubricant are described. A mathematical model of an electromagnetic petal bearing with a ferromagnetic fluid is proposed on the basis of the Reynolds equation from the course of magnetohydrodynamics, Maxwell's equations for a magnetic field, a system of equations in displacements based on the theory of cylindrical shells. An algorithm for the operation of the rotor support during start-up, shutdown, as well as when the power supply of the electromagnets is turned off.*

**Keywords:** *multi-blade plain bearing, magnetohydrodynamics, ferromagnetic fluid, wear minimization, magnetic viscosity, dynamic characteristics.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Poznyak, E.L. Oscillations of the rotors. Vibrations in technology. In 6 volumes. Volume 3. Oscillations of machines, structures and their elements: Ed. F.M. Diementberg, K.S. Kolesnikov. Moscow: Mechanical Engineering, 1980. S. 130–189.
2. Zakharova, N.E., Bragin A.N. Experimental study of elastic compliance of petal gas–dynamic thrust bearings / Zakharova N.E., Bragin A.N. M.: Mashinovedenie, 1984. №1. S. 99–105.
3. Baluev A.E. Improvement of strength and antifriction properties of thermal gas coatings on plain bearings: dis. Cand. those. Sciences: 05.16.01 / Baluev Aleksey Evgenovich. M., 1999.130 p.
4. Redcliffe V. Hydrostatic bearings of cryogenic turbopumps of rocket engines / Redcliffe V. // Problems of friction and lubrication. 1970, no. 3, p. 206 – 227.
5. Anderson W.J. The series hybrid bearing – A new high speed bearing concept / W.J. Anderson, D.P. Fleming, R.J. Parker // J. Lubr. Technol. Pp. 117–123.
6. Pelevina D.A. Study of deformations of the surface of a magnetic fluid in a magnetic field causing directional movement / D.A. Pelevin, diss. Cand. phys.–mat. sciences. M., 2014.131 p.
7. Bushueva KA Deformation of a horizontal layer of ferro–liquid on a liquid substrate in a magnetic field: dis.... Cand. phys.–mat. Sciences / K.A. Bushueva, Perm, 2014.109 p.
8. Ghaffari Ali. A review on the simulation and modeling of magnetorheological fluids / Ali Ghaffari, Seyed Hassan Hashemabadi, Mashid Ashtiani // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 2015. Vol. 26 (8). P. 881 – 904.
9. Kordonsky W. Elements and devises based on magnetorheological effect / W. Kordonsky // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 1993. Vol. 4. P. 65 – 69.
10. Tipei, N. Theory of lubrication with ferrofluids: Application to short bearings / Nicolae Tipei / Journal of Lubrication technology. 1982. Vol. 103. P. 510 – 515.
11. Keith D. Weiss Viscoelastic properities of magneto– and electro–rheological fluids / Keith D. Weiss, J. David Carlson, Donald A. Nixon // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 1994. Vol. 5. P. 772 – 775.
12. Osman, T. Static and dynamic characteristics of magnetized journal bearings lubricated with ferrofluids / T.A. Osman, G.S. Nada, Z.S. Safar // Tribology Int. 2001. Vol. 34. P. 369 – 380.
13. Grigolyuk, E. I. Contact problems of the theory of plates and shells. Moscow: Mashinostroenie, 1980.411 p.
14. Zhuravlev, Yu.N. Active magnetic bearings: theory, calculation, application. SPb.: Politekhnika, 2003.206 p.

**Sytin Anton Valerievich**

Orel State University named after I.S. Turgenev  
candidate of technical Sciences, associate Professor of  
the Department mechatronics, mechanics and robotics  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
Ph.: +79192046050  
E–mail: sytin@mail.ru

**Kirichek Alexey Andreevich**

Orel State University named after I.S. Turgenev  
student  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
Ph.: +79102606508  
E–mail: stalker.20122@yandex.ru

**Tokmakov Nikita Vladimirovich**

Orel State University named after I.S. Turgenev  
student  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
Ph.: +79102606508  
E–mail: stalker.20122@yandex.ru

**Yakovlenko Oksana Vladimirovna**

Orel State University named after I.S. Turgenev  
student  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
Ph.: +79122600267  
E–mail: gorin57@mail.ru

## **ПРИБОРЫ, БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ**

УДК 536.3+621.362.1

DOI: 10.33979/2073-7408-2021-347-3-161-165

О.И. МАРКОВ

### **ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ИМПУЛЬСА ТОКА НА ДИНАМИКУ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ВЕТВИ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОХЛАДИТЕЛЯ**

**Аннотация.** Выполнено численное моделирование термоэлектрических процессов в ветви твердотельного термоэлектрического охладителя Пельтье в нестационарном режиме. На некоторых примерах показано влияние изменения амплитуды импульса тока со временем на ход температуры в ветви термоэлемента

**Ключевые слова:** математическое моделирование, температурное поле, твердотельные термоэлектрические охладители Пельтье, импульс тока нестационарный режим.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иорданишвили Е.К., Бабин В.П. Нестационарные процессы в термоэлектрических и термоманитных системах преобразования энергии. М.: Наука, 1983. – 216 с.
2. Набиев М. Б. Экстремальные режимы работы полупроводниковых термоэлементов и устройств на их основе. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Ашхабад. 1993. – 13 с.
3. Дударев Ю. И. Решение нестационарных нелинейных задач теплопроводности в обоснование установок новой техники. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Сухуми, 1998. – 23 с.
4. Анатыхук Л.И. Термоэлектричество. Т.2. Термоэлектрические преобразователи энергии. Киев, Черновцы.: Институт термоэлектричества. 2003. – 374 с.
5. Дударев Ю.Б., Максимов М.З., Сабо Е.П., Хагба Г.С., Дударева С.Ю. Температурное поле термоэлектрических охлаждающих систем в двумерном нестационарном случае. Доклады VIII Международного семинара «Термоэлектрики и их применения». СПб. – 2002. – С.129–132.

### Марков Олег Иванович

Орловский государственный  
университет имени И.С. Тургенева,  
г. Орел, д-р физ.-мат. наук, заведующий  
кафедрой экспериментальной и  
теоретической физики  
E-mail: O.I.Markov@mail.ru.

---

O.I. MARKOV

## INFLUENCE OF THE CURRENT PULSE SHAPE ON THE DYNAMICS OF THE TEMPERATURE FIELD OF THE THERMOELECTRIC COOLER BRANCH

**Abstract.** Numerical simulation of thermoelectric processes in a branch of a solid-state thermoelectric Peltier cooler in a non-stationary mode is performed. Some examples show the effect of changes in the amplitude of the current pulse over time on the temperature in the branch of the thermoelectric element.

**Keywords:** mathematical modeling, temperature field, solid-state thermoelectric Peltier coolers, current pulse, non-stationary mode.

## BIBLIOGRAPHY

1. Iordanishvili E.K., Babin V.P. Nestatsionarnye protsessy v termoelektricheskikh i termomagnitnykh sistemakh preobrazovaniya energii. M.: Nauka 1983. 216 s.
2. Nabiev M. B. Ekstremalnye rezhimy raboty poluprovodnikovyykh termoelementov i ustroystv na ikh osnove. Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tehnikeskikh nauk. Ashhabad. 1993. 13 s.
3. Dudarev Y. I. Reshenie nestatsionarnyykh nelineynykh sadach teploprovodnosti v obosnovanie ustanovok novoi tekhniki. Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni doktora tehnikeskikh nauk. Suhumi, 1998. 23 s.
4. Anatychuk L.I. Termoelektrichestvo. T.2. Termoelektrichesknie preobrasovateli energii. Kiev, Chernovtsy. Institut termoelektrichestva, 2003. 374 s.
5. Dudarev Y. I., Maksimov M.S., Sabo E.P., Hagba G.S., Dudareva S.Y. Yemperaturnoe pole termoelektricheskikh ohlazhdayushchikh sistem v dvumernom nestatsionarnom sluchae. Doklady VIII Mezhdumarnodnogo seminaru «Termoelektriki i ikh primenenija». SPb. 2002. S.129–132.

### Markov Oleg Ivanovich

Orel State University named after I.S.Turgenev, Orel,  
Doctor of Phys.-Math, Sciences, Head of Department of experimental and theoretical physics  
E-mail: O.I.Markov@mail.ru.

А.Г. ЕГОРОВ, Е.М. ГЛУХОВСКИЙ

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ПРОИЗВОДСТВО ИМПОРТОЗАМЕНЯЮЩЕЙ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КОХЛЕАРНОЙ ИМПЛАНТАЦИИ ДЛЯ РЕАБИЛИТАЦИИ ПАЦИЕНТОВ С СЕНСОНЕВРАЛЬНОЙ ТУГОУХОСТЬЮ

**Аннотация.** В нашей статье идёт речь о результатах работ по созданию импортозамещающей технологии производства отечественных кохлеарных имплантатов. Кохлеарная имплантация рассматривается как радикальный метод решения проблемы слуха, как у детей, так и у пожилых граждан. Был проанализирован опыт отечественных операций, путём опроса пациентов, перенёсших процедуру кохлеарной имплантации. Для решения задачи исследования мы проанализировали накопленный опыт отечественных операций, путём опроса пациентов, которые перенесли процедуру кохлеарной имплантации. Мы выделим критерии успешности улучшения качества жизни пациентов, и нашли корреляцию успешности улучшения качества жизни пациента после операции с особенностями использовавшегося имплантата. На основании анализа этих корреляционных зависимостей и детального изучения на лабораторном стенде, наиболее способствовавшего улучшению качества жизни пациентов имплантата, мы предложили конфигурацию отечественного устройства призванного заместить в медицинской практике зарубежный аналог.

**Ключевые слова:** слуховые аппараты, кохлеарная имплантация, реабилитации слуха.

*Работа выполнена на базе «Лаборатории медицинского приборостроения» МФТИ – Головного исполнителя НИОКТР или его соисполнителя. Данная статья подготовлена при проведении НИОКТР по теме «Разработка технологии изготовления и постановка на производство импортозамещающей многофункциональной системы кохлеарной имплантации для реабилитации пациентов с сенсоневральной тугоухостью» в МФТИ. Финансовая поддержка осуществлялась Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zuniga, M. Geraldine, et al. "Tip fold-over in cochlear implantation: case series." *Otology & neurotology: official publication of the American Otological Society, American Neurotology Society [and] European Academy of Otology and Neurotology* 38.2 (2017): 199.
2. Völter, Christiane, et al. "Can cochlear implantation improve neurocognition in the aging population?" *Clinical Interventions in Aging* 13 (2018): 701.
3. Peng, Kevin A., et al. "Cochlear implantation and auditory brainstem implantation in neurofibromatosis type 2." *The Laryngoscope* 128.9 (2018): 2163–2169.
4. Geers, Ann E., et al. "Early sign language exposure and cochlear implantation benefits." *Pediatrics* 140.1 (2017).
5. Yoshinaga-Itano, Christine, et al. "Language outcomes improved through early hearing detection and earlier cochlear implantation." *Otology & Neurotology* 39.10 (2018): 1256–1263.
6. Micheletti, Serena, et al. "Cognitive improvement after cochlear implantation in deaf children with associated disabilities." *Developmental Medicine & Child Neurology* (2020).
7. Sladen, Douglas P., et al. "Cochlear implantation for single-sided deafness: A multicenter study." *The Laryngoscope* 127.1 (2017): 223–228.
8. Holder, Jourdan T., et al. "Cochlear implantation for single-sided deafness and tinnitus suppression." *American journal of otolaryngology* 38.2 (2017): 226–229.
9. O'Connell, Brendan P., et al. "Electrode location and angular insertion depth are predictors of audiologic outcomes in cochlear implantation." *Otology & neurotology: official publication of the American Otological Society, American Neurotology Society [and] European Academy of Otology and Neurotology* 37.8 (2016): 1016.
10. Wanna GB, Noble JH, Carlson ML, Gifford RH, Dietrich MS, Haynes DS, Dawant BM, Labadie RF Impact of electrode design and surgical approach on scalar location and cochlear implant outcomes. *Laryngoscope*. 2014 Nov; 124 Suppl 6():S1–7.,
11. Boyer E, Karkas A, Attye A, Lefournier V, Escude B, Schmerber S Scalar localization by cone-beam computed tomography of cochlear implant carriers: a comparative study between straight and peri-modiolar precurved electrode arrays. *Otol Neurotol*. 2015 Mar; 36(3):422–9.
12. Aschendorff A, Kromeier J, Klenzner T, Laszig R Quality control after insertion of the nucleus contour and contour advance electrode in adults. *Ear Hear*. 2007 Apr; 28(2 Suppl):75S–79S.,
13. Holden LK, Finley CC, Firszt JB, Holden TA, Brenner C, Potts LG, Gotter BD, Vanderhoof SS, Mispagel K, Heydebrand G, Skinner MW Factors affecting open-set word recognition in adults with cochlear implants. *Ear Hear*. 2013 May–Jun; 34(3):342–60.,

14. Greenham, Mrs Paula, et al. "Outcomes for a clinically representative cohort of hearing-impaired adults using the Nucleus CI532 cochlear implant." BRITISH COCHLEAR IMPLANT GROUP MEETING 2020 IMPROVING HEARING HEALTHCARE IN THE 21ST CENTURY ASSTRACT BOOK.
15. Wanna GB, Noble JH, Gifford RH, Dietrich MS, Sweeney AD, Zhang D, Dawant BM, Rivas A, Labadie RF Impact of Intrascalar Electrode Location, Electrode Type, and Angular Insertion Depth on Residual Hearing in Cochlear Implant Patients: Preliminary Results. *Otol Neurotol*. 2015 Sep; 36(8):1343–8.,
16. Zelener, Freddi, et al. "Relations Between Scalar Shift and Insertion Depth in Human Cochlear Implantation." *Otology & Neurotology* 41.2 (2020): 178–185.
17. MacCallum, Robert C., et al. "Sample size in factor analysis: The role of model error." *Multivariate behavioral research* 36.4 (2001): 611–637.
18. Rosseel, Yves, et al. "Package 'lavaan'." Retrieved June 17 (2017): 2017.
19. Brown, Timothy A. *Confirmatory factor analysis for applied research*. Guilford publications, 2015.
20. Beavers, Amy S., et al. "Practical considerations for using exploratory factor analysis in educational research." *Practical Assessment, Research, and Evaluation* 18.1 (2013): 6.
21. Pilkonis, Paul A., et al. "Item banks for measuring emotional distress from the Patient-Reported Outcomes Measurement Information System (PROMIS®): depression, anxiety, and anger." *Assessment* 18.3 (2011): 263–283.
22. Linacre, J. M. "Winsteps®(Version 3.92. 0)." Winsteps, Beaverton, OR, USA (2016).
23. Linacre, J. M. "Winsteps®(Version 4.4. 1)[Computer Software]. Beaverton, Oregon: Winsteps. com. Retrieved January 1, 2019." (2019).
24. McRackan, Theodore R., et al. "Use of adult patient focus groups to develop the initial item bank for a cochlear implant quality-of-life instrument." *JAMA Otolaryngology-Head & Neck Surgery* 143.10 (2017): 975–982.)

#### **Егоров Алексей Игоревич**

Московский физико-технический институт (МФТИ)  
Лаборатории медицинского приборостроения  
Кандидат физико-математических наук, Заведующий  
лаборатории  
141701, г. Долгопрудный,  
Институтский пер., 9.  
Тел. +79859240800  
E-mail: egorov.aleksei.i@mipt.ru

#### **Глуховский Евгений Михайлович**

Московский физико-технический институт (МФТИ)  
Лаборатории медицинского приборостроения  
Младший научный сотрудник  
141701, г. Долгопрудный,  
Институтский пер., 9.  
Тел. +79099023380  
E-mail: glukhovskii.em@mipt.ru

---

A.I. EGOROV, E.M. GLUKHOVSKIY

## **DEVELOPMENT OF MANUFACTURING TECHNOLOGY AND PRODUCTION OF AN IMPORT-SUBSTITUTING MULTIFUNCTIONAL COCHLEAR IMPLANTATION SYSTEM FOR THE REHABILITATION OF PATIENTS WITH SENSORINEURAL HEARING LOSS**

**Abstract.** *This article deals with the results of work on the creation of an import-substituting technology for the production of domestic cochlear implants. Cochlear implantation is considered as a radical method for solving hearing problems, both in children and in the elderly. The experience of domestic operations was analyzed by interviewing patients who underwent the procedure of cochlear implantation. To solve the research problem, we analyzed the accumulated experience of domestic operations by interviewing patients who underwent the procedure of cochlear implantation. We will highlight the criteria for the success of improving the quality of life of patients, and we found a correlation between the success of improving the quality of life of a patient after surgery with the characteristics of the implant used. Based on the analysis of these correlations and a detailed study at the laboratory bench of the implant that most contributed to the improvement of the quality of life of patients, we proposed a configuration of a domestic device designed to replace a foreign analogue in medical practice.*

**Keywords:** *hearing aids, cochlear implantation, hearing rehabilitation.*

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Zuniga, M. Geraldine, et al. "Tip fold-over in cochlear implantation: case series." *Otology & neurotology: official publication of the American Otological Society, American Neurotology Society [and] European Academy of Otology and Neurotology* 38.2 (2017): 199.
2. Völter, Christiane, et al. "Can cochlear implantation improve neurocognition in the aging population?." *Clinical Interventions in Aging* 13 (2018): 701.
3. Peng, Kevin A., et al. "Cochlear implantation and auditory brainstem implantation in neurofibromatosis type 2." *The Laryngoscope* 128.9 (2018): 2163–2169.
4. Geers, Ann E., et al. "Early sign language exposure and cochlear implantation benefits." *Pediatrics* 140.1 (2017).

5. Yoshinaga-Itano, Christine, et al. "Language outcomes improved through early hearing detection and earlier cochlear implantation." *Otology & Neurotology* 39.10 (2018): 1256–1263.
6. Micheletti, Serena, et al. "Cognitive improvement after cochlear implantation in deaf children with associated disabilities." *Developmental Medicine & Child Neurology* (2020).
7. Sladen, Douglas P., et al. "Cochlear implantation for single-sided deafness: A multicenter study." *The Laryngoscope* 127.1 (2017): 223–228.
8. Holder, Jourdan T., et al. "Cochlear implantation for single-sided deafness and tinnitus suppression." *American journal of otolaryngology* 38.2 (2017): 226–229.
9. O'Connell, Brendan P., et al. "Electrode location and angular insertion depth are predictors of audiologic outcomes in cochlear implantation." *Otology & neurotology: official publication of the American Otological Society, American Neurotology Society [and] European Academy of Otology and Neurotology* 37.8 (2016): 1016.
10. Wanna GB, Noble JH, Carlson ML, Gifford RH, Dietrich MS, Haynes DS, Dawant BM, Labadie RF Impact of electrode design and surgical approach on scalar location and cochlear implant outcomes. *Laryngoscope*. 2014 Nov; 124 Suppl 6():S1–7.,
11. Boyer E, Karkas A, Attye A, Lefournier V, Escude B, Schmerber S Scalar localization by cone-beam computed tomography of cochlear implant carriers: a comparative study between straight and perimodiolar precurved electrode arrays. *Otol Neurotol*. 2015 Mar; 36(3):422–9.
12. Aschendorff A, Kromeier J, Klenzner T, Laszig R Quality control after insertion of the nucleus contour and contour advance electrode in adults. *Ear Hear*. 2007 Apr; 28(2 Suppl):75S–79S.,
13. Holden LK, Finley CC, Firszt JB, Holden TA, Brenner C, Potts LG, Gotter BD, Vanderhoof SS, Mispagel K, Heydebrand G, Skinner MW Factors affecting open-set word recognition in adults with cochlear implants. *Ear Hear*. 2013 May–Jun; 34(3):342–60.,
14. Greenham, Mrs Paula, et al. "Outcomes for a clinically representative cohort of hearing-impaired adults using the Nucleus CI532 cochlear implant." *BRITISH COCHLEAR IMPLANT GROUP MEETING 2020 IMPROVING HEARING HEALTHCARE IN THE 21ST CENTURY ASSTRACT BOOK*.
15. Wanna GB, Noble JH, Gifford RH, Dietrich MS, Sweeney AD, Zhang D, Dawant BM, Rivas A, Labadie RF Impact of Intrascalar Electrode Location, Electrode Type, and Angular Insertion Depth on Residual Hearing in Cochlear Implant Patients: Preliminary Results. *Otol Neurotol*. 2015 Sep; 36(8):1343–8.,
16. Zelener, Freddi, et al. "Relations Between Scalar Shift and Insertion Depth in Human Cochlear Implantation." *Otology & Neurotology* 41.2 (2020): 178–185.
17. MacCallum, Robert C., et al. "Sample size in factor analysis: The role of model error." *Multivariate behavioral research* 36.4 (2001): 611–637.
18. Rosseel, Yves, et al. "Package 'lavaan'." Retrieved June 17 (2017): 2017.
19. Brown, Timothy A. *Confirmatory factor analysis for applied research*. Guilford publications, 2015.
20. Beavers, Amy S., et al. "Practical considerations for using exploratory factor analysis in educational research." *Practical Assessment, Research, and Evaluation* 18.1 (2013): 6.
21. Pilkonis, Paul A., et al. "Item banks for measuring emotional distress from the Patient-Reported Outcomes Measurement Information System (PROMIS®): depression, anxiety, and anger." *Assessment* 18.3 (2011): 263–283.
22. Linacre, J. M. "Winsteps®(Version 3.92. 0)." Winsteps, Beaverton, OR, USA (2016).).
23. (Linacre, J. M. "Winsteps®(Version 4.4. 1)[Computer Software]. Beaverton, Oregon: Winsteps. com. Retrieved January 1, 2019." (2019).
24. McRackan, Theodore R., et al. "Use of adult patient focus groups to develop the initial item bank for a cochlear implant quality-of-life instrument." *JAMA Otolaryngology–Head & Neck Surgery* 143.10 (2017): 975–982.)

**Egorov Alexey Igorevich**

Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT)  
Head of Medical Instrumentation Laboratories  
Ph.D, Candidate of Physical and Mathematical Sciences  
141701, Dolgoprudny, Institutskiy per., 9  
Ph.: +79859240800  
E-mail: egorov.aleksei.i@mipt.ru

**Glukhovskiy Evgeniy Mikhailovich**

Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT)  
Medical Instrumentation Laboratories  
Junior research fellow  
141701, Dolgoprudny, Institutskiy per., 9  
Ph.: +79099023380  
E-mail: glukhovskii.em@mipt.ru

## **КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА, ИСПЫТАНИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ**

УДК 621.314.522, 621.316.717

DOI: 10.33979/2073-7408-2021-347-3-178-186

Е.В. ГОСТЕНКОВ, В.В. МИШИН, Д.А. ЧЕТВЕРИКОВ

### **МЕТОД КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ IGBT КРИСТАЛЛА В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ**

**Аннотация.** Работа посвящена исследованию термочувствительных параметров силовых IGBT транзисторов. Рассмотрен способ измерения температуры IGBT на основе термочувствительных

параметров. Проведена экспериментальная оценка температурной зависимости термочувствительного параметра  $R_{gint}$ .

**Ключевые слова:** Силовые IGBT модули, электро-термочувствительные параметры, измерение температуры IGBT кристаллов, встроенное сопротивление затвора  $R_{gint}$ , измерение температуры в режиме реального времени.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юдин А. IGBT силовые модули большой мощности для тяговых преобразователей производства компании Infineon // Силовая электроника. – 2008. – №2.
2. Колпаков А.И. Методы оценки надежности силовых модулей igbt semikron в предельных режимах // Силовая электроника. – 2004. – №1. – С. 40–45.
3. Веревкин В. В., Стригунов С. Л., Пилипенко А. П., Волобуев К. А., Лобанова В. А. Испытания многокристалльных IGBT-модулей на стойкость к циклическому воздействию силового тока // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2020. – №5. – С. 451–459.
4. Колпаков А.И. О термоциклах и термоциклировании // Силовая электроника. – 2006. – №2. – С. 6–11.
5. D.-L. Blackburn Temperature measurements of semiconductor devices—A review // in Proc. 20th Annu. Semicond. Therm. Meas. Man- age. Symp., San Jose, CA, Mar. 11–24, 2004, pp. 70–80.
6. R. Wu; F. Blaabjerg, Huai Wang; M. Liserre, F. Iannuzzo //Catastrophic failure and fault-tolerant design of IGBT power electronic converters – an overview// 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2013) Nov. 201., P.507–513, 10–13.
7. D. Ginart, W. Brown, P. W. Kalgren, M. J. Roemer //Online Ringing Characterization as a Diagnostic Technique for IGBTs in Power Drives// IEEE Trans. Instrum. Meas. Jul. 2009. vol. 58, no. 7. P. 2290–2299.
8. M. Ciappa //Selected failure mechanisms of modern power modules// Microelectron. Reliab. 2002. vol. 42, no. 4, P. 653–667.
9. Manjula S. Raman, Teweldebhran Kifle, Enakshi Bhattacharya, and K. N. Bhat //Physical Model for the Resistivity and Temperature Coefficient of Resistivity in Heavily Doped Polysilicon// IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. 53, NO. 8, AUGUST 2006
10. Глушко А.А., Шахнов В.А. Параметры резистивных структур на поликристаллическом кремнии // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Приборостроение”. – 2011. – №1. – С. 67–75.

**Гостенков Евгений Викторович**  
Орловский Государственный  
Университет имени И.С. Тургенева  
Аспирант 4 курса  
г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел. +7 (960) 651 50 00  
E-mail: e.gostenkov@proton-  
electrotex.com

**Мишин Владислав Владимирович**  
Орловский Государственный  
Университет имени И.С. Тургенева  
Кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой электроники,  
радиотехники и систем связи  
г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел. +7 (903) 882 0147  
E-mail: zam\_fdo@mail.ru

**Четвериков Дмитрий Андреевич**  
Орловский Государственный  
Университет имени И.С.  
Тургенева  
Аспирант 4 курса  
г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел. +7 (919) 266 69 75  
E-mail:  
dimachetverikov@gmail.com

---

E.V. GOSTENKOV, V.V. MISHIN, D.A. CHETVERIKOV

## IGBT CHIP TEMPERATURE CONTROL METHOD IN REAL TIME

**Abstract.** The work is devoted to the study of temperature-sensitive parameters of power IGBT transistors. A method for measuring IGBT temperature based on temperature-sensitive parameters is considered. An experimental estimate of the temperature dependence of the temperature-sensitive parameter  $R_{gint}$ .

**Keywords:** Power IGBT modules, electro-temperature sensitive parameters, IGBT chip temperature measurement, built-in gate resistance  $R_{gint}$ , real-time temperature measurement.

## BIBLIOGRAPHY

1. Yudin A. IGBT silovie moduli bolshoy moshchnosti dlya tyagovih preobrazovateley proizvodstva kompanii Infineon // Silovaya electronica. – 2008. – №2.
2. Kolpakov A.I. Metody otsenki nadezhnosti silovih moduley igbt semikron v predelnykh rezhimakh // Silovaya electronica. – 2004. – №1. – S. 40–45.
3. Verevkin V. V., Strigunov S. L., Pilipenko A. P., Volobuev K. A., Lobanova V. A. Ispytaniya mnogokristalnykh IGBT-moduley na stoykost k tsyklicheskomu vozddeystviyu silovogo toka // Izvestiya vysshykh uchebnykh zavedeniy. Priborostroeniye. – 2020. – №5. – S. 451–459.
4. Kolpakov A.I. O termotsyklyakh i termotsyklirovanii // Silovaya electronica. – 2006. – №2. – S. 6–11.
5. D.-L. Blackburn Temperature measurements of semiconductor devices—A review // in Proc. 20th Annu. Semicond. Therm. Meas. Man- age. Symp., San Jose, CA, Mar. 11–24, 2004, pp. 70–80.

6. R. Wu; F. Blaabjerg, Huai Wang; M. Liserre, F. Iannuzzo //Catastrophic failure and fault-tolerant design of IGBT power electronic converters – an overview// 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2013) Nov. 201., P.507–513, 10–13.

7. D. Ginart, W. Brown, P. W. Kalgren, M. J. Roemer //Online Ringing Characterization as a Diagnostic Technique for IGBTs in Power Drives// IEEE Trans. Instrum. Meas. Jul. 2009. vol. 58, no. 7. P. 2290–2299.

8. M. Ciappa //Selected failure mechanisms of modern power modules// Microelectron. Reliab. 2002. vol. 42, no. 4, P. 653–667.

9. Manjula S. Raman, Teweldebhran Kifle, Enakshi Bhattacharya, and K. N. Bhat //Physical Model for the Resistivity and Temperature Coefficient of Resistivity in Heavily Doped Polysilicon// IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. 53, NO. 8, AUGUST 2006

10. Glushko A.A., Shahnov V.A. Parametry rezistivnyh struktur na polikristalicheskom krremnii // Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser. “Priborostroeniye”. – 2011. – №1. – S. 67–75.

**Gostenkov Evgeniy Viktorovich**

Orel state university named after  
I.S. Turgenev

Post-graduate student 4th year

Orel, Naugorskoe Shosse, 29

Ph.: +7 (960) 651 50 00

E-mail: e.gostenkov@proton-  
electrotex.com

**Mishin Vladislav Vladimirovich**

Orel state university named after I.S.  
Turgenev

Ph.D., associate professor, head of  
the department of electronics, radio  
and communication systems

302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29

Ph.: +7 (903) 882 0147

E-mail: zam\_fdo@mail.ru

**Chetverikov Dmitriy Andreevich**

Orel state university named after I.S.  
Turgenev

Post-graduate student 4th year

302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29

Ph.: +7 (919) 266 69 75

E-mail:  
dimachetverikov@gmail.com



*Адрес издателя:*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»  
302026, г. Орёл, ул. Комсомольская, 95  
Тел. (4862) 75–13–18  
<http://oreluniver.ru>  
E-mail: [info@oreluniver.ru](mailto:info@oreluniver.ru)

*Адрес редакции:*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»  
302030, Орловская обл., г. Орёл, ул. Московская, 34  
+7(920)2806645, +7(906)6639898  
  
<http://oreluniver.ru>  
E-mail: [radsu@rambler.ru](mailto:radsu@rambler.ru)

Право использования произведений предоставлено авторами на основании  
п. 2 ст. 1286 Четвертой части Гражданского Кодекса Российской Федерации

Технический редактор Тюхта А.В.  
Компьютерная верстка Тюхта А.В.

Подписано в печать 18.06.2021 г.  
Дата выхода в свет 25.06.2021 г.  
Формат 70х108/16. Усл. печ. л. 11,6875  
Цена свободная. Тираж 600 экз.  
Заказ 87

Отпечатано с готового оригинал–макета  
на полиграфической базе ОГУ имени И.С. Тургенева  
302026, г. Орёл, ул. Комсомольская, д. 95