

## 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.  
Савин Л.А. д-р техн. наук, проф.  
Шоркин В.С. д-р физ.-мат. наук, проф.

## Члены редколлегии:

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.Л. д-р техн. наук, проф. (Россия)  
Лавриненко В.Ю. д-р техн. наук, проф. (Россия)  
Ли Шэнбо. канд. техн. наук, доц. (Китай)  
Мирсалимов 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)  
Поляков Р.Н. д-р техн. наук, доц. (Россия)  
Распопов В.Я. 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:  
Тюхта 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, 2020

## Содержание

### Теоретическая механика и ее приложения

Хромов Е.В., Морева И.Н. Методика экспериментального определения демпфирующих характеристик механической системы в случае нелинейной комбинированной функции трения.....	3
Тихомиров В.П., Горленко А.О., Измеров М.А., Дорофеев О.В., Злобин С.Н., Ерохин А.Н. Определение закономерности изнашивания сферического подшипника скольжения.....	8

### Механика деформируемого твердого тела, динамика и прочность

Сухоруков А.Л., Слуцкий Р.В. Результаты верификации численного метода расчета взаимодействия подводного объекта с ледовым покровом.....	17
Сапрыкина Н.А., Проскоков А.В., Сапрыкин А.А. Синтез механизмов с кинематикой типа дельта.....	26
Гордон В.А., Семенова Г.А. Собственные изгибные колебания балки, частично опертой на основании Пастернака.....	34

### Машиностроительные технологии и оборудование

Кононенко А.С., Игнаткин И.Ю., Кильдеев Т.А. Ремонт прецизионных подшипниковых соединений металлорежущих станков полимерными материалами.....	43
Игнатов А.В., Субханкулов Р.М. Адгезивная сборка многослойных изделий переменного сечения.....	48
Липка В.М., Рапацкий Ю.Л., Братан С.М. Математическое моделирование и анализ процесса шлифования резьбы на заготовках резьбонакатных роликов.....	54
Аблаев Р.Р., Аблаев А.Р. Постановка задачи оптимальной ресурсоэффективной компоновки механизированных объектов.....	70
Братан С.М., Харченко А.О., Владецкая Е.А. Стохастическая система управления операцией плоского шлифования.....	75

### Машиноведение и мехатроника

Мартинез Леон А.С., Яцун С.Ф., Емельянова О.В. Управление электроприводами мультироторной системы типа конвертоплан.....	83
Абдулин Р.Р., Подшибнев В.А., Самсонович С.Л. Обоснование принципа действия волновой передачи с промежуточными телами качения как следящей системы.....	94
Корнаев А.В., Фетисов А.С., Бобырь М.В. Влияние массовых сил на течение неньютоновских жидкостей в тонких каналах.....	103
Поляков Р.Н., Бондаренко М.Э., Горин А.В. Исследование характеристик гибридного подшипника с газовой смазкой.....	107
Фетисов А.С., Бабин А.Ю., Тюрин В.О. Экспериментальный стенд для исследования влияния магнитореологических смазочных материалов на характеристики работы опоры скольжения.....	114
Сытин А.В., Зарецкий Р.К., Токмаков Н.В. Мехатронное устройство для изготовления лепестков.....	120

### Приборы, биотехнические системы и технологии

Суханова М.В. Аналитический обзор подходов к математическому моделированию взаимодействия оптического излучения с растительной тканью.....	127
Буркова Е.В., Бурков Д.В. Исследование процессов теплопередачи в аккумуляторах солнечной энергии.....	139

### Контроль, диагностика, испытания и управление качеством

Лоскутов И.А. Стандарты применяемые при разработки силового и управляющего оборудования для АЭС.....	144
Селихов А.В., Мишин В.В., Воронина О.А., Подмастерьев К.В., Лоскутов И.А., Хайрутдинов И.И. Оценка достоверности диагностического параметра НИВ при дискретном представлении диагностического сигнала.....	151

## 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.

Savin L.A. 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 Shenbo. 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)

Polyakov R.N. Doc. Sc. Tech., Assist. Prof. (Russia)

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

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

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

Starovoitov A.L. 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 Orel, Moskovskaya ul., 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, 2020

## Contents

### Theoretical mechanics and its applications

- Khromov E.V., Moreva I.N. Methodology for experimental determination of damping characteristics of the mechanical system in the case of a nonlinear combined friction functions..... 3  
Tikhomirov V.P., Gorlenko O.A., Izmerov M.A., Dorofeyev O.V., Zlobin S.N., Erokhin A.N. Identifying the patterns of wear of the spherical sliding bearing..... 8

### Mechanics of deformable solids, dynamics and strength

- Sukhorukov A.L., Sluzky R.V. The results of verification of the numerical method for calculation of interaction between underwater object and ice cover..... 17  
Saprykina N.A., Proskokov A.V., Saprykin A.A. Structural synthesis of mechanisms kinematics-type delta..... 26  
Gordon V.A., Semenova G.A. Natural bending vibrations of the beam, partially supported on the base of Pasternak..... 34

### Machine-building technologies and equipment

- Kononenko A.S., Ignatkin I.Yu., Kildeev T.A. Renovation of metal-cutting machines precision bearing connections by polymeric materials..... 43  
Ignatov A.V., Subkhankulov R.M. Adhesive assembly of multi-layered products with variable section..... 48  
Lypka V.M., Rapatskiy Yu.L., Bratan S.M. Mathematical modeling and analysis of the process of thread grinding on the workpieces of thread rolling rollers..... 54  
Ablaev R.R., Ablaev A.R. Statement of the problem the optimal resource-efficient layout of mechanical objects..... 70  
Bratan S.M., Kharchenko A.O., Vladetskaya E.A. Stochastic flat grinding operation control system. 75

### Machine Science and Mechatronics

- Martinez Leon A.S., Jatsun S.F., Emelyanova O.V. Control of the electric drives of a multirotor system type convertiplane..... 83  
Abdulin R.R., Podshibnev V.A., Samsonovich S.L. Substantiation of the action principle of a harmonic gear with intermediate rolling bodies as a servomechanism..... 94  
Kornaev A.V., Fetisov A.S., Bobyr M.V. Effect of mass forces on the fluid flow between parallel plates..... 103  
Polyakov R.N., Bondarenko M.E., Gorin A.V. Study performance hybrid bearing gas lubrication..... 107  
Fetisov A.S., Babin A.Yu., Tyurin V.O. Experimental stand for research of the influence of magnetoreological lubricants on the operation characteristics of the sliding bearing..... 114  
Sitin A.V., Zaretskiy R.K., Tokmakov N.V. Mechatronic device for manufacturing petals..... 120

### Devices, biotechnical systems and technologies

- Sukhanova M.V. Analytical review of approaches to mathematical modeling of interactions of optical radiation with plant tissues..... 127  
Burkova E.V., Burkov D.V. Research of heat transfer processes in batteries of solar energy..... 139

### Monitoring, Diagnostics, Testing and Quality Management

- Loskutov I.A. Standards used in the development of power and control equipment for nuclear power plants..... 144  
Selikhov A.V., Mishin V.V., Voronina O.A., Podmasteryev K.V., Loskutov I.A., Khairutdinov I.I. Assessment of the reliability of the diagnostic parameter of NIV at the discrete representation of the diagnostic signal..... 151

# **ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ**

УДК 621.71.027

DOI: 10.33979/2073-7408-2020-339-1-3-7

Е.В. ХРОМОВ, И.Н. МОРЕВА

## **МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕМПФИРУЮЩИХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В СЛУЧАЕ НЕЛИНЕЙНОЙ КОМБИНИРОВАННОЙ ФУНКЦИИ ТРЕНИЯ**

**Аннотация.** *Выполнен анализ возможности применения энергетического метода для экспериментального определения коэффициентов демпфирования нелинейной комбинированной функции трения.*

**Ключевые слова:** *демпфирующие свойства, функция трения, осциллограммы колебаний.*

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Сорокин Е. С. Внутренние и внешние сопротивления при колебаниях твердых тел // Научное сообщение ЦНИИСК.– М., 1957. – Вып. 3. – 64 с.
2. Пановко Я. Г. Внутреннее трение при колебаниях упругих систем / Я.Г. Пановко. – М.: Физматгиз, 1960. – 193 с.
3. Писаренко Г.С. Обобщенная нелинейная модель учета рассеяния энергии при колебаниях / Г.С. Писаренко. – К.: Наукова думка, 1985. – 236 с.
4. Хромов Е.В. Исследования вида функции внутреннего трения для собственных изгибных колебаний стальной балки / Е.В.Хромов, О.В.Хромов // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. – 2008. – № 1. – С. 111 – 114.
5. Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы / Г.Б.Двайт. – М.: Наука, 1973. – 228 с.

**Хромов Егор Владимирович**  
ФГАОУ ВО «Севастопольский  
государственный университет»,  
г. Севастополь  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
энергоустановки морских судов и сооружений  
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33  
Тел.: +78692243561  
E-mail: ev.khromov@mail.ru

**Морева Ирина Николаевна**  
ФГАОУ ВО «Севастопольский  
государственный университет»,  
г. Севастополь  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
океанотехника и кораблестроение  
299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33  
Тел.: +78692243561  
E-mail: i.n.moreva@mail.ru

E. V. KHROMOV, I. N. MOREVA

## **METHODOLOGY FOR EXPERIMENTAL DETERMINATION OF DAMPING CHARACTERISTICS OF THE MECHANICAL SYSTEM IN THE CASE OF A NONLINEAR COMBINED FRICTION FUNCTIONS**

**Abstract.** *The analysis of the possibility of applying the energy method for the experimental determination of the damping coefficients of a nonlinear combined friction function.*

**Keywords:** *Damping properties, friction function, oscillograms of oscillations.*

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Sorokin E. C. Internal and external resistances during oscillations of solids // Scientific report TSNIISK.– М., 1957. – Issue. 3. – 64 s.
2. Panko Ya. G. Internal friction during oscillations of elastic systems / Ya.G. Panovko. – М.: Fizmatgiz, 1960.– 193 p.
3. Pisarenko G.S. Generalized nonlinear model for accounting for energy dissipation during oscillations / G.S. P-Sarenko. – К.: Naukova Dumka, 1985. – 236 p.

4. Khromov E.V. Studies of the type of internal friction function for natural bending vibrations of a steel beam / E.V. Khromov, O.V. Khromov // New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering. – 2008. – No. 1. – S. 111 – 114.

5. Dvayt G.B. Tables of integrals and other mathematical formulas / GBDvayt. – M.: Nauka, 1973.– 228 p.

**Khromov Egor Vladimirovich**

Sevastopol State University,  
PhD, Associate Professor of the Department «Ship power plants and structures»,  
Sevastopol, Universitetskaya, 33  
Tel. +78692243561  
E-mail: ev.khromov@mail.ru

**Moreva Irina Nikolaevna**

Sevastopol State University,  
PhD, Associate Professor of the Department «Ocean engineering and shipbuilding»,  
Sevastopol, Universitetskaya, 33  
Tel. +78692243561  
E-mail: i.n.moreva@mail.ru

УДК 621.891

DOI: 10.33979/2073-7408-2020-339-1-8-16

В.П. ТИХОМИРОВ, А.О. ГОРЛЕНКО, М.А. ИЗМЕРОВ,  
О.В. ДОРОФЕЕВ, С.Н. ЗЛОБИН, А.Н. ЕРОХИН

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ СФЕРИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА СКОЛЬЖЕНИЯ**

**Аннотация.** Представлена методика оценки величины износа шероховатой поверхности трения сферического подшипника скольжения на основе модифицированного уравнения Арчарда с определением коэффициента трения на основе фрактальных представлений об инженерной поверхности и расчётом приведенного коэффициента износа с учётом физико-механических свойств сопряженных тел, состояния контакта и пути трения.

**Ключевые слова:** сферический подшипник, износ, коэффициент трения, уравнение Арчарда, интенсивность изнашивания.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Archard J.F. Wear theory and mechanism, from wear control handbook. Edited by Peterson M.B. and Winter W.O. – New York, the ASME United Engineering Center. – 1980.
2. Coulomb C.A. Theorie des machines Simple. Memoire de mathematique et de physique de Academie des sciences. – 1785. – №10. – P. 161–331.
3. Majumdar A. Fractal model of elastic–plastic contact between rough surfaces / A. Majumdar, B. Bhushan / Journal of Tribology. – 1991. – 113(1). – P. 1–11.
4. Измеров М.А. Адекватность модели и реальной поверхности // М.А. Измеров, В.П. Тихомиров // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2012. – № 3. – С. 64 – 71.
5. Yan W. Contact analysis of elastic–plastic fractal surfaces / W. Yan, K. Komvopoulos / American institute of physics journal of applied physics. – 1998.
6. Ausloos M. Elastic–plastic contact model for bifractal surfaces / M. Ausloos, D.H. Berman / Proceedings of the Royal Society of London Series A. – 1985. – 400. – P. 331–350.
7. Liu Y. Fractal prediction model during the wear process based on Archard formula / Yao Liu, Yashun Wang, Xun Chen, Chunhua Zhang, Yuanvuan Tan / 2 International conference on mechanical, electronic and information technology engineering (ICMITE – 2016), 2016.

**Тихомиров Виктор Петрович**

Брянский государственный  
технический университет, г.  
Брянск  
Доктор технических наук,  
профессор, зав. кафедрой «Детали  
машин»  
dm-bgtu@yandex.ru

**Горленко Александр Олегович**

Брянский государственный  
технический университет, г.  
Брянск  
Доктор технических наук,  
профессор кафедры  
«Автомобильный транспорт»  
bugi12@bk.ru

**Измеров Михаил**

**Александрович**  
Брянский государственный  
технический университет, г.  
Брянск  
Кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Детали машин»  
maik51@yandex.ru

**Дорофеев Олег Васильевич**

ОГУ имени И.С. Тургенева, г.  
Орел  
Кандидат технических наук,  
доцент кафедры машиностроения

**Злобин Сергей Николаевич**

ОГУ имени И.С. Тургенева, г.  
Орел  
Кандидат технических наук,  
доцент кафедры машиностроения

**Ерохин Александр Николаевич**

Брянский государственный  
технический университет, г.  
Брянск  
Аспирант

V.P. TIKHOMIROV, O.A. GORLENKO, M.A. IZMEROV,  
O.V. DOROFEEV, S.N. ZLOBIN, A.N. EROKHIN

## IDENTIFYING THE PATTERNS OF WEAR OF THE SPHERICAL SLIDING BEARING

**Abstract.** *The methodology of estimating wear amount of rough surface friction of the spherical sliding bearing based on modified equations of Archard with the definition of the coefficient of friction based on the fractal ideas about the engineering of the surface and calculation of wear rate with physical and mechanical properties of the mating bodies, contact and friction the way.*

**Keywords:** *spherical bearing, wear, friction coefficient, Archard equation, wear intensity.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Archard J. F. Wear theory and movement, from the wear control manual. Edited by Peterson M. B. and Winter W. O.–New York, ASME joint Engineering center. – 1980.
2. S. A. machines the Coulomb Theorie DES just. Memoire de mathematique de Physique Et de of the académie DES Sciences. – 1785. – №10. – P. 161–331.
3. Majumdar A. fractal model of elastoplastic contact between rough surfaces / A. Majumdar, B. Bhushan / Journal of Tribology. – 1991. – 113 (1). – P. 1–11.
4. Izmerov M. A. Adequacy of the model and the real surface // M. A. Izmerov, V. p. Tikhomirov // Bulletin of the Bryansk state technical University. – 2012. – № 3. – P. 64 – 71.
5. Yan W. contact analysis of elastoplastic fractal surfaces / W. Yan, K. Komvopoulos / American institute of physics journal of applied physics. – 1998.
6. Ausloos M. elastic–plastic contact model for bifractal surfaces / M. Ausloos, D. N. Berman / Proceedings of the Royal society of London, Series A. – 1985. – 400. – P. 331–350.
7. Liu Yu fractal model for predicting the wear process on the basis of the formula of Archard / Yao Liu, Achung Wang, Xun Chen, Chunhua Zhang, Wangwang tan / 2 international conference on mechanical engineering, electronics and information technology (ICMITE – 2016), in 2016.

**Tikhomirov Viktor Petrovich**

Bryansk State Technical University,  
Bryansk,  
Doctor of technical Sciences,  
Professor, head. CFR. «Details of  
machines»,  
dm-bgtu@yandex.ru

**Gorlenko Alexander Olegovich**

Bryansk State Technical University,  
Bryansk,  
Doctor of technical Sciences, Prof.  
«Road transport»,  
bugi12@bk.ru

**Izmerov Mikhail Aleksandrovich**

Bryansk State Technical University,  
Bryansk,  
Ph. D., associate Professor, DEP.  
«Details of machines»,  
maik51@yandex.ru

**Dorofeev Oleg Vasilevich**

Orel State university, Orel  
Candidate of technical sciences,  
Associate Professor at the  
Department of “Mechanical  
engineering”  
E-mail: olegdor57@gmail.com

**Zlobin Sergey Nikolaevich**

Orel State university, Orel  
Candidate of technical sciences,  
Associate Professor at the  
Department of “Mechanical  
engineering”  
E-mail: zsn2@rambler.ru

**Erokhin Alexander Nikolaevich**

Bryansk State Technical University,  
Bryansk,  
postgraduate

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

УДК 629.12

DOI: 10.33979/2073-7408-2020-339-1-17-25

А.Л. СУХОРУКОВ, Р.В. СЛУЦКИЙ

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕРИФИКАЦИИ ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА РАСЧЕТА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОДВОДНОГО ОБЪЕКТА С ЛЕДОВЫМ ПОКРОВОМ**

**Аннотация.** В работе проведена верификация численного метода расчета взаимодействия подводного объекта с ледовым покровом на основе аналитического решения соответствующей модельной задачи. Получена аналитическая оценка прогиба ледового покрова при динамическом воздействии сосредоточенной нагрузки, которая также может быть полезна для верификации численных методов расчета динамического взаимодействия подводного объекта с ледовым покровом.

**Ключевые слова:** верификация, численные методы, подводный объект, ледовый покров, метод конечных элементов

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Власов, В.З. Балки, плиты и оболочки на упругом основании / В.З. Власов, Н.Н. Леонтьев. – М.: ФИЗМАТГИЗ, 1960. – 491 с.
2. Лурье, А.И. Операционное исчисление / А.И. Лурье. – М.–Л.: ГИТТЛ, 1950. — 432 с.
3. Короткин, А.И. Присоединенные массы судостроительных конструкций / А.И. Короткин. – СПб.: Мор Вест, 2007. – 448 с.
4. Козин, В.М. Ледоразрушающая способность изгибно–гравитационных волн от движения объектов / В.М. Козин, А.В. Онишук, Б.Н. Марьин, Ю.Л. Иванов, Н.Г. Повзык, В.И. Шпорт. – Владивосток: Дальнаука, 2005. – 198 с.
5. Песчанский, И.С. Ледоведение и ледотехника / И.С. Песчанский. – Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1967. – 324 с.
6. Позняк, И.И. Совершенствование методики приготовления моделированного льда / И.И. Позняк // Труды ААНИИ. 1973. Том 309. Ледовые качества судов, С. 200 – 209
7. Шейнин, И.С. Маломасштабное моделирование динамических явлений. Справочник проектировщика. Динамический расчет сооружений на специальные воздействия / И.С. Шейнин. – М.: Стройиздат, 1981. – 216 с.

**Сухоруков Андрей Львович**  
АО «ЦКБ МТ «Рубин», г. Санкт–Петербург  
Доктор технических наук, заместитель начальника  
отдела  
191119, г. Санкт–Петербург, ул. Марата, 90  
Тел. (812) 494–19–40  
E–mail: su\_andr@yahoo.com

**Слущкий Роман Владимирович**  
АО «ЦКБ МТ «Рубин», г. Санкт–Петербург  
Заместитель начальника отдела  
191119, г. Санкт–Петербург, ул. Марата, 90  
Тел. (812) 494–12–14

A.L. SUKHORUKOV, R.V. SLUZKY

## **THE RESULTS OF VERIFICATION OF THE NUMERICAL METHOD FOR CALCULATION OF INTERACTION BETWEEN UNDERWATER OBJECT AND ICE COVER**

**Abstract.** The verification of the numerical method for calculation of interaction between underwater object and ice cover based on analytical solution of the corresponding model problem was performed in this work. The analytical

approach for dynamic deflection of ice cover under concentrated load was obtained. It can be useful for verification of the numerical methods for calculation of dynamic interaction between underwater object and ice cover.

**Keywords:** verification, numerical methods, underwater object, ice cover, finite element method.

## BIBLIOGRAPHY

1. Vlasov, V.Z. Balki, plity i obolochki na uprugom osnovanii / V.Z. Vlasov, N.N. Leontyev. – M.: FIZMATGIZ, 1960. – 491 s.
2. Lurye, A.I. Operatsionnoe ischislenie / A.I. Lurye. – M.–L.: GITTL, 1950. – 432 s.
3. Korotkin, A.I. Prisoedinennye massy sudostroitelnykh konstruktsiy / A.I. Korotkin – SPb.: Mor Vest, 2007. – 448 s.
4. Kozin, V.M. Ledorazrushayuschaya sposobnost izgibno-gravitatsionnykh voln ot dvizheniya obyektov / V.M. Kozin, A.V. Onischuk, B.N. Maryin, Yu.L. Ivanov, N.G. Povzyk, V.I. Shport. – Vladivostok: Dalnauka, 2005. – 198 s.
5. Peschanskiy, I.S. Ledovedenie i ledotehnika / I.S. Peschanskiy. – L.: Gidrometeorologicheskoe izd-vo, 1967. – 324 s.
6. Poznyak, I.I. Sovershenstvovanie metodiki prigotovleniya modelirovannogo lda / I.I. Poznyak // Trudy AANII. 1973. Tom 309. Ledovye kachestva sudov, S. 200 – 209
7. Sheinin, I.S. Malomashtabnoe modelirovanie dinamicheskikh yavleniy. Spravochnik proektirovshchika. Dinamicheskii raschet sooruzheniy na specialnye vozdeystviya / I.S. Sheinin. – M.: Stroyizdat, 1981. – 216 s.

### Sukhorukov Andrey Lvovich

Central Design Bureau for Marine Engineering  
“Rubin”, St. Petersburg  
Doctor of Technical Sciences, Deputy Head  
Department  
191119, St. Petersburg, 90 Marata str.  
Ph.: (812) 494-19-40  
E-mail: su\_andr@yahoo.com

### Sluzky Roman Vladimirovich

Central Design Bureau for Marine Engineering  
“Rubin”, St. Petersburg  
Deputy Head Department  
191119, St. Petersburg, 90 Marata str.  
Ph.: (812) 494-12-14

УДК. 621.01

DOI: 10.33979/2073-7408-2020-339-1-26-33

Н.А. САПРЫКИНА, А.В. ПРОСКОКОВ, А.А. САПРЫКИН

## СИНТЕЗ МЕХАНИЗМОВ С КИНЕМАТИКОЙ ТИПА ДЕЛЬТА

**Аннотация.** Дельта роботы находят широкое применение при решении промышленных задач. Обладая высоким быстродействием, дельта-роботы зарекомендовали себя при сортировке и переориентации небольших изделий, сварке, пищевой промышленности и т.д. Область применения манипуляторов с кинематикой типа дельта постоянно растет. Несмотря на универсальность их применения при проектировании необходимо учитывать конкретные задачи и функции для их выполнения. В последние годы ученые занимаются созданием оптимальной конструкции 3D принтера с кинематикой типа дельта. Для улучшения функциональных возможностей необходимо оптимизировать геометрические, кинематические и динамические характеристики манипуляторов. Пространственный синтез остается главной проблемой при проектировании. В данной статье рассмотрено создание макета 3D принтера с кинематикой типа дельта. Проведен структурный анализ механизма, определены кинематические параметры звеньев механизма. Составлено векторное уравнение кинематической цепи дельта-робота. Рассмотрены вопросы о влиянии кинематических характеристик на параметры рабочего пространства.

**Ключевые слова:** дельта-робот, механизм с параллельной кинематикой, структурный анализ, кинематика типа Delta, рабочее пространство, замкнутая кинематическая цепь, манипулятор.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Несмиянов, И. А. Структурный и параметрический синтез и оптимизация программных движений манипуляторов на основе трипода [Текст]: дис. доктора. тех. наук: 05.02.18: защищена 28.11.17: утв. 15.07.02 / Несмиянов Иван Алексеевич. – Волгоград, 2017. – 349 с. – Библиогр.: с. 38–39.
2. Stewart, D. A. Platform with six degrees of freedom / D. A Stewart // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers – London. – 1965. – V.180 – Part 1. – pp. 371–386.
3. Gosselin, C.M., Kong, X., Foucault, S. and other. A fully decoupled 3-dof translational parallel mechanism. // Parallel Kinematic Machines International Conference. Chemnitz. Germany – 2004 – pp. 595–610
4. Глазунов, В.А., Колисков, А.Ш., Крайнев, А.Ф. Пространственные механизмы параллельной структуры – М.: Наука – 1991.
5. <https://actu.epfl.ch/news/the-delta-robot-swiss-made-and-fastest-in-the-world>.

6. <https://reprap.org/wiki/Rostock>.
7. Peng, B., Zhu, S., Khajepour, A., Huang, Y. Kinematics and orientation capability of a family of 3-DOF parallel mechanisms // Mechanism and Machine Theory – 142 – 2019. – 103606.
8. Laribi, M.A., Romdhane L., Zeghloul S. Analysis and dimensional synthesis of the DELTA robot for a prescribed workspace // Mech. Mach. Theory – 42 – 2007. – pp. 859–870.
9. Park, S.B., Kim, H.S., Song, C., Kim, K. Dynamics modeling of a delta-type parallel robot // The 44th International Symposium on Robotics – 2013. – pp. 1–5.
10. Correa, J. E., Toombs, N., Toombs, J., Ferreira, P. M. Laminated micro-machine: Design and fabrication of a flexure-based Delta robot // Journal of Manufacturing Processes – V. 24 – P. 2 – 2016. – P. 370–375.

**Сапрыкина Наталья Анатольевна**  
ФГАОУ ВО НИ ТПУ ЮТИ, г.  
Юрга  
Кандидат технических наук,  
доцент Юргинского  
технологического института  
652055, г. Юрга, Кемеровская  
обл.,  
ул. Ленинградская 26  
Тел. (384–51) 7–77–67  
E-mail: nat\_anat\_sapr@mail.ru

**Проскоков Андрей  
Владимирович**  
ФГАОУ ВО НИ ТПУ ЮТИ, г.  
Юрга  
Кандидат технических наук,  
доцент Юргинского  
технологического института  
652055, г. Юрга, Кемеровская  
обл.,  
ул. Ленинградская 26  
Тел. (384–51) 7–77–67  
E-mail: proskokov@tpu.ru

**Сапрыкин Александр Александрович**  
ФГАОУ ВО НИ ТПУ ЮТИ, г. Юрга  
Кандидат технических наук,  
доцент Юргинского  
технологического института  
652055, г. Юрга, Кемеровская обл.,  
ул. Ленинградская 26  
Тел. (384–51) 7–77–67  
E-mail: alex\_sapr@rambler.ru

---

N.A. SAPRYKINA, A.V. PROSKOKOV, A.A. SAPRYKIN

## **STRUCTURAL SYNTHESIS OF MECHANISMS KINEMATICS-TYPE DELTA**

**Abstract.** *Delta robots are widely used in industrial applications. With its high speed, Delta robots have proven themselves in sorting and reorientation of small products, welding, food processing, etc. the Field of application of manipulators with kinematics Delta type is constantly growing. Despite the universality of their application, the design must take into account the specific tasks and functions for their implementation. In recent years, scientists have been creating an optimal 3D printer design with Delta kinematics. To improve the functionality it is necessary to optimize the geometric, kinematic and dynamic characteristics of the manipulators. Spatial synthesis remains a major design challenge. This article discusses the creation of a 3D printer layout with kinematics type Delta. The structural analysis of the mechanism is carried out, the kinematic parameters of the mechanism links are determined. The vector equation of the kinematic chain of the Delta-robot is made. Questions about the influence of kinematic characteristics on the parameters of the working space are considered.*

**Keywords:** *delta robot, parallel kinematics mechanism, structural analysis, Delta kinematics, workspace, closed kinematic chain, manipulator.*

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Nesmiyanov, I. A. Structural and parametric synthesis and optimization of program movements of manipulators based on a tripod [Text]: dis. doctors. technical Sciences: 05.02.18: protected 28.11.17: UTV. 15.07.02 / Nesmiyanov, Ivan Alekseevich. – Volgograd, 2017. – 349 p. – Bibliogr.: pp. 38–39.
2. Stewart, D. A. Platform with six degrees of freedom / D. A Stewart // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers – London. – 1965. – V.180 – Part 1. – pp. 371–386.
3. Gosselin, C.M., Kong, X., Foucault, S. and other. A fully decoupled 3-dof translational parallel mechanism. // Parallel Kinematic Machines International Conference. Chemnitz. Germany – 2004 – pp. 595–610
4. Glazunov, V. A., Koliskor, A. sh., Kraynev, A. F. Spatial mechanisms of parallel structure–Moscow: Nauka–1991.
5. <https://actu.epfl.ch/news/the-delta-robot-swiss-made-and-fastest-in-the-world>.
6. <https://reprap.org/wiki/Rostock>.
7. Peng, B., Zhu, S., Khajepour, A., Huang, Y. Kinematics and orientation capability of a family of 3-DOF parallel mechanisms // Mechanism and Machine Theory – 142 – 2019. – 103606.
8. Laribi, M.A., Romdhane L., Zeghloul S. Analysis and dimensional synthesis of the DELTA robot for a prescribed workspace // Mech. Mach. Theory – 42 – 2007. – pp. 859–870.
9. Park, S.B., Kim, H.S., Song, C., Kim, K. Dynamics modeling of a delta-type parallel robot // The 44th International Symposium on Robotics – 2013. – pp. 1–5.



10. Correa, J. E., Toombs, N., Toombs, J., Ferreira, P. M. Laminated micro-machine: Design and fabrication of a flexure-based Delta robot // Journal of Manufacturing Processes – V. 24 – P. 2 – 2016. – P. 370–375.

**Saprykina Natalia Anatolievna**  
FSAET HE NR TPU Yurga  
Institute of Technology  
C. Sc. (Engineering), Associate  
professor  
652055, Yurga, 26,  
Leningradskaya str.  
Ph.: (384–51) 7–77–67  
e-mail: saprikina@tpu.ru

**Proskokov Andrey Vladimirovich**  
FSAET HE NR TPU Yurga Institute  
of Technology  
C. Sc. (Engineering), Associate  
professor  
652055, Yurga, 26, Leningradskaya  
str.  
Ph.: (384–51) 7–77–67  
E-mail: proskokov@tpu.ru

**Saprykin Alexander Alexandrovich**  
FSAET HE NR TPU Yurga Institute  
of Technology  
C. Sc. (Engineering), Associate  
professor  
652055, Yurga, 26, Leningradskaya  
str.  
Ph.: (384–51) 7–77–67  
E-mail: alex\_sapr@rambler.ru

УДК 624.072.2

DOI: 10.33979/2073-7408-2020-339-1-34-42

В.А. ГОРДОН, Г.А. СЕМЕНОВА

## СОБСТВЕННЫЕ ИЗГИБНЫЕ КОЛЕБАНИЯ БАЛКИ, ЧАСТИЧНО ОПЁРТОЙ НА ОСНОВАНИЕ ПАСТЕРНАКА

**Аннотация.** *Рассматривается математическая модель собственных изгибных колебаний свободной балки, частично опёртой на упругое двухпараметрическое основание Пастернака. Решение задачи собственных колебаний строится методом начальных параметров с привлечением векторов состояния сечений балки и матриц влияния начальных параметров на состояние произвольных сечений.*

**Ключевые слова:** *основание Пастернака; свободная балка; матрица влияния; вектор состояния.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пастернак, П.Л. Основы нового метода расчёта фундаментов на упругом основании при помощи двух коэффициентов постели. – М.: Госстройиздат, 1954. – 56с.
2. Клепиков, С.И. Расчёт сооружений на деформируемом основании. – Киев: НИИСК, 1994. – 203с.
3. Gordon V.A., Pilipenko O.V. Vibration of loaded beam initiated by fully or partially destruction of the elastic foundation / Proc. of the 22nd International Conference on Sound and Vibration, 2015.
4. Gordon V.A., Pilipenko O.V. Dynamical processes analysis in the load beams after partial destruction / COMPDYN 2017 – Proc. of the 6th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering 6, 2017. – Vol.2. – С. 3847–3860.
5. Гордон, В.А. Собственные поперечные колебания балки, частично опертой на упругое основание / В.А. Гордон, Г.А. Семенова, Т.В. Потураева // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2015. – № 6 (314). – С. 3–10.
6. Gordon V.A., Pilipenko O.V., Trifonov V.A. The reactions of the "beam – foundation" system to the sudden change of the boundary conditions / MATEC Web of Conferences 5. Ser. "5th International Conference of Engineering Against Failure, ICEAF-V 2018", 2018. – Vol. 188. – С. 03008.
7. Travush V.I., Gordon V.A., Kolchunov V.I., Leontiev E.V. The response of the system "beam – foundation" on sudden changes of boundary conditions / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018. – Tom 456. – С. 012130.
8. Цвей, А.Ю. Балки и плиты на упругом основании. Лекции с примерами расчёта по спецкурсу строительной механики: учебное пособие / А.Ю. Цвей. – М.: МАДИ, 2014. – 96с.
9. Fwa T.F., Shi X.P., Tan S.A. Use of Pasternak foundation model in concrete pavement analysis / International Journal of Transportation Engineering, 1996. – 122(4). – С. 323–328.
10. Teodoru I.B., Musat V., Vrabie M. A finite element study of the bending behavior of beam resting on two-parameter elastic foundation / Buletinul Institutului politehnic din Iasi, 2006. – Tom LII – Fasc. 3–4.
11. Чадаев, Ю.А. Применение метода начальных параметров к определению динамических состояний центрально-сжатых прямых неоднородных стержней / Дисс. канд. физ.-мат. наук. Тула, 2014. – 83с.

**Гордон Владимир Александрович**  
Орловский государственный университет имени И.С.  
Тургенева  
Доктор технических наук, профессор кафедры  
технической физики и математики  
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, д. 95  
Тел. +7 (4862) 41–98–48  
E-mail: gordon@ostu.ru

**Семенова Галина Александровна**  
Орловский государственный университет имени И.С.  
Тургенева  
Кандидат технических наук, доцент кафедры  
технической физики и математики  
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, д. 95  
Тел. +7 (4862) 41–98–48  
E-mail: greece-g2011@yandex.ru

V.A. GORDON, G.A. SEMENOVA

## NATURAL BENDING VIBRATIONS OF THE BEAM, PARTIALLY SUPPORTED ON THE BASE OF PASTERNAK

**Abstract.** *Mathematical model of natural bending vibrations of free beam partially supported on elastic two-parameter base of Pasternak is considered. The solution of the problem of natural vibrations is constructed by the method of initial parameters with the involvement of vectors of beam section state and matrices of influence of initial parameters on the state of arbitrary sections.*

**Keywords:** *base of Pasternak; free beam; matrix of influence; state vector.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Pasternak, P.L. Osnovy novogo metodarascheta fundamentov na uprugom osnovanii pri pomoshi dvuh koefficientov posteli. – M.: Gosstrojizdat, 1954. – 56s.
2. Klepikov, S.I. Raschet sooruzhenij na deformiruемом osnovanii. – Kiev: NIISK, 1994. – 203s.
3. Gordon V.A., Pilipenko O.V. Vibration of loaded beam initiated by fully or partially destruction of the elastic foundation / Proc. of the 22nd International Conference on Sound and Vibration, 2015.
4. Gordon V.A., Pilipenko O.V. Dynamical processes analysis in the load beams after partial destruction / COMPDYN 2017 – Proc. of the 6th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering 6, 2017. – Vol.2. – S. 3847–3860.
5. Gordon, V.A. Sobsnvenye poperechnye kolebaniya balki, chastichno opertoj na uprugoe osnovanie / V.A. Gordon, G.A. Semenova, T.V. Poturaeva // Fundamentalnye i prikladnye problem tehniki i tehnologii. – 2015. – № 6 (314). – S. 3–10.
6. Gordon V.A., Pilipenko O.V., Trifonov V.A. The reactions of the "beam – foundation" system to the sudden change of the boundary conditions / MATEC Web of Conferences 5. Ser. "5th International Conference of Engineering Against Failure, ICEAF–V 2018", 2018. – Vol. 188. – S. 03008.
7. Travush V.I., Gordon V.A., Kolchunov V.I., Leontiev E.V. The response of the system "beam – foundation" on sudden changes of boundary conditions / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018. – Tom 456. – S. 012130.
8. Chvej, A.U. Balki i plity na uprugom osnovanii. Lekhii s primerami rascheta po spechkursu stroitelnoj mehaniki: uchebnoe posobie / A.U. Chvej. – M.: MADI, 2014. – 96s.
9. Fwa T.F., Shi X.P., Tan S.A. Use of Pasternak foundation model in concrete pavement analysis / International Journal of Transportation Engineering, 1996. – 122(4). – S. 323–328.
10. Teodoru I.B., Musat V., Vrabie M. A finite element study of the bending behavior of beam resting on two-parameter elastic foundation / Buletinul Institutului politehnic din Iasi, 2006. – Tom LII – Fasc. 3–4.
11. Chadaev, U.A. Primenenie metoda nachalnyh parametrov k opredeleniyu dinamicheskikh sostoyanij centralno–szhatyh pryamyh neodnorodnyh sterzhnej / Diss. kand. fiz.–mat. nauk. Tula, 2014. – 83s.

#### Gordon Vladimir Aleksandrovich

«OGU them. I. S. Turgenev», Orel  
Doctor of technical Sciences, Professor of the Department  
of technical physics and mathematics  
302026, Orel, Komsomolskaya str., 95  
Phone: +7 (4862) 41–98–48  
E-mail: gordon@ostu.ru

#### Semenova Galina Aleksandrovna

«OGU them. I. S. Turgenev», Orel  
Ph.D., associate Professor of the Department of technical  
physics and mathematics  
302026, Orel, Komsomolskaya str., 95  
Phone: +7 (4862) 41–98–48  
E-mail: greece-g2011@yandex.ru

## **МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ** **И ОБОРУДОВАНИЕ**

УДК 621.792

DOI:10.33979/2073-7408-2020-339-1-43-47

А.С. КОНОНЕНКО, И.Ю. ИГНАТКИН, Т.А. КИЛЬДЕЕВ

### **РЕМОНТ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПОДШИПНИКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ ПОЛИМЕРНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ**

**Аннотация.** В статье обобщены требования, предъявляемые к шпиндельным узлам металлообрабатывающих станков. Рассмотрены наиболее эффективные способы ремонта и повышения надежности посадочных шеек шпинделей. Показано, что перспективным методом ремонта изношенных посадочных поверхностей является создание полимерной прослойки между валом и внутренними кольцами подшипников. Экспериментально получена новая полимерная композиция с повышенными прочностными характеристиками.

**Ключевые слова:** шпиндельный узел, подшипники, клей-герметик, износ, прочность, жесткость.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Abele E., Altintas Y., Brecher C. Machine tool spindle units. CIRP Annals, 2010, vol. 59, no. 2, pp. 781–802. DOI: 10.1016/j.cirp.2010.05.002
2. Пуш В.Э. Конструирование металлорежущих станков. – М: Машиностроение, 1997. – 391с.
3. Надежность технических систем / Е.А. Пучин, Е.А. Лисунов, А.В. Чепурин и др. – М.: Издательство КолосС, 2010. – 318 с.
4. Кононенко А.С., Кильдеев Т.А., Сажаев А.А. Восстановление посадочных поверхностей шпинделя станка DMG MORI CTX 510 ecoline полимерными наноконпозициями. // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологий. 2018. 4. С. 140–146.
5. Фирсов В.Т., Лебедь В.Т., Бобух И.А., Гречушкин Г.М. Исследование фреттинг-износа крупных деталей, соединенных натягом // Вестник машиностроения. – 1991. – №3. – с.14–16.
6. Ожегов Н.М., Слинко Д.Б. Повышение качества формирования покрытий плазменно-порошковой наплавкой. // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2017. – № 3. – с. 34–37.
7. Федоров С.К., Лашуков М.А., Гамидов А.Г. Упрочняющее электромеханическое восстановление посадочных поверхностей валов под подшипники качения. // Международный технико-экономический журнал. 2018. № 2. С. 72–77.
8. Кононенко А.С. Кильдеев Т.А., Соловьева А.А. Особенности восстановления шпиндельных валов металлорежущих станков полимерными материалами и наноконпозициями на их основе. // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2018. – № 10. – с. 3–8.
9. Кононенко А.С., Гайдар С.М. Адгезионная прочность герметиков и наноконпозиций на их основе. // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2011. № 6. С. 38–42.
10. Мокоучунина Т.В. Упрочняющее модифицирование продуктов нефтепереработки углеродными наночастицами: дис. ... канд. техн. Наук: 20.00.11 / Мокоучунина Татьяна Владимировна. – Москва., 2015. – 127 с.

**Кононенко Александр Сергеевич**  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Технологии обработки  
материалов»  
105005, г. Москва, 2-я Бауманская  
ул., д. 5, стр. 1  
Тел. 8 (926) 147–17–50  
E-mail: as-kononenko@yandex.ru

**Игнаткин Иван Юрьевич**  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г.  
Москва  
доктор технических наук,  
доцент кафедры  
«Технологии обработки  
материалов»  
105005, г. Москва, 2-я  
Бауманская ул., д. 5, стр. 1  
Тел. 8 (967) 140–78–47  
E-mail: ignatkinivan@gmail.com

**Кильдеев Тимур Анверович**  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г.  
Москва  
студент 4 курса кафедры  
«Технологии обработки  
материалов»  
105005, г. Москва, 2-я Бауманская  
ул., д. 5, стр. 1  
Тел. 8 (917) 088–41–13  
E-mail: kildeevt@mail.ru

A.S. KONONENKO, I.Yu. IGNATKIN, T.A. KILDEEV

### **RENOVATION OF METAL-CUTTING MACHINES PRECISION BEARING CONNECTIONS BY POLYMERIC MATERIALS**

**Abstract.** The article summarizes the requirements for spindle units of metalworking machines. The most effective ways to repair and improve the reliability of the spindle landing surfaces are considered. It is shown that a promising method of repairing of worn spindle landing surfaces is to create a polymer interlayer between the shaft and

*the inner rings of the bearings. A new polymer composition with improved strength characteristics was experimentally obtained.*

**Keywords:** spindle unit, bearings, adhesive–sealant, wear, strength, rigidity.

## BIBLIOGRAPHY

1. Abele E., Altintas Y., Brecher C. Machine tool spindle units. CIRP Annals, 2010, vol. 59, no. 2, pp. 781–802. DOI: 10.1016/j.cirp.2010.05.002
2. Push V.E. Konstruirovaniye metallorazhushchih stankov [Design of metal cutting machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1997, 391 p.
3. E.A. Puchin, E.A. Lisunov, A.V. Chepurin Nadezhnost tekhnicheskikh sistem [Reliability of technical systems]. Moscow, Publishing House KolosS, 2010, 318 p.
4. Kononenko A.S., Kildeev T.A., Sazhaev A.A. Vosstanovleniye posadochnykh poverkhnostey shpindelya stanka DMG MORI CTX 510 ecoline polimernymi nanokompozitsiyami. [Restoration of the seating surfaces of the spindle of the DMG MORI CTX 510 ecoline machine with polymer nanocompositions]. Fundamental and applied problems of engineering and technology, 2018, no. 4, pp. 140–146.
5. Firsov V.T., Swan V.T., Bobukh I.A., Grechushkin G.M. Issledovaniye fretting–iznosa krupnykh detaley, soyedinennykh natyagom [The study of fretting wear of large parts connected by interference]. Vestnik mashinostroyeniya, 1991, no. 3, pp. 14–16.
6. Ozhegov N.M., Slinko D.B. Povysheniye kachestva formirovaniya pokrytij plazmenno–poroshkovoj naplavkoj [Improving the quality of coating formation by plasma–powder surfacing]. Repair, Recovery, Modernization, 2017, no. 3, p. 3.
7. Fedorov S.K., Lashukov M.A., Gamidov A.G. Uprochnyayushcheye elektromekhanicheskoye vosstanovleniye posadochnykh poverkhnostey valov pod podshipniki kacheniya [Reinforcing electromechanical restoration of shaft seating surfaces under rolling bearings]. International Technical and Economic Journal. 2018, no. 2, pp. 72–77.
8. Kononenko A.S., Kildeev T.A., Soloveva A.A. Osobennosti vosstanovleniya shpindelnykh valov metallorazhushchih stankov polimernymi materialami i nanokompozitsiyami na ikh osnove [Features of restoration of spindle shafts of metal–cutting machines with polymer materials and nanocomposites based on them]. Repair, Recovery, Modernization, 2018, no. 10, pp. 3–8.
9. Kononenko A.S., Gaydar S.M. Adgezionnaya prochnost germetikov i nanokompozitsiy na ikh osnove [Adhesive strength of sealants and nanocomposites based on them]. Repair, Recovery, Modernization, 2011, no. 6, pp. 38–42.
10. Mokochunina T.V. Uprochnyayushcheye modifitsirovaniye produktov neftepererabotki uglerodnymi nanochastitsami [Strengthening modification of oil products by carbon nanoparticles]: Doct, Diss. Science: 20.00.11 / Mokochunina Tatyana Vladimirovna. Moscow., 2015, 127 p.

**Kononenko Alexander Sergeevich**  
Bauman Moscow State Technical  
University, Moscow  
Doctor of Science, Professor of  
«Materials Processing Technologies»  
department  
105005, Moscow, 2nd Baumanskaya  
St., Bldg. 5, Block 1  
Tel. 8 (926) 147–17–50  
E–mail: as–kononenko@yandex.ru

**Ignatkin Ivan Yurievich**  
Bauman Moscow State Technical  
University, Moscow  
Doctor of Science, associate  
Professor of «Materials Processing  
Technologies» department  
105005, Moscow, 2nd Baumanskaya  
St., Bldg. 5, Block 1  
Tel. 8 (967) 140–78–47  
E–mail: ignatkinivan@gmail.com

**Kildeev Timur Anverovich**  
Bauman Moscow State Technical  
University, Moscow  
4<sup>th</sup> year student of «Materials  
Processing Technologies»  
department  
105005, Moscow, 2nd Baumanskaya  
St., Bldg. 5, Block 1  
Tel. 8 (917) 088–41–13  
E–mail: kildeev@mail.ru

УДК 621.792

DOI: 10.33979/2073-7408-2020-339-1-48-53

А.В. ИГНАТОВ, Р.М. СУБХАНКУЛОВ

## АДГЕЗИВНАЯ СБОРКА МНОГОСЛОЙНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ

**Аннотация.** Предложена оригинальная, не имеющая прямых аналогов в мире, технология адгезивной сборки многослойных изделий переменного сечения из полимерных композиционных материалов. Технология позволяет обойти недостатки существующих и значительно расширить возможности по применению современных полимерных композиционных материалов при серийном изготовлении продукции высокотехнологичного машиностроения наиболее сложной геометрической формы. Представлены результаты экспериментальных исследований по разработке методики по управлению основными технологическими режимами в процессе бесконтактной выкладки изделий из полимерных композиционных материалов. В результате теоретических и экспериментальных исследований оригинального метода бесконтактной выкладки: выявлены рекомендуемые технологические режимы, позволяющие управлять технологическим процессом с целью достижения требуемого качества и снижения трудоемкости; получены эмпирические зависимости, позволяющие рассчитывать технологические режимы бесконтактной выкладки в рамках разработанного оригинального метода, и позволяющие прогнозировать технико–эксплуатационные показатели многослойных изделий переменного сечения.

**Ключевые слова:** клеевая сборка, подготовка производства, полимерные изделия, клеевая композиция, упрочняющий материал, профильные изделия, оболочка, лопасть, винт, лопатка.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Субханкулов Р.М., Игнатов А.В. Разработка классификации полимерных изделий переменного сечения / Р. М. Субханкулов, А. В. Игнатов// Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2018. №12. С. 531–536.
2. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. М.: Наука, 1970.
3. Caruso, M. M., Davis, D. A., Shen, Q., Odom, S. A., Sottos, N. R., White, S. R., & Moore, J. S. (2009). Mechanically-induced chemical changes in polymeric materials. *Chemical reviews*, 109(11), 5755–5798.
4. Крысин В. Н., Крысин М. В. Технологические процессы формования, намотки и склеивания конструкций. – М.: Машиностроение, 1989 – 240 с.: ил.
5. Дятченко С. В. Технология изготовления корпусов судов из полимерных композиционных материалов: [учебное пособие для вузов по специальности 140100 – Кораблестроение]/ С. В. Дятченко, А. П. Иванов; Л. И. Полищук; Калинингр. гос. техн. ун–т. – Калининград: Изд–во КГТУ, 2003.
6. Головкин Г. С. Проектирование технологических процессов изготовления изделий из полимерных материалов. – М.: Химия, КолосС, 2007 – 399 с.: ил. – (Учебники и учеб. Пособия для студентов высш. Уч. заведений).
7. Lichtinger, R., Hörmann, P., Stelzl, D., & Hinterhölzl, R. (2015). The effects of heat input on adjacent paths during automated fibre placement. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 68, 387–397.
8. Тимошенко С.П. Сопротивление материалов. М.: Наука, Т. 1–2, 1965.
9. Rizzolo, R. H., & Walczyk, D. F. (2016). Ultrasonic consolidation of thermoplastic composite prepreg for automated fiber placement. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 29(11), 1480–1497.
10. Бутенин Н.В., Луц Я.Л., Меркин Д.Р. Курс теоретической механики. М.: Наука, Т. 1, 1979.
11. Субханкулов Р.М., Игнатов А.В. Разработка прогрессивного технологического метода изготовления полимерных изделий переменного сечения в отечественном авиа– и кораблестроении. Современные технологии в кораблестроительном и авиационном образовании, науке и производстве: сборник докладов Всероссийской научно–практ. конф.; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2016. С. 286–288.
12. Демидов С.П. Теория упругости. М.: Высшая школа, 1979

**Игнатов Алексей Владимирович**  
ФГБОУВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»  
К. т. н., доцент кафедры «Технология  
машиностроения»  
105005, Москва, 2–я Бауманская ул., д. 5, стр. 1  
Тел. +7 (499) 267–0206  
E–mail: avi@bmstu.ru

**Субханкулов Рустам Маратович**  
ФГБОУВО «МГТУ им. Н.Э. Баумана»  
Аспирант кафедры «Технология машиностроения»  
105005, Москва, 2–я Бауманская ул., д. 5, стр. 1  
Тел. +7 (926) 860–94–81  
E–mail: subtem@rambler.ru

A.V. IGNATOV, R.M. SUBKHANKULOV

## ADHESIVE ASSEMBLY OF MULTI-LAYERED PRODUCTS WITH VARIABLE SECTION

**Abstract.** *The paper provides an original technology for the adhesive assembly of multilayer products with variable cross-section made of polymer composite materials. The technology allows circumventing the shortcomings of existing and significantly expanding the possibilities for the use of modern polymer composite materials in the serial production of high-tech industry products of the most complex geometric shapes. The results of experimental studies on the development of methods for managing the main technological modes in the process of non-contact laying out of products from polymer composite materials are presented. As a result of theoretical and experimental studies of the original method of contactless calculation: the recommended technological modes have been identified that allow you to control the process in order to achieve the required quality and reduce the complexity; empirical dependences are obtained that allow one to calculate the technological modes of contactless calculation within the framework of the developed original method and allow one to predict the technical and operational characteristics of multilayer products of variable cross section.*

**Keywords:** *adhesive assembly, pre-production, polymer products, adhesive composition, hardening material, profile products, shell, blade, screw*

## BIBLIOGRAPHY

1. Subhankulov R.M., Ignatov A.V. Razrabotka klassifikacii polimernyh izdelij peremennogo secheniya / R. M. Subhankulov, A. V. Ignatov// Sbornik v mashinostroenii, priborostroenii. – 2018, №12, 531–536.
2. Feodosev V.I. Soprotivlenie materialov. M.: Nauka, 1970.
3. Caruso, M. M., Davis, D. A., Shen, Q., Odom, S. A., Sottos, N. R., White, S. R., & Moore, J. S. (2009). Mechanically-induced chemical changes in polymeric materials. Chemical reviews, 109(11), 5755–5798.
4. Krysin V. N., Krysin M. V. Tekhnologicheskie processy formovaniya, namotki i skleivaniya konstrukcij. – M.: Mashinostroenie, 1989.
5. Dyatchenko S. V. Tekhnologiya izgotovleniya korpusov sudov iz polimernyh kompozicionnyh materialov: [uchebnoe posobie dlya vozov po specialnosti 140100 – Korablestroenie]/ S. V. Dyatchenko, A. P. Ivanov; L. I. Polishchuk; Kaliningr. gos. tekhn. un-t. – Kaliningrad: Izd-vo KGTU, 2003.
6. Golovkin G. S. Proektirovanie tekhnologicheskikh processov izgotovleniya izdelij iz polimernyh materialov. – M.: Himiya, KolosS, 2007.
7. Lichtinger, R., Hörmann, P., Stelzl, D., & Hinterhölzl, R. (2015). The effects of heat input on adjacent paths during automated fibre placement. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 68, 387–397.
8. Timoshenko S.P. Soprotivlenie materialov. M.: Nauka, Vol. 1–2, 1965.
9. Rizzolo, R. H., & Walczyk, D. F. (2016). Ultrasonic consolidation of thermoplastic composite prepreg for automated fiber placement. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 29(11), 1480–1497.
10. Butenin N.V., Lunc YA.L., Merkin D.R. Kurs teoreticheskoy mekhaniki. M.: Nauka, Vol. 1, 1979.
11. Subhankulov R.M., Ignatov A.V. Razrabotka progressivnogo tekhnologicheskogo metoda izgotovleniya polimernyh izdelij peremennogo secheniya v otechestvennom avia- i korablestroenii. Sovremennye tekhnologii v korablestroitelnom i aviacionnom obrazovanii, nauke i proizvodstve: sbornik dokladov Vserossijskoj nauchno-prakt. konf.; NGTU im. R.E. Alekseeva. – Nizhnij Novgorod, 2016, 286–288.
12. Demidov S.P. Teoriya uprugosti. M.: Vysshaya shkola, 1979.

**Ignatov Aleksey Vladimirovich**

"Bauman MSTU", Moscow

Ph.D., associate professor of the department "Engineering Technology"

105005, Moscow, 2–nd Baumanskaya ul. 5, bld. 1

Ph. +7 (499) 267–0206

E-mail: avi@bmstu.ru

**Subhankulov Rustam Maratovich**

"Bauman MSTU", Moscow

Graduate student of the department "Engineering Technology"

105005, Moscow, 2–nd Baumanskaya ul. 5, bld. 1

Ph. +7 (926) 860–94–81

E-mail: subtem@rambler.ru

УДК 621.0:519.873

DOI: 10.33979/2073-7408-2020-339-1-54-69

**В.М. ЛИПКА, Ю.Л. РАПАЦКИЙ, С.М. БРАТАН**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
И АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ШЛИФОВАНИЯ РЕЗЬБЫ  
НА ЗАГОТОВКАХ РЕЗЬБОНАКАТНЫХ РОЛИКОВ**

**Аннотация.** *Исследуется процесс шлифования резьбовых канавок на заготовках роликов, предназначенных для накатывания наружных резьб на двухроликовых резьбонакатных станках. К резьбонакатным роликам предъявляются высокие требования по точности и стойкости, которые могут быть выполнены при условии получения наружной резьбы на них резьбошлифованием. Наименьшие погрешности формы и размеров резьбы могут быть получены при шлифовании заготовок резьбонакатных роликов одноиточным кругом, но проблемой является обеспечение стабильной формы резьбового профиля, а также предотвращение прижогов и шлифовочных трещин. Для обеспечения качества и стабильной формы резьбового профиля разработан способ повышения стабильности профиля круга за счет увеличения износа круга на боковых участках путем увеличения на них глубины резания. Для реализации предложенного способа разработана и верифицирована математическая модель процесса шлифования резьбы, обеспечивающего сохранение профиля круга. Предложена и обоснована аппроксимация сложного профиля резьбовой канавки, обеспечивающего стабильность профиля круга в процессе его износа, дугой окружности. Полученные результаты актуальны для специалистов в области производства и восстановления резьбонакатных инструментов.*

**Ключевые слова:** *наружная резьба, резьбошлифование, математическая модель, надежность, производительность технологического процесса*

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений/ Под общ. ред. А.Г. Сулова. – М: Машиностроение, 2006. –448 с.
2. Петриков А.П. Прогрессивные крепежные изделия / А.П. Петриков, В.Г. Власов – М: Машиностроение, 1991. – 256 с.

3. Липка В.М. Повышение качества и надежности резьбовых соединений в условиях серийного производства силовых агрегатов для легковых автомобилей / В.М. Липка, В.Я. Копп, Ю.Л. Рапацкий // Вестник СевНТУ. Сер.: Машиноприборостроение и транспорт: сб. науч. тр. – Севастополь, 2013. – Вып.139. – С. 154 – 160.
4. Липка В.М. Оценка влияния параметров резьбовых крепежных изделий на качество сборки силовых агрегатов автомобилей / В.М. Липка, Ю.Л. Рапацкий // Вестник СевНТУ. сер. Машиноприборостроение и транспорт: сб. науч. тр. – Севастополь, 2010. – вып. 107. – С. 121 – 127.
5. Аверченков В.И. Основы математического моделирования технических систем: учеб. пособие / В.И. Аверченков, В.П. Федоров, М.Л. Хейфец. – М.: «Флинта», 2016. – 271 с.
6. Липка В.М. Исследование надежности процесса накатывания наружных резьб с учетом взаимосвязанных отказов / В.М. Липка, С.М. Братан, Ю.Л. Рапацкий // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии: научно-технический журнал. Орел: изд-во ОГУ им. И.С. Тургенева, №4-2-(330) 2018-12-23. – С.198 – 206.
7. Киричек А.В. Резьбонакатывание.: Библиотека технолога / А.В. Киричек, А.Н. Афонин – М.: Машиностроение, 2009. – 312 с.
8. Якухин В.Г. Изготовление резьбы: Справочник / В.Г. Якухин, В.А. Ставров – М: Машиностроение, 1989 – 192 с.
9. Липка В.М. Повышение надежности резьбонакатных роликов, изготавливаемых методом резьбошлифования / В.М. Липка, С.М. Братан, Ю.Л. Рапацкий // Вестник современных технологий / сборник научных трудов. – №4(12) 2018 Севастополь, Брянск, 2018 г. – С.49 –57.
10. Рапацкий Ю.Л. Математическая модель процесса накатывания наружных резьб роликами / Ю.Л. Рапацкий, В.М. Липка // Вестник СевНТУ. Сер.Машино – приборостроение– и транспорт: сб.науч.тр. – Севастополь: изд-во СевНТУ, 2011. – Вып. 111. – С. 138 – 143.
11. Липка В.М. Повышение точности математической модели процесса накатывания наружных резьб на двухроликотых станках / В.М. Липка // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем.: сб. науч. трудов. – Краматорск, 2011. – № 28. – С. 305 – 310.
12. Исследование накатывания резьбы на заготовках из труднообрабатываемых материалов / И.А. Бугай и др.// Динамика систем, механизмов и машин. Омск: Омский государственный технический университет. 2017. №1 т.5. С.93–96 DOI: 10.25206/2310–9793–2017–5–1–93–96
13. Безязычный В.Ф. Технологические процессы механической и физико-технической обработки в машиностроении/ В.Ф. Безязычный и др. – М.: Лань, 2016. – 432 с.
14. Прокофьев А.Н. Разработка системы выбора оптимального метода обработки резьбы. / А.Н. Прокофьев // Качество машин. Сборник трудов. Брянск. – БГТУ. – 2001. – С.88 – 89.
15. Расулов Н.М. О точности формы резьбы при ее накатывании на двухроликотых профиленкатных станках и повышении эффективности технологического процесса / Н.М. Расулов, Г.В. Дамирова // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. научных трудов. В 3 кн. Книга 3. Обработка металлов давлением / редкол.: А.В. Белый (гл. ред.) [и др.]. –Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2017. – С. 106 – 116.
16. Липка В.М. Анализ стойкости резьбонакатного инструмента в условиях автоматизированного массового производства и пути её повышения / В.М. Липка, Ю.Л. Рапацкий // Вестник СевНТУ. Сер. Машиноприборостроение и транспорт.: сб. науч. трудов. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2011. – С.68 – 75.
17. Васильев Е.В. Технология восстановления резьбонакатных роликов / Е.В. Васильев, А.Ю. Попов, О.Е. Патрахина // Динамика систем, механизмов и машин/ журнал.–№2 2012 Омск: изд-во Омского государственного технического университета, 2012г.– С. 350 – 354.
18. Филимонов Л.Н. Стойкость шлифовальных кругов. Л.: Машиностроение, 1973. – 136 с.
19. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов. –М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.
20. Глясс В.Д., Кудасов Г.Ф. Резьбошлифование.: Л.: Машгиз, 1960. – 64 с.
21. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. – М: Машиностроение, 1982.– 320 с.
22. Лоладзе Т.Н. Износ алмазов и алмазных кругов / Т.Н. Лоладзе, Г.В. Бокучава. – М.:Машиностроение, 1967. – 113 с.
23. Новоселов Ю.К. Анализ связи износа инструмента с износом абразивных зерен /Ю.К. Новоселов, В.Б. Богущкий //Резание и инструмент в технологических системах: междунар. науч.–техн. сб. – Харьков.: НТУ «ХПИ», 2012. – вып.81.– С.228 – 237.
24. Кремень З.И. Технология шлифования в машиностроении/З.И. Кремень, В.Г. Юрьев, А.Ф. Бабошкин: под общ.ред. З.И. Кременя. — СПб.: Политехника, 2007 – 424 с.
25. Kremen Z.I. A new generation of high-porous vitrified CBN grinding wheels.– JDR, 2003.–№4. – P.53–56.
26. Якухин В.Г. Высокотехнологичные методы металлообработки.: Учебник. – Под ред. О.В. Таратынова. // М.: МГИУ, 2011. –362 с.
27. Братан С.М. Автоматическое управление процессами механической обработки: учебник/ С.М. Братан и др. – М: Вузовский учебник: ИНФРА–М, 2017. –228с.
28. Курдюков В.И. Основы абразивной обработки. – Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2014. – 195 с.
29. Должиков В.П. Разработка технологических процессов механообработки в мелкосерийном производстве. – М.: Лань, 2016. – 328 с.
30. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник. Под ред А.М. Резникова. –М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
31. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). – М.: Наука, 1978. – 832 с.
32. Солонин И.С. Математическая статистика в технологии машиностроения. – М: Машиностроение, 1972. – 215 с.

Филиал ФГБОУ ВО  
«Государственный Морской  
университет им. адм. Ф.Ф.  
Ушакова»  
в г. Севастополь  
Старший преподаватель кафедры  
«Фундаментальные дисциплины»  
Аспирант кафедры «Технология  
машиностроения»,  
Политехнический институт  
ФГАОУ ВО «Севастопольский  
государственный университет»,  
299009, г. Севастополь, ул. Героев  
Севастополя, 11 к8/22  
+7 (978) 767 32 71  
E-mail: lipka.vita@yandex.ru

государственный университет»,  
г. Севастополь  
Кандидат технических наук,  
доцент  
Директор Центра оценки качества  
образования, доцент кафедры  
«Приборные системы и  
автоматизация технологических  
процессов»,  
Политехнический институт,  
299053, г. Севастополь,  
ул. Университетская, 33  
+7(8692) 41 77 41 доб. 1275  
+7(978) 767-96-50

ФГАОУ ВО «Севастопольский  
государственный университет», г.  
Севастополь  
Доктор технических наук,  
профессор,  
Заведующий кафедрой  
«Технология машиностроения»,  
Политехнический институт,  
299053, г. Севастополь, ул.  
Университетская, 33  
+7(8692) 41 77 41 доб. 1150  
E-mail: tm@sevsu.ru

V.M. LYPKA, Yu.L. RAPATSKIY, S.M. BRATAN

## MATHEMATICAL MODELING AND ANALYSIS OF THE PROCESS OF THREAD GRINDING ON THE WORKPIECES OF THREAD ROLLING ROLLERS

**Abstract.** *The process of grinding of threaded grooves on work pieces of rollers intended for rolling of external threads on two-roller thread rolling machines is investigated. Thread rolling rollers are subject to high requirements for accuracy and durability, which can be performed subject to obtaining the external thread on them by thread grinding. The smallest errors in the shape and size of the thread can be obtained when grinding work pieces thread rollers single-thread circle, but the problem is to ensure a stable shape of the threaded profile, as well as the prevention of burns and grinding cracks. To ensure the quality and the stable shape of the threaded profile, a method has been developed to increase the stability of the circle profile by increasing the wear of the circle on the side sections by increasing the cutting depth on them. To implement the proposed method, a mathematical model of the thread grinding process was developed and verified, which ensures the preservation of the circle profile. The approximation of a complex profile of a threaded groove providing stability of a profile of a circle in the course of its wear by a circle arc is offered and proved. The results obtained are relevant for specialists in the field of production and restoration of thread rolling tools.*

**Keywords:** *external thread, thread grinding, mathematical model, reliability, productivity of technological process.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Tekhnologicheskoe obespechenie i povyshenie ekspluatatsionnykh svoystv detalej i ih soedinenij/ Pod obshch.red. A.G. Suslova. – M: Mashinostroenie, 2006. –448 s.
2. Petrikov A.P. Progressivnye krepzhnnye izdeliya / A.P. Petrikov, V.G. Vlasov – M: Mashinostroenie, 1991. – 256 s.
3. Lipka V.M. Povyshenie kachestva i nadezhnosti rezbovnykh soedinenij v usloviyakh serijnogo proizvodstva silovykh agregatov dlya legkovykh avtomobilej / V.M. Lipka, V.YA. Kopp, YU.L. Rapackij // Vestnik SevNTU. Ser.: Mashinoprioborostroenie i transport: sb. nauch. tr. – Sevastopol, 2013. – Vyp.139. – S. 154 – 160.
4. Lipka V.M. Ocenka vliyaniya parametrov rezbovnykh krepzhnnykh izdelij na kachestvo sborki silovykh agregatov avtomobilej / V.M. Lipka, YU.L. Rapackij // Vestnik SevNTU. ser. Mashinoprioborostroenie i transport: sb. nauch. tr. – Sevastopol, 2010. – vyp. 107. – S. 121 – 127.
5. Averchenkov V.I. Osnovy matematicheskogo modelirovaniya tekhnicheskikh sistem: ucheb. posobie / V.I. Averchenkov, V.P. Fedorov, M.L. Hejfec. – M.: «Flinta», 2016. – 271 s.
6. Lipka V.M. Issledovanie nadezhnosti processa nakatyvaniya naruzhnykh rezb s uchetom vzaimosvyazannykh otkazov / V.M. Lipka, S.M. Bratan, YU.L. Rapackij // Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii: nauchno-tekhnicheskij zhurnal. Orel: izd-vo OGU im. I.S. Turgeneva, №4-2-(330) 2018-12-23. – S.198 – 206.
7. Kirichek A.V. Rezbokatnyvanie.: Biblioteka tekhnologa / A.V. Kirichek, A.N. Afonin – M.: Mashinostroenie, 2009. – 312 s.
8. YAkuhin V.G. Izgotovlenie rezby: Spravochnik / V.G. YAkuhin, V.A. Stavrov – M: Mashinostroenie, 1989 – 192 s.
9. Lipka V.M. Povyshenie nadezhnosti rezbonakatnykh rolikov, izgotavlivaemykh metodom rezboshlifovaniya / V.M. Lipka, S.M. Bratan, YU.L. Rapackij // Vestnik sovremennykh tekhnologij / sbornik nauchnykh trudov. – №4(12) 2018 Sevastopol, Bryansk, 2018 g. – S.49 –57.
10. Rapackij YU.L. Matematicheskaya model processa nakatyvaniya naruzhnykh rezb rolikami / YU.L. Rapackij, V.M. Lipka // Vestnik SevNTU. Ser. Mashino – prioborostroenie – i transport: sb. nauch. tr. – Sevastopol: izd-vo SevNTU, 2011. – Vyp. 111. – S. 138 – 143.
11. Lipka V.M. Povyshenie tochnosti matematicheskoy modeli processa nakatyvaniya naruzhnykh rezb na dvuhrolikovykh stankah / V.M. Lipka // Nadezhnost instrumenta i optimizatsiya tekhnologicheskikh sistem.: sb. nauch. trudov. – Kramatorsk, 2011. – № 28. – S. 305 – 310.



12. Issledovanie nakatyvaniya rezby na zagotovkah iz trudnoobrabatyvaemykh materialov / I.A. Bugaj i dr.// Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. Omsk: Omskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet. 2017. №1 t.5. S.93–96 DOI: 10.25206/2310–9793–2017–5–1–93–96
13. Bez"yazychnyj V.F. Tekhnologicheskie processy mekhanicheskoy i fiziko–tekhnicheskoy obrabotki v mashinostroenii/ V.F. Bez"yazychnyj i dr. – M.: Lan, 2016. – 432 s.
14. Prokofev A.N. Razrabotka sistemy vybora optimalnogo metoda obrabotki rezby. / A.N. Prokofev // Kachestvo mashin. Sbornik trudov. Bryansk. – BG TU. – 2001. – S.88 – 89.
15. Rasulov N.M. O tochnosti formy rezby pri ee nakatyvanii na dvuhrolikovykh profilenakatnykh stankah i povyshenii effektivnosti tekhnologicheskogo processa / N.M. Rasulov, G.V. Damirova // Sovremennye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov: sb. nauchnykh trudov. V 3 kn. Kniga 3. Obrabotka metallov davleniem / redkol.: A.V. Belyj (gl. red.) [i dr.]. –Minsk: FTI NAN Belarusi, 2017. – S. 106 – 116.
16. Lipka V.M. Analiz stojkosti rezbonakatnogo instrumenta v usloviyah avtomatizirovannogo massovogo proizvodstva i puti eyo povysheniya / V.M. Lipka, YU.L. Rapackij // Vestnik SevNTU. Ser. Mashinopriborostroenie i transport.: sb. nauch. trudov. – Sevastopol: Izd–vo SevNTU, 2011. – S.68 – 75.
17. Vasilev E.V. Tekhnologiya vosstanovleniya rezbonakatnykh rolikov / E.V. Vasilev, A.YU. Popov, O.E. Patrahina // Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin/ zhurnal.–№2 2012 Omsk: izd–vo Omskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2012g.– S. 350 – 354.
18. Filimonov L.N. Stojkost shlifovalnykh krugov. L.: Mashinostroenie, 1973. – 136 s.
19. Maslov E.N. Teoriya shlifovaniya materialov. –M.: Mashinostroenie, 1974. – 320 s.
20. Glyass V.D., Kudasov G.F. Rezboshlifovanie.: L.: Mashgiz, 1960. – 64 s.
21. Loladze T.N. Prochnost i iznosostojkost rezhushchego instrumenta. – M: Mashinostroenie, 1982.– 320 s.
22. Loladze T.N. Iznos almazov i almaznykh krugov / T.N. Loladze, G.V.Bokuchava. – M.:Mashinostroenie, 1967. – 113 s.
23. Novoselov YU.K. Analiz svyazi iznosa instrumenta s iznosom abrazivnykh zeren /YU.K. Novoselov, V.B. Boguckij //Rezanie i instrument v tekhnologicheskikh sistemah: mezhdunar. nauch.–tekhn. sb. – Harkov.: NTU «HPI», 2012. – vyp.81.– S.228 – 237.
24. Kremen Z.I. Tekhnologiya shlifovaniya v mashinostroenii/Z.I. Kremen, V.G. YUrev, A.F. Baboshkin: pod obshch.red. Z.I. Kremnya. — SPb.: Politekhnika, 2007 – 424 s.
25. Kremen Z.I. A new generation of high–porous vitrified CBN grinding wheels.– JDR, 2003.–№4. – P.53–56.
26. YAKuhin V.G. Vysokotekhnologichnye metody metalloobrabotki.: Uchebnik. – Pod red. O.V. Taratynova. // M.: MGIU, 2011. –362 s.
27. Bratan S.M. Avtomaticheskoe upravlenie processami mekhanicheskoy obrabotki: uchebnik/ S.M. Bratan i dr. – M: Vuzovskij uchebnik: INFRA–M, 2017. –228s.
28. Kurdyukov V.I. Osnovy abrazivnoj obrabotki. – Kurgan: Izd–vo Kurganskogo gos. un–ta, 2014. – 195 s.
29. Dolzhikov V.P. Razrabotka tekhnologicheskikh processov mekhanooobrabotki v melkoserijnom proizvodstve. – M.: Lan, 2016. – 328 s.
30. Abrazivnaya i almaznaya obrabotka materialov. Spravochnik. Pod red A.M. Reznikova. –M.: Mashinostroenie, 1977. – 391 s.
31. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike (dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov). – M.: Nauka, 1978. – 832 s.
32. Solonin I.S. Matematicheskaya statistika v tekhnologii mashinostroeniya. – M: Mashinostroenie, 1972. – 215 s.

**Lypka Victoria Mikhailovna**  
Senior Lecturer, chair «Fundamental Disciplines», Philial FGBOU VO «State Maritime University named after Admiral F.F. Ushakov» in the city of Sevastopol  
Postgraduate student, Chair of Technology of Mechanical Engineering, Polytechnic Institute, Sevastopol State University 299009, 11 b8/22, Geroev Sevastopolya st., Sevastopol  
+7 (978) 767 32 71  
E–mail: lipka.vita@yandex.ru

**Rapatskiy Yuri Leonidovich**  
Sevastopol State University, Director of the Center for Educational Quality Assessment, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Chair «Instrumentation systems and automation of technological processes» Polytechnic Institute, 299053, 33, Universitetskaya st, Sevastopol,  
+7(978)767–96–50  
E–mail: u.l.rapatskiy@mail.ru

**Bratan Sergey Mikhailovich**  
Sevastopol State University, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief of Chair of Technology Of Mechanical Engineering, Polytechnic Institute, Sevastopol State University 299053, 33, Universitetskaya st., Sevastopol,  
+7(8692) 41 77 41 add. 1150  
E–mail: tm@sevsu.ru

УДК 629.363

DOI: 10.33979/2073-7408-2020-339-1-70-74

Р.Р. АБЛАЕВ, А.Р. АБЛАЕВ

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОЙ РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОЙ КОМПОНОВКИ МЕХАНИЗИРОВАННЫХ ОБЪЕКТОВ

**Аннотация.** В статье рассмотрены вопросы наиболее сложного и трудоемкого этапа проектирования механизированных объектов – этапа определения рациональной компоновки производства, включающего в себя определение конфигурации и размеров объекта, а также оптимального расположения в нем технологического оборудования.

**Ключевые слова:** передвижной механизированный комплекс, компоновка, оптимизация, целевая функция, автоматизация.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Митрофанов В.Г. Задачи размещения и компоновки технологического оборудования/ В.Г. Митрофанов, Л.В. Феоктистова // Вестник МГТУ «Станкин», №2 – М., 2008. – С. 87–96.
2. Егоров С.Я. Аналитические и процедурные модели компоновки оборудования промышленных производств: монография / С.Я. Егоров. – М.: Машиностроение–1, 2007. – 104 с.
3. Кафаров В.В. Проектирование и расчет оптимальных систем технологических трубопроводов/ В.В. Кафаров, В.П. Мешалкин. – М.: Химия, 1991. – 368 с.
4. Аблаев Р.Р. Перспективы использования передвижных механизированных комплексов как основа расширения рынка услуг по ремонту и техническому обслуживанию машин и сооружений // Вестник молодежной науки. 2018. №1 (13). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivy-ispolzovaniya-peredvizhnyh-mehanizirovannyh-kompleksov-kak-osnova-rasshireniya-rynka-uslug-po-remontu-i-tehnicheskomu> (дата обращения: 02.10.2019).
5. Бакунина Т.А. Проектирование механосборочных цехов: Учебное пособие/ Т.А. Бакунина, Е.В. Тимофеева. – Рыбинск: РГАТА имени П. А. Соловьева, 2011.–154с.
6. Технология машиностроения: В 2 т. Т.2. Производство машин: Учебник для вузов / В. М. Бурцев, А. С. Васильев, О. М. Деев и др.; Под ред. Г. Н. Мельникова. – М.: Изд-во МГТУ им Н. Э. Баумана, 2012. – 551 с.
7. Усачев Ю.И. Синтез компоновочных схем механосборочных цехов // Проблемы Науки. 2016. №6 (48). С–39–46 URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sintez-komponovochnyh-shem-mehanoborochnyh-tsehov> (дата обращения: 02.10.2019).
8. Жуков Е.М. Компоновочно–технологическое проектирование автоматизированного механообрабатывающего производства деталей энергетического и горнодобывающего комплекса: дис.... канд. техн. наук: 05.02.08. – Белгород, 2006 – 197 с.

**Аблаев Ремзи Рустемович**  
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,  
г. Севастополь  
Старший преподаватель кафедры «Экономика предприятий», судебный эксперт–автотехник  
299053, г. Севастополь,  
ул. Университетская, 33  
Тел. 8978–801–91–41  
E–mail: ablaev.expert@mail.ru

**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: ARAblaev@sevsu.ru

---

R.R. ABLAEV, A.R. ABLAEV

### STATEMENT OF THE PROBLEM THE OPTIMAL RESOURCE– EFFICIENT LAYOUT OF MECHANICAL OBJECTS

**Abstract.** The article deals with the most complex and time-consuming stage of designing mechanized facilities–the stage of determining the rational layout of production, including the definition of the configuration and size of the object, as well as the optimal location of technological equipment in it.

**Keywords:** mobile mechanized complex, layout, optimization, objective function, automation.

### BIBLIOGRAPHY

1. Mitrofanov V.G. problems of placement and layout of technological equipment / V. G. Mitrofanov–Nov, L. V. Feoktistova // Vestnik MGTU "Stankin", №2 – М., 2008. Pp. 87–96.
2. Egorov S.Y. Analytical and procedural models of industrial production equipment layout: monograph / S. Ya. Egorov. – Moscow: Mashinostroenie–1, 2007. – 104 p.
3. Kafarov V.V. Design and calculation of optimal systems of technological pipelines/ V. V. Kafarov, V. P. Meshalkin. – М.: Chemistry, 1991. – 368 p.

4. Ablaev R.R. Prospects for the use of mobile mechanized complexes as a basis for expanding the market for repair and maintenance of machines and structures // Bulletin of youth science. 2018. No. 1 (13).
5. Bakunina T.A. Design of the mechanical Assembly shop: a Training manual/ T.A. Bakunina, E.V. Timofeeva. – Rybinsk, 2011.– 154 p.
6. Mechanical engineering technology: In 2 vols. Production of machines: Textbook for universities / V. M. Burtsev, A. S. Vasiliev, O. M. Deev, etc.; ed. – M.: Publishing house of Bauman Moscow state technical University, 2012. – 551 p.
7. Usachev Y.I. Synthesis of layout schemes of mechanical Assembly shops // Problems of Science. 2016. No. 6 (48). С–39–46
8. Zhukov E. M. Layout and technological design of automated machining production of parts of the energy and mining complex: dis.... kand. Techn. Sciences: 05.02.08. – Belgorod, 2006–197 p.

**Ablaev Remzi Rustemovich**  
Senior Lecturer  
Sevastopol State University, expert  
299053, Sevastopol, Universitetskaya Str. 33  
Ph.: 8978–801–91–41  
E–mail: ablaev.expert@mail.ru

**Ablaev Alim Rustemovich**  
Ph.D., Associate Professor  
Sevastopol State University  
299053, Sevastopol, Universitetskaya Str. 33  
Ph.: 8978–810–05–64  
E–mail: ARAblaev@sevsu.ru

УДК 621.923:621.90.17

DOI: 10.33979/2073-7408-2020-339-1-75-82

С.М. БРАТАН, А.О. ХАРЧЕНКО, Е.А. ВЛАДЕЦКАЯ

## СТОХАСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ОПЕРАЦИЕЙ ПЛОСКОГО ШЛИФОВАНИЯ

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы стохастического управления операцией шлифования с динамической стабилизацией параметров цикла обработки. Представленная автоматическая система осуществляет управление операцией шлифования путем стабилизации глубины резания на протяжении всего цикла шлифования с применением специальной стратегии регулирования. Основой системы является введение в память управляющей ЭВМ данных, которые получают при расчете циклов с помощью теоретико-вероятностной модели и метода динамического программирования. При использовании предложенной системы управления производительность обработки увеличивается в 1,2 раза при одновременной стабилизации параметров качества деталей.

**Ключевые слова:** операция шлифования, технологическая система, цикл шлифования, стохастическая система управления, теоретико-вероятностная модель, метод динамического программирования, стабилизация параметров качества.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Современная теория систем управления / Под ред. К.Т. Леондеса. – М.: Наука, 1970. – 512 с.
2. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новоселов. – Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1979. – 232 с.
3. Королев В.А. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке/ В.А. Королев. – Саратов: Изд-во Саратовского университета. 1975. – 192 с.
4. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Архипов П.В. Напряженно-деформированное состояние твердосплавных режущих элементов при алмазном затачивании // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2015. № 3–1 (33–1). С. 85–91.
5. Лобанов Д.В., Мулюхин Н.В. Методика прогнозирования поврежденности твердого сплава при затачивании инструмента для обработки неметаллических композитов // Актуальные проблемы в машиностроении. 2018. Т. 5. №1–2. С. 78–84.
6. Лурье Б.Я. Классические методы автоматического управления / Б.Я. Лурье, П. Дж. Энрайт. – СПб.: БХВ–Петербург, 2004. – 640 с.
7. Деруссо П. Пространство состояний в теории управления / П. Деруссо, Р. Рой, Ч. Клоуз. – М.: Наука, 1970. – 620 с.
8. Братан С.М. Автоматическое управление процессами механической обработки: учебник / С.М. Братан, Е.А. Левченко, Н.И. Покинтелица, А.О. Харченко. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА–М, 2017. – 228 с.

9. Братан С.М. Повышение качества деталей при шлифовании в условиях плавучих мастерских: монография / С.М. Братан, Е.А. Владецкая, Д.О. Владецкий, А.О. Харченко. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2018. – 154 с.

10. Братан С.М. Синтез фильтра Калмана–Бюсси для оценивания состояния операции шлифования / С.М. Братан, Д.Е. Сидоров, В.Б. Богущкий, // Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении. – Севастополь: ФГАОУ ВО «СевГУ», 2015. – с. 87–91.

11. Владецкая Е.А. Обеспечение качества шлифовальной обработки путем уменьшения внешних возмущений в условиях плавучей мастерской / Е.А. Владецкая, С.М. Братан, А.О. Харченко, Д.О. Владецкий // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел: ФГБОУ ВО «ПГУ», 2015. №6 (314). – С.88–103.

12. Владецкая Е.А. Разработка формирующего фильтра, моделирующего динамику морского волнения плавучей ремонтной мастерской / Е.А. Владецкая // Вісник СевНТУ. – Вип.150: Машиноприладобудування та транспорт; зб. наук. пр. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2014. – С. 36–40.

13. Петраков Ю.В. Теория автоматического управления технологическими системами: учебное пособие / Ю.В. Петраков, О.И. Драчев. – М.: Машиностроение, 2008. – 336 с.

14. Братан С.М. Обеспечение стабильности параметров качества изделий за счет разработки систем адаптивного управления / С.М. Братан, Ю.О. Стреляная, М.Г. Ступко. – Вестник СевНТУ. Вып. 139: Машиноприборостроение и транспорт. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2013. — С. 22–27.

15. Братан С.М. Синтез стохастического наблюдателя Льюнбергера для оценивания состояния операции шлифования / С.М. Братан, А.О. Харченко, Е.А. Владецкая, С.И. Рошупкин // Вестник современных технологий: Сб. науч. трудов. – Севастополь: СевГУ, 2018. – Вып.2(10). – С.9–14.

16. Vladetskaya Ekaterina. Modeling of Dynamic Links which Characterize Static Properties of Grinding Wheel and Workpiece during Flat Grinding Process / Ekaterina Vladetskaya, Aleksander Kharchenko, Dmitriy Vladetskiy // Materials Today: Proceedings 11 (2019) 565–572 Selection and/or Peer–review under responsibility of International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2018: Materials Science.

**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

**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

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

---

S.M. BRATAN, A.O. KHARCHENKO, E.A. VLADETSKAYA

## STOCHASTIC FLAT GRINDING OPERATION CONTROL SYSTEM

**Abstract.** *The article discusses the issues of stochastic control of grinding operation with dynamic stabilization of processing cycle parameters. The presented automatic system controls the grinding operation by stabilizing the cutting depth throughout the entire grinding cycle using a special regulation strategy. The basis of the system is the introduction into the memory of the control computer of the data, that are obtained in the calculation of cycles using the probability–theoretical model and the dynamic programming method. When using the proposed control system, processing productivity increases by 1.2 times while stabilizing the quality parameters of parts.*

**Keywords:** *grinding operation, technological system, grinding cycle, stochastic control system, probability theory model, dynamic programming method, stabilization of quality parameters.*

## BIBLIOGRAPHY

1. Sovremennaya teoriya sistem upravleniya (Modern theory of control systems) / Ed. K.T. Leondes. – М.: Nauka, 1970. – 512 s.

2. Novoselov YU.K. Dinamika formoobrazovaniya poverkhnostey pri abrazivnoy obrabotke (Dynamics of the formation of surfaces during abrasive processing) / YU.K. Novoselov. – Saratov: Izd–vo Saratovskogo universiteta, 1979. – 232 s.
3. Korolev V.A. Issledovaniye protsessov obrazovaniya poverkhnostey instrumenta i detali pri abrazivnoy obrabotke (Study of the processes of formation of the surfaces of the tool and parts during abrasive processing) / V.A. Korolev. – Saratov: Izd–vo Saratovskogo universiteta. 1975. – 192 s.
4. Lobanov D.V., Ianiushkin A.S., Arkhipov P.V. Napriazhenno–deformirovannoe sostoianie tverdosplavnykh rezhushchikh elementov pri almaznom zatachivanii // Vektor nauki Toliattinskogo gosudarstvennogo universiteta. 2015. № 3–1 (33–1). S. 85–91.
5. Lobanov D.V., Muliukhin N.V. Metodika prognozirovaniia povrezhdennosti tverdogo splava pri zatachivanii instrumenta dlia obrabotki nemetallicheskih kompozitov // Aktualnye problemy v mashinostroyenii. 2018. T. 5. №1–2. S. 78–84.1.
6. Lurye B.YA. Klassicheskiye metody avtoma–ticheskogo upravleniya (Classical methods of automatic control) / B.YA. Lurye, P. Dzh. Enrayt. – SPb.: BKHV–Peterburg, 2004. – 640 s.
7. Derusso P. Prostranstvo sostoyaniy v teorii upravleniya (The state space in control theory) / P. Derusso, R. Roy, CH. Klouz. – M.: Nauka, 1970. – 620 s.
8. Bratan S.M. Avtomaticheskoye upravleniye protsessami mekhanicheskoy obrabotki: uchebnyk / S.M. Bratan, Ye.A. Levchenko, N.I. Pokintelitsa, A.O. Kharchenko. – M.: Vuzovskiy uchebnyk: INFRA–M, 2017. – 228 s.
9. Bratan S.M. Povysheniye kachestva detaley pri shlifovanii v usloviyakh plavuchikh masterskikh: monografiya / S.M. Bratan, Ye.A. Vladetskaya, D.O. Vladetskiy, A.O. Kharchenko. – M.: Vuzovskiy uchebnyk: INFRA–M, 2018. – 154 s.
10. Bratan S.M. Sintez filtra Kalmana–Byussi dlya otsenivaniya sostoyaniya operatsii shlifovaniya / S.M. Bratan, D.Ye. Sidorov, V.B. Bogutskiy, // Sovremennyye napravleniya i perspektivy razvitiya tekhnologiy obrabotki i oborudovaniya v mashinostroyenii.– Sevastopol: FGAOU VO «SevGU», 2015. – S. 87–91.
11. Vladeckaya E.A. Obespecheniye kachestva shlifovalnoy obrabotki putem umensheniya vneshnih vozmushheniy v usloviyakh plavuchey masterskoj/ E.A. Vladeckaya, S.M. Bratan, A.O. Harchenko, D.O. Vladeckij // Fundamentalnye i prikladnye problemy tehnik i tekhnologii.– Orel: FGBOU VO «PGU», 2015. №6 (314). – S.88–103.
12. Vladeckaya E.A. Razrabotka formiruyushchego filtra, modeliruyushchego dinamiku morskogo volneniya plavuchey remontnoj masterskoj / E.A. Vladeckaya // Visnik SevNTU. – Vip.150: Mashinopriborostroyeniya ta transport; zb. nauk. pr. – Sevastopol: Vid–vo SevNTU, 2014. – S. 36–40.
13. Petrakov YU.V. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya tekhnologicheskimi sistemami: ucheb–noye posobiye (Theory of automatic control of technological systems) / YU.V. Petrakov, O.I. Drachev. – M.: Mashinostroyeniye, 2008. – 336 s.
14. Bratan S.M. Obespecheniye stabilnosti parametrov kachestva izdeliy za schet razrabotki sistem adaptivnogo upravleniya (Ensuring the stability of product quality parameters through the development of adaptive management systems) / S.M. Bratan, YU.O. Strelyanaya, M.G. Stupko. – Vestnik SevNTU. Vyp. 139: Mashinopriborostroyeniye i transport. – Sevastopol: Izd–vo SevNTU, 2013. – S. 22–27.
15. Bratan S.M. Sintez stokhasticheskogo nablyudatelya Lyunbergera dlya otsenivaniya sosto–yaniya operatsii shlifovaniya (Synthesis of a stochastic observer Lyunberger to assess the state of the grinding operation) / S.M. Bratan, A.O. Kharchenko, Ye.A. Vladetskaya, S.I. Roshchupkin // Vestnik sovremennykh tekhnologiy: Sb. nauch. trudov. – Sevastopol: SevGU, 2018. – Vyp. 2(10). – S.9–14.
16. Vladetskaya Ekaterina. Modeling of Dynamic Links which Characterize Static Properties of Grinding Wheel and Workpiece during Flat Grinding Process / Ekaterina Vladetskaya, Aleksander Kharchenko, Dmitriy Vladetskiy // Materials Today: Proceedings 11 (2019) 565–572 Selection and/or Peer–review under responsibility of International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2018: Materials Science.

**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

**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

**Vladetskaya Ekaterina Aleksandrovna**  
 "Sevastopol State University",  
 Sevastopol  
 Ph.D., assistant professor of the  
 department "Technology of mechanical  
 engineering"  
 299053, Sevastopol,  
 Universitetskaya St., 33  
 Тел. 54–05–57  
 E–mail: vladetska@rambler.ru

А.С. МАРТИНЕЗ ЛЕОН, С.Ф. ЯЦУН, О.В. ЕМЕЛЬЯНОВА

**УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ МУЛЬТИРОТОРНОЙ СИСТЕМЫ ТИПА КОНВЕРТОПЛАН**

**Аннотация.** В данной статье рассматривается вопрос об управлении электроприводами мультироторной системы, выявлены достоинства и недостатки существующие на сегодняшний день методы управления БПЛА, разработан цифровой комплементарный фильтр для обработки сигналов от инерциального модуля MPU-6050, предложен алгоритм управления электроприводами беспилотного летательного аппарата (БПЛА) типа квадрокоптер с использованием ПИД-регулятора, написан код программы в среде Arduino IDE на базе микроконтроллера Arduino Nano.

**Ключевые слова:** Беспилотные летательные аппараты (БПЛА), управление электроприводами БПЛА, инерциальный модуль MPU-6050, ПИД-регулятор для БПЛА.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Остатов А. А., Первухин Д.А., Ляшенко Д.А. Системы автоматического управления летательными аппаратами. История и практика / А.А. Остатов, Д.А. Первухин, Д.А. Ляшенко. – СПб.: СатисЪ, 2013. – 184 с.
2. Яцун С.Ф., Емельянова О.В., Казарян К.Г. Алгоритм управления беспилотным летательным аппаратом типа конвертоплан / С.Ф. Яцун, О.В. Емельянова, К.Г. Казарян // Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта» (БТС-ИИ-2016). – Иннополис: Перо – 2016. – С. 147–157.
3. Павловский В.Е., Яцун С.Ф., Емельянова О.В., Савицкий А.В. Моделирование и исследование процессов управления квадрокоптером / В.Е. Павловский, С.Ф. Яцун, О.В. Емельянова // Научно техн. журнал «Робототехника и техническая кибернетика». – СПб.: ЦНИИ РТК, 2014. – № 4 – с. 49–57.
4. Яцун С.Ф., Емельянова О.В., Савин А.И. Моделирование движения квадрокоптера при отклонении осей несущих винтов относительно корпуса / С.Ф. Яцун, О.В. Емельянова, А.И. Савин // Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины. – Курск.: Юго-Западный гос. ун-т – 2014. – С. 329–338.
5. Яцун С.Ф., Емельянова О.В., Савин А.И., Стуканева С.П. Моделирование полета конвертоплана в различных режимах движения./ С.Ф. Яцун, О.В. Емельянова, А.И. Савин, С.П. Стуканева. Курск.: Известия ЮЗГУ – 2015. – №1. – с. 55 – 66.
6. Попов Н.И., Яцун С.Ф., Емельянова О.В., Савин А.И. Исследование движения квадрокоптера при внешнем периодическом воздействии / Н.И. Попов, С.Ф. Яцун, О.В. Емельянова, А.И. Савин // Инженерный журнал с приложением «Справочник». – Москва.: Спектр, 2014. – №. S4 – с. 17–21.
7. Емельянова О. В., Попов Н. И., Яцун С. Ф. Моделирование движения квадроскопического летающего робота / О.В. Емельянова, Н.И. Попов, С.Ф. Яцун // Актуальные вопросы науки. Материалы VIII Международной научно-практической конференции. М.: Спутник, 2013. С. 6–8.
8. Емельянова О.В., Казарян К.Г., Мартинез Леон А.С., Яцун С. Ф. Синтез параметров электроприводов БПЛА типа конвертоплан-трикоптер / О.В. Емельянова, К.Г. Казарян, А.С. Мартинез Леон, С.Ф. Яцун // IV Международная школа-конференция молодых ученых «Нелинейная динамика машин» – School-NDM 2017: Сборник трудов. М.: ИМАШ РАН, 2017. С. 239–249.
9. Павловский В.Е., Яцун С.Ф., Емельянова О.В., Стуканева С.П. Математическое моделирование робота с переменным вектором тяги / В.Е. Павловский, С.Ф. Яцун, О.В. Емельянова, С.П. Стуканева // Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта» (БТС-ИИ-2015). СПб.: Политехника сервис, 2015. С. 99–106.
10. Zulu A., John S. A review of control algorithms for autonomous quadrotors / A. Zulu, S.A. John. – New York.: arXiv, 2016, – 11 pp.
11. Пат. на полезную модель 157967 Российская Федерация, МПК В64С 27/28, В64С 39/02. Двигатель воздушный с изменяемым вектором тяги / Яцун С.Ф., Ефимов С.В., Мищенко В.Я., Яцун А.С., Емельянова О.В., Мартинез Леон А.С.; заявитель и патентообладатель ФГУВО «Юго-западный государственный университет. – № 2015131037/11; заявл. 27.07.2015; опубл. 20.12.2015. Бюл. № 35.
12. Åström K. J., Hägglund T. Advanced PID control / K.J. Åström, T. Åström // Research Triangle Park. NC.: ISA–The Instrumentation, Systems, and Automation Society. 2006. – 461 pp.
13. Красильщиков М.Н. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий / М.Н. Красильщиков. – М.: Физматлит, 2003. – 280 с.
14. Фетисов В.С. Беспилотная авиация: терминология, классификация, современное состояние / В.С. Фетисов. – Уфа: ФОТОН, 2014. – 217 с
15. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. / Р. Дорф, Р. Бишоп. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.
16. Сайт «InvenSense I». [Электронный ресурс] / Режим доступа: [https://store.invensense.com/datasheets/invensense/MPU6050\\_DataSheet\\_V3%204.pdf](https://store.invensense.com/datasheets/invensense/MPU6050_DataSheet_V3%204.pdf), свободный

17. Сайт «electronoobs» [Электронный ресурс] / Режим доступа: [http://www.electronoobs.com/eng\\_robotica\\_tut9.php](http://www.electronoobs.com/eng_robotica_tut9.php), свободный.
18. Euston M. et al. A complementary filter for attitude estimation of a fixed-wing UAV with a low-cost IMU / M. Euston, et al. // 6th International Conference on Field and Service Robotics. 2007. 1–6 pp.
19. Islam T. et al. Comparison of complementary and kalman filter based data fusion for attitude heading reference system / T. Islam, et al. // AIP Conference Proceedings. 2017. 020002 pp.

**Мартинез Леон Андрес Сантьяго**  
ФГБОУ ВПО «Юго-западный  
государственный университет», г.  
Курск  
аспирант 2-го года обучения,  
кафедра механики, мехатроники и  
робототехники (ММиР)  
305040, г. Курск, ул. 50 лет октября,  
д.94  
Тел. +7 (4712) 22 – 2626  
e-mail: asml1992@yandex.ru

**Яцун Сергей Федорович**  
ФГБОУ ВПО «Юго-западный  
государственный университет», г.  
Курск  
доктор технических наук,  
профессор, заведующий кафедрой  
механики, мехатроники и  
робототехники (ММиР)  
305040, г. Курск, ул. 50 лет  
октября, д.94  
Тел. +7 (4712) 22 – 2626  
e-mail: teormeh@inbox.ru

**Емельянова Оксана Викторовна**  
ФГБОУ ВПО «Юго-западный  
государственный университет», г.  
Курск  
кандидат технических наук,  
доцент, преподаватель кафедры  
механики, мехатроники и  
робототехники (ММиР)  
305040, г. Курск, ул. 50 лет  
октября, д.94  
Тел. +7 (4712) 22 – 2626  
e-mail: teormeh@inbox.ru

A.S. MARTINEZ LEON, S.F. JATSUN, O.V. EMELYANOVA

## CONTROL OF THE ELECTRIC DRIVES OF A MULTIROTOR SYSTEM TYPE CONVERTERTIPLANE

**Abstract.** *The paper discusses the issue of controlling electric drives of a multi-rotor system, identifies the advantages and disadvantages of existing UAV control methods, a digital complementary filter for processing signals from an inertial module MPU-6050 has been developed, an algorithm for controlling electric drives of an unmanned aerial vehicle (UAV) such as a quadcopter using a PID controller has been proposed, a program code has been written using Arduino IDE based on Arduino Nano microcontroller.*

**Keywords:** *Unmanned aerial vehicles (UAVs), UAV electric drive control, MPU-6050 inertial module, PID controller for UAVs.*

### BIBLIOGRAPHY

- Ostahov A. A., Pervuhin D.A., Lyashenko D.A. Sistemy avtomaticheskogo upravleniya letatelnyimi apparatami. Istoriya i praktika / A.A. Ostahov, D.A. Pervuhin, D.A. Lyashenko. – SPb.: Satis, 2013. – 184 s.
- Jatsun S.F., Emelyanova O.V., Kazaryan K.G. Algoritm upravleniya bespilotnym letatelnyim apparatom tipa konvertoplan / S.F. Jatsun, O.V. Emelyanova, K.G. Kazaryan // Vserossijskij nauchno-prakticheskij seminar «Bespilotnye transportnye sredstva s elementami iskusstvennogo intellekta» (BTS-II-2016). – Innopolis: Pero – 2016. – S. 147–157.
- Pavlovskij V.E., Jatsun S.F., Emelyanova O.V., Savickij A.V. Modelirovanie i issledovanie processov upravleniya kvadrokopterom / V.E. Pavlovskij, S.F. Jatsun, O.V. Emelyanova // Nauchno tekhn. zhurnal «Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika». – SPb.: CNII RTK, 2014. – № 4 – s. 49–57.
- Jatsun S.F., Emelyanova O.V., Savin A.I. Modelirovanie dvizheniya kvadrokoptera pri otklonenii osej nesushchih vintov odnositelno korpusa / S.F. Jatsun, O.V. Emelyanova, A.I. Savin // Vibracionnye tekhnologii, mekhatronika i upravlyaemye mashiny. – Kursk.: Yugo-Zapadnyj gos. un-t – 2014. – S. 329–338.
- Jatsun S.F., Emelyanova O.V., Savin A.I., Stukaneva S.P. Modelirovanie poleta konvertoplana v razlichnyh rezhimakh dvizheniya. / S.F. Jatsun, O.V. Emelyanova, A.I. Savin, S.P. Stukaneva. Kursk.: Izvestiya YUZGU – 2015. – №1. – s. 55 – 66.
- Popov N.I., Jatsun S.F., Emelyanova O.V., Savin A.I. Issledovanie dvizheniya kvadrokoptera pri vneshnem periodicheskom vozdejstvii / N.I. Popov, S.F. Jatsun, O.V. Emelyanova, A.I. Savin // Inzhenernyj zhurnal s prilozheniem «Spravochnik». – Moskva.: Spektr, 2014. – №. S4 – s. 17–21.
- Emelyanova O. V., Popov N. I., Jatsun S. F. Modelirovanie dvizheniya kvadrorotacionnogo letayushchego robota / O.V. Emelyanova, N.I. Popov, S.F. Jatsun // Aktualnye voprosy nauki. Materialy VIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. M.: Sputnik, 2013. S. 6–8.
- Emelyanova O.V., Kazaryan K.G., Martinez Leon A.S., Jatsun S. F. Sintez parametrov elektroprivodov BPLA tipa konvertoplan-trikopter / O.V. Emelyanova, K.G. Kazaryan, A.S. Martinez Leon, S.F. Jatsun // IV Mezhdunarodnaya shkola-konferenciya molodyh uchenyh «Nelinejnaya dinamika mashin» – School-NDM 2017: Sbornik trudov. M.: IMASH RAN, 2017. S. 239–249.
- Pavlovskij V.E., Jatsun S.F., Emelyanova O.V., Stukaneva S.P. Matematicheskoe modelirovanie robota s peremennym vektorom tyagi / V.E. Pavlovskij, S.F. Jatsun, O.V. Emelyanova, S.P. Stukaneva // Vserossijskij nauchno-prakticheskij seminar «Bespilotnye transportnye sredstva s elementami iskusstvennogo intellekta» (BTS-II-2015). SPb.: Politehnika servis, 2015. S. 99–106.
- Zulu A., John S. A review of control algorithms for autonomous quadrotors / A. Zulu, S.A. John. – New York.: arXiv, 2016, – 11 pp.
- Pat. na poleznuyu model 157967 Rossijskaya Federaciya, MPK B64C 27/28, B64C 39/02. Dvizhitel vozdushnyj s izmenyaemym vektorom tyagi / Jatsun S.F., Efimov S.V., Mishchenko V.Ya., Jatsun A.S., Emelyanova

O.V., Martinez Leon A.S.; заявитель и патентообладатель FGUVU «YUgo-zapadnyj gosudarstvennyj universitet. – № 2015131037/11; заявл. 27.07.2015; опubl. 20.12.2015. Byul. № 35.

12. Åström K. J., Hägglund T. Advanced PID control / K.J. Åström, T. Åström // Research Triangle Park. NC.: ISA–The Instrumentation, Systems, and Automation Society. 2006. – 461 pp.

13. Krasilshchikov M.N. Upravlenie i navedenie bespilotnyh manevrennyh letatelnyh apparatov na osnove sovremennyh informacionnyh tekhnologij / M.N. Krasilshchikov. – M.: Fizmatlit, 2003. – 280 s.

14. Fetisov V.S. Bespilotnaya aviaciya: terminologiya, klassifikaciya, sovremennoe sostoyanie / V.S. Fetisov. – Ufa: FOTON, 2014. – 217 s

15. Dorf R., Bishop R. Sovremennye sistemy upravleniya. / R. Dorf, R. Bishop. – M.: Laboratoriya bazovyh znaniy, 2002. – 832 s.

16. Web-site «InvenSense I». [Electronic resource] / DOI: [https://store.invensense.com/datasheets/invensense/MPU6050\\_DataSheet\\_V3%204.pdf](https://store.invensense.com/datasheets/invensense/MPU6050_DataSheet_V3%204.pdf), free.

17. Web-site «electronoobs» [Electronic resource] / DOI: [http://www.electronoobs.com/eng\\_robotica\\_tut9.php](http://www.electronoobs.com/eng_robotica_tut9.php), free.

18. Euston M. et al. A complementary filter for attitude estimation of a fixed-wing UAV with a low-cost IMU / M. Euston, et al. // 6th International Conference on Field and Service Robotics. 2007. 1–6 pp.

19. Islam T. et al. Comparison of complementary and kalman filter based data fusion for attitude heading reference system / T. Islam, et al. // AIP Conference Proceedings. 2017. 020002 pp.

**Martinez Leon Andres Santiago**  
“Souhwest State University”,  
2-nd year PhD student, Department  
of mechanics, mechatronics and  
robotics  
305040, Kursk, 50 let oktyabrya, 94  
Ph. +7 (4712) 22 – 2626  
e-mail: [asml1992@yandex.ru](mailto:asml1992@yandex.ru)

**Jatsun Sergey Fedorovich**  
“Souhwest State University”,  
Doctor of technical sciences,  
professor, Head of the Department of  
mechanics, mechatronics and  
robotics  
305040, Kursk, 50 let oktyabrya, 94  
Ph. +7 (4712) 22 – 2626  
e-mail: [teormeh@inbox.ru](mailto:teormeh@inbox.ru)

**Emelyanova Oksana Victorovna**  
“Souhwest State University”,  
PhD, full-time teacher of the  
Department of mechanics,  
mechatronics and robotics  
305040, Kursk, 50 let oktyabrya, 94  
Ph. +7 (4712) 22 – 2626  
e-mail: [teormeh@inbox.ru](mailto:teormeh@inbox.ru)

УДК 621.83

DOI: 10.33979/2073-7408-2020-339-1-94-102

Р.Р. АБДУЛИН, В.А. ПОДШИБНЕВ, С.Л. САМСОНОВИЧ

## **ОБОСНОВАНИЕ ПРИНЦИПА ДЕЙСТВИЯ ВОЛНОВОЙ ПЕРЕДАЧИ С ПРОМЕЖУТОЧНЫМИ ТЕЛАМИ КАЧЕНИЯ КАК СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ**

**Аннотация.** Работа посвящена актуальной проблеме разработки механизмов на основе волновой передачи с промежуточными телами качения (ВПТК), обладающей высокими удельными масса-габаритными показателями, что особенно важно, для ее использования в приводных системах летательных аппаратов. Действие ВПТК представлено в виде действия следящей системы, у которой малая центральная ось симметрии овала, проходящей через центры тел качения, отслеживает положение суммарного вектора усилия, создаваемого волнообразователем, аналогично действию волновой передачи с гибким колесом. Решена задача о распределении контактных сил между телами качения в ВПТК. Показано, что величина угла рассогласования зависит от положения тел качения относительно малой центральной оси симметрии волнообразователя, которое можно сравнить с изменением формы гибкого колеса в зубчатой волновой передаче. Величина суммарного вектора усилия складывается из векторов сил передаваемых от волнообразователя через тела качения к жесткому колесу при остановленном сепараторе. За один оборот волнообразователя величины этих векторов изменяются периодически от максимального значения до минимального. Максимальное значения вектора имеет место у тела качения, рассоложенного на оси симметрии впадины жесткого колеса, а максимальное значение при расположении тела качения вблизи оси симметрии выступа жесткого колеса. Определена величина момента развиваемого на жестком колесе. Составленную математическую модель принципа действия ВПТК необходимо использовать при анализе динамических характеристик приводных систем на основе ВПТК.

**Ключевые слова:** волновая передача с промежуточными телами качения, принцип действия волновой передачи, силовой анализ волновой передачи.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Н. В. Крылов, В. И. Лалабеков, С.Л. Самсоновича и др. Электромеханические силовые мини-приводы для «более электрифицированного» самолета под ред. С.Л. Самсоновича. // Москва. 2016. 359 с.
2. Становской В. В., Ремнева Т. А., Казакиявичус С. М. Передачи со свободными телами качения, обзор патентной литературы // Прогрессивные зубчатые передачи: сб. науч. тр. – Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2003. – С. 61–94.



3. Лустенков, М. Е. Мотор–редуктор с двухступенчатой планетарной шариковой передачей / М. Е. Лустенков // Современные методы проектирования машин: Респ. межведомственный сб. науч. тр. – Вып. 2.: в 7 т. Т. 3. Проектирование приводов машин. – Минск: Технопринт, 2004. – С. 83–88
4. Лустенков, М. Е. Проектирование планетарных шариковых передач с различными профилями беговых дорожек / М. Е. Лустенков // Вестн. Брянского гос. техн. ун–та. – 2009. – № 2. – С. 70–77.
5. Н.В. Крылов. Исследование жесткости и прочности волновой передачи с телами качения электромеханического силового привода летательного аппарата» диссертация кандидата технических наук: 05.02.02 / [Место защиты: Моск. гос. авиац. ин–т]// Москва, 2014. 149 с.
6. В.Ю. Тимофеев, В.Ю. Бегляков, М.В. Дохненко. Определение параметров силового взаимодействия элементов волновой передачи с полым валом и промежуточными телами качения в трансмиссии геохода.// Материалы V Международной научно–практической конференции «Инновационные технологии и экономика в машиностроении» с. 301–307. // 21 – 23 мая 2015.
7. И–Кан Ан, Ф. Р. Алиев, А. В. Лазуркевич Силовой и прочностной расчеты волновой передачи с шариковыми промежуточными телами. Сборник докладов научно–практической конференции «Теория и практика зубчатых передач и редукторостроения» с. 115–119//Ижевск, 16–18 мая 2017.
8. Янгулов В.С., Беляев А.Е. Элементы расчёта жесткости волновой передачи с промежуточными телами качения // Известия ТПУ. 2008. №3. С.69–73.
9. Янгулов В. С. Силовой расчёт волновых передач с промежуточными телами качения с адаптивным генератором // Известия ТПУ. 2008. №2. С.28–31
10. А.Н. Геращенко, С.Л. Самсонович. Пневматические, гидравлические и электрические приводы летательных аппаратов на основе волновых исполнительных механизмов под ред. А.М. Матвеевко. // Москва. 2006. 390с.

**Подшибнев Владимир Александрович**  
 Московский авиационный институт  
 (национальный исследовательский  
 университет),  
 аспирант,  
 Волоколамское шоссе, 4, Москва, А–80,  
 ГСП–3, 125993, Россия  
 E–mail: podshibneff@mail.ru

**Самсонович Семен Львович**  
 Московский авиационный институт  
 (национальный исследовательский  
 университет),  
 профессор, д.т.н.,  
 Волоколамское шоссе, 4, Москва,  
 А–80, ГСП–3, 125993, Россия  
 E–mail: samsonovich40@mail.ru

**Абдулин Рашид Раисович**  
 АО Московский научно–  
 производственный комплекс  
 «Авионика» имени О.В.  
 Успенского,  
 к.т.н. главный конструктор,  
 ул. Образцова 7, 127055,  
 Россия  
 E–mail: abdulin@mpnk.ru

R.R. ABDULIN, V.A. PODSHIBNEV, S.L. SAMSONOVICH

## SUBSTANTIATION OF THE ACTION PRINCIPLE OF A HARMONIC GEAR WITH INTERMEDIATE ROLLING BODIES AS A SERVOMECHANISM

**Abstract.** *The work is devoted to the urgent problem of developing mechanisms based on harmonic gear with intermediate rolling elements (HGRE), which has high specific mass–dimensional parameters, which is especially important for its use in aircraft actuator systems. The action of HGRE is presented in the form of the action of a servosystem, in which the small central axis of symmetry of the oval passing through the centers of the rolling bodies tracks the position of the total force vector created by the wave former, similar to the action of wave transmission with a flexible wheel. The problem of the distribution of contact forces between rolling bodies in HGRE. It is shown that the value of the mismatch angle depends on the position of the relatively small central axis of symmetry of the wave former. The general common effort comes down to the fact that everything is moving forward. Wave formation has a value that periodically changes from the minimum value. The maximum value that takes place is the vibrations located around the axis and the symmetrical protruding hard wheels. A certain amount of torque developed on a hard wheel. It is necessary to use a mathematical model of the principle of operation of the HGRE when analyzing the dynamic characteristics of actuator systems based on the HGRE.*

**Keywords:** *harmonic gear with intermediate rolling bodies, action principle of the harmonic gear., power analysis of harmonic gear.*

### BIBLIOGRAPHY

1. N. V. Krylov, V.I. Lalabekov, S.L. Samsonovich et al. Electromechanical power mini–drives for a “more electrified” aircraft, ed. S.L. Samsonovich. // Moscow. 2016.335 p.
2. Stanovskoy V. V., Remneva T. A., Kazakevichus S. M. Patent literature // Progressive gears: collection. scientific tr – Novouralsk: Publishing house of the NTI, 2003. – P. 61–94.
3. Lustenkov, M. E. Motor–reducer with a two–stage planetary ball transmission / M. E. Lustenkov // Modern methods of designing machines: Rep. interdepartmental collection scientific tr – Vol. 2.: in 7 t. T. 3. Design of machine drives. – Minsk: Technoprint, 2004. –p. 83–88

4. Lustenkov, M. E. Design of planetary ball gears with different profiles of racetracks / M. E. Lustenkov // Vestn. Bryansk state. tech. un—that. – 2009. – No. 2. – p. 70–77.
5. N.V. Krylov. Research of rigidity and strength of a wave transmission with rolling bodies of an electromechanical power drive of an aircraft »the dissertation of the candidate of technical sciences: 05.02.02 / [Protection place: Mosk. state Aviation Institute] // Moscow, 2014. 149 p.
6. V.Y. Timofeev, V.Y. Beglyakov, M.V. Dokhnenko. Determination of the parameters of the force interaction of the wave transmission elements with a hollow shaft and intermediate rolling bodies in the transmission of the geohod. // Materials of the V International Scientific and Practical Conference "Innovative Technologies and Economics in Engineering" p. 301–307. // May 21 – 23, 2015.
7. I-Kan An, F. R. Aliev, A. V. Lazurkevich Strength and strength calculations of wave transmission with ball intermediate bodies. Collection of reports of the scientific–practical conference "Theory and practice of gears and gear construction" p. 115–119 // Izhevsk, May 16–18, 2017.
8. Yangulov V.S., Belyaev A.E. Elements for calculating the stiffness of wave transmission with intermediate rolling bodies // News of TPU. 2008. No3. p.69–73
9. Yangulov V. S. Power calculation of wave transmissions with intermediate rolling bodies with an adaptive generator // News of TPU. 2008. No2. S.28–31
10. A.N. Gerashchenko, S.L. Samsonovich. Pneumatic, hydraulic and electric drives of aircraft based on wave actuators ed. A.M. Matveenko. // Moscow. 2006.390 s.

**Podshibnev Vladimir Alexandrovich**  
Moscow Aviation Institute (National  
Research University),  
graduate student  
Volokolamsk Highway 4, Moscow, A–  
80, GSP–3, 125993, Russia  
E–mail: podshibneff@mail.ru

**Samsonovich Semen Lvovich**  
Moscow Aviation Institute (National  
Research University),  
Professor, Doctor of Technical Sciences  
Volokolamsk Highway 4, Moscow, A–  
80, GSP–3, 125993, Russia  
E–mail: samsonovich40@mail.ru

**Abduln Rashid Raisovich**  
Moscow joint stock company  
"Avionicsa" named after O.V.  
Uspensky, chief designer,  
Ph.D.  
st. Obraztsova 7, 127055,  
Russia  
E–mail: abduln@mpnk.ru

УДК 532.5

DOI: 10.33979/2073-7408-2020-339-1-103-106

А.В. КОРНАЕВ, А.С. ФЕТИСОВ, М.В. БОБЫРЬ

## ВЛИЯНИЕ МАССОВЫХ СИЛ НА ТЕЧЕНИЕ НЕНЬЮТОНОВСКИХ ЖИДКОСТЕЙ В ТОНКИХ КАНАЛАХ

**Аннотация.** В статье представлены результаты вычислительного эксперимента по влиянию объемных сил электромагнитной природы на характеристики течения неньютоновской жидкости между параллельными пластинами. Приведено сравнение результатов расчета на основе обобщенного вариационного принципа Лагранжа с результатами аналитического решения уравнений гидродинамики и с результатами моделирования в программной среде ComSol.

**Ключевые слова:** магнитная сила, функционал, вариационный принцип Лагранжа, аналитическое решение.

*Работа подготовлена в рамках выполнения проекта РНФ №16–19–00186. Авторы выражают благодарность Фонду за оказанную поддержку.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Polyakov R. Analysis of the conditions for the occurrence of the effect of a minimum of friction in hybrid bearings based on the load separation principle / Polyakov, R., Savin, L., Fetisov, A. // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. – Part J: Journal of Engineering Tribology. – 233(2). – Pp. 271–280
2. Majorov S. Estimation of energy efficiency of oscillations of rotors on radial fluid film bearings/ Majorov, S., Savin, L., Babin, A. // Lecture Notes in Mechanical Engineering. –0(9783319956299). – Pp. 351–358
3. Babin A. Active thrust fluid–film bearings: Theoretical and experimental studies/ Babin, A., Kornaeв, A., Rodichev, A., Savin, L.// Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2019
4. Roache P 1998 Fundamentals of Computational Fluid Dynamics
5. Anderson J 1995 Computational fluid dynamics. The basics with applications (New York: McGraw–Hill)
6. Hori Y 2006 Hydrodynamic Lubrication (Tokyo: Yokendo Ltd)
7. Dowson D 1962 A generalized Reynolds equation for fluid–film lubrication International Journal of Mechanical Sciences vol 4(2) pp. 159–170 DOI: 10.1016/S0020–7403(62)80038–1 Ghaffari A., Hashemabadi S. H., Ashtiani M. A review on the simulation and modeling of magnetorheological fluids. Journal of intelligent material systems and structures. Vol. 26 (8), 2015. P. 881–904.
8. Кучеряев, Б. В. Механика сплошных сред. Теоретические основы обработки давлением композитных материалов: учебник для вузов / Б. В. Кучеряев. – М.: Изд–во МИСИС, 2000. – 320 с.
9. Savin L, Kornaeв A and Kornaeв E 2015 Variational principle in the hydrodynamic lubrication theory International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences vol 9 pp. 114–119

10. Schechter R 1967 The variational method in engineering (New York: McGraw–Hill Book Company)
11. Фетисов А.С. Вариационный подход моделирования гидродинамических течений сред с управляемыми свойствами. – Материалы конференции «Энерго– и ресурсосбережение – XXI век (МИК–2019), 2019.
12. Korn G and Korn T 2000 *Mathematical handbook for scientists and engineers* 2nd ed. (New York: Dover Publications)
13. GNU Octave. Available online: <http://www.gnu.org/software/octave> (accessed on 30 December 2017)

**Корнаев Алексей Валерьевич**  
 ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
 Научный сотрудник ПНИЛ «Моделирование гидромеханических систем»  
 E-mail: rusakor@inbox.ru

**Фетисов Александр Сергеевич**  
 ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
 стажёр–исследователь ПНИЛ «Моделирование гидромеханических систем»  
 E-mail: fetisov57rus@mail.ru

**Бобырь Максим Владимирович**  
 ФГБОУ ВО «Юго–Западный государственный университет», г. Курск  
 Доцент, канд. техн. наук»  
 E-mail: max\_bobyry@mail.ru

A.V. KORNAEV, A.S. FETISOV, M.V. BOBYR

## EFFECT OF MASS FORCES ON THE FLUID FLOW BETWEEN PARALLEL PLATES

**Abstract.** *The article presents the results of a computational experiment on the influence of volume magnetic forces on the characteristics of a non-Newtonian fluid flow between parallel plates. The results of the variational approach based on the modernized Lagrange variational principle, the results of the analytical solution of the equations of hydrodynamics and the simulation results in ComSol are compared.*

**Keywords:** *magnetic force, functional, variational Lagrange principle, analytical solution*

### BIBLIOGRAPHY

1. Polyakov R. Analysis of the conditions for the occurrence of the effect of a minimum of friction in hybrid bearings based on the load separation principle / Polyakov, R., Savin, L., Fetisov, A. // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. – Part J: Journal of Engineering Tribology. – 233(2). – Pp. 271–280
2. Majorov S. Estimation of energy efficiency of oscillations of rotors on radial fluid film bearings/ Majorov, S., Savin, L., Babin, A. // Lecture Notes in Mechanical Engineering. –0(9783319956299). – Pp. 351–358
3. Babin A. Active thrust fluid–film bearings: Theoretical and experimental studies/ Babin, A., Kornaev, A., Rodichev, A., Savin, L.// Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2019
4. Roache P 1998 Fundamentals of Computational Fluid Dynamics
5. Anderson J 1995 Computational fluid dynamics. The basics with applications (New York: McGraw–Hill)
6. Hori Y 2006 Hydrodynamic Lubrication (Tokyo: Yokendo Ltd)
7. Dowson D 1962 A generalized Reynolds equation for fluid–film lubrication International Journal of Mechanical Sciences vol 4(2) pp. 159–170 DOI: 10.1016/S0020–7403(62)80038–1 Ghaffari A., Hashemabadi S. H., Ashtiani M. A review on the simulation and modeling of magnetorheological fluids. Journal of intelligent material systems and structures. Vol. 26 (8), 2015. P. 881–904.
8. Kucheryayev, B. V. Mekhanika sploshnykh sred. Teoreticheskiye osnovy obrabotki davleniyem kompozitnykh materialov: uchebnik dlya vuzov / B. V. Kucheryayev. – M.: MISIS Publishing House, 2000.— 320 p.
9. Savin L, Kornaev A and Kornaeva E 2015 Variational principle in the hydrodynamic lubrication theory International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences vol 9 pp. 114–119
10. Schechter R 1967 The variational method in engineering (New York: McGraw–Hill Book Company)
11. Fetisov A.S. Variatsionnyy podkhod modelirovaniya gidrodinamicheskikh techeniy sred s upravlyayemyimi svoystvami. – Materialy konferentsii «Energo– i resursosberezheniye – XXI vek (MIK–2019), 2019
12. Korn G and Korn T 2000 *Mathematical handbook for scientists and engineers* 2nd ed. (New York: Dover Publications)
13. GNU Octave. Available online: <http://www.gnu.org/software/octave> (accessed on 30 December 2017)

**Kornaev Alexey Valerievich**  
 Orel State University,  
 Senior researche RL "Modeling of hydromechanical systems"  
 E-mail: rusakor@inbox.ru

**Fetisov Alexander Sergeevich**  
 Orel State University,  
 Trainee–researcher RL "Modeling of hydromechanical systems"  
 E-mail: fetisov57rus@mail.ru

**Bobyry Maksim Vladimirovich**  
 Southwest State University.  
 Associate Professor, Candidate of Technical Sciences  
 E-mail: max\_bobyry@mail.ru

УДК 621.82

DOI:10.33979/2073-7408-2020-339-1-107-113

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

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГИБРИДНОГО ПОДШИПНИКА С ГАЗОВОЙ СМАЗКОЙ

**Аннотация.** Многие высокоскоростные роторные агрегаты работают на закритических частотах, что означает, что в процессе разгона ротора до рабочей частоты вращения неизбежно возникают нежелательные колебания вследствие перехода через данные критические частоты вращения. Кроме того, рабочие частоты порядка 100000 оборотов в минуту и более требуют новых конструкторских и технологических решений, обеспечивающие заданные показатели быстроходности, устойчивости износа опорных поверхностей. Одним из направлений совершенствования опорных узлов является совмещение подшипников качения и лепестковых подшипников скольжения с газовой смазкой в комбинированную опору с активным управлением, что позволяет повысить надежность и долговечность опоры и агрегата в целом за счет разделения и дублирования функций подшипников на различных режимах работы. В статье представлен общий подход к построению математической модели гибридного подшипника с активным управлением и его рабочие характеристики.

**Ключевые слова:** гибридный подшипник, лепестковый подшипник, подшипник качения, грузоподъемность.

*Работа выполнена в рамках проекта №05.607.21.0303 "Разработка интеллектуальной технологии мониторинга и прототипа программно-аппаратного комплекса безопасности объектов энергетического комплекса" ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно – технологического комплекса России на 2014–2020 годы" (уникальный идентификатор соглашения RFMEFI60719X0303).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Harnoy, A. Hydro-Roll: A novel bearing design with superior thermal characteristics / A. Harnoy, M. Khonsary // Tribology transactions, 1996. – Vol. 39. – PP. 455–461.
2. Zapoměl J. Controllable magnetically sensitive rotor support element for reducing oscillation and force transmission/ Zapoměl, J., Ferfecki, P., Kozánek, J., Savin, L. // Mechanisms and Machine Science. – vol. 73. – Pp. 3385–3394.
3. Jeong, S. Effects of eccentricity and vibration response on high-speed rigid rotor supported by hybrid foil-magnetic bearing // S. Jeong, Y. Lee // Journal of mechanical engineering science, 2015. – Vol. 230. – PP. 994–1006.
4. Feng, K. Experimental evaluation of the structure characterization of a novel hybrid bump-metal mesh foil bearing / K. Feng, Y. Liu, X. Zhao, W. Liu // Journal of tribology, 2015. – Vol. 138.
5. Savin L. Aerodynamic Bearings with Elastic Elements and Active Regime Control/ Savin, L., Sytin, A. // 2018 2nd School on Dynamics of Complex Networks and their Application in Intellectual Robotics, DCNAIR 2018. – DOI: 8589225. – Pp. 106–108.
6. Silver A. Patent US 3642331, IPC F16C 21/00. Hybrid bearing, publ. 15.02.1972.
7. Babin A. Active thrust fluid-film bearings: Theoretical and experimental studies/ Babin, A., Kornaev, A., Rodichev, A., Savin, L.// Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2019.
8. Feng K., Guan H.-Q., Zhao Z.-L., Liu T.-Y. Active bump-type foil bearing with controllable mechanical preloads. Tribology International 120 (2018) 187–202 p.
9. Park J., Sim K. A Feasibility Study of Controllable Gas Foil Bearings With Piezoelectric Materials Via Rotordynamic Model Predictions. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power 141 (2019)
10. Dellacorte C., Valco M. Load Capacity Estimation of Foil Air Journal Bearings for Oil-Free Turbomachinery Applications. Tribology transactions 43 (2000),4, 795–801 p.
11. Peng Z.-C., Khonsary M. On the Limiting Load-Carrying Capacity of Foil Bearings. Journal of Tribology 126 (2004).
12. Li Y., Lei G., Sun Y., Wang L. Effect of environmental pressure enhanced by a booster on the load capacity of the aerodynamic gas bearing of a turbo expander. Tribology International 105 (2017) 77–84 p.
13. Bondarenko M., Polyakov R. Patent Russian Federation 2561199, IPC F16C 21/00. Hybrid bearing, publ. 27.08.2015.
14. Konstantinescu V. Sliding Bearings: Calculation, Designing, Lubrication, Bukharest, AN RNR Publ. 458 (1964) 98–100 p.

**Поляков Роман Николаевич**  
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
Д-р. техн. наук, доцент кафедры мехатроники, механики и робототехники  
E-mail: romanpolak@mail.ru

**Бондаренко Максим Эдуардович**  
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
Ассистент кафедры мехатроники, механики и робототехники  
E-mail: maxbondarenko22@yandex.ru

**Горин Андрей Владимирович**  
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел  
Канд. техн. наук, доцент кафедры мехатроники, механики и робототехники  
E-mail: gorin57@mail.ru

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

## STUDY PERFORMANCE HYBRID BEARING GAS LUBRICATION

**Abstract.** *Many high-speed rotor units operate at supercritical frequencies, which means that undesirable oscillations inevitably occur during acceleration of the rotor to the operating frequency of rotation due to transition through these critical rotational frequencies. In addition, operating frequencies of the order of 100 000 revolutions per minute and more require new design and technological solutions that provide the specified indicators of speed, stability and wear of bearing surfaces. One of the ways to improve bearing units is to combine rolling and air-lubricated foil bearings into a hybrid bearing with active control, which improves the reliability and durability of the unit as a whole due to the separation and duplication of bearing functions in various operating modes. The article presents a general approach to the construction of a mathematical model of a hybrid bearing with active control and its performance.*

**Keywords:** *hybrid bearing, spade bearing, rolling bearing, load capacity.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Harnoy, A. Hydro-Roll: A novel bearing design with superior thermal characteristics / A. Harnoy, M. Khonsary // Tribology transactions, 1996. – Vol. 39. – PP. 455–461.
2. Zapoměl J. Controllable magnetically sensitive rotor support element for reducing oscillation and force transmission/ Zapoměl, J., Ferfecki, P., Kozánek, J., Savin, L. // Mechanisms and Machine Science. – vol. 73. – Pp. 3385–3394.
3. Jeong, S. Effects of eccentricity and vibration response on high-speed rigid rotor supported by hybrid foil-magnetic bearing // S. Jeong, Y. Lee // Journal of mechanical engineering science, 2015. – Vol. 230. – PP. 994–1006.
4. Feng, K. Experimental evaluation of the structure characterization of a novel hybrid bump-metal mesh foil bearing / K. Feng, Y. Liu, X. Zhao, W. Liu // Journal of tribology, 2015. – Vol. 138.
5. Savin L. Aerodynamic Bearings with Elastic Elements and Active Regime Control/ Savin, L., Sytin, A. // 2018 2nd School on Dynamics of Complex Networks and their Application in Intellectual Robotics, DCNAIR 2018. – DOI: 8589225. – Pp. 106–108.
6. Silver A. Patent US 3642331, IPC F16C 21/00. Hybrid bearing, publ. 15.02.1972.
7. Babin A. Active thrust fluid-film bearings: Theoretical and experimental studies/ Babin, A., Kornaev, A., Rodichev, A., Savin, L. // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2019.
8. Feng K., Guan H.-Q., Zhao Z.-L., Liu T.-Y. Active bump-type foil bearing with controllable mechanical preloads. Tribology International 120 (2018) 187–202 p.
9. Park J., Sim K. A Feasibility Study of Controllable Gas Foil Bearings With Piezoelectric Materials Via Rotordynamic Model Predictions. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power 141 (2019)
10. Dellacorte C., Valco M. Load Capacity Estimation of Foil Air Journal Bearings for Oil-Free Turbomachinery Applications. Tribology transactions 43 (2000),4, 795–801 p.
11. Peng Z.-C., Khonsary M. On the Limiting Load-Carrying Capacity of Foil Bearings. Journal of Tribology 126 (2004).
12. Li Y., Lei G., Sun Y., Wang L. Effect of environmental pressure enhanced by a booster on the load capacity of the aerodynamic gas bearing of a turbo expander. Tribology International 105 (2017) 77–84 p.
13. Bondarenko M., Polyakov R. Patent Russian Federation 2561199, IPC F16C 21/00. Hybrid bearing, publ. 27.08.2015.
14. Konstantinescu V. Sliding Bearings: Calculation, Designing, Lubrication, Bukharest, AN RNR Publ. 458 (1964) 98–100 p.

**Polyakov Roman Nikolaevich**  
Orel State University  
Doctor of technical Sciences,  
associate Professor of the  
Department mechatronics,  
mechanics and robotics  
E-mail: romanpolak@mail.ru

**Bondarenko Maxim Eduardovich**  
Orel State University  
Assistent of the Department  
mechatronics, mechanics and robotics  
E-mail:  
maxbondarenko22@yandex.ru

**Gorin Andrey Vladimirovich**  
Orel State University  
Candidate of technical Sciences,  
associate Professor of the  
Department mechatronics,  
mechanics and robotics  
E-mail: gorin57@mail.ru

УДК 62–25

DOI: 10.33979/2073-7408-2020-339-1-114-119

А.С. ФЕТИСОВ, А.Ю. БАБИН, В.О. ТЮРИН

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ РАБОТЫ ОПОРЫ СКОЛЬЖЕНИЯ

**Аннотация.** В статье рассмотрена конструкция опоры скольжения, смазываемой магнитореологическими жидкостями. Особенностью данной конструкции является применение двух электромагнитных актуаторов. Приведен расчет магнитной цепи. Определены характеристики магнитного поля в области зазора опоры скольжения

**Ключевые слова:** Опорный узел, роторная машина, магнитореологическая жидкость, подшипник скольжения, магнитная цепь, электромагнитный актуатор

*Настоящее исследование выполнено в рамках выполнения проекта РФФИ № 18–38–00465.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gropper, D. Hydrodynamic lubrication of textured surfaces: A review of modeling techniques and key findings / D. Gropper, L. Wang, T. Harvey // *Tribology International*. – 2016. – Vol. 94. – P. 509 – 529.
2. Kasai, M. Influence of lubricants on plain bearing performance: analysis of bearing performance with polymer-containing oils / M. Kasai, M. Fillon, J. Bouyer, S. Jarny // *Proceedings of the 2012 STLE Annual Meeting & Exhibition, St. Louis, Missouri, USA*. – 2012. – 5 p.
3. Савин, Л.А. Моделирование роторных систем с опорами жидкостного трения: монография / Савин Л.А., Соломин О.В. – М.: Машиностроение–1, 2006. – 444 с.
4. Мышкин, Н.К. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 368 с.
5. Kuznetsov, E. The effect of PTFE lining on plain journal bearing characteristics / E. Kuznetsov, S. Glavatskih, M. Fillon // *9th EDF/Pprime (LMS) Poitiers Workshop*. – 2010. – 8 p.
6. Ginzburg, B.M. Thermal and Tribological Properties of Fullerene-Containing Composite Systems. P. 2. Formation of Tribo-Polymer Films during Boundary Sliding Friction in the Presence of Fullerene C60 / Ginzburg, B.M., Kireenko O.F., Shepelevskii A.A., Shibaev L.A., Tochilnikov D.G., Leksovskii A.M. // *J. Macromol. Sci., B, Physics*. – 2005. – No 44 (1). – Pp. 93–115.
7. Kornaeв, A.V. Theoretical premises of thermal wedge effect in fluid-film bearings supplied with a non-homogeneous lubricant / A.V. Kornaeв, E.P. Kornaeва, L.A. Savin // *International Journal of Mechanics*. – 2017. – Vol. 11. – Pp. 197–203.
8. Kornaeв, A.V. Application of artificial neural networks to calculation of oil film reaction forces and dynamics of rotors on journal bearings [Electronic resource] / A.V. Kornaeв, N.V. Kornaeв, E.P. Kornaeва, L.A. Savin // *International Journal of Rotating Machinery*. – 2017. – Vol. 2017. – 11 p. – <https://doi.org/10.1155/2017/9196701>.
9. *Encyclopedia of tribology* / Q.J. Wang, Y.-H. Chung (Eds.). – New York: Springer Science + Business Media, 2013. – 4192 p.
10. Фундаментальные основы микрополярной и гибридной смазки гранулированными наноматериалами: отчет о НИР (заключительный): по проекту государственного задания № 7.516.2011 от 01.01.2012 г. Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс; рук. Савин Л.А.; исполн.: Корнаев А.В. и др. – Орел, 2013. – 102 с.
11. Andrew, D.D. Electrorheological Fluid-Controlled “Smart” Journal Bearings / D.D. Andrew, K. Alexander // *Tribology Transactions*. – 1992. – Vol. 35. – P. 611–618.
12. Agrawal, A. A Bearing Application Using Magnetorheological Fluid / A. Agrawal, C. Ciocanel, T. Martinez, J. Duggan, // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. – 2002. – Vol. 13. – P. 667–673.
13. Laukiavich, C.A. A comparison between the performance of ferro- and magnetorheological fluids in a hydrodynamic bearing / C.A. Laukiavich, M.J. Braun, A.J. Chandy // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J Journal of Engineering Tribology*. – 2014. – Vol. 228. – P. 649–666.
14. 1. Montazeri H. Numerical analysis of hydrodynamic journal bearings lubricated with ferrofluids. *Engineering Tribology. Proc. IMechE, Vol.222., 2007. Part J.:51 – 60.*
15. Osman, T. A., Nada G. S., Safar Z. S. Static and dynamic characteristics of magnetized journal bearings lubricated with ferrofluid. *Tribology international. Elsevier, Vol. 34, 2001, 369 – 380.*
16. Фетисов А.С. Расчет магнитной цепи опоры скольжения, смазываемой магнитореологическими жидкостями // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – №3 (335). – 2019. – С. – 69–74.
17. Zapoměl, J. Application of the controllable magnetorheological squeeze film dampers for minimizing energy losses and driving moment of rotating machines / Zapoměl, J., Ferfecki, P., Kozánek, J. // *Mechanisms and Machine Science*. – vol. 60. – 2019. – P. 132–143

---

**Фетисов Александр Сергеевич**  
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С.  
Тургенева», г. Орел

**Бабин Александр Юрьевич**  
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С.  
Тургенева», г. Орел

**Тюрин Валентин Олегович**  
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С.  
Тургенева», г. Орел

---

стажёр–исследователь ПНИЛ  
«Моделирование  
гидромеханических систем»  
E–mail: fetisov57rus@mail.ru

младший научный сотрудник  
ПНИЛ «Моделирование  
гидромеханических систем»  
E–mail: alex.mech.osu@gmail.com

младший научный сотрудник  
ПНИЛ «Моделирование  
гидромеханических систем»  
E–mail: v7a717@mail.ru

A.S. FETISOV, A.Yu. BABIN, V.O. TYURIN

## EXPERIMENTAL STAND FOR RESEARCH OF THE INFLUENCE OF MAGNETOREOLOGICAL LUBRICANTS ON THE OPERATION CHARACTERISTICS OF THE SLIDING BEARING

**Abstract.** *The article describes the design of a sliding support lubricated by magnetorheological fluids. A feature of this design is the use of two electromagnetic actuators. The calculation of the magnetic circuit is given. The characteristics of the magnetic field in the region of the clearance of the sliding support are determined*

**Keywords:** *support unit, rotor machine, magnetorheological fluid, sliding bearing, magnetic circuit, electromagnetic actuator*

### BIBLIOGRAPHY

1. Gropper, D. Hydrodynamic lubrication of textured surfaces: A review of modeling techniques and key findings / D. Gropper, L. Wang, T. Harvey // *Tribology International*. – 2016. – Vol. 94. – P. 509 – 529.
2. Kasai, M. Influence of lubricants on plain bearing performance: analysis of bearing performance with polymer-containing oils / M. Kasai, M. Fillon, J. Bouyer, S. Jarny // *Proceedings of the 2012 STLE Annual Meeting & Exhibition*, St. Louis, Missouri, USA. –2012. – 5 p.
3. Savin L.A. Modelirovaniye rotornykh sistem s oporami zhidkostnogo treniya: monografiya / Savin L.A., Solomin O.V. – M.: Mashinostroyeniye–1, 2006. – 444 s.
4. Myshkin, N.K. Treniye, smazka, iznos. Fizicheskiye osnovy i tekhnicheskiye prilozheniya tribologii / N.K. Myshkin, M.I. Petrokovets. – M.: FIZMATLIT, 2007. – 368 s.
5. Kuznetsov, E. The effect of PTFE lining on plain journal bearing characteristics / E. Kuznetsov, S. Glavatskih, M. Fillon // *9th EDF/Pprime (LMS) Poitiers Workshop*. – 2010. – 8 p.
6. Ginzburg, B.M. Thermal and Tribological Properties of Fullerene-Containing Composite Systems. P. 2. Formation of Tribo-Polymer Films during Boundary Sliding Friction in the Presence of Fullerene C60 / Ginzburg, B.M., Kireenko O.F., Shepelevskii A.A., Shibaev L.A., Tochilnikov D.G., Leksovskii A.M. // *J. Macromol. Sci., B, Physics*. – 2005. –No 44 (1). –Pp. 93–115.
7. Kornaeв, A.V. Theoretical premises of thermal wedge effect in fluid–film bearings supplied with a non-homogeneous lubricant / A.V. Kornaeв, E.P. Kornaeва, L.A. Savin // *International Journal of Mechanics*. – 2017. – Vol. 11. – Pp. 197–203.
8. Kornaeв, A.V. Application of artificial neural networks to calculation of oil film reaction forces and dynamics of rotors on journal bearings [Electronic resource] / A.V. Kornaeв, N.V. Kornaeв, E.P. Kornaeва, L.A. Savin // *International Journal of Rotating Machinery*. – 2017. – Vol. 2017. – 11 p. – <https://doi.org/10.1155/2017/9196701>.
9. *Encyclopedia of tribology* / Q.J. Wang, Y.–H. Chung (Eds.). – New York: Springer Science + Business Media, 2013. – 4192 p.
10. Fundamentalnyye osnovy mikropolyarnoy i gidridnoy smazki granulirovannymi nanomaterialami: otchet o NIR (zaklyuchitelnyy): po proyektu gosudarstvennogo zadaniya № 7.516.2011 ot 01.01.2012 g. Gosudarstvennyy universitet – uchebno–nauchno–proizvodstvennyy kompleks; ruk. Savin L.A.; ispoln.: Kornayev A.V. i dr. – Orel, 2013. – 102 s.
11. Andrew, D.D. Electrorheological Fluid–Controlled “Smart” Journal Bearings / D.D. Andrew, K. Alexander // *Tribology Transactions*. – 1992. – Vol. 35. – P. 611–618.
12. Agrawal, A. A Bearing Application Using Magnetorheological Fluid / A. Agrawal, C. Ciocanel, T. Martinez, J. Duggan, // *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. – 2002. – Vol. 13. – P. 667–673.
13. Laukiavich, C.A. A comparison between the performance of ferro– and magnetorheological fluids in a hydrodynamic bearing / C.A. Laukiavich, M.J. Braun, A.J. Chandy // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J Journal of Engineering Tribology*. – 2014. – Vol. 228. – P. 649–666.
14. Montazeri H. Numerical analysis of hydrodynamic journal bearings lubricated with ferrofluids. *Engineering Tribology. Proc. IMechE, Vol.222., 2007. Part J.:51 – 60.*
15. Osman, T. A., Nada G. S., Safar Z. S. Static and dynamic characteristics of magnetized journal bearings lubricated with ferrofluid. *Tribology international*. Elsevier, Vol. 34, 2001, 369 – 380.
16. Fetisov A.S. Raschet magnitnoy tsepi opory skolzheniya, smazyvayemoy magnitoreologicheskimi zhidkostyami // *Fundamentalnyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii*. – №3 (335). – 2019. – S. – 69–74
17. Zapoměl, J. Application of the controllable magnetorheological squeeze film dampers for minimizing energy losses and driving moment of rotating machines / Zapoměl, J., Ferfecki, P., Kozánek, J. // *Mechanisms and Machine Science*. – vol. 60. – 2019. – P. 132–143.

Fetisov Alexander Sergeevich

Babin Alexander Yuryevich

Tyurin Valentin Olegovich

Orel State University,  
Trainee–researcher RL "Modeling of  
hydromechanical systems"  
E–mail: fetisov57rus@mail.ru

Orel State University,  
Junior Researcher RL "Modeling of  
hydromechanical systems"  
E–mail: alex.mech.osu@gmail.com

Orel State University  
Junior Researcher RL "Modeling of  
hydromechanical systems"  
E–mail: v7a717@mail.ru

УДК 621.965

DOI: 10.33979/2073-7408-2020-339-1-120-126

А.В. СЫТИН, Р.К. ЗАРЕЦКИЙ, Н.В. ТОКМАКОВ

## МЕХАТРОННОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛЕПЕСТКОВ

**Аннотация.** В статье представлено устройство для изготовления лепестков газодинамического подшипника. Приведена принципиальная схема мальтийского механизма, позволяющего выполнять резку тонкого листового материала. Определены площади и требуемые силы резания для выполнения различных лепестков. Выявлен случай для максимального усилия резания. Рассчитаны параметры мальтийского механизма. Представлены лепестки газодинамического подшипника скольжения различного вида, выполненные с применением представленного устройства.

**Ключевые слова:** газодинамический подшипник, лепестки, резак, мальтийский механизм.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агажанов, А.П. Проектирование мехатронных и робототехнических устройств: Учебное пособие [Текст] / А.П. Агажанов. – СПб.: Лань, 2012. – 608 с.
2. Горин, А.В. Применение гидравлических машин ударного действия для образования скважин в грунтах: монография [Текст] / А.В. Горин, Д.Н. Ешуткин, М.А. Горина. – Орел: Госуниверситет – УНПК, 2015. – 151 с.
3. Лукинов, А.П. Проектирование мехатронных и робототехнических устройств [Текст]: Учебное пособие / А.П. Лукинов. – СПб.: Лань, 2012. – 608 с.
4. Асташев В.К., Бабицкий И.И. Вибрации в технике [Текст]: справочник: в 6-ти т. / В.К. Асташев, В.И. Бабицкий, И.И. Быховский и др.; ред. совет под пред. В.Н. Челомей. – М.: Машиностроение, 1981. – Т. 6. Защита от вибрации и ударов / под ред. К.В. Фролова. – 1981. – 456 с.
5. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин [Текст]. Учебник для вузов. 4-е изд. / И.И. Артоболевский; – М.: Наука. 1988. 640 с.
6. Babin A. Active thrust fluid–film bearings: Theoretical and experimental studies/ Babin, A., Kornaeв, A., Rodichev, A., Savin, L.// Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2019.
7. Егоров О.Д., Подураев Ю.В. Мехатронные модули. Расчет и конструирование [Текст]: Учебное пособие. / О.Д. Егоров, Ю.В. Подураев. – М.: МГТУ «Станкин», 2004. – 360 с.
8. Иванов, А.А. Проектирование систем автоматизированного машиностроения [Текст] / А.А. Иванов. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2014. – 320 с.
9. Савин Л.А. Автоматизированное проектирование роторных машин [Текст] / Л. А. Савин, О. В. Соломин, Д. Е. Устинов, А. О. Пугачев. – Москва: Машиностроение–1, 2006.–360с.
10. Поляков Р.Н. Динамические качества и ресурс комбинированных опорных узлов. Монография [Текст] / Р.Н. Поляков. – Издательство LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG Heinrich–Bocking–Str. 6–8, 66121 Saarbrücken, Germany. ISBN: 978–3–659–14623–7. Saarbrücken 2012. – 161 с
11. Хомченко В.Г., Соломин В.Ю. Мехатронные и робототехнические системы [Текст]: Учебное пособие. / В.Г. Хомченко, В.Ю. Соломин. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2008 г. – 160 с.
12. Savin L.A. Influence of Critical Flow Rates on Characteristics of Enforced and Shear Flows in Circular Convergent–Divergent Channels / Savin, L.A., Kornaeв, A.V., Kornaeва, E.P.// International Journal of Rotating Machinery. – 2017. – 8761375
13. Пат. 2658260 Российская Федерация, МПК F16C 17/02 (2006.01), F16C 27/02 (2006.01), F16C 32/06 (2006.01). Радиальный лепестковый газодинамический подшипник / Сигачев С.И.; заявитель и патентообладатель: Сигачев С.И. – № 2015103661; заявл: 27.08.2016 Бюл. № 24; опубл: 19.06.2018 Бюл. № 17
14. Пат. 2568005 Российская Федерация, МПК F16C 27/02, F16C 32/02 (2015 г.), Лепестковый газодинамический подшипник с активным управлением / Савин Л.А. (РФ), Сытин А.В. (РФ), Тюрин В.О. (РФ), Шутин Д.В.; заявитель и патентообладатель: Орловский государственный технический университет. – № 2003110901/11; заявл: 16, 04.2015; опубл: 27.06.2017
15. Колосков М. М. Марочник сталей и сплавов [Текст] / М.М. Колосков и др.; под ред. А.С. Зубченко. – М., 2001. – 671 с.
16. Savin L. Actuators of active tribotechnical systems of the rotor–bearing type/ Savin, L., Shutin, D., Kuzavka, A. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – vol.233(1). – 012043.
17. Чернавский, С.А. Курсовое проектирование деталей машин [Текст]: Учебное пособие / С.А. Чернавский, К.Н. Боков, И.М. Чернин. – М.: НИЦ ИНФРА–М, 2013. – 414 с.



18. Тимофеев, Г.А. Теория механизмов и машин. Курсовое проектирование [Текст] / Г.А. Тимофеев. – М.: МГТУ, 2010. – 154 с.

19. Гидроцилиндры// pneumax URL:<https://www.pneumax.ru/upload/iblock/5ee/5eea7468d83f135e1b9a684ff80a395d.pdf> (20.12.18).

**Сытин Антон Валерьевич**  
ОГУ имени И.С. Тургенева, г. Орел  
Кандидат технических наук,  
доцент кафедры мехатроники,  
механики и робототехники  
302020, г. Орел, Наугорское  
шоссе, 29  
Тел. (4862) 41–98–85  
E-mail: sytin@mail.ru

**Зарецкий Роман Константинович**  
ОГУ имени И.С. Тургенева, г. Орел  
Аспирант  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе,  
29  
Тел. 89208182314  
E-mail: kogots@bk.ru

**Токмаков Никита Владимирович**  
ОГУ имени И.С. Тургенева, г. Орел  
Студент  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе,  
29  
Тел. 89102600267  
E-mail: gorin57@mail.ru

A.V. SITIN, R.K. ZARETSKIY, N.V. TOKMAKOV

## MECHATRONIC DEVICE FOR MANUFACTURING PETALS

**Abstract.** *The article presents a device for the manufacture of gas–dynamic bearing petals. A schematic diagram of the Maltese mechanism, allowing the cutting of thin sheet material. Determined the area and the required cutting forces to perform various petals. The case for the maximum cutting force is revealed. The parameters of the Maltese mechanism are calculated. The petals of a gas–dynamic sliding bearing of various types, made using the device presented, are presented.*

**Keywords:** *gas–dynamic bearing, petals, cutter, maltese mechanism.*

### BIBLIOGRAPHY

1. A.P. Agazhanov, Design of Mechatronic and Robotic Devices: Textbook [Text] / A.P. Agazhanov, – St. Petersburg.: Lan', 2012. – 608 p.
2. A.V Gorin. The use of hydraulic shock machines for the formation of wells in soils: monograph [Text] / A.V Gorin, D.N. Yeshutkin, M.A. Gorina. – Orel: State University – UNPK, 2015. – 151 p.
3. Lukinov, A.P. Design of mechatronic and robotic devices [Text]: Textbook / A.P. Lukinov. – St. Petersburg.: Lan', 2012.— 608 с.
4. V.K. Astashev, I.I Babitsky. Vibrations in technology [Text]: reference book: in 6 volumes / V.K. Astashev, V.I. Babitsky, I.I. Bykhovsky and others; ed. advice under. V.N. Chelomei. – М.: Mechanical Engineering, 1981. – Т. 6. Protection against vibration and shock / ed. K.V. Frolova. – 1981. – 456 p.
5. I.I Artobolevsky. Theory of mechanisms and machines [Text]. Textbook for high schools. 4th ed. / I.I. Artobolevsky; – М.: Science. 1988.640 s.
6. Babin A. Active thrust fluid–film bearings: Theoretical and experimental studies/ Babin, A., Kornaev, A., Rodichev, A., Savin, L.// Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2019.
7. O.D. Egorov, Yu.V Poduraev. Mechatronic modules. Calculation and construction [Text]: Textbook. / O.D. Egorov, Yu.V. Poduraev. – М.: MSTU "Stankin", 2004. – 360 p.
8. A.A Ivanov,. Design of automated engineering systems [Text] / A.A. Ivanov. – Vologda: Infra–Engineering, 2014. – 320 с.
9. L.A Savin. Automated design of rotor machines [Text] / L. A. Savin, O. V. Solomin, D. E. Ustinov, A. O. Pugachev. – Moscow: Engineering–1, 2006. – 360 p.
10. R.N. Polyakov Dynamic qualities and resource of combined support units. Monograph [Text] / R.N. Poles. – LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG Heinrich–Bocking–Str. 6–8, 66121 Saarbrucken, Germany. ISBN: 978–3–659–14623–7. Saarbrucken 2012. – 161 с
11. V.G. Khomchenko, V.Yu Solomin. Mechatronic and robotic systems [Text]: Textbook. / V.G. Khomchenko, V.Yu. Solomin. – Omsk: Publishing House of OmSTU, 2008 – 160 s.
12. Savin L.A. Influence of Critical Flow Rates on Characteristics of Enforced and Shear Flows in Circular Convergent–Divergent Channels / Savin, L.A., Kornaev, A.V., Kornaeva, E.P.// International Journal of Rotating Machinery. – 2017. – 8761375
13. Pat. 2658260 Russian Federation, IPC F16C 17/02 (2006.01), F16C 27/02 (2006.01), F16C 32/06 (2006.01). Radial flap gas–dynamic bearing / S.I. Sigachev; Applicant and patent holder: S. Sigachev – No. 2015103661; stated: 08/27/2016 Bull. Number 24; publisher: 06/19/2018 Bull. Number 17

14. Pat. 2568005 Russian Federation, IPC F16C 27/02, F16C 32/02 (2015), Active Controlled Gas–Dynamic Bearing / L.A. Savin (RF), A.V. Sytin (RF), V.O. Tyurin (RF), D. Shutin; Applicant and patent holder: Orel State Technical University. – No. 2003110901/11; stated: 16, 04.2015; publisher: 06/27/2017

15. M. M. Koloskov, Marochnik steels and alloys [Text] / M.M. Koloskov and others; under the editorship of A.S. Zubchenko. – M., 2001.— 671 p.

16. Savin L. Actuators of active tribotechnical systems of the rotor–bearing type/ Savin, L., Shutin, D., Kuzavka, A. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – vol.233(1). – 012043

17. S.A. Chernavsky, Course design of machine parts [Text]: Textbook / S.A. Chernavsky, K.N. Bokov, I.M. Chernin. – M.: SIC INFRA–M, 2013.— 414 p.

18. G.A. Timofeev, Theory of mechanisms and machines. Course design [Text] / G.A. Timofeev. – M.: MSTU, 2010. – 154 p.

19. Hydrocylinders

// pneumax URL:<https://www.pneumax.ru/upload/iblock/5ee/5eea7468d83f135e1b9a684ff80a395d.pdf> (20.12.18).

**Sytin Anton Valerievich**

Orel State University named after  
I.S.Turgenev, Orel  
Candidate of technical Sciences,  
associate professor  
Faculty «Mekhatronika. mekhanika  
i robototekhnika »  
302020, Orel, Naugorskoye shosse,  
29  
Ph.: (4862) 41–98–85  
E–mail: sytin@mail.ru

**Zaretskiy Roman Konstantinovich**

Orel State University named after  
I.S.Turgenev, Orel  
Student  
302020, Orel, Naugorskoye shosse, 29  
Ph.:89208182314  
E–mail: kogots@bk.ru

**Tokmakov Nikita Vladimirovich**

OSU named after I.S. Turgenev,  
Oryol  
Student  
302020, Oryol, Naugorsk highway,  
29  
Tel 89102600267  
E–mail: gorin57@mail.ru

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

УДК 51–76:535.015

DOI: 10.33979/2073-7408-2020-339-1-127-138

М.В. СУХАНОВА

### **АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ПОДХОДОВ К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С РАСТИТЕЛЬНОЙ ТКАНЬЮ**

**Аннотация.** В работе представлен обзор существующих на сегодняшний день подходов к моделированию в области биооптики, в частности, процессов взаимодействия оптического излучения с растительной тканью. Рассмотрено шесть основных классов моделей. Проанализированы их преимущества и недостатки.

**Ключевые слова:** математическая модель, листья растений, оптическое излучение, отражение от листьев, структура листа, ДФОС.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно – неоднородных средах, М: Мир, 1981.
2. Братченко, И.А. Экспериментальные исследования и математическое моделирование оптических характеристик растительной ткани / И.А Братченко, Е.В. Воробьева, В.П. Захаров, П.Е Тимченко, С.П. Котова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2007. – №3. – С. 620–625.
3. Братченко, И.А. Моделирование влияния покровных тканей растения на характеристики рассеянного обратного излучения / И.А Братченко, В.П. Захаров, Е.В. Тимченко // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, 2008. – №2. – С. 117–122.
4. Vogelmann T.C., Bjorn L.O. Plants as Light Traps // *Physiol.plant.* 1986. Vol. 68.
5. Тагеева, С.В. Изучение оптических свойств листьев в зависимости от угла падения света / С.В. Тагеева, А.Б. Брандт // *Биофизика.* – 1960. – Т.5, Вып. 3. – С.308–314.
6. Tageyeva S.V., Brandt A.B. (1961), Study of optical properties of leaves depending on the angle of light incidence, in *Progress in Photobiology Book* (B.C.C.B. Buchmann), Elsevier Publishing Company (Amsterdam), pp. 163–169.
7. Шульгин И. А., Хазанов В. С., Клешнин А. Ф. О характере отражения лучистой энергии в зависимости от строения листа // Доклады Академии наук. – 1960. – Т. 134, № 2. – С. 471–474.
8. Breese H.T., Holmes R.A. (1971), Bidirectional scattering characteristics of healthy green soybeans and corn leaves in vivo, *Appl. Opt.*, 10(1):119–127.
9. Brakke T.W., Smith J.A., Harnden J.M. (1989), Bidirectional scattering of light from tree leaves, *Remote Sens. Environ.*, 29:175–183.
10. Ma Q., Ishimaru A., Phu P., Kuga Y. (1990), Transmission, reflection, and depolarization of an optical wave for a single leaf, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 28:865–872.
11. Vanderbilt V.C., Grant L., Ustin S.L. (1990), Polarization of light by vegetation, in *Photon–Vegetation Interactions: Applications in Optical Remote sensing and Plant Ecology* (J. Ross & R.B. Myneni, Eds.), Springer–Verlag, pp. 194–228.
12. Walter–Shea E.A., Norman J.M., Blad B.L. (1989), Leaf bidirectional reflectance and transmittance in corn and soybean, *Remote Sens. Environ.*, 29:161–174.
13. Sanz C. (1994), Mesure et modelisation de la variation directionnelle des proprietes optiques des feuilles", Mémoire de DEA, Université Toulouse III / CESR / INRA
14. Тимченко Е. В. Дифференциальные оптические методы контроля состояния растений: автореферат дис.... канд. физ.–мат. наук: 01.04.05 / Е. В. Тимченко; [Самар. гос. аэрокосм. ун–т им. С. П. Королева]. – Самара, 2009. – 20 с.
15. Будаговский, А.В. Новый подход к проблеме функциональной диагностики растений /А.В. Будаговский, О.Н. Будаговская, Ф. Ленц //Аграрная наука. – 2009. – № 9. – С. 19–21.
16. Будаговский А.В. Управление функциональной активностью растений когерентным светом: диссертация... доктора технических наук: 05.20.02 / Будаговский Андрей Валентинович; [Место защиты: Моск. гос. агроинженер. ун–т им. В.П. Горячкина]. – Москва, 2008. – 533 с.: ил.
17. Будаговская О.Н. Лазерно–оптические методы и технические средства многопараметрической диагностики растений и плодов: диссертация... доктора технических наук: 05.20.02 / О.Н. Будаговская; [ФГОУВПО "Московский государственный агроинженерный университет"]. – Москва, 2013. – 472 с.: ил. – РГБ ОД, 71 14–5/127.
18. S. Jacquemoud, F. Baret, “PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra,” *Remote Sensing Environ.* 34. – 75–91. – 1990.

19. Feret, J.–B. PROSPECT–4 and 5: Advances in the leaf optical properties model separating photosynthetic pigments/ Jean–Baptiste Feret, Christophe François, Gregory P. Asner, Anatoly A. Gitelson, Roberta E. Martin Luc P.R. Bidel, Susan L. Ustin, Gueric le Maire, Stéphane Jacquemoud // *Remote Sensing of Environment*, 2008. – №112. – P. 3030–3043.
20. Dawson, T.P. LIBERTY–Modeling the Effects of Leaf Biochemical Concentration on Reflectance Spectra / Terence P. Dawson, Paul J. Curran, Stephen E. Plummer // *REMOTE SENS. ENVIRON.* – New York, 1998.
21. LEAFMOD: A new within–leaf radiative transfer model [Электронный ресурс] – URL: <https://arizona.pure.elsevier.com/en/publications/leafmod–a–new–within–leaf–radiative–transfer–model> (дата обращения 23.09.2018).
22. Allen W.A., Gausman H.W., Richardson A.J., Thomas J.R. (1969), Interaction of isotropic light with a compact leaf, *J. Opt. Soc. Am.*, 59:1376–1379.
23. Allen W.A., Gausman H.W., Richardson A.J. (1970), Mean effective constants of cotton leaves, *J. Opt. Soc. Am.*, 60:542–547.
24. Fourty T., Baret F., Jacquemoud S., Schmuck G., Verdebout J. (1996), Optical properties of dry plant leaves with explicit description of their biochemical composition: direct and inverse problems, *Remote Sens. Environ.*, 56:104–117
25. Jacquemoud S., Ustin S.L., Verdebout J., Schmuck G., Andreoli G., Hosgood B. (1996), Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model, *Remote Sens. Environ.*, 56:194–202.
26. Baret F., Fourty T. (1997), Estimation of leaf water content and specific leaf weight from reflectance and transmittance measurements, *Agronomy*, 17:455–464.
27. Veyrat S. (1999), Modélisation des propriétés optiques des feuilles, Mémoire de DEA, Université de Clermont Ferrand / INRA, 98 pp.
28. Jacquemoud S., Bacour C., Poilvé H. and Frangi J.–P. (2000), Comparison of four radiative transfer models to simulate plant canopies reflectance – Direct and inverse mode, *Remote Sensing of Environment*, 74:471–481
29. Ceccato P., Flasse S., Tarantola S., Jacquemoud S. and Grégoire J.M. (2001), Detecting vegetation water content using reflectance in the optical domain, *Remote Sensing of Environment*, 77:22–33.
30. Bacour C., Jacquemoud S., Tourbier Y., Dechambre M. and Frangi J.P. (2002), Design and analysis of numerical experiments to compare four canopy reflectance models, *Remote Sensing of Environment*, 79(1):72–83
31. Kubelka P. and Munk F. (1931), Ein Beitrag zur Optik der farbanstriche, *Zeitschrift für Technische Physik*, 12:593–601.
32. Allen W.A., Richardson A.J. (1968), Interaction of light with a plant canopy, *J. Opt. Soc. Am.*, 58(8):1023–1028.
33. Fukshansky L., Fukshansky–Kazarinova N., Martinez v. Remisowsky A. (1991), Estimation of optical parameters in a living tissue by the inverse problem of the multiflux radiative transfer, *Appl. Opt.*, 30:3145–3153.
34. Martinez v. Remisowsky A., McClendon J.H., Fukshansky L. (1992), Estimation of the optical parameters and light gradients in leaves: multi–flux versus two–flux treatment, *Photochem. Photobiol.*, 55:857–865.
35. Conel J.E., van den Bosch J., Grove C.I. (1993), Application of a two–stream radiative transfer model for leaf lignin and cellulose concentrations from spectral reflectance measurements. Parts 1 & 2, in *Proc. 4th Annual JPL Airborne Geoscience Workshop, Volume 1. AVIRIS Workshop (R.O. Green, Ed), 25–29 October 1993, Washington (DC), NASA–JPL Publication 93–26, pages 39–51.*
36. Richter, T., Fukshansky L., 1996. Optics of a bifacial leaf: 1. A novel combined procedure for deriving the optical parameters, *Photochem. Photobiol.*, 63, 507–516.
37. Yamada, N., Fujimura S., 1991. Nondestructive measurement of chlorophyll pigment content in plant leaves from three–color reflectance and transmittance, *Appl. Opt.*, 30:3964–3973.
38. Andrieu B., Baret F., Schellberg J. and Rinderle U. (1988), Estimation de spectres de feuilles à partir de mesures dans les bandes spectrales larges, in *Proc. 4th International Colloquium on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing, Aussois (France), 18–22 January 1988, ESA, Vol. SP–287, pp. 351–356.*
39. Melamed N.T. (1963), Optical properties of powders. Part I. Optical absorption coefficients and the absolute value of the diffuse reflectance. Part II. Properties of luminescent powders, *Journal of Applied Physics*, 34(3):560–570.
40. Ma Q., Ishimaru A., Phu P. and Kuga Y. (1990), Transmission, reflection, and depolarization of an optical wave for a single leaf, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28(5):865–872.
41. Tucker C.J., Garratt M.W. (1977), Leaf optical system modeled as a stochastic process, *Appl. Opt.*, 16(3):635–642.
42. Lüdeker W. and Günther K.P. (1990), Leaf reflectance: A stochastic model for analysing the blue shift, in *Proc. Symposium on Global and Environmental Monitoring Techniques and Impacts, Victoria (BC), 17–21 September 1990, pp. 475–480.*
43. Maier S.W., Lüdeker W., Günther K.P. (1999), SLOP: A revised version of the stochastic model for leaf optical properties, *Remote Sens. Environ.*, 68(3):273–280.
44. Maier S.W. (2000), Modeling the radiative transfer in leaves in the 300 nm to 2.5 µm wavelength region taking into consideration chlorophyll fluorescence – The leaf model SLOPE, PhD Thesis, Deutsches Fernerkundungstagsdatenzentrum, Technische Universität München, Oberpfaffenhofen (Germany), 110 pp.
45. Gabrys–Mizera H. (1976), Model considerations of the light conditions in noncylindrical plant cells, *Photochemistry and photobiology*, 24:453–461.
46. Bone R.A., Lee D.W. and Norman J.M. (1985), Epidermal cells functioning as lenses in leaves of tropical rain forest shade plants, *Applied Optics*, 24(10):1408–1414.
47. Govaerts Y.M., Jacquemoud S., Verstraete M.M., Ustin S.L. (1996), Three–dimensional radiation transfer modeling in a dicotyledon leaf, *Appl. Opt.*, 35(33):6585–6598.

48. Govaerts Y. and Verstraete M.M. (1998), Raytran: a Monte Carlo ray-tracing model to compute light scattering in three-dimensional heterogeneous media, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(2):493–505.
49. Ustin S.L., Jacquemoud S., Govaerts Y.M. (2001), Simulation of photon transport in a three-dimensional leaf: Implication for photosynthesis, *Plant Cell Environ.*, submitted.
50. Baranoski G.V.B., Rokne J.G. (1997), An algorithmic reflectance and transmittance model for plant tissue, *EUROGRAPHICS97* (D. Fellner & L. Szirmay-Kalos, eds), 16(3):141–150.
51. Baranoski G.V.G. and Rokne J.G. (1999), A non-deterministic reconstruction approach for isotropic reflectances and transmittances, *Journal of Visualization and Computer Animation*, 10(4):225–231.
52. Baranoski G.V.G. and Rokne J.G. (2001), Efficiently simulating scattering of light by leaves, *Visual Computer*, 17(8):491–505.
53. PROSPECT + SAIL models: A review of use for vegetation [Электронный ресурс] – URL: <http://www.ipgp.fr/en/node/8279> (дата обращения 05.10.2018)

**Суханова Марина Владимировна**

ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орел  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Телефон: +7-911-385-78-18.  
E-mail: Suhanova.M.V@yandex.ru

M.V. SUKHANOVA

## ANALYTICAL REVIEW OF APPROACHES TO MATHEMATICAL MODELING OF INTERACTIONS OF OPTICAL RADIATION WITH PLANT TISSUES

**Abstract.** *The paper provides an overview of modeling approaches in the field of optics of biological tissues, in particular processes of interaction of optical radiation with plant tissue. It was considered six main classes of models. Were analyzed their advantages and disadvantages.*

**Keywords:** *mathematical model, plant leaves, optical radiation, reflection from the leaves, leaf structure, BRDF.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Isimaru A. *Rasprostranenie i rasseyanie voln v sluchajno – neodnorodnyh sredah*, M: Mir, 1981.
2. Bratchenko, I.A. *Eksperimentalnye issledovaniya i matematicheskoe modelirovanie opticheskikh harakteristik rastitelnoj tkani* / I.A. Bratchenko, E.V. Vorobyova, V.P. Zaharov, P.E. Timchenko, S.P. Kotova // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*, 2007. – №3. – S. 620–625.
3. Bratchenko, I.A. *Modelirovanie vliyaniya pokrovnyh tkaney rasteniya na harakteristiki rasseyannogo obratnogo izlucheniya* / I.A. Bratchenko, V.P. Zaharov, E.V. Timchenko // *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2008. – №2. – S. 117–122.
4. Vogelmann T.C., Bjorn L.O. *Plants as Light Traps* // *Physiol.plant.* 1986. Vol. 68.
5. Tageeva, C.B. *Izuchenie opticheskikh svoystv listev v zavisimosti ot ugla padeniya sveta* / C.B. Tageeva, A.B. Brandt // *Biofizika*. – 1960. – T.5, Vyp. 3. – S.308–314.
6. Tageeva S.V., Brandt A.B. (1961), Study of optical properties of leaves depending on the angle of light incidence, in *Progress in Photobiology Book* (B.C.C.B. Buchmann), Elsevier Publishing Company (Amsterdam), pp. 163–169.
7. SHulgin I. A., Hazanov B. C., Kleshnin A. F. *O haraktere otrazheniya luchistoj energii v zavisimosti ot stroeniya lista* // *Doklady Akademii nauk*. – 1960. – T. 134, № 2. – S. 471–474.
8. Breece H.T., Holmes R.A. (1971), Bidirectional scattering characteristics of healthy green soybeans and corn leaves in vivo, *Appl. Opt.*, 10(1):119–127.
9. Brakke T.W., Smith J.A., Harnden J.M. (1989), Bidirectional scattering of light from tree leaves, *Remote Sens. Environ.*, 29:175–183.
10. Ma Q., Ishimaru A., Phu P., Kuga Y. (1990), Transmission, reflection, and depolarization of an optical wave for a single leaf, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 28:865–872.
11. Vanderbilt V.C., Grant L., Ustin S.L. (1990), Polarization of light by vegetation, in *Photon-Vegetation Interactions: Applications in Optical Remote sensing and Plant Ecology* (J. Ross & R.B. Myneni, Eds.), Springer-Verlag, pp. 194–228.
12. Walter-Shea E.A., Norman J.M., Blad B.L. (1989), Leaf bidirectional reflectance and transmittance in corn and soybean, *Remote Sens. Environ.*, 29:161–174.
13. Sanz C. (1994), *Mesure et modelisation de la variation directionnelle des proprietes optiques des feuilles*", Mémoire de DEA, Université Toulouse III / CESR / INRA

14. Timchenko E. V. *Differencialnye opticheskie metody kontrolya sostoyaniya rastenij: avtoreferat dis.... kand. fiz.–mat. nauk: 01.04.05 / E. V. Timchenko; [Samar. gos. aerokosm. un–t im. S. P. Koroleva]. – Samara, 2009. – 20 s.*
15. Budagovskij, A.V. *Novyj podhod k probleme funkcionalnoj diagnostiki rastenij /A.V. Budagovskij, O.N. Budagovskaya, F. Lenc //Agrarnaya nauka. – 2009. – № 9. – S. 19–21.*
16. Budagovskij A.V. *Upravlenie funkcionalnoj aktivnostyu rastenij kogerentnym svetom: dissertaciya... doktora tekhnicheskikh nauk: 05.20.02 / Budagovskij Andrej Valentinovich; [Mesto zashchity: Mosk. gos. agroinzhen. un–t im. V.P. Goryachkina]. – Moskva, 2008. – 533 s.: il.*
17. Budagovskaya O.N. *Lazerno–opticheskie metody i tekhnicheskie sredstva mnogoparametricheskoj diagnostiki rastenij i plodov: dissertaciya... doktora tekhnicheskikh nauk: 05.20.02 / O.N. Budagovskaya; [FGOUPVO "Moskovskij gosudarstvennyj agroinzhenernyj universitet"]. – Moskva, 2013. – 472 s.: il. – RGB OD, 71 14–5/127.*
18. S. Jacquemoud, F. Baret, "PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra," *Remote Sensing Environ.* 34. – 75–91 – 1990.
19. Feret, J.–B. PROSPECT–4 and 5: Advances in the leaf optical properties model separating photosynthetic pigments/ Jean–Baptiste Feret, Christophe François, Gregory P. Asner, Anatoly A. Gitelson, Roberta E. Martin Luc P.R. Bidet, Susan L. Ustin, Gueric le Maire, Stéphane Jacquemoud // *Remote Sensing of Environment*, 2008. – №112. – R. 3030–3043.
20. Dawson, T.P. LIBERTY–Modeling the Effects of Leaf Biochemical Concentration on Reflectance Spectra / Terence P. Dawson, Paul J. Curran, Stephen E. Plummer // *REMOTE SENS. ENVIRON.* – New York, 1998.
21. LEAFMOD: A new within–leaf radiative transfer model [Elektronnyj resurs] – URL: <https://arizona.pure.elsevier.com/en/publications/leafmod–a–new–within–leaf–radiative–transfer–model> (data obrashcheniya 23.09.2018).
22. Allen W.A., Gausman H.W., Richardson A.J., Thomas J.R. (1969), Interaction of isotropic light with a compact leaf, *J. Opt. Soc. Am.*, 59:1376–1379.
23. Allen W.A., Gausman H.W., Richardson A.J. (1970), Mean effective constants of cotton leaves, *J. Opt. Soc. Am.*, 60:542–547.
24. Fourty T., Baret F., Jacquemoud S., Schmuck G., Verdebout J. (1996), Optical properties of dry plant leaves with explicit description of their biochemical composition: direct and inverse problems, *Remote Sens. Environ.*, 56:104–117.
25. Jacquemoud S., Ustin S.L., Verdebout J., Schmuck G., Andreoli G., Hosgood B. (1996), Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model, *Remote Sens. Environ.*, 56:194–202.
26. Baret F., Fourty T. (1997), Estimation of leaf water content and specific leaf weight from reflectance and transmittance measurements, *Agronomy*, 17:455–464.
27. Veyrat S. (1999), *Modélisation des propriétés optiques des feuilles*, Mémoire de DEA, Université de Clermont Ferrand / INRA, 98 pp.
28. Jacquemoud S., Bacour C., Poilvé H. and Frangi J.–P. (2000), Comparison of four radiative transfer models to simulate plant canopies reflectance – Direct and inverse mode, *Remote Sensing of Environment*, 74:471–481
29. Ceccato P., Flasse S., Tarantola S., Jacquemoud S. and Grégoire J.M. (2001), Detecting vegetation water content using reflectance in the optical domain, *Remote Sensing of Environment*, 77:22–33.
30. Bacour C., Jacquemoud S., Tourbier Y., Dechambre M. and Frangi J.P. (2002), Design and analysis of numerical experiments to compare four canopy reflectance models, *Remote Sensing of Environment*, 79(1):72–83
31. Kubelka P. and Munk F. (1931), Ein Beitrag zur Optik der Farbanstriche, *Zeitschrift für Technische Physik*, 12:593–601.
32. Allen W.A., Richardson A.J. (1968), Interaction of light with a plant canopy, *J. Opt. Soc. Am.*, 58(8):1023–1028.
33. Fukshansky L., Fukshansky–Kazarinova N., Martinez v. Remisowsky A. (1991), Estimation of optical parameters in a living tissue by solving the inverse problem of the multiflux radiative transfer, *Appl. Opt.*, 30:3145–3153.
34. Martinez v. Remisowsky A., McClendon J.H., Fukshansky L. (1992), Estimation of the optical parameters and light gradients in leaves: multi–flux versus two–flux treatment, *Photochem. Photobiol.*, 55:857–865.
35. Conel J.E., van den Bosch J., Grove C.I. (1993), Application of a two–stream radiative transfer model for leaf lignin and cellulose concentrations from spectral reflectance measurements. Parts 1 & 2, in *Proc. 4th Annual JPL Airborne Geoscience Workshop, Volume 1. AVIRIS Workshop (R.O. Green, Ed), 25–29 October 1993, Washington (DC), NASA–JPL Publication 93–26, pages 39–51.*
36. Richter, T., Fukshansky L., 1996. Optics of a bifacial leaf: 1. A novel combined procedure for deriving the optical parameters, *Photochem. Photobiol.*, 63, 507–516.
37. Yamada, N., Fujimura S., 1991. Nondestructive measurement of chlorophyll pigment content in plant leaves from three–color reflectance and transmittance, *Appl. Opt.*, 30:3964–3973.
38. Andrieu B., Baret F., Schellberg J. and Rinderle U. (1988), Estimation de spectres de feuilles à partir de mesures dans les bandes spectrales larges, in *Proc. 4th International Colloquium on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing, Aussois (France), 18–22 January 1988, ESA, Vol. SP–287, pp. 351–356.*
39. Melamed N.T. (1963), Optical properties of powders. Part I. Optical absorption coefficients and the absolute value of the diffuse reflectance. Part II. Properties of luminescent powders, *Journal of Applied Physics*, 34(3):560–570.
40. Ma Q., Ishimaru A., Phu P. and Kuga Y. (1990), Transmission, reflection, and depolarization of an optical wave for a single leaf, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28(5):865–872.
41. Tucker C.J., Garratt M.W. (1977), Leaf optical system modeled as a stochastic process, *Appl. Opt.*, 16(3):635–642.

42. Lüdeker W. and Günther K.P. (1990), Leaf reflectance: A stochastic model for analysing the blue shift, in Proc. Symposium on Global and Environmental Monitoring Techniques and Impacts, Victoria (BC), 17–21 September 1990, pp. 475–480.
43. Maier S.W., Lüdeker W., Günther K.P. (1999), SLOP: A revised version of the stochastic model for leaf optical properties, Remote Sens. Environ., 68(3): 273–280.
44. Maier S.W. (2000), Modeling the radiative transfer in leaves in the 300 nm to 2.5  $\mu\text{m}$  wavelength region taking into consideration chlorophyll fluorescence – The leaf model SLOPE, PhD Thesis, Deutsches Fernerkundungstagsdatenzentrum, Technische Universität München, Oberpfaffenhofen (Germany), 110 pp.
45. Gabrys–Mizera H. (1976), Model considerations of the light conditions in noncylindrical plant cells, Photochemistry and photobiology, 24:453–461.
46. Bone R.A., Lee D.W. and Norman J.M. (1985), Epidermal cells functioning as lenses in leaves of tropical rain forest shade plants, Applied Optics, 24(10):1408–1414.
47. Govaerts Y.M., Jacquemoud S., Verstraete M.M., Ustin S.L. (1996), Three–dimensional radiation transfer modeling in a dicotyledon leaf, Appl. Opt., 35(33):6585–6598.
48. Govaerts Y. and Verstraete M.M. (1998), Raytran: a Monte Carlo ray–tracing model to compute light scattering in three–dimensional heterogeneous media, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 36(2):493–505.
49. Ustin S.L., Jacquemoud S., Govaerts Y.M. (2001), Simulation of photon transport in a three–dimensional leaf: Implication for photosynthesis, Plant Cell Environ., submitted.
50. Baranoski G.V.B., Rokne J.G. (1997), An algorithmic reflectance and transmittance model for plant tissue, EUROGRAPHICS97 (D. Fellner & L. Szirmay–Kalos, eds), 16(3):141–150.
51. Baranoski G.V.G. and Rokne J.G. (1999), A non–deterministic reconstruction approach for isotropic reflectances and transmittances, Journal of Visualization and Computer Animation, 10(4):225–231.
52. Baranoski G.V.G. and Rokne J.G. (2001), Efficiently simulating scattering of light by leaves, Visual Computer, 17(8):491–505.
53. PROSPECT + SAIL models: A review of use for vegetation [Elektronnyj resurs] – URL: <http://www.ipgp.fr/en/node/8279> (data obrashcheniya 05.10.2018)

**Sukhanova Marina Vladimirovna**

Oryol State University named after I.S. Turgenev, Oryol  
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29  
Phone: +7–911–385–78–18.  
E–mail: Suhanova.M.V@yandex.ru

УДК 502.174:697.7

DOI: 10.33979/2073-7408-2020-339-1-139-143

Е.В. БУРКОВА, Д.В. БУРКОВ

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В АККУМУЛЯТОРАХ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

**Аннотация.** *Исследованы процессы теплопередачи на модели сезонного аккумулятора солнечной энергии. Представлен алгоритм расчета температур на границе раздела фаз. Получены уравнения по определению температуры на границе раздела фаз.*

**Ключевые слова:** *сезонный аккумулятор, солнечная энергия, сезонные аккумуляторы.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров В.В., Буркова Е.В. Оценка возможности сезонного аккумулирования солнечной энергии в выработанных карьерах// Возобновляемая энергетика. – 2008. – №3 (14). – С. 36–40.
2. Твайделл Дж. Возобновляемые источники энергии [пер. с англ.] / Дж. Твайделл, А. Уэйр; под ред. В. А. Коробкова. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 390 с.
3. Roselund C. Large–scale PV comes to the Ukraine: Active Solars Ohotnikovo and Perovo PV plants [Electronic resource] / C. Roselund // Solar Server. Global Solar Industry Website. – Режим доступа: <http://www.solarserver.com/>

**Буркова Елена Викторовна**

Севастопольский государственный университет, г.  
Севастополь  
Кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Техносферная безопасность»  
E–mail: lena1b@mail.ru

**Бурков Дмитрий Валериевич**

Севастопольский государственный университет, г.  
Севастополь  
Кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Энергоустановки морских судов и сооружений»  
E–mail: dv.burkov@mail.ru

E.V. BURKOVA, D.V. BURKOV

## RESEARCH OF HEAT TRANSFER PROCESSES IN BATTERIES OF SOLAR ENERGY

**Abstract.** *Heat transfer processes are investigated on a model of a seasonal solar energy accumulator. An algorithm for calculating temperatures at the interface is presented. Equations are obtained for determining the temperature at the phase boundary.*

**Keywords:** *seasonal battery, solar energy, seasonal batteries.*

### BIBLIOGRAPHY

1. Makarov V.V., Burkova E.V. Assessment of the possibility of seasonal accumulation of solar energy in depleted quarries // Renewable energy. – 2008. – No. 3 (14). – S. 36–40.
2. Twidell J. Renewable sources of energy [per.s angl.] / J. The tvaydell, A. Weir; under the editorship of V. A. Korobkov. – Moscow: Energoatomizdat, 1990. – 390 p.
3. Roselund C. Large-scale PV comes to the Ukraine: Active Solars Ohotnikovo and Perovo PV plants [Electronic resource] / C. Roselund // Solar Server. Global Solar Industry Website. – Режим доступа: <http://www.solarserver.com/>

**Burkova ElenaViktorovna**

Sevastopol State University, Sevastopol  
Ph.D., associate professor of the Department  
«Technosphere safety»  
E-mail: lena1b@mail.ru

**BurkovDmitiyValerievich**

Sevastopol State University, Sevastopol  
Ph.D., associate professor of the Department «Power  
plants of ships and structures»  
E-mail: dv.burkov@mail.ru



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

УДК 006.013, 658.5.011

DOI: 10.33979/2073-7408-2020-339-1-144-150

И.А. ЛОСКУТОВ

## **СТАНДАРТЫ ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ РАЗРАБОТКИ СИЛОВОГО И УПРАВЛЯЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ АЭС**

**Аннотация.** Доказана оправданность развития мирных атомных технологий. Обозначен тип оборудования. Показаны основные стандарты, которыми пользуются производители силового и управляющего оборудования для АЭС в Российской Федерации. Доказаны существенные различия в принципах и особенностях сборки и монтажа при работе по национальным и иностранным стандартам.

**Ключевые слова:** АЭС, стандарт, шкаф, ГОСТ, международные стандарты

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Стоцкий К.С. Атомная энергетика. Преимущества и недостатки / К.С. Стоцкий // Наука через призму времени. – Самара, 2019. – №8 (29). – С.41–43
2. Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом» / Доля АЭС в выработке электроэнергии в России в 2017 году выросла до 18,9% – Режим доступа: <https://www.rosatom.ru/journalist/news/dolya-aes-v-vyrabotke-elektroenergii-v-rossii-v-2017-godu-vyrosla-do-18-9/>, свободный (Дата обращения 14.06.2019)
3. World Nuclear Industry Status Report. The Independent Assessment of Nuclear Developments in the World / Russia – Режим доступа: <https://www.worldnuclearreport.org/+Russia+.html>, свободный (Дата обращения 12.07.2019)
4. World Nuclear Industry Status Report. The Independent Assessment of Nuclear Developments in the World / World Nuclear Power Status – Режим доступа: <https://www.worldnuclearreport.org/>, свободный (Дата обращения 12.07.2019)
5. Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом» / Строящиеся АЭС – Режим доступа: <http://www.rosatom.ru/production/design/stroyash-chiesya-aes/>, свободный (Дата обращения 26.07.2018)
6. M. Schneider, A. Froggatt и др. World Nuclear Industry Status Report 2014 / Schneider M., Froggatt A. и др. – Париж, Лондон, Вашингтон, июль 2014, 158с.
7. IAEA. Power Reactor Information System / NPP status changes – Режим доступа: <https://pris.iaea.org/pris/>, свободный (Дата обращения 08.05.2019)
8. Абросимова Н.В. Профессиональные стандарты в атомной энергетике: понятие, система, перспективы / Н.В. Абросимова // Глобальная ядерная безопасность. – Москва, 2014. – №2(11), С.104–110
9. Акционерное общество «научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г.Иосифьяна / Комплекс электрооборудования СУЗ для реакторов ВВЭР-440 – Режим доступа: [http://www.vniem.ru/ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=653%3A-440&catid=89%3A2015-03-12-20-31-17&Itemid=63](http://www.vniem.ru/ru/index.php?option=com_content&view=article&id=653%3A-440&catid=89%3A2015-03-12-20-31-17&Itemid=63), свободный (Дата обращения 16.08.2019)
10. Акционерное общество «научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г.Иосифьяна / Комплекс электрооборудования СУЗ для реакторов типа ВВЭР-1000, ВВЭР-1200 – Режим доступа: [http://www.vniem.ru/ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=652%3A-1000-1200&catid=89%3A2015-03-12-20-31-17&Itemid=63](http://www.vniem.ru/ru/index.php?option=com_content&view=article&id=652%3A-1000-1200&catid=89%3A2015-03-12-20-31-17&Itemid=63), свободный (Дата обращения 16.08.2019)
11. СТО 56947007–29.120.70.042–2010 Требования к шкафам управления и РЗА с микропроцессорными устройствами 30.03.2010 – 17 с.
12. ГОСТ Р 51321.5–2011 (МЭК 60439–5:2006) Устройства комплектные низковольтные распределения и управления. Часть 5. Дополнительные требования к низковольтным комплектным устройствам, предназначенным для наружной установки в общедоступных местах (распределительным шкафам и щитам)
13. UL 508A Standard for Safety Industrial Control Panels, July 3, 2018
14. РД 34.35.310–97 Общие требования к микропроцессорным устройствам защиты и автоматики энергосистем
15. IEEE C37.90–2005 – IEEE Standard for Relays and Relay Systems Associated with Electric Power Apparatus

16. ГОСТ Р 56376–2015/IEEC C37.92(2005) Преобразователи электрические измерительные. Аналоговые входы защитных реле от электронных преобразователей напряжения и тока
17. ПНСТ 164–2016. Электрооборудование для атомных станций. Общие технические требования
18. ГОСТ 30631–99 Общие требования к машинам, приборам и другим техническим изделиям в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам при эксплуатации
19. ГОСТ 30546.2–98 Испытания на сейсмостойкость машин, приборов и других технических изделий. Общие положения и методы испытаний (с Изменением N 1)
20. IEC 60068–3–3:1991 Environmental testing; part 3: guidance; seismic test methods for equipments
21. ANSI/AISC 341–16 Seismic Provisions for Structural Steel Buildings
22. AS 60068–3–3–2003 Environmental testing; part 3.3: Guidance – Seismic test methods for equipment
23. Гродзенский С.Я. Управление качеством: учебник. – 2–е изд. М.: Проспект, 2018 – 320с.
24. Крутикова Л.П. и др. Применение средств автоматизации при проектировании и производстве электрооборудования для АЭС с широким использованием кооперации / Л.П. Крутикова и др. // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва, 2004. – Том 101, С.35–44
25. Armenian nuclear power plant “Improvement of the Primary Circuit Pressure Control System” Project A1.01/00B1 // Европейская комиссия. Речевой репозиторий. Толкование – Режим доступа: <https://webgate.ec.europa.eu/europeaid/online-services/index.cfm?ADSSChck=1404600970004&do=publi.getDoc&documentId=41045&pubID=115075>, свободный (Дата обращения 04.05.2019)
26. IAEA Safety Standards for protecting people and environment. Specific Safety Guide No. SSG–39. Design of Instrumentation and Control Systems for Nuclear Power Plants, Вена, апрель 2016. – 184с.
27. Nuclear Energy Agency Committee on the safety of nuclear installations. Defence in Depth of Electrical Systems and Grid Interaction. Final DIDEYSYS Task Group Report. 09–Nov–2009, 169с, – Режим доступа: <https://www.oecd-nea.org/nsd/docs/2009/csni-r2009-10.pdf>, свободный (Дата обращения 08.05.2019)
28. АО «Атомэнергпром» // Project management structure AES–2006 // СПб: 2014, 28 с. – Режим доступа: [http://atomenergoprom.ru/u/file/npp\\_2006\\_eng.pdf](http://atomenergoprom.ru/u/file/npp_2006_eng.pdf), свободный (Дата обращения 08.05.2019)
29. Johnston G. The development of the new idea safety guide for design of instrumentation and control systems for nuclear power plants / G. Johnston, A. Duchag // The development of the new idea safety guide. – Вена, Март 2017. – No1 (44). – Volume 12,
30. NFPA 79: Electrical Standard for Industrial Machinery, 2018 Edition
31. ГОСТ 12.2.007.0–75 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Изделия электротехнические. Общие требования безопасности (с Изменениями N 1, 2, 3, 4)
32. ГОСТ 14254–96 (МЭК 529–89) Степени защиты, обеспечиваемые оболочками (код IP)
33. NEC 70: National Electrical Code, 2020 Edition

**Лоскутов Иван Андреевич**

1. Акционерное общество «Научно–производственной корпорации «Космические системы мониторинга, информационно–управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна» (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»), инженер–конструктор, 107078, г. Москва, Хоромный тупик, д.4, стр. 1
2. ГБПОУ "Политехнический колледж им. Н.Н. Годовикова", преподаватель, г. Москва, 125130, Москва, улица Зои и Александра Космодемьянских, д. 19
3. МИРЭА–Российский технологический университет, аспирант кафедры метрологии и стандартизации, 119454, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78  
Тел. +7(926)152–32–42  
E–mail: faxvex@yandex.ru

---

I.A. LOSKUTOV

**STANDARDS USED IN THE DEVELOPMENT OF POWER AND CONTROL EQUIPMENT FOR NUCLEAR POWER PLANTS**

**Abstract.** *The justification of the development of peaceful nuclear technologies is proved. The type of equipment is indicated. The main standards used by manufacturers of power and control equipment for nuclear power plants in the Russian Federation are shown. Significant differences in the principles and features of assembly and installation when working according to national and foreign standards are proved.*

**Keywords:** *NPPs, standard, cabinet, GOST, international standards.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Stotsky K.S. Nuclear power. Advantages and disadvantages / K.S. Stotsky // Science through the prism of time. – Samara, 2019. – No. 8 (29). – Pp. 41–43
2. State atomic energy Corporation Rosatom / Share of nuclear power plants in power generation in Russia in 2017 increased to 18.9% – Access mode: <https://www.rosatom.ru/journalist/news/dolya-aes-v-vyrabotke-elektroenergii-v-rossii-v-2017-godu-vyrosla-do-18-9-/>, free (Accessed date 14.06.2019)
3. World Nuclear Industry Status Report. The Independent Assessment of Nuclear Developments in the World / Russia – Access mode: <https://www.worldnuclearreport.org/+Russia+.html>, free (Accessed date 12.07.2019)
4. World Nuclear Industry Status Report. The Independent Assessment of Nuclear Developments in the World / World Nuclear Power Status – Access mode: <https://www.worldnuclearreport.org/>, free (Accessed date 12.07.2019)
5. Rosatom state atomic energy Corporation / Nuclear power plants under Construction – Access mode: <http://www.rosatom.ru/production/design/stroyash-chiesya-aes/>, free (Accessed date 26.07.2018)
6. M. Schneider, A. Froggatt и др. World Nuclear Industry Status Report 2014 / Schneider M., Froggatt A. and other – Paris, London, Washington DC, July 2014, 158с.
7. IAEA. Power Reactor Information System / NPP status changes – Access mode: <https://pris.iaea.org/pris/>, free (Accessed date 08.05.2019)
8. Abrosimova N.V. Professional Standards in Nuclear Power Engineering: the Concept, System, Prospects / N.V. Abrosimova // Global Nuclear Safety. – Moscow, 2014. – №2(11), Pp.104–110
9. Joint Company "Research and Production Corporation" Space Monitoring Systems, Information & Control and Electromechanical Complexes "named after A.G. Iosifian" / Complex of electrical equipment complex for VVER–440 reactors – Access mode: [http://www.vniiem.ru/ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=653%3A-440&catid=89%3A2015-03-12-20-31-17&Itemid=63](http://www.vniiem.ru/ru/index.php?option=com_content&view=article&id=653%3A-440&catid=89%3A2015-03-12-20-31-17&Itemid=63), free (Accessed date 16.08.2019)
10. Joint Company "Research and Production Corporation" Space Monitoring Systems, Information & Control and Electromechanical Complexes "named after A.G. Iosifian" / Complex of electrical equipment complex for VVER–1000, VVER–1200 reactors – Access mode: [http://www.vniiem.ru/ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=652%3A-1000-1200&catid=89%3A2015-03-12-20-31-17&Itemid=63](http://www.vniiem.ru/ru/index.php?option=com_content&view=article&id=652%3A-1000-1200&catid=89%3A2015-03-12-20-31-17&Itemid=63), free (Accessed date 16.08.2019)
11. STO 56947007–29. 120. 70. 042–2010 Requirements for control cabinets and RZA with microprocessor devices 30.03.2010 – 17 с.
12. GOST R 51321.5–2011 (IEC 60439–5:2006) Low–voltage switchgear and controlgear assemblies. Part 5. Particular requirements for low–voltage assemblies for power distribution in public networks (distribution cabinets and boards)
13. UL 508A Standard for Safety Industrial Control Panels, July 3, 2018
14. WD 34.35.310–97 General requirements for microprocessor devices of protection and automation of power systems
15. IEEE C37.90–2005 – IEEE Standard for Relays and Relay Systems Associated with Electric Power Apparatus
16. GOST R 56376–2015/IEEE C37.92(2005) Electrical transducers. Analog inputs to protective relays from electronic voltage and current transducers
17. PNST 164–2016. Electric equipment for nuclear power plants. General technical requirements
18. GOST 30631–99 General requirements for machines, instruments and other industrial products as to environment mechanical stability
19. GOST 30546.2–98 Seismic stability tests for machines, instruments and other industrial products. General guidance and test methods (with Change N 1)
20. IEC 60068–3–3:1991 Environmental testing; part 3: guidance; seismic test methods for equipments
21. ANSI/AISC 341–16 Seismic Provisions for Structural Steel Buildings
22. AS 60068–3–3–2003 Environmental testing; part 3.3: Guidance – Seismic test methods for equipment
23. Grodzensky S.Ya. Quality management: tutorial. – 2nd ed. M.: Prospect, 2018 – 320с.
24. Krutikova L.P. et al. The use of automation in the design and manufacture of electrical equipment for nuclear power plants with a wide use of cooperation / L.P. Krutikova et al. // Questions of electromechanics. Proceedings of VNIIEМ. – Moscow, 2004. – Thom 101, C.35–44\
25. Armenian nuclear power plant “Improvement of the Primary Circuit Pressure Control System” Project A1.01/00B1 // European commission. The speech repository. Interpretation – Access mode: <https://webgate.ec.europa.eu/europeaid/online-services/index.cfm?ADSSChck=1404600970004&do=publi.getDoc&documentId=41045&pubID=115075>, free (Accessed date 04.05.2019)
26. IAEA Safety Standards for protecting people and environment. Specific Safety Guide No. SSG–39. Design of Instrumentation and Control Systems for Nuclear Power Plants, Vienna, April 2016. – 184с.
27. Nuclear Energy Agency Committee on the safety of nuclear installations. Defence in Depth of Electrical Systems and Grid Interaction. Final DIDEЛSYS Task Group Report. 09–Nov–2009, 169с, – Access mode: <https://www.oecd-nea.org/nsd/docs/2009/csni-r2009-10.pdf>, free (Accessed date 08.05.2019)
28. JC «Atomenergoprom» // Project management structure AES–2006 // СИ6: 2014, 28 с. – Access mode: [http://atomenergoprom.ru/u/file/npp\\_2006\\_eng.pdf](http://atomenergoprom.ru/u/file/npp_2006_eng.pdf), free (Accessed date 08.05.2019)

29. Johnston G. The development of the new idea safety guide for design of instrumentation and control systems for nuclear power plants / G. Johnston, A. Duchag // The development of the new idea safety guide. – Vienna, March 2017. – No1 (44). –Volume 12,
30. NFPA 79: Electrical Standard for Industrial Machinery, 2018 Edition
31. GOST 12.2.007.0–75 Occupation safety standards system. Electrical equipment. General safety requirements (with Changes N 1, 2, 3, 4)
32. GOST 14254–96 (IEC 529–89) Degrees of protection provided by enclosures (IP Code)
33. NEC 70: National Electrical Code, 2020 Edition

**Loskutov Ivan Andreevich**

1. Joint Company "Research and Production Corporation" Space Monitoring Systems, Information & Control and Electromechanical Complexes "named after A.G. Iosifian" ("VNIIEМ" Corporation" JC), engineer – constructor, 107078, Moscow, Khoromny tupik, h.4, b.1
2. SBPEI "Polytechnic College named after N.N. Godovikova", teacher, Moscow, 125130, Moscow, Zoya and Alexander Kosmodemyansky street, h.19
3. MIREA – Russian Technological University, postgraduate student of Metrology and standardization Department, 78 Vernadsky Avenue, Moscow, 119454  
Tel. +7(926)152–32–42  
E–mail: faxvex@yandex.ru

А.В. СЕЛИХОВ, В.В. МИШИН, О.А. ВОРОНИНА, К.В. ПОДМАСТЕРЬЕВ,  
И.А. ЛОСКУТОВ, И.И. ХАЙРУТДИНОВ

## ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА НИВ ПРИ ДИСКРЕТНОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

**Аннотация.** Данная статья посвящена описанию принципа получения дискретного значения параметра НИВ, постановке экспериментальных исследований для проверки адекватности его использования, условиям проведения дисперсионного анализа, результатам оценки степени влияния факторов, влияющих на техническое состояние подшипника качения, на диагностический параметр.

**Ключевые слова:** подшипник, опора трения, смазочный процесс, НИВ, электрическое сопротивление, приборостроение.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подмастерьев, К.В. Прогнозирование перспектив развития методов мониторинга узлов трения машин по результатам патентных исследований [Текст] / К.В. Подмастерьев, В.В. Марков // В сборнике: Перспективы инновационного развития угольных регионов России Сборник трудов IV Международная научно-практическая конференция. Редакционная коллегия: Пудов Е.Ю. (ответственный редактор), Клаус О.А. (ответственный редактор), Бершполец С.И., Конопля А.А.. 2014. С. 329–331.
2. Мишин, В.В. Подход к комплексному диагностированию подшипникового узла с учетом качества его сборки [Текст] / В.В. Мишин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. – №6. – С. 132–139.
3. Подмастерьев, К.В. Электропараметрические методы комплексного диагностирования опор качения [Текст] / К.В. Подмастерьев. – М.: Машиностроение–1, 2001. – 376 с.
4. Пахолкин, Е.В. Приборы для трибомониторинга [Текст] / Е.В. Пахолкин, К.В. Подмастерьев // Датчики и системы, 2008. – №3. – С. 16–19.
5. Мишин, В.В. Приборная база для комплексного диагностирования подшипников [Текст] / В.В. Мишин, К.В. Подмастерьев, В.В. Марков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – №4 (288). – С. 111–120.
6. Подмастерьев, К.В. Общие подходы к комплексированию при диагностировании опор качения и частное решение для электрических и вибрационных параметров [Текст] / К.В. Подмастерьев, В.В. Мишин, В.В. Семёнов, П.П. Моисеев, О.В. Щепилина // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2008. – № 4. – С. 53–59
7. Воронина, О.А. Учебно-методический комплекс по дисциплине: Эксперимент, планирование, проведение, анализ для направления 211000 [Текст] / О.А. Воронина. – Орел: ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», 2012. – 292 с.
8. Селихов, А.В. Устройство диагностирования дефектного подшипника в двухопорном узле трения [Текст] / А. В. Селихов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2015. – №5–2 (313). – С. 285–291.
9. Чернышов, В.Н. Моделирование активного сопротивления подшипникового узла [Текст] / В.Н. Чернышов, В.В. Мишин, А.В. Пальчевский // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии — Орёл: ФГБОУ ВПО «Госуниверситет — УНПК». — 2011. — № 2/2 С. 18–24.
10. Галахов М.А. Расчет подшипниковых узлов / М.А. Галахов, А.Н. Бурмистров. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.
11. Ковалев М.П. Расчет высокоточных шарикоподшипников / М.П. Ковалев, Н.З. Народецкий – М.: Машиностроение. – 1980. – 373 с.

**Селихов Алексей Владимирович**  
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»  
магистр кафедры электроники, радиотехники и систем  
связи  
Телефон (4862) 41–98–76  
E-mail: pms35@ostu.ru

**Мишин Владислав Владимирович**  
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»  
к.т.н., доцент, зав. каф. электроники, радиотехники и  
систем связи  
Тел. (4862) 41–98–76  
E-mail: vlad89290@gmail.com

**Воронина Оксана Александровна**  
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»

**Подмастерьев Константин Валентинович**  
ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»

к.т.н., доцент кафедры электроники, радиотехники и систем связи  
Тел. (4862) 41–98–76  
E-mail: Voronina\_o\_a@mail.ru

Доктор технических наук, профессор, директор института приборостроения, автоматизации и информационных технологий  
Тел.: (4862)41–98–03  
E-mail: asms-orel@mail.ru

**Лоскутов Илья Александрович**  
Студент кафедры приборостроения, метрологии и сертификации  
Тел. (4862) 41–98–76  
E-mail: pms35@ostu.ru

**Хайрутдинов Иван Игоревич**  
Студент кафедры приборостроения, метрологии и сертификации  
Тел. (4862) 41–98–76  
E-mail: pms35@ostu.ru

---

A.V. SELIKHOV, V.V. MISHIN, O.A. VORONINA, K.V. PODMASTERYEV,  
I.A. LOSKUTOV, I.I. KHAIRUTDINOV

## **ASSESSMENT OF THE RELIABILITY OF THE DIAGNOSTIC PARAMETER OF NIV AT THE DISCRETE REPRESENTATION OF THE DIAGNOSTIC SIGNAL**

**Abstract:** *This article is devoted to the description of the principle of obtaining the discrete value of the NIV parameter, the setting up of experimental studies to check the adequacy of its use, the conditions for the analysis of variance, the results of assessing the degree of influence of factors affecting the technical condition of the rolling bearing on the diagnostic parameter.*

**Keywords:** *bearing, friction support, lubrication process, NIV, electrical resistance, instrumentation.*

### **BIBLIOGRAPHY**

1. Podmasteryev, K.V. Prediction of development prospects of methods for monitoring friction units of machines according to the results of patent research [Text] / K.V. Podmasteryev, V.V. Markov // In the collection: Prospects for the innovative development of the coal regions of Russia Proceedings IV International Scientific and Practical Conference. Editorial board: Pudov E.Yu. (executive editor), Klaus O.A. (executive editor), Bershpolets S.I., Konoplya A.A. 2014.P. 329–331.
2. Mishin, V.V. An approach to comprehensive diagnosis of a bearing assembly, taking into account the quality of its assembly [Text] / V.V. Mishin // Fundamental and applied problems of engineering and technology. – 2010. – No. 6. – S. 132–139.
3. Podmasteryev, K.V. Electroparametric methods for the comprehensive diagnosis of rolling bearings [Text] / K.V. Journeymen. – M.: Mechanical Engineering–1, 2001.— 376 p.
4. Pakholkin, E.V. Instruments for tribomonitoring [Text] / E.V. Pakholkin, K.V. Podmasteryev // Sensors and Systems, 2008. – No. 3. – S. 16–19.
5. Mishin, V.V. Instrument base for comprehensive diagnosis of bearings [Text] / V.V. Mishin, K.V. Podmasteryev, V.V. Markov // Fundamental and applied problems of engineering and technology. – 2011. – No. 4 (288). – S. 111–120.
6. The apprentices, K.V. General approaches to integration in the diagnosis of rolling bearings and a partial solution for electrical and vibration parameters [Text] / K.V. Podmasteryev, V.V. Mishin, V.V. Semenov, P.P. Moiseev, O.V. Schepilina // Fundamental and applied problems of engineering and technology. – 2008. – No. 4. – S. 53–59
7. Voronin, O.A. Educational complex on the discipline: Experiment, planning, conducting, analysis for the direction 211000 [Text] / OA Voronin. – Eagle: FSBEI HPE "State University – UNPK", 2012. – 292 p.
8. Selikhov, A.V. A device for diagnosing a defective bearing in a two-bearing friction unit [Text] / A. V. Selikhov // Fundamental and applied problems of engineering and technology. – 2015. – No. 5–2 (313). – S. 285–291.
9. Chernyshov, V.N. Modeling the active resistance of the bearing assembly [Text] / V.N. Chernyshov, V.V. Mishin, A.V. Palchevsky // Fundamental and applied problems of engineering and technology – Orel: FSBEI HPE "State University – UNPK". – 2011. – No. 2/2 S. 18–24.
10. Galakhov M.A. Calculation of bearing units / M.A. Galakhov, A.N. Burmistrov. – M.: Mechanical Engineering, 1988. – 272 p.
11. Kovalev M.P. Calculation of high-precision ball bearings / M.P. Kovalev, N.Z. Narodetskiy – M.: Mechanical Engineering. – 1980. – 373 p.

**Selikhov Aleksey Vladimirovich**  
FGBOU VO "Turgenev OSU"

**Mishin Vladislav Vladimirovich**  
FGBOU VO "Turgenev OSU"

Master of the Department of Electronics, Radio  
Engineering and Communication Systems.  
Tel. (4862) 41-98-76  
E-mail: thelonglonebox@yandex.ru

**Voronina Oksana Aleksandrovna**

FGBOU VO " Turgenev OSU"  
Cand. tech. sci., associate professor of «Electronics,  
computer technology and information security» dep.  
Tel. (4862) 41-98-76  
E-mail: Voronina\_o\_a@mail.ru

**Loskutov Ilya Alexandrovich**

Student of the Department of IMM&S dep.  
Tel (4862) 41-98-76  
E-mail: pms35@ostu.ru

Cand. tech. sci., associate professor, head of  
«Electronics, computer technology and information  
security» dep.  
Tel. (4862) 41-98-76  
E-mail: vlad89290@gmail.com

**Podmasteryev Konstantin Valentinovich**

FGBOU VO «Turgenev OSU»  
Doctor of Technical Sciences, professor, Director of  
Institute of Instrument Engineering, Automation and  
Information Technology  
Ph.: (4862)41-98-03  
E-mail: asms-orel@mail.ru

**Khayrutdinov Ivan Igorevich**

Student of the Department of IMM&S dep.  
Tel (4862) 41-98-76  
E-mail: pms35@ostu.ru

*Адрес издателя:*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»  
302026, г. Орел, 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, г. Орел, 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 28.02.2020 г.  
Дата выхода в свет  
Формат 60x88 1/8. Усл. печ. л. 10.  
Цена свободная. Тираж 600 экз.  
Заказ \_\_\_\_\_

Отпечатано с готового оригинал-макета  
на полиграфической базе ИП Синяев В.В.  
302001, г. Орел, ул. Розы Люксембург, 10а