

Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии

Учредитель – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»
(ОГУ имени И.С. Тургенева)

Редакционная

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)

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

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

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

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

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

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

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

Мирсалимов В.М. д-р физ.-мат. наук, проф.

(Азербайджан)

Мудюкин 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:

Тюхтя А.В. канд. техн. наук

Адрес редакции

302030, г. Орел, ул. Московская, 34

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

http://oreluniver.ru

E-mail: tiostu@mail.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, 2018

Содержание

Колонка главного редактора

Человек – эпоха. К 100-летию Сергея Фердинандовича Коридорфа..... 3

Механика деформируемого твердого тела, динамика и прочность

Gordon V.A., Poturaeva T.V., Semenova G.A. Matrix of the influence for rod with the cross cracks..... 6

Селиванов А.С., Севастьянов А.А., Лукьянов А.А., Бобровский Н.М. Особенности

формирования микрорельефа поверхности закаленной стали при ультразвуковой

упрочняющей обработке выглаживанием..... 13

Луккин Е.С. Определение локальной текучести металлических материалов методом

тепловизионной диагностики 21

Машиностроительные технологии и оборудование

Канатников Н.В., Гуков А.А., Канатникова П.А., Паишментова А.С. Экспериментальное

исследование влияния геометрических параметров режущей части инструмента на

максимальную температуру, возникающую в процессе обработки конических зубчатых

колес..... 29

Самойлов В.Б., Осипов Т.А. Восстановление объемной геометрической точности учебного

гравировально-фрезерного станка методами программной коррекции 37

Шатульский А.А., Голубенцев А.В. Повышение надежности и долговечности ответственных

отливок ГТУ на основе совершенствования технологии литья и термической обработки 44

Рапацкий Ю.Л., Копн В.Я., Липка В.М. Исследование и моделирование автоматизированной

линии сборки с гибкой структурой..... 51

Селеменова Е.М., Губарева Л.И., Черепенько А.А. Повышение износостойкости

сложнопрофильных рабочих поверхностей при знакопеременных нагрузках..... 64

Кирейнов А.В., Есов В.Б. Влияние полусинтетической СОЖ с металлоорганическими

присадками на износ твердосплавного инструмента при точении коррозионностойкой

стали 12X18H10T..... 70

Машиноведение и мехатроника

Поляков Р.Н., Рыженко П.И. Энергоэффективный ветрогенератор с адаптивно

изменяющимся моментом инерции..... 74

Сафронов Е.В., Носко А.Л. Выбор передаточного отношения мультипликатора

фрикционного тормозного ролика..... 81

Локтионова О.Г., Яцун С.Ф., Ворочаева Л.Ю., Мальчиков А.В. Проектирование и

исследование робота-орнитоптера с пассивно складывающимися крыльями..... 88

Фоминова О.В. Виброзащитные системы с рекуператорами механической энергии..... 96

Приборы, биотехнические системы и технологии

Потапова Е.В., Дрёмин В.В., Жеребцов Е.А., Подмастерьев К.В., Дунаев А.В. Разработка

жидкого оптического фантома для флуоресцентных спектроскопических исследований..... 105

Бондарева Л.А. Исследование теплового воздействия излучения мобильного телефона на

организм человека по изменению температуры барабанной перепонки..... 115

Незнанов А.И., Есипов В.Н. Методика определения параметров движения маятникового

элемента датчика уровня железнодорожного пути, обусловленных влиянием жидкости..... 123

Селихов А.В., Мишин В.В., Подмастерьев К.В., Тихов С.И. Разработка математической

модели системы распознавания технического состояния трибузла..... 129

Контроль, диагностика, испытания и управление качеством

Давыдова Н.В., Иванов Ю.Н., Лазарев С.Н. Метод экспресс-анализа качества смазочного

материала для автомобилей гаража особого назначения..... 136

Грядунуова Е.Н., Горин А.В., Токмакова М.А. Контроль герметичности анероидных коробок

фотометрическим методом..... 144

Марков В.В., Углова Н.В., Скопень В.Н. Актуальные проблемы контроля механических

характеристик деталей контактных пар электрических соединителей..... 149

Жильцов М.П., Жидков А.В., Воронина О.А. Исследование контактного взаимодействия

поверхностей шар-плоскость, разделенных слоем смазочного материала..... 155

Варгашкин В.Я. Механизм формирования туннельной составляющей электрического тока

через смазочную пленку при диагностировании опор качения с жидкостной и

полужидкостной смазкой..... 162

Семина Е.В. К вопросу о повышении эффективности управления функционированием

единой системы газоснабжения..... 173

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)

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

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

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

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

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

Executive secretary:

Tyukhta A.V. Candidate Sc. Tech.

Address

302030 Orel, Moskovskaya ul., 34
+7(920)2806645, +7(906)6639898
http://oreluniver.ru
E-mail: tiostu@mail.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, 2018

Contents

Editors Note

Man - the era. To the 100th anniversary of Sergei Ferdinandovich Korndorf.....	3
--	---

Mechanics of deformable solids, dynamics and strength

Гордон В.А., Потураева Т.В., Семенова Г.А. Матрица влияния для стержня с поперечными трещинами.....	6
Selivanov A.S., Sevastyanov A.A., Lukyanov A.A., Bobrovskij N.M. Features of surface microrelief formation of hardened steel with ultrasonic strengthening burnishing.....	13
Lukin E.S. Determination of local fluidity of metal materials by thermovision method.....	21

Machine-building technologies and equipment

Kanatnikov N.V., Gukov A.A., Kanatnikova P.A., Pashmentova A.S. Experimental investigation of the influence of geometric parameters of the cutting part of the tool on the maximum temperature that arises in the process of processing of the bevel gear wheels.....	29
Samoylov V.B., Osipov T.A. Renovation of volume geometric accuracy of educational graving-milling machine by methods of software correction.....	37
Shatul'sky A.A., Golubentsev A.V. Improving the reliability and durability of responsible castings of the GAS turbine by advancement of casting technology and heat treatment.....	44
Rapatskiy Yu.L., Kopp V.Ya., Lypka V.M. Research and simulation of automated assembling line with flexible structure.....	51
Seleemeneva E.M., Gubareva L.I., Cherepenko A.A. Increase of wear-resistance of working surfaces of ironing pillows with significant loads.....	64
Kireinov A.V., Esov V.B. The influence of semi-synthetic cutting fluid with organometallic additives on tool wear in turning of stainless steel 12H18N10T.....	70

Machine Science and Mechatronics

Polyakov R.N., Ryzhenko P.I. Energy efficient wind turbine with adaptly variables inertia.....	74
Safronov E.V., Nosko A.L. Selection of the gear ratio of the multiplicator of friction brake roller.....	81
Loktionova O.G., Jatsun S.F., Vorochaeva L.Yu., Malchikov A.V. Design and research of the robot-ornitopter with passive folding wings.....	88
Fominova O.V. Vibrprotective systems with recruiters mechanical energy.....	96

Devices, biotechnical systems and technologies

Potapova E.V., Dremine V.V., Zherebtsov E.A., Podmasteryev K.V., Dunaev A.V. Liquid optical phantom for fluorescence spectroscopy.....	105
Bondareva L.A. Study of temperature effects of mobile phone radiation on the human body on change the temperature at the eardrum.....	115
Neznanov A.I., Esipov V.N. Method of determining the parameters of movement pendulum element of the sensor of the railway-level sensor defined by the influence of the liquid.....	123
Selikhov A.V., Mishin V.V., Podmasteryev K.V., Tikhov S.I. Development of the mathematical model of the recognition system of the technical condition of the tribo joint.....	129

Monitoring, Diagnostics, Testing and Quality Management

Davydova N.V., Ivanov Yu.N., Lazarev S.N. Method of express analysis of the quality of the lubricant for vehicles of garage of special function.....	136
Griadyanova T.N., Gorin A.V., Tokmakova M.A. Tightness control aneroid boxes by photometric method.....	144
Markov V.V., Uglova N.V., Skovpen V.N. Actual problems control the mechanical characteristics of parts contact pairs electrical connectors.....	149
Zhiltsov M.P., Zhidkov A.V., Voronina O.A. Research of contact interaction the surfaces a sphere-flat surfaces separated by layer of lubricant.....	155
Vargashkin V.Ya. The mechanism of formation of the tunnel component of electric current through the lubricant film at diagnosing of ball-bearing with liquid and semi-liquid lubricant.....	162
Semina E.V. To the issue of improving the efficiency of management of the national gas supply system functioning.....	173

ЧЕЛОВЕК – ЭПОХА



*О милых спутниках, которые наш свет
Своим сопутствием для нас животворили,
Не говори с тоской: их нет;
Но с благодарностью: были.*

В.А. Жуковский

23 октября 2018 года исполняется 100 лет со дня рождения выдающегося ученого, наставника и педагога **Сергея Фердинандовича Корндорфа** – доктора технических наук, профессора, Заслуженного работника высшего образования Российской Федерации. Он прожил длинную и достойную жизнь, оставив после себя глубокий след в науке и в судьбе тысяч людей, став для многих своих учеников примером беззаветной службы науке, глубокой порядочности и потрясающей эрудиции. Он ушел из жизни в январе 2012 года в возрасте 93 лет, до последнего времени оставаясь действующим профессором кафедры приборостроения, метрологии и сертификации Орловского государственного университета им. И.С. Тургенева.

Родился Сергей Фердинандович в г. Костроме в семье банковского служащего Фердинанда Федоровича Корндорфа, его дед Дионисий Антонович Поржезинский, был одним из ведущих учёных Императорского технического училища (ныне МГТУ им. Н.Э. Баумана).

В 1934-1938 годах – он студент Московского радиотехникума, где впервые начал заниматься исследовательской деятельностью, а закончив техникум, стал работать в ЦНИИ связи в антенной лаборатории. Самостоятельные исследования С.Ф. Корндорф начал вести с 1949 г., являясь научным сотрудником кафедры "Электротехника" Московского станкоинструментального института "СТАНКИН". В 1954 г. он защитил кандидатскую, а в 1965 г. – докторскую диссертацию на тему «Фотоэлектрические методы контроля в машиностроении».



С 1960 г. Сергей Фердинандович заведует кафедрой "Электроника и автоматическое регулирование" Московского станкоинструментального института, одновременно читает лекции в Московском Высшем техническом училище им. Н.Э. Баумана. В 1972 г. Министерством высшего и среднего специального образования откомандирован в Красноярский политехнический институт для организации кафедры "Информационно-измерительная техника". В период с 1972 по 1979 годы он являлся членом Головного совета по метрологии и стандартизации Минвуза РСФСР.

На протяжении более чем 30 лет работы в г. Москве и Красноярске С.Ф. Корндорф вел целенаправленную работу по созданию научной школы в области фотоэлектрического приборостроения и разработки приборов, основанных на использовании флуктуационных

процессов. Под его руководством было подготовлено более 50 кандидатов наук, 5 человек из которых в дальнейшем защитили докторские диссертации. Под его руководством велись научно-исследовательские работы для ряда предприятий: ЭНИМСа, станкостроительного завода им. Серго Орджоникидзе, завода "Калибр", Первого часового завода, НИИ медицинского приборостроения и инструмента. Начатая под его руководством разработка оптических ультразвуковых шкал в Московском станкоинструментальном институте и ЭНИМСе привела к созданию ряда образцов шкал, и успешно продолжилась под руководством его ученика, профессора, д.т.н. В.И. Телешевского. Разработкой фотоэлектрических методов контроля в текстильной промышленности занимался еще один ученик С.Ф. Корндорфа – профессор, д.т.н., М.М. Мухитдинов, который затем возглавлял Ферганский политехнический институт.



Следующим периодом в жизни С.Ф. Корндорфа был приход в 1979 г. на пост заведующего кафедрой приборов точной механики Орловского филиала Всесоюзного заочного машиностроительного института (ныне – Орловский государственный университет). Указанный период характеризуется изменением профиля подготовки специалистов вузов. Бурное развитие электроники в области приборостроения привело к тому, что наиболее востребованными стали инженеры, сочетающие глубокие знания в области точной механики со знаниями в области электроники и вычислительной

техники. С учетом указанных тенденций было принято решение о подготовке в Орле инженеров-электромехаников по специальности приборостроение и переименовании кафедры в кафедру приборостроения, метрологии и сертификации, где Сергей Фердинандович работал до последнего момента.

За более чем 30 лет работы в Орле Сергей Фердинандович основал новую научную школу по разработке электрофлуктуационных методов и средств технического диагностирования, контроля и прогнозирования состояния веществ, материалов и изделий,



технических и биологических объектов. Первым выпускником данной школы был Подмастерьев Константин Валентинович (1986 год), который затем защитил докторскую диссертацию (2002 г.) и в настоящее время возглавляет кафедру. После открытия в университете аспирантуры по специальности 05.11.13 "Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий"

научная школа получила бурное развитие, практически ежегодно проходили защиты кандидатских диссертаций аспирантов, при этом решалась задача повышения научной квалификации не только преподавателей родной для Сергея Фердинандовича кафедры, но и других кафедр университета, предприятий региона. В Орле под его руководством было подготовлено более 15 кандидатов наук.

Вот так 93 года жизни можно вложить в страничку текста. И не видна за этими строками безудержная энергия Сергея Фердинандовича, бьющая из него неиссякаемым фонтаном, не виден круг интересов, поражающий своей широтой, не чувствуется глубина тех знаний, которыми он обладал и постоянно делился. И не расскажет никакая биография о том, что человек в 93 года постоянно учился, и что профессор Корндорф каждый свой отпуск на несколько недель ездил в Российскую Государственную библиотеку, чтобы ознакомиться с передовыми достижениями в разных отраслях науки и техники (тогда не было интернета).

Посвятить всю свою жизнь науке сможет далеко не каждый, но именно такой путь стал призванием Сергея Фердинандовича, по книгам которого учились многие классики в области приборостроения и неразрушающего контроля, начиная уже с 50-60 годов прошлого века.

Его интерес к окружающему миру поистине был неисчерпаем, а круг научных интересов затрагивал очень разные области и направления и постоянно расширялся. Он интересовался всем, будь то проблема оценки состояния смазочной пленки в подшипниках качения или способ измерения фазового сдвига световых волн, испытание экзокарпии ягод на растяжение или ультразвуковой способ контроля перемещений. Сергей Фердинандович Корндорф является автором 17 монографий, справочников и учебников, изданных как в нашей стране, так и за рубежом, более 150 статей и свыше 50 изобретений.

Сергей Фердинандович являлся одним из последних представителей старой научной школы. Он был истинным ученым – дерзким мечтателем и одновременно экспертом, высокопрофессиональным и необыкновенно деятельным, эрудитом и фантазером.

Он был думающим человеком, философом, мыслителем, и, общаясь с людьми, он ценил тех, кто думает, он учил думать, он не разрешал принимать на веру ни один из фактов. Это был мудрец, способный не только увидеть сущность проблемы, но и предложить несколько вариантов ее решения. Причем относилось это как к научно-техническим, так и к житейским, бытовым ситуациям. Его душевный мир никогда не был замкнут, он оставался мудрым и спокойным собеседником и откликался на все насущные проблемы времени.

Сергей Фердинандович с щедростью тратил на вас своё время, он безусловный авторитет, корифей, занятый и много работающий человек, в мире, где четко установлены временные и иные рамки, а он с необыкновенной щедростью и радостью уделял вам время, не оставляя никого без внимания.

У этого замечательного ученого и удивительного человека была необыкновенная черта становится для своих учеников не только научным руководителем, но и советчиком, наставником, учителем. Нет даже не так. Учителем! Обязательно с большой буквы.

Ученики С.Ф. Корндорфа

P.S. Характерно, что сформированная С.Ф. Корндорфом в Орловском государственном университете научная школа интенсивно развивается и сегодня. Расширяются и углубляются традиционные научные направления, появляются новые перспективные направления исследований. Многие из его учеников уже выступают в качестве успешных научных руководителей аспирантов и докторантов, практически ежегодно защищаются диссертации на соискание ученых степеней. В данном номере журнала две рубрики: «Приборы, биотехнические системы и технологии» и «Контроль, диагностика, испытания и управление качеством» наполнены статьями представителей развивающейся научной школы Сергея Фердинандовича Корндорфа.

МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА, ДИНАМИКА И ПРОЧНОСТЬ

УДК 624.072.2.011.1

V.A. GORDON, T.V. POTURAEVA, G.A. SEMENOVA

MATRIX OF THE INFLUENCE FOR ROD WITH THE CROSS CRACKS

Abstract. In work the option of use of a method of initial parameters in a problem of a bend of a rod with cross cracks is presented. At the same time the rod is modelled by a compound design from several sites which borders are cracks. The matrix of influence of initial parameters on a condition of the arbitrary sections of each site is constructed.

Keywords: matrix of influence, rod, crack, dynamic characteristic of rod; state vector.

Introduction

Problems of dynamics of rod with cracks are relevant still, is devoted to them works a set, in particular [1–8].

Let us examine the straight rod with a length of L of the rectangular cross section H , in reference to the Cartesian system of coordinates $Oxyz$, where $A=B \times H$ of whose beginning is located in the center of gravity of left end (figure 1). We consider the material of rod ideally elastic with Youngs and shift modulus E , G ; the linear mass of the rod ρ . Assume that the rod is weakened by n cross cracks with depth h_i (or b_i , depending on the orientation of crack with respect to the coordinate system). Cracks are arranged in the cross sections with the longitudinal coordinates L_i , $i=1 \dots n$.

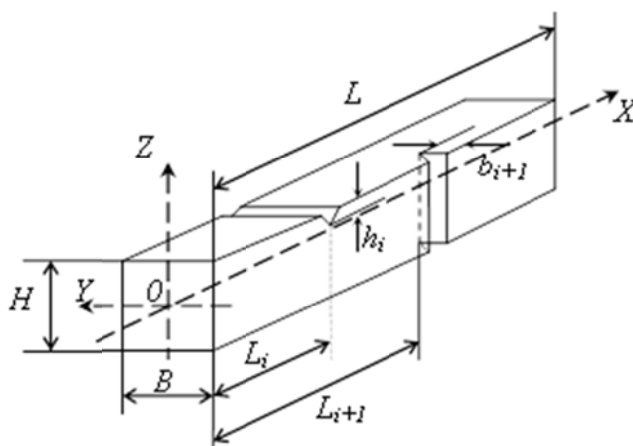


Figure 1 – Sketch of beam with the cracks

The influence of cracks on the dynamic characteristics of rod is proposed to consider by the idea of the cross sections, at which lies each of the cracks, by the lumped mass-free yielding elements (springs of tension and twisting) (figure 2). These elements connect the intact sections of rod, which are the beams of Euler–Bernoulli [9].

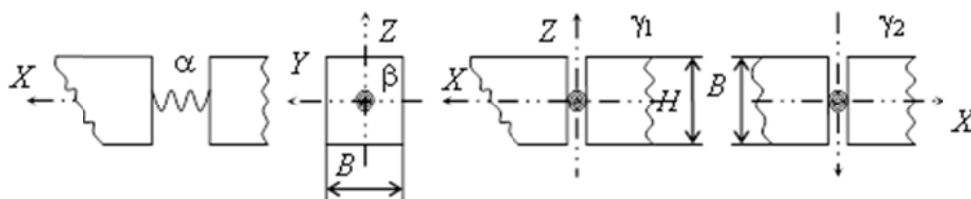


Figure 2 – The models of sections with the cracks

Methodology

Following [10], the spring constant of twisting γ_1 and γ_2 we express as the geometry of cross section, the depth of crack and property of the material

$$\gamma_i = \frac{EI_i}{6\pi(1-\nu^2)H_i J(\zeta_i)}; \quad i=1,2; \quad \zeta_1 = \frac{h_i}{H}; \quad \zeta_2 = \frac{b_i}{B};$$

$$J(\zeta) = 0.6272\zeta^2 - 1.045\zeta^3 + 4.5948\zeta^4 - 9.9736\zeta^5 + 20.2948\zeta^6 - 33.0251\zeta^7 + 47.1063\zeta^8 - 40.7556\zeta^9 + 19.6\zeta^{10},$$

where ζ – relative depth of crack.

We assume hardness for the springs of the tension α_i and twisting with the relative twisting of the intact parts β_i in the form

$$\alpha_i = \frac{EA_{T_i}}{H_i}, \quad \beta_i = \frac{GJ_{pT_i}}{H_i},$$

where A_{T_i} , J_{pT_i} – effective area and the polar moment of inertia are i -th of section taking into account crack.

Thus, rod is $n+1$ segments $\Omega_i = [C_{i-1}, C_i]$, $C_0 = 0$, $C_{n+1} = L$. Then local coordinates

$$\xi_i = x - \sum_{k=1}^{i-1} L_k$$

are introduced for each segment (figure 3). This technology of simulation gives satisfactory results as long as cracks during the oscillations remain open. Opening and closing («the respiration» of crack) introduces weak nonlinearity into the motion of rod and thus far it is not examined. Small oscillations of a rod with the cracks further are examined.

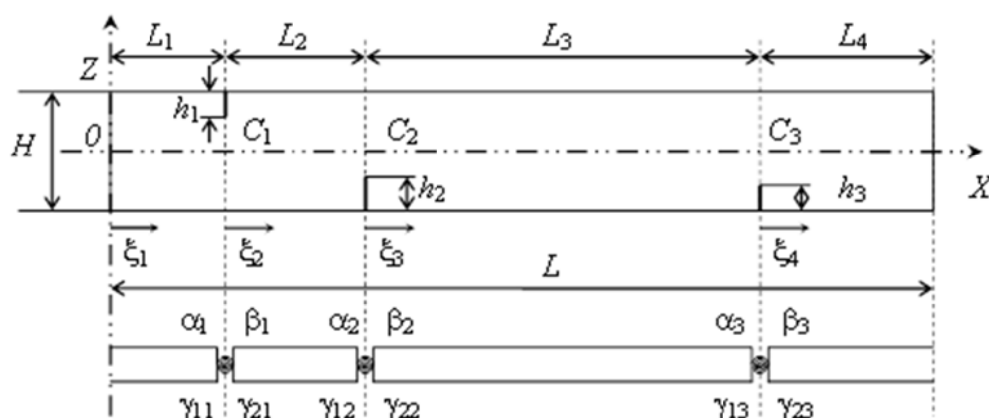


Figure 3 – The design diagram of beam with the cracks

Lets consider a bend in the i -segment plane Oxz . The equation of the free flexural oscillations in the plane Oxz are described by the equation

$$E I_y w_i^{IV}(\xi_i, t) + \rho A \ddot{w}_i(\xi_i, t) = 0. \quad (1)$$

Conditions of interface of two neighbouring segments (i and $i+1$) have an appearance

$$\begin{aligned} w_i(l_i, t) &= w_{i+1}(0, t) \\ w_i''(l_i, t) &= w_{i+1}''(0, t) \\ w_i'''(l_i, t) &= w_{i+1}'''(0, t) \end{aligned} \quad (2)$$

$$w_i''(l_i, t) = \frac{\gamma_{li}}{E I_y} [w_i'(l_i, t) - w_{i+1}'(0, t)].$$

After a separation of variables representation

$$w_i = W_i(\xi_i) e^{i\omega t}$$

we will receive the equation of forms of oscillations

$$W_i^{IV} - k^4 W_i = 0, \quad (3)$$

where ω – frequency of vibration,

$$k = \sqrt{\frac{\omega}{c_B R_1}}, \quad c_B = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad R_1 = \sqrt{\frac{I_y}{A}}.$$

Forms of oscillations their derivative have an appearance

$$\begin{aligned} W_i &= A_{i1} \cos k\xi_i + A_{i2} \sin k\xi_i + A_{i3} \operatorname{ch} k\xi_i + A_{i4} \operatorname{sh} k\xi_i \\ W_i' &= \theta_y = k(-A_{i1} \sin k\xi_i + A_{i2} \cos k\xi_i + A_{i3} \operatorname{sh} k\xi_i + A_{i4} \operatorname{ch} k\xi_i) \\ W_i'' &= \frac{M_y}{EI_y} = k^2(-A_{i1} \cos k\xi_i - A_{i2} \sin k\xi_i + A_{i3} \operatorname{ch} k\xi_i + A_{i4} \operatorname{sh} k\xi_i) \\ W_i''' &= \frac{Q_z}{EI_y} = k^3(A_{i1} \sin k\xi_i - A_{i2} \cos k\xi_i + A_{i3} \operatorname{sh} k\xi_i + A_{i4} \operatorname{ch} k\xi_i). \end{aligned}$$

The state vector in the arbitrariness section of i -segment $\bar{Z}_i = (W_i \ W_i' \ W_i'' \ W_i''')$ is bound to a vector of initial parameters of this segment $\bar{Z}_{i,0} = (W_{i,0} \ W_{i,0}' \ W_{i,0}'' \ W_{i,0}''')$ the equation

$$\bar{Z}_i(\xi_i) = V_i(\xi_i) \bar{Z}_{i,0},$$

where $V_i(\xi_i) = W_i(\xi_i) B_1^{-1}$,

$$\begin{aligned} B_1 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & k & 0 & k \\ -k^2 & 0 & k^2 & 0 \\ 0 & -k^3 & 0 & k^3 \end{pmatrix}, \\ W_i &= \begin{pmatrix} \cos k\xi_i & \sin k\xi_i & \operatorname{ch} k\xi_i & \operatorname{sh} k\xi_i \\ -k \sin k\xi_i & k \cos k\xi_i & k \operatorname{sh} k\xi_i & k \operatorname{ch} k\xi_i \\ -k^2 \cos k\xi_i & -k^2 \sin k\xi_i & k^2 \operatorname{ch} k\xi_i & k^2 \operatorname{sh} k\xi_i \\ k^3 \sin k\xi_i & -k^3 \cos k\xi_i & k^3 \operatorname{sh} k\xi_i & k^3 \operatorname{ch} k\xi_i \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Then the matrix $V_i(\xi_i)$ takes a form

$$V_i(\xi_i) = \begin{pmatrix} K_4(k\xi_i) & K_3(k\xi_i) & K_2(k\xi_i) & K_1(k\xi_i) \\ k^4 K_1(k\xi_i) & K_4(k\xi_i) & K_3(k\xi_i) & K_2(k\xi_i) \\ k^4 K_2(k\xi_i) & k^4 K_1(k\xi_i) & K_4(k\xi_i) & K_3(k\xi_i) \\ k^4 K_3(k\xi_i) & k^4 K_2(k\xi_i) & k^4 K_1(k\xi_i) & K_4(k\xi_i) \end{pmatrix},$$

where $K_i(k\xi_i)$ ($i = \overline{1,4}$) – Krylovs functions,

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{\operatorname{sh} k\xi_i - \sin k\xi_i}{2k^3}, & K_2 &= \frac{\operatorname{ch} k\xi_i - \cos k\xi_i}{2k^2}, \\ K_3 &= \frac{\operatorname{sh} k\xi_i + \sin k\xi_i}{2k}, & K_4 &= \frac{\operatorname{ch} k\xi_i + \cos k\xi_i}{2}. \end{aligned}$$

Вектор состояния конца i -го сегмента State vector of the end of i -segment

$$\bar{Z}_i(l_i) = V_i(\eta_i) \bar{Z}_{i,0},$$

where $\eta_i = kl_i$,

$V_i(\eta_i)$ –matrix of influence of the initial hub of i -segment on trailer knot of the same segment.

Conditions of interface (2) in a matrix form take a form

$$T_i \bar{Z}_{i,0} = T_{i+1} \bar{Z}_{i+1,0},$$

where

$$T_i = \begin{pmatrix} K_4(\eta_i) & K_3(\eta_i) & K_2(\eta_i) & K_1(\eta_i) \\ k^4 K_2(\eta_i) & k^4 K_1(\eta_i) & K_4(\eta_i) & K_3(\eta_i) \\ k^4 K_3(\eta_i) & k^4 K_2(\eta_i) & k^4 K_1(\eta_i) & K_4(\eta_i) \\ K_{21}(\eta_i) & K_{34}(\eta_i) & K_{43}(\eta_i) & K_{32}(\eta_i) \end{pmatrix},$$

$$K_{21} = k^4 K_2(\eta_i) - \frac{\gamma_{li}}{E I_y} K_1(\eta_i), \quad K_{34} = k^4 K_3(\eta_i) - \frac{\gamma_{li}}{E I_y} K_4(\eta_i),$$

$$K_{43} = K_4(\eta_i) - \frac{\gamma_{li}}{E I_y} K_3(\eta_i), \quad K_{32} = K_3(\eta_i) - \frac{\gamma_{li}}{E I_y} K_2(\eta_i),$$

$$T_{i+1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{\gamma_{li}}{E I_y} & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad T_{i+1}^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{E I_y}{\gamma_{li}} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Now the dependence between constants of the neighbouring segments takes a form

$$\bar{Z}_{i+1,0} = T_{i+1,i} \bar{Z}_{i,0},$$

where $T_{i+1,i} = T_{i+1}^{-1} \cdot T_i$.

Then the state vector at the end of $n+1$ -segment, that is at the end of all rod $x=l$, is expressed by a ratio

$$\bar{Z}_{n+1}(l_{n+1}) = R_y \bar{Z}_{1,0},$$

where $R_y = V_i(\eta_{n+1}) T_{n+1,n} \cdot T_{n,n-1} \cdots T_{2,1}$.

Similarly we receive ratios for other types of an intense strained state: a bend in the planes Oxy , stretching compression along an axis x , torsion concerning an axis x .

Let us use for describing the state of the section of rod the method of the initial parameters. Let us introduce state vector

$$\mathbf{Y}(x) = \{u \ v \ w \ \theta_x \ \theta_z \ \theta_y \ M_x \ M_z \ M_y \ N \ Q_y \ Q_z\}(x),$$

where u, v, w – the component of the vector of displacement of the point, which belongs to the axis of rod in the adopted system of the coordinates;

θ_x – angle of torsion;

$\theta_y = \frac{\partial w}{\partial x}$ – the angle of rotation of cross section relative to the axis y ;

$\theta_z = \frac{\partial v}{\partial x}$ – the angle of rotation of cross section relative to the axis z ;

M_x – the torque;

M_z and M_y the bending moments, (force pairs, which form them, they lie in the planes of xy and xz respectively);

N – the longitudinal force;

Q_y and Q_z – the transverse forces.

Equations of state of straight rod with the free harmonic oscillations

$$\left. \begin{aligned} \frac{dN}{dx} &= -\rho \cdot A \cdot \omega^2 \cdot u; & \frac{dQ_y}{dx} &= -\rho \cdot A \cdot \omega^2 \cdot v; & \frac{dQ_z}{dx} &= -\rho \cdot A \cdot \omega^2 \cdot w \\ \frac{dM_x}{dx} &= -J_p \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot \theta_x; & \frac{dM_z}{dx} &= Q_y; & \frac{dM_y}{dx} &= Q_z \\ \frac{du}{dx} &= \frac{N}{E \cdot A}; & \frac{dv}{dx} &= \theta_z; & \frac{dw}{dx} &= \theta_y \\ \frac{d\theta_x}{dx} &= \frac{M_x}{G \cdot J_p}; & \frac{d\theta_z}{dx} &= -\frac{M_z}{E \cdot I_z}; & \frac{d\theta_y}{dx} &= -\frac{M_y}{E \cdot I_y} \end{aligned} \right\}$$

it is possible to write down in the matrix form

$$\mathbf{Y}'(x) = (\mathbf{A} - \omega^2 \mathbf{M}) \cdot \mathbf{Y}(x), \quad (4)$$

where matrices $\mathbf{A}$ and $\mathbf{M}$ by the size of 12×12 are represented as follows:

$$\begin{aligned} A_{1,10} &= \frac{1}{E A}; & A_{2,5} &= A_{3,6} = 1; & A_{4,7} &= \frac{1}{G J_p}; \\ A_{5,8} &= -\frac{1}{E I_z}; & A_{6,9} &= -\frac{1}{E I_y}; & A_{8,11} &= A_{9,12} = 1; \\ M_{9,4} &= -\rho J_p \omega^2; & M_{10,1} &= M_{11,2} = M_{12,3} = -\rho A \omega^2. \end{aligned}$$

The remaining components of matrices $\mathbf{A}$ and $\mathbf{M}$ are equal to zero. The solution (4) is possible to shape in the form of Cauchy:

$$\mathbf{Y}(x) = \mathbf{V}(x) \cdot \mathbf{Y}_0, \quad \mathbf{V}(0) = \mathbf{I}_{12},$$

where $\mathbf{V}(x)$ – the standardized matrix of the fundamental solutions (4) (matrix of influence);

$\mathbf{I}_{12}$ – the unit matrix 12×12 ;

$\mathbf{Y}_0$ – the value of state vector in the beginning of rod (with $x = 0$).

Let us write down the conditions of joining the sections from the following considerations. Let the crack have depth h_i or b_i (figure 1). Then the cross section, weakened by crack, has a center of gravity, displaced to the value

$$\begin{aligned} y_{C_i} &= \frac{S_{yi}}{BH} = \frac{B(H-h_i)(H-h_i)}{2BH} = \frac{(H-h_i)^2}{2H} = \frac{H}{2} - h_i(1+\zeta_1); \\ z_{C_i} &= \frac{S_{zi}}{BH} = \frac{H(B-b_i)(B-b_i)}{2BH} = \frac{(B-b_i)^2}{2B} = \frac{B}{2} - b_i(1+\zeta_2). \end{aligned}$$

Examining the sections of more left than the section with the crack in the infinitesimal quantity and the section with the crack, it is not difficult to ascertain that the longitudinal force in the left section gives the additional bending moment:

$$\Delta M_z = N(L_i) y_{C_i}; \quad \Delta M_y = N(L_i) z_{C_i},$$

and transverse forces – additional torque:

$$\Delta M_x = Q_y z_{C_i} + Q_z y_{C_i},$$

which should be considered with the composition of the conditions of the compatibility of two adjacent sections.

It is utilized as the same:

the connection between the longitudinal motion:

$$u^+(L_i) = u^-(L_i) - \frac{N(L_i)}{L_i};$$

the equality of lateral motions v, w :

$$v^+ = v^-; \quad w^+ = w^-; \quad \theta_x^+ = \theta_x^-;$$

the connection between the angle of rotations of the section θ_x, θ_z and θ_y :

$$\begin{aligned} \theta_x^+ &= \theta_x^- + \frac{M_x^- + \Delta M_x}{\beta_i} \\ \theta_z^+ &= \theta_z^- + \frac{(M_z^- + \Delta M_z)}{\gamma_1} = \theta_z^- + \frac{(M_z^- + N^- y_{C_i})}{\gamma_1}; \\ \theta_y^+ &= \theta_y^- + \frac{(M_y^- + \Delta M_y)}{\gamma_2} = \theta_y^- + \frac{(M_y^- + N^- z_{C_i})}{\gamma_2}; \end{aligned}$$

the equality of the internal power factors:

$$N^+ = N^-; \quad Q_y^+ = Q_y^-; \quad Q_z^+ = Q_z^-; \quad M_x^+ = M_x^-; \quad M_z^+ = M_z^-; \quad M_y^+ = M_y^-.$$

These relationships can be written down in the matrix form:

$$\mathbf{Y}^+ = \mathbf{T}_i \cdot \mathbf{Y}^-, \quad (5)$$

where

$$T_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\alpha_i} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -\frac{1}{\beta_i} & 0 & 0 & 0 & -\frac{z_{C_i}}{\beta_i} & -\frac{y_{C_i}}{\beta_i} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -\frac{1}{\gamma_1} & 0 & -\frac{y_{C_i}}{\gamma_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -\frac{1}{\gamma_2} & -\frac{z_{C_i}}{\gamma_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Matrix (5) considers two cracks in one section – in the longitudinal and transverse directions. With the presence of one crack the coefficient $1/\gamma_1$ or $1/\gamma_2$ assumed equal to zero. For the rod without the cracks matrix $\mathbf{T}$ – single.

Now the connection between the initial parameters and the state at the end of rod can to be represented in the form:

$$\mathbf{Y}(L) = \left(\prod_{k=1}^N T_i V_i(L_i) \right) \cdot \mathbf{Y}_0 = \mathbf{V}^{Nmm} \cdot \mathbf{Y}_0. \quad (6)$$

Conclusion

Expression (6) takes exactly this form as for the rod without the cracks and can be used for the composition of the stiffness matrix of pivotal super–element.

BIBLIOGRAPHY

1. Shifrin, E.I. Natural frequencies of a beam with an arbitrary number of cracks/ Journal of sound and vibration 222(3) 1999: 409–423
2. Hai–Ping Lin, Wu J.D. Beam vibrations with arbitrary number of cracks / Journal of sound and vibration 258(5) 2002: 987–999
3. Fernandez–Saez J., Navarro C. Fundamental frequency of cracked beams: an analytical approach / Journal of sound and vibration 256(2) 2002: 17–31
4. Han–Ik Yoon, In–Soo Son, Sung–Jin Ahn. Vibration analysis of Euler–Bernoulli beam with double cracks / Journal of Mech.Science and Technology 21 2007: 476–485
5. Behrad M., Ebrahimi, Meghdari A. A continuous vibration theory for beams with a vertical edge cracks / Mechanical Engineering Vol.17 2010: 194–204
6. Khatir A., Tehami M., Khatir S. Damage detection and localization in composite beam structures based on vibration analysis / Mechanica 21(6) 2015: 472–479
7. Jagdale P.M., Chakrabarti D.M.A. Free vibration analysis of cracked beam / Intern.J.of Engineering Research and Applications. Vol.3. Issue 6. 2013: 1172–1176
8. Capozucca R., Magagnini E. Analysis of cracked RC beam under vibration / IOP Conf.Series: Journal of Physics: Conf.Series. 842 2017: 012076
9. Tolokonnikov, L.A. The mechanics solid of body being deformed. – M.: Higher school, 1979. – 307 p.
10. Bamnias, Y. Identification of cracks in single and double cracked beams using mechanical impedance / Y. Bamnias, E. Douka, A. Trochidis // Proc. X Intern. Congress on sound and vibration, 2003. – Stockholm, Sweden. – P. 1267–1274.

Turgenev, Orel, Russia
Doctor of Engineering Sciences,
Professor of the higher mathematics
department
302026, Orel, st. Komsomolskaya, 95
E-mail: gordon@ostu.ru

Turgenev, Orel, Russia
PhD Doctor of Engineering Sciences,
Associate Professor of the higher
mathematics department
302026, Orel, st. Komsomolskaya, 95
E-mail: tanpo77@mail.ru

Turgenev, Orel, Russia
PhD Doctor of Engineering Sciences,
Associate Professor of the higher
mathematics department
302026, Orel, st. Komsomolskaya, 95
E-mail: greece-g2011@yandex.ru

В.А. ГОРДОН, Т.В. ПОТУРАЕВА, Г.А. СЕМЕНОВА

МАТРИЦА ВЛИЯНИЯ ДЛЯ СТЕРЖНЯ С ПОПЕРЕЧНЫМИ ТРЕЩИНАМИ

Аннотация. В работе представлен вариант использования метода начальных параметров в задаче изгиба стержня с поперечными трещинами. При этом стержень моделируется составной конструкцией из нескольких участков, границами которых являются трещины. Построена матрица влияния начальных параметров на состояние произвольных сечений каждого участка.

Ключевые слова: матрица влияния, стержень, трещины, динамические характеристики стержня, вектор состояния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shifrin, E.I. Natural frequencies of a beam with an arbitrary number of cracks / Journal of sound and vibration 222(3) 1999: 409–423
2. Hai-Ping, Lin Beam vibrations with arbitrary number of cracks / Journal of sound and vibration 258(5) 2002: 987–999
3. Fernandez-Saez J. Fundamental frequency of cracked beams: an analytical approach / Journal of sound and vibration 256(2) 2002: 17–31
4. Han-Ik, Yoon Vibration analysis of Euler-Bernoulli beam with double cracks / Journal of Mech. Science and Technology 21 2007: 476–485
5. Behrad, M., A continuous vibration theory for beams with a vertical edge cracks / Mechanical Engineering Vol.17 2010: 194–204
6. Khatir, A. Damage detection and localization in composite beam structures based on vibration analysis / Mechanics 21(6) 2015: 472–479
7. Jagdale, P.M. Free vibration analysis of cracked beam / Intern. J. of Engineering Research and Applications. Vol.3. Issue 6. 2013: 1172–1176
8. Capozucca, R. Analysis of cracked RC beam under vibration / IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 842 2017: 012076
9. Толоконников, Л.А. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Высшая школа, 1979. – 307 с.
10. Bannios, Y. Identification of cracks in single and double cracked beams using mechanical impedance / Y. Bannios, E. Douka, A. Trochidis // Proc. X Intern. Congress on sound and vibration, 2003. – Stockholm, Sweden. – P. 1267–1274.

Гордон Владимир Александрович
Орловский государственный
университет им. И.С. Тургенева
Доктор технических наук,
профессор кафедры высшей
математики
302026, Орел, ул. Комсомольская,
95
E-mail: gordon@ostu.ru

Потураева Татьяна Вячеславовна
Орловский государственный
университет им. И.С. Тургенева
Кандидат технических наук, доцент
кафедры высшей математики
302026, Орел, ул. Комсомольская,
95
E-mail: tanpo77@mail.ru

Семенова Галина Александровна
Орловский государственный
университет им. И.С. Тургенева
Кандидат технических наук,
доцент кафедры высшей
математики
302026, Орел, ул. Комсомольская,
95
E-mail: greece-g2011@yandex.ru

А.С. СЕЛИВАНОВ, А.А. СЕВАСТЬЯНОВ, А.А. ЛУКЬЯНОВ, Н.М. БОБРОВСКИЙ

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ ЗАКАЛЕННОЙ СТАЛИ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКЕ ВЫГЛАЖИВАНИЕМ

Аннотация. В статье представлены результаты сравнительного экспериментального исследования топографии поверхности детали из закаленной стали при отделочно-упрочняющей обработки выглаживанием инструментом с наложением механических колебаний ультразвуковой частоты и без наложения. Эксперименты проведены на станке с ЧПУ модели 16B16T1C1, ультразвуковой генератор УЗГ–0,4/22 мощностью 0,4 кВт и частотой колебаний 22 кГц. Материал заготовок – сталь ХВГ (HRC 60...63), конструкция – кольца наружным диаметром $\varnothing 56 \pm 0,2$ мм. и высотой $20 \pm 0,5$ мм. Режимы обработки: давление в гидросистеме приспособления – 0,1...0,3 МПа; величина подачи инструмента $s=0,1$ мм/об; частота вращения $n=400$ об/мин. При ультразвуковом выглаживании амплитуда колебаний инструмента составляла 9 мкм, частота 22 кГц. Топография обработанных поверхностей исследовалась на оптическом микроскопе Axiovert 40MAT и лазерном сканирующем микроскопе LEXT, измерение шероховатости и профилографирование поверхностей выполняли на приборе Mitutoyo Surftest SJ-210. Получено, что после обработки выглаживанием с наложением УЗК имеется упорядоченная пластически деформированная структура.

Ключевые слова: шероховатость, микрорельеф, поверхность, ультразвуковое выглаживание.

Введение.

Эксплуатационные характеристики изделий машиностроения в значительной степени определяются качеством поверхности и поверхностного слоя деталей машин, формируемых на этапах технологического процесса их изготовления. Одной из важных технологических задач наряду с обеспечением точности изготовления деталей машин и стабильности физико-механических свойств поверхностного слоя, является задача формирования определенной микрогеометрии поверхности. Эффективным технологическим методом обеспечения качества изделий машиностроения является финишная комбинированная технология выглаживания с наложением на инструмент механических колебаний ультразвуковой частоты (УЗК). Дополнительная энергия УЗК позволяет интенсифицировать процесс обработки и добиться значительного улучшения показателей качества поверхностного слоя (ПС) по сравнению с традиционной обработкой выглаживанием [13].

Методика эксперимента.

Экспериментальные исследования проводили на токарном станке с ЧПУ модели 16B16T1C1, оснащенным устройством для ультразвуковой упрочняющей обработки выглаживанием и ультразвуковым генератором УЗГ–0,4/22 мощностью 0,4 кВт и частотой колебаний 22 кГц (рисунок 1). К генератору подсоединяли ультразвуковую колебательную систему на основе магнитострикционного преобразователя сечением 20×20 мм согласованного с ультразвуковым волноводом конической формы с входным и выходным торцами диаметрами $\varnothing 26$ и 18 мм соответственно. К выходному торцу волновода через переходник крепили инструмент для выглаживания. В качестве инструмента использовали наконечники из природного алмаза по ТУ 2–037–631–88, исполнения II со сферической рабочей частью радиусом 2,5 мм. Монтаж ультразвуковой колебательной системы выполнен в устройстве с возможностью создания статического усилия прижима инструмента к детали гидравлическим способом. Контроль усилия осуществляли с помощью манометра, установленного в устройстве.

В качестве образцов использовали заготовки из закаленной стали ХВГ (HRC 60...63) в виде колец наружным диаметром $\varnothing 56 \pm 0,2$ мм. и высотой $20 \pm 0,5$ мм. При проведении исследований упрочняющую обработку обычным и ультразвуковым выглаживанием выполняли по торцевым поверхностям образцов по схеме, показанной на рисунке 1 в. Предварительно торцы образцов обработаны шлифованием и твердым точением. Исходная шероховатость поверхностей по параметру Ra составляла 0,4...0,6 мкм после шлифования и 1,6...2 мкм после твердого точения.

Обработку выглаживанием производили на следующих режимах: давление в гидросистеме приспособления – 0,1...0,3 МПа; величина подачи инструмента $s=0,1$ мм/об; частота вращения $n=400$ об/мин. При ультразвуковом выглаживании амплитуда колебаний инструмента составляла 9 мкм, частота 22 кГц.

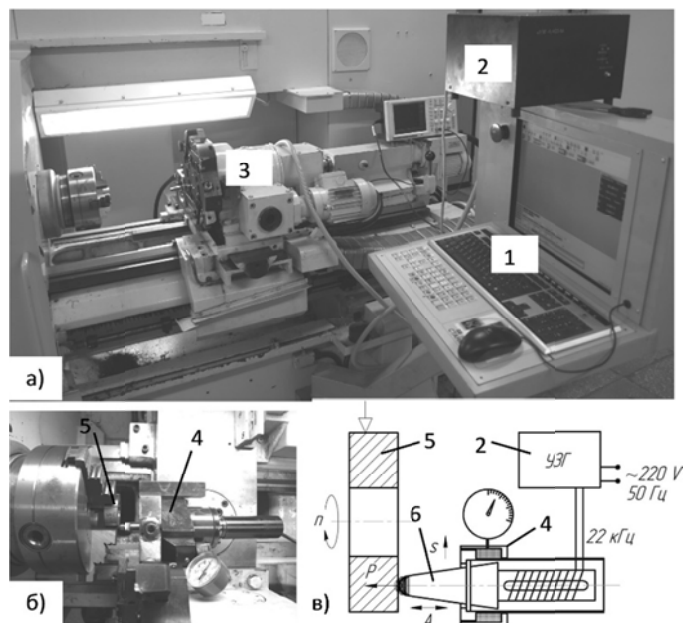


Рисунок 1 – Оборудование и технологическое оснащение для ультразвуковой упрочняющей обработки:
 а) общий вид рабочей зоны токарного станка с ЧПУ 16Б16П; б) процесс ультразвукового упрочнения образцов; в) схема обработки образцов. 1 – стойка системы ЧПУ; 2 – ультразвуковой генератор УЗГ–0,4/22; 3 – револьверная головка станка; 4 – устройство для ультразвукового упрочнения; 5 – образец из стали ХВГ; 6 – ультразвуковая колебательная система

Изучение топографии обработанных поверхностей проводили с помощью оптического микроскопа Axiovert 40MAT и лазерного сканирующего микроскопа LEXT, измерение шероховатости и профилографирование поверхностей выполняли на приборе Mitutoyo Surftest SJ–210.

Результаты и обсуждение.

На рисунке 2 в виде диаграммы представлены результаты измерения параметра шероховатости R_a обработанных образцов в сопоставлении с исходной шероховатостью поверхности после шлифования. Как следует из полученных результатов, упрочняющая обработка выглаживанием как с применением ультразвуковых колебаний, так и без них, способствует снижению шероховатости поверхности более чем в два раза по сравнению с исходной. Обусловлено это пластической деформацией исходных микровыступов и их сглаживанием [4–7]. При этом меньшие значения параметра R_a (0,15; 0,14 мкм) получены при ультразвуковой обработке с небольшими значениями статического усилия внедрения инструмента (в диапазоне давлений в гидросистеме приспособления до 0,2 МПа).

При более высоких значениях статического усилия (давление 0,3 МПа) величина параметра R_a оказалась меньше при обычном выглаживании и составила 0,06 мкм по сравнению с ультразвуковой обработкой, где параметра R_a равен 0,17 мкм. Обусловлено это тем, что для радиуса инструмента 2,5 мм при обработке закаленной стали обычным выглаживанием требуется значительное статическое усилия, необходимое для пластической деформации поверхности. При наложении ультразвуковых колебаний пластическая деформация возникает при сравнительно не больших значениях статического усилия [8–11]. Увеличение статического усилия при ультразвуковой обработке привело к ухудшению шероховатости поверхности, что возможно может быть связано с многократными пластическими деформациями в зоне контакта, обусловленные как статическим усилием, так и динамической высокочастотной нагрузкой.

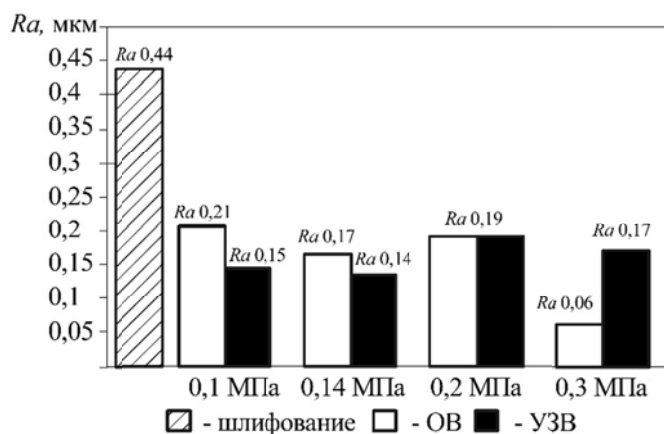


Рисунок 2 – Значение среднеарифметического отклонения профиля поверхности (параметр Ra) после обработки шлифованием, обычным (OB) и ультразвуковым (УЗВ) выглаживанием

На рисунке 3 представлены фотоснимки поверхностей образцов, полученные с помощью оптического микроскопа Axiovert 40MAT при четырехсоткратном увеличении и соответствующие им профилограммы поверхностей. На приведенных фотоснимках заметна очевидная качественная разница в формировании микрогеометрии обработанных поверхностей: наличие шлифовочных рисок на поверхности образца после шлифования (рисунок 3 а); прямолинейные следы, образованные при обычном выглаживании (рисунок 3 б, г) и структурированная поверхность за счет вибрационного воздействия инструмента при ультразвуковой обработке (рисунок 3 в, д).

Микропрофиль шлифованной поверхности имеет хаотичным образом чередующиеся остроконечные выступы и впадины, характерные для методов абразивной обработки [12, 13]. Профилограмма шлифованной поверхности содержит низкочастотную и высокочастотную составляющие микрорельефа. Наибольшие значения микронеровностей формируют низкочастотную составляющую рельефа. Это можно объяснить действием процесса правки шлифовального круга, когда правящий алмаз формирует на его рабочей поверхности элементы резбового профиля, «копируемого» при шлифовании обрабатываемой поверхностью. Высокочастотная составляющая зависит от характеристики шлифовального круга и режима шлифования [14, 15].

Обычное выглаживание с меньшим усилием обработки (давление 0,1 МПа) способствует частичному сглаживанию шлифовочных рисок (рисунок 3 б), при этом выступы профиля имеют более округлую сглаженную форму, что является характерным для методов отделочно–упрочняющей обработки [16–18].

При давлении 0,3 МПа наблюдается более существенное сглаживание шлифовочных рисок (рисунок 3 г). На поверхности имеются чередующиеся следы в направлении подачи, являющиеся следом сферической формы инструмента.

Принципиально другую структуру профиля имеют образцы после ультразвукового выглаживания при соответствующих значениях усилия обработки (рисунок 3 в, д). В этом случае выглаживающий инструмент совершает дополнительные колебания с ультразвуковой частотой, что интенсифицирует процесс пластической деформации и приводит к соответствующим отличительным изменениям в формировании микропрофиля поверхности [19, 20]. Так, на рисунке 3 на поверхности, обработанной с давлением прижима инструмента, равным 0,1 МПа полностью отсутствуют шлифовочные риски и следы от выглаживающего инструмента. Очевидно, что при небольших усилиях обработки инструмент внедряется в поверхность на небольшую глубину, деформируя выступы исходной шероховатости, а полное сглаживания исходного профиля поверхности обеспечивается за счет высокочастотного вибрационного воздействия инструмента. Однако, при более высоком давлении (0,3 МПа) на поверхности отчетливо проявляются следы от инструмента, чередующиеся в направлении подачи. При этом хаотичные шлифовочные риски отсутствуют, а топография поверхности характеризуется сравнительно упорядоченной сильно деформированной структурой. По–видимому, это обусловлено тем, что при высоких

значениях усилия обработки инструмент внедряется в поверхность практически на всю глубину исходного профиля, перераспределяя объемы материала с вершин профиля во впадины. А вибрационное воздействие инструмента с определенной амплитудой колебаний вызывает дальнейшую многократную пластическую деформацию поверхности.

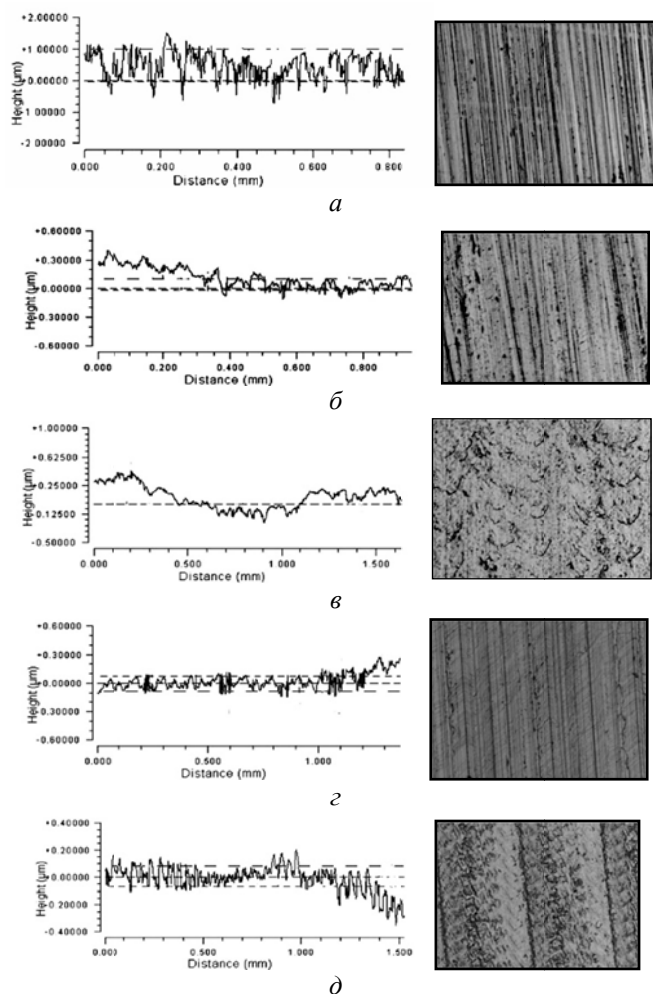


Рисунок 3 – Профилограммы и фотоснимки поверхностей образцов после шлифования (а), обычного (ОВ) и ультразвукового (УЗВ) выглаживания (б – д):

б) ОВ с усилием 0,1 Мпа; в) УЗВ с усилием 0,1 Мпа; г) ОВ с усилием 0,3 Мпа; д) УЗВ с усилием 0,3 Мпа

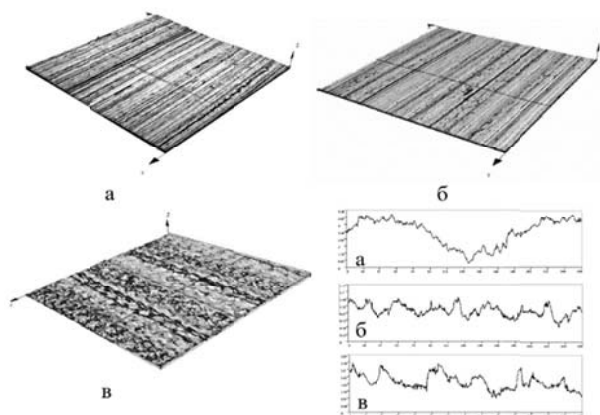


Рисунок 4 – Трехмерная топография поверхностей после твердого точения (а), обычного выглаживания (б) и ультразвукового выглаживания (в)

На рисунке 4 представлены трехмерные топографии поверхностей после твердого точения, обычного и ультразвукового выглаживания, полученные с помощью лазерного

сканирующего микроскопа. Как следует из рисунок 4 а поверхность после твердого точения характеризуется чередующимся профилем, являющимся результатом копирования геометрии режущего инструмента. После обычного и ультразвукового выглаживания (рисунок 4 б, в) профиль более сглаженный. Однако, для поверхности после обычного выглаживания также характерно наличие рисок от предшествующей токарной обработки.

Заключение. Топография поверхности образца после ультразвуковой обработки характеризуется наличием упорядоченной пластически деформированной структуры.

Оценка топографии проведена в двух направлениях:

1. В направлении вектора скорости (направление вращения заготовки) наблюдается деформированная структура профиля поверхности, подверженного многократному ударному воздействию со стороны инструмента;

2. В направлении величины подачи инструмента наблюдается наличие сильнодеформированных валиков материала, вытесненного в сторону за счет многоциклового деформации и перемещения инструмента.

Многократное вибрационное воздействие инструмента с определенной амплитудой вызывает многократное пластическое деформирование поверхности, при одновременном повышении статического давления на поверхности проявляются следы от инструмента. При рациональном выборе режимов обработки учитывающих особенности образования топографии при УЗК обработка выглаживанием может позволить получить заданную шероховатость при меньшем статическом усилии и, следовательно, меньшем износе инструмента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Grigoriev, S.N., The Control Platform for Decomposition and Synthesis of Specialized CNC Systems, *Procedia CIRP*, 41 (2016), pp. 858–863. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84968831732&doi=10.1016%2fj.procir.2015.08.031&partnerID=40&md5=bc439efa0eb323b10fd7b9cf01b1c22> (access date: 23.03.2018) DOI: 10.1016/j.procir.2015.08.031
2. Grigorev, S.N. A method of technologic audit of technical re-equipment projects in aircraft production enterprises, *Russian Aeronautics*, 58(2) (2015), pp. 244–250. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84941129784&doi=10.3103%2fS106879981502018X&partnerID=40&md5=7d65f5e9de81d90b62c845a2b1625dc3> (access date: 23.03.2018) DOI: 10.3103/S106879981502018X
3. Grigoriev, S.N., Research of Tool Durability in Surface Plastic Deformation Processing by Burnishing of Steel Without Metalworking Fluids (2017) *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 66 (1), art. no. 012013, URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85019770159&doi=10.1088%2f1755-1315%2f66%2f1%2f012013&partnerID=40&md5=67dea062f36ae0dabafe572637edfd2c> DOI: 10.1088/1755-1315/66/1/012013
4. Grigoriev, S.N. Ecological and Toxicological Characteristics of Metalworking Fluids Used in Finishing Processing in Russian Federation (2017) *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 66 (1), art. no. 012012, URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85019695191&doi=10.1088%2f1755-1315%2f66%2f1%2f012012&partnerID=40&md5=89494b0074095bad5e7282e87b0a2550> DOI: 10.1088/1755-1315/66/1/012012
5. Grigoriev, S.N. Environmental Aspects of the Green Surface Plastic Deformation Technology of Car Parts (2017) *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 50 (1), art. no. 012015, URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85012206681&doi=10.1088%2f1755-1315%2f50%2f1%2f012015&partnerID=40&md5=b599b219d6dc4d1abdae8dfb0ccd7d3> DOI: 10.1088/1755-1315/50/1/012015
6. Grigoriev, S.N. Technological parameters forming the surface texture in hyper productive surface Plastic deformation processing (2017) *Key Engineering Materials*, 746 KEM, pp. 114–119, URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85027038463&doi=10.4028%2fwww.scientific.net%2fKEM.746.114&partnerID=40&md5=976ef83f601af061ee97fef219d8a15f> DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.746.114
7. Grigoriev, S.N. Testing of external cylindrical surfaces of car parts after wide burnishing processing (2017) *Key Engineering Materials*, 746 KEM, pp. 126–131, URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85027021045&doi=10.4028%2fwww.scientific.net%2fKEM.746.126&partnerID=40&md5=0fbf3d44d1854908d9db874d6c927743> DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.746.126
8. Bobrovskij N.M. The Modelling Of Basing Holes Machining Of Automatically Replaceable Cubical Units For Reconfigurable Manufacturing Systems With Low-Waste Production, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 50 (2017), pp. 012013.

9. Gorshkov B.M. Methods for diagnosing of technical systems [Metody diagnostirovaniya tekhnicheskikh sistem], Conference proceedings of the III International Scientific and Practical Conference «Innovative Technologies in Service», (St. Petersburg State University of Service and Economics, St. Petersburg, 2012), pp. 148–149.
10. Grigoriev, S.N. Research of tool durability in surface plastic deformation by Wide burnishing of cast iron without metalworking fluids (2017) Key Engineering Materials, 746 KEM, pp. 120–125, URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85027031213&doi=10.4028%2fwww.scientific.net%2fKEM.746.120&partnerID=40&md5=898a5486ce2a899def44dd1e8830f41d> DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.746.120
11. Bobrovskij, N.M. Simulation of thermal fields using different types of wide burnishing (2015) IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 91 (1), art. no. 012034, URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84946962908&doi=10.1088%2f1757-899X%2f91%2f1%2f012034&partnerID=40&md5=c40daf25714e225654c2c07c4e3e6f95> DOI: 10.1088/1757-899X/91/1/012034
12. Unyanin, A.N. Study of Forces during Ultrasonic Vibration Assisted Grinding (2016) Procedia Engineering, 150, pp. 1000–1006, URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84984788929&doi=10.1016%2fj.proeng.2016.07.153&partnerID=40&md5=dd67fbb86303b3c3e5c5c2f0f6579e05> DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.153
13. Unyanin, A.N. Ultrasound treatment of lubricating-cooling liquid in grinding part billets (2001) Avtomobilnaya Promyshlennost, (4), pp. 37–39, URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0035773918&partnerID=40&md5=0e5787c22176b0c622f91ef0ebe37be4>
14. Kiselev, E. Direct formation of surface layers quality parameters during combined treatment of two-phase stainless steel blanks (2017) MATEC Web of Conferences, 129, art. no. 01056, URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85034215781&doi=10.1051%2fmateconf%2f201712901056&partnerID=40&md5=b0153a981669f5b70bef1dcb3a34918> DOI: 10.1051/mateconf/201712901056
15. Kiselev, E.S. Hybrid machining in the creation of specified residual stress in the surface layer (2012) Russian Engineering Research, 32 (5–6), pp. 504–507, URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84862607247&doi=10.3103%2fS1068798X12050097&partnerID=40&md5=07c8ae94f3b92293f84aba4522520236> DOI: 10.3103/S1068798X12050097
16. Bobrovskij, N.M. Aspects of thermal field by wide burnishing (2015) IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 91 (1), art. no. 012035, URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84946962867&doi=10.1088%2f1757-899X%2f91%2f1%2f012035&partnerID=40&md5=c0a942d0ce2f13a0fa3717e4fc76621e> DOI: 10.1088/1757-899X/91/1/012035
17. Unyanin, A.N. Grinding Forces in the Presence of Ultrasound (2018) Russian Engineering Research, 38 (3), pp. 193–197, URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85045970943&doi=10.3103%2fS1068798X1803022X&partnerID=40&md5=9ee037b582f088a25f2f20376d32d631> DOI: 10.3103/S1068798X1803022X
18. Unyanin, A. The ultrasonic grinding process temperature field study (2017) MATEC Web of Conferences, 129, art. no. 01011, URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85034213057&doi=10.1051%2fmateconf%2f201712901011&partnerID=40&md5=73d99e3a45212af9f2d5a212974ce1a1> DOI: 10.1051/mateconf/201712901011
19. Kiselev, E.S. Inheritance and the Residual Stress in the Surface Layer of Machine Parts (2011) Russian Engineering Research, 31 (6), pp. 545–548, URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-79959633529&doi=10.3103%2fS1068798X11060128&partnerID=40&md5=af1e36583a0c1774dc7fcb82e430c2b4> DOI: 10.3103/S1068798X11060128
20. Kiselev, E.S. Efficiency rise of billets grinding with the help of ultrasonics (2001) Avtomobilnaya Promyshlennost, (9), pp. 26–27, URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0035548811&partnerID=40&md5=76e93c16345c2250ebfbf097b957f52e>

Селиванов Александр Сергеевич

Тольяттинский государственный университет
К.т.н., директор института машиностроения
Тел.: +79608466579
E-mail: selivas@inbox.ru

Лукьянов Алексей Александрович

Тольяттинский государственный университет, аспирант
Тел.: +79178206581
E-mail: a.lukyanov@tehnomasch.ru

Севастьянов Александр Александрович

Тольяттинский государственный
университет, студент
Тел.: +78482539453
E-mail: topavel@mail.ru

Бобровский Николай Михайлович

Тольяттинский государственный
университет, профессор
Тел.: 88482408011
E-mail: bobrnm@yandex.ru

FEATURES OF SURFACE MICRORELIEF FORMATION OF HARDENED STEEL WITH ULTRASONIC STRENGTHENING BURNISHING

Abstract. *In this article results of comparative experimental study of the hardened steel part surface topography with a finishing–hardening processing using a tool with superposition of mechanical ultrasonic frequency oscillations and without overlapping are presented. The experiments were carried out on a CNC machine model 16B16T1S1, with ultrasonic generator UZG–0.4/22 with a power of 0.4 kW and oscillations frequency of 22 kHz. The material of the workpieces was steel HVG (HRC 60... 63), the construction – rings with an outer diameter of $\varnothing 56 \pm 0.2$ mm. and a height of 20 ± 0.5 mm. Processing modes: the pressure in the hydraulic system of the device is 0.1...0.3 MPa; tools feed $s = 0.1$ mm/rev; rotation speed $n = 400$ rpm. With ultrasonic burnishing, the oscillation amplitude of the instrument was 9 μ m, the frequency was 22 kHz. The topography of the treated surfaces was examined with an Axiovert 40MAT optical microscope and a LEXT laser scanning microscope, the roughness measurement and surface profiling were performed on a Mitutoyo Surftest SJ–210 instrument. As a result, it was found that after the burnishing treatment with ultrasonic application, the surface obtains an ordered plastically deformed structure.*

Keywords: roughness, microrelief, surface, ultrasonic burnishing.

BIBLIOGRAPHY

1. Grigoriev, S.N., The Control Platform for Decomposition and Synthesis of Specialized CNC Systems, *Procedia CIRP*, 41 (2016), pp. 858–863. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84968831732&doi=10.1016%2fj.procir.2015.08.031&partnerID=40&md5=bc439efa0eb323b10fd7b9cf01b1c22> (access date: 23.03.2018) DOI: 10.1016/j.procir.2015.08.031
2. Grigorev, S.N. A method of technologic audit of technical re–equipment projects in aircraft production enterprises, *Russian Aeronautics*, 58(2) (2015), pp. 244–250. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84941129784&doi=10.3103%2fS106879981502018X&partnerID=40&md5=7d65f5e9de81d90b62c845a2b1625dc3> (access date: 23.03.2018) DOI: 10.3103/S106879981502018X
3. Grigoriev, S.N., Research of Tool Durability in Surface Plastic Deformation Processing by Burnishing of Steel Without Metalworking Fluids (2017) IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 66 (1), art. no. 012013, URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85019770159&doi=10.1088%2f1755-1315%2f66%2f1%2f012013&partnerID=40&md5=67dea062f36ae0dabafe572637edfd2c> DOI: 10.1088/1755-1315/66/1/012013
4. Grigoriev, S.N. Ecological and Toxicological Characteristics of Metalworking Fluids Used in Finishing Processing in Russian Federation (2017) IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 66 (1), art. no. 012012, URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85019695191&doi=10.1088%2f1755-1315%2f66%2f1%2f012012&partnerID=40&md5=89494b0074095bad5e7282e87b0a2550> DOI: 10.1088/1755-1315/66/1/012012
5. Grigoriev, S.N. Environmental Aspects of the Green Surface Plastic Deformation Technology of Car Parts (2017) IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 50 (1), art. no. 012015, URL <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85012206681&doi=10.1088%2f1755-1315%2f50%2f1%2f012015&partnerID=40&md5=b599b219d6dc4d1abdae8dfb0ccd7d3> DOI: 10.1088/1755-1315/50/1/012015
6. Grigoriev, S.N. Technological parameters forming the surface texture in hyper productive surface Plastic deformation processing (2017) *Key Engineering Materials*, 746 KEM, pp. 114–119, URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85027038463&doi=10.4028%2fwww.scientific.net%2fKEM.746.114&partnerID=40&md5=976ef83f601af061ee97fef219d8a15f> DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.746.114
7. Grigoriev, S.N. Testing of external cylindrical surfaces of car parts after wide burnishing processing (2017) *Key Engineering Materials*, 746 KEM, pp. 126–131, URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85027021045&doi=10.4028%2fwww.scientific.net%2fKEM.746.126&partnerID=40&md5=0fbf3d44d1854908d9db874d6c927743> DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.746.126
8. Bobrovskij N.M. The Modelling Of Basing Holes Machining Of Automatically Replaceable Cubical Units For Reconfigurable Manufacturing Systems With Low–Waste Production, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 50 (2017), pp. 012013.
9. Gorshkov B.M. Methods for diagnosing of technical systems [Metody diagnostirovaniya tekhnicheskikh sistem], Conference proceedings of the III International Scientific and Practical Conference «Innovative Technologies in Service», (St. Petersburg State University of Service and Economics, St. Petersburg, 2012), pp. 148–149.
10. Grigoriev, S.N. Research of tool durability in surface plastic deformation by Wide burnishing of cast iron without metalworking fluids (2017) *Key Engineering Materials*, 746 KEM, pp. 120–125, URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85027031213&doi=10.4028%2fwww.scientific.net%2fKEM.746.120&partnerID=40&md5=898a5486ce2a899def44dd1e8830f41d> DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.746.120

11. Bobrovskij, N.M. Simulation of thermal fields using different types of wide burnishing (2015) IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 91 (1), art. no. 012034, URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84946962908&doi=10.1088%2f1757-899X%2f91%2f1%2f012034&partnerID=40&md5=c40daf25714e225654c2c07c4e3e6f95> DOI: 10.1088/1757-899X/91/1/012034
12. Unyanin, A.N. Study of Forces during Ultrasonic Vibration Assisted Grinding (2016) Procedia Engineering, 150, pp. 1000–1006, URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84984788929&doi=10.1016%2fj.proeng.2016.07.153&partnerID=40&md5=dd67fbb86303b3c3e5c5c2f0f6579e05> DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.153
13. Unyanin, A.N. Ultrasound treatment of lubricating-cooling liquid in grinding part billets (2001) Avtomobilnaya Promyshlennost, (4), pp. 37–39, URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0035773918&partnerID=40&md5=0e5787c22176b0c622f91ef0ebe37be4>
14. Kiselev, E. Direct formation of surface layers quality parameters during combined treatment of two-phase stainless steel blanks (2017) MATEC Web of Conferences, 129, art. no. 01056, URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85034215781&doi=10.1051%2fmateconf%2f201712901056&partnerID=40&md5=b0153a981669f5b70bef1dcbd3a34918> DOI: 10.1051/mateconf/201712901056
15. Kiselev, E.S. Hybrid machining in the creation of specified residual stress in the surface layer (2012) Russian Engineering Research, 32 (5–6), pp. 504–507, URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84862607247&doi=10.3103%2fS1068798X12050097&partnerID=40&md5=07c8ae94f3b92293f84aba4522520236> DOI: 10.3103/S1068798X12050097
16. Bobrovskij, N.M. Aspects of thermal field by wide burnishing (2015) IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 91 (1), art. no. 012035, URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84946962867&doi=10.1088%2f1757-899X%2f91%2f1%2f012035&partnerID=40&md5=c0a942d0ce2f13a0fa3717e4fc76621e> DOI: 10.1088/1757-899X/91/1/012035
17. Unyanin, A.N. Grinding Forces in the Presence of Ultrasound (2018) Russian Engineering Research, 38 (3), pp. 193–197, URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85045970943&doi=10.3103%2fS1068798X1803022X&partnerID=40&md5=9ee037b582f088a25f2f20376d32d631> DOI: 10.3103/S1068798X1803022X
18. Unyanin, A. The ultrasonic grinding process temperature field study (2017) MATEC Web of Conferences, 129, art. no. 01011, URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85034213057&doi=10.1051%2fmateconf%2f201712901011&partnerID=40&md5=73d99e3a45212af9f2d5a212974ce1a1> DOI: 10.1051/mateconf/201712901011
19. Kiselev, E.S. Inheritance and the Residual Stress in the Surface Layer of Machine Parts (2011) Russian Engineering Research, 31 (6), pp. 545–548, URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-79959633529&doi=10.3103%2fS1068798X11060128&partnerID=40&md5=af1e36583a0c1774dc7fcb82e430c2b4> DOI: 10.3103/S1068798X11060128
20. Kiselev, E.S. Efficiency rise of billets grinding with the help of ultrasonics (2001) Avtomobilnaya Promyshlennost, (9), pp. 26–27, URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0035548811&partnerID=40&md5=76e93c16345c2250ebfbf097b957f52e>

Selivanov Aleksandr Sergeevich

Togliatti State University
Cand. of tech. science,
Director of the Institute of Mechanical Engineering
445020, Togliatti, Belorusskaya St., 14
Phone: +79608466579
E-mail: selivas@inbox.ru

Sevastjanov Aleksandr Aleksandrovich

Togliatti State University, student
445020, Togliatti, Belorusskaya St., 14
Phone: +78482539453
E-mail: office@tltsu.ru

Lukyanov Aleksey Aleksandrovich

Togliatti State University
post graduate student
445020, Togliatti, Belorusskaya St., 14
Phone.: +79178206581
E-mail: a.lukyanov@tehnomasch.ru

Bobrovskij Nikolaj Mihajlovich

Togliatti State University,
professor
445020, Togliatti, Belorusskaya St., 14
Phone.: +78482408011
E-mail: bobrnm@yandex.ru

Е.С. ЛУКИН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ ТЕКУЧЕСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы оценки достижения предельного состояния элементов конструкций из сталей, выполненных в виде плоских гладких образцов и образцов с центральным круговыми концентраторами напряжений. Оценка предельного состояния проводится в процессе упругопластического деформирования конструкционных сталей, с привлечением средств тепловизионной диагностики. Тепловизионная камера позволяет измерять интенсивность ИК-излучение с поверхности деформируемого образца, формируя двумерное распределение температуры по поверхности. Момент достижения предельного состояния материала, производится на основе термоупругого и термопластического эффектов, которые проявляются в процессе упругопластического деформирования. Показано, что тепловизионный метод позволяет установить момент начала локальной текучести для гладких образцов и образцов с концентраторами напряжений, а также установить момент потери устойчивости пластических деформаций. Результаты оценки предельного состояния на основе тепловизионного метода, удовлетворительно согласуются с данными полученными зарекомендовавшими способами.

Ключевые слова: Локальная текучесть, термоупругий эффект, термопластический эффект, тепловизионная система, упруго–пластическая деформация.

Введение

В настоящее время, для определения прочностных характеристик конструкционных сталей, применяются стандартные и хорошо зарекомендовавшие себя методы механических испытаний. Полученные таким образом механические характеристики материалов, используются в различных моделях для расчета на прочность элементов конструкций [1, 2]. Однако, в зонах конструктивной концентрации напряжений, анализ напряженно–деформированного состояния, особенно в условиях упругопластического деформирования, может вызывать некоторые затруднения. Из–за сложности конструктивных форм и различного сопротивления материалов образованию упругопластических деформаций широко применяют экспериментальные способы определения полей деформаций – фотоупругость, фотопластичность, методы муара, сеток, голографическую интерферометрию, лазерную и оптическую интерферометрию, и другие [3, 4]. Каждый из методов имеет свои преимущества и недостатки.

В последнее время, для исследования полей деформаций в упругопластических материалах – стал стал применяться тепловизионный метод [5–8]. Данный метод основан на регистрации инфракрасного (ИК) излучения с поверхности исследуемого объекта. В основе используемой методики лежит два эффекта – термоупругий и термопластический эффекты. Термоупругий эффект был открыт еще лордом Кельвином в позапрошлом веке [9]. Он заключается в понижении температуры тела при увеличении его объема и обратном эффекте – при уменьшении объема. Применительно к твердым телам термоупругий эффект проявляется следующим образом: при упругом растяжении металлов – температура материала снижается, а при упругом сжатии – повышается. Термопластический эффект, всегда сопровождается только повышением температуры металла [10]. Поэтому, при статическом растяжении металлов вначале наблюдается термоупругий эффект сопровождающийся понижением температуры, а при появлении пластических деформаций – обратный градиент температуры. Причем термопластический эффект сначала проявляется в локальных областях – в зоне локальной текучести металла, и только после переходит в развитую пластичность на всю ширину образца.

Актуальность применения тепловизионной диагностики при исследовании упругопластических деформаций обусловлено высокой экспрессностью метода и сравнительно несложной методикой обработки результатов эксперимента. Более того, данный метод позволяет исследовать кинетику в широком диапазоне упругопластических

деформаций. Тепловизионная система позволяет дистанционно измерять температуру поверхности исследуемого образца. Тепловизионная камера измеряет интенсивность электромагнитного излучения в инфракрасной (ИК) области спектра и формирует двухмерное тепловое изображение исследуемого объекта. Таким образом, тепловизионная система способна регистрировать локальные изменения температуры деформируемого образца по всей поверхности.

Целью исследования является оценка достижения предельного состояния упругопластичных материалов с привлечением средств тепловизионной диагностики.

Благодаря наблюдаемому при помощи тепловизора проявлению термоупругого, а затем и термопластического эффектов при статическом растяжении образцов – можно установить момент наступления локальной текучести материала. В момент перехода от упругих деформаций к пластическим, на кривой изменения температуры наблюдается обратный градиент – снижение температуры образца в упругой области и следующее за этим резкое локальное повышение температуры в зоне возникновения пластических деформаций. Таким образом, тепловизионная система позволяет установить момент наступления локальной текучести материала, что особенно актуально при определении НДС элементов конструкций сложной формы и содержащих зоны конструктивной концентрации напряжений. Кроме того, данная методика позволяет установить момент потери устойчивости пластических деформаций.

Основная часть

В настоящей работе исследованы образцы из малоуглеродистой 10кп5 и низколегированных сталей марок 09Г2С, 18Г2С и 10ХСНД. Химический состав стали 09Г2С – 0,1 % С, 0,85 % Si, 1,41 % Mn, 0,17 % Cr, 0,18 % Ni, 0,35 % Cu, остальное Fe; стали 18Г2С – 0,15 % С, 0,85 % Si, 1,4 % Mn, 0,25 % Cr, 0,15 % Ni, 0,31 % Cu, остальное Fe; стали 10ХСНД – 0,15 % С, 1,05 % Si, 0,65 % Mn, 0,8 % Cr, 0,44 % Ni, 0,4 % Cu, остальное Fe; стали 10кп – 0,09 % С, 0,06 % Si, 0,3 % Mn, 0,15 % Cr, 0,13 % Ni, 0,3 % Cu, остальное Fe. Плоские гладкие образцы и образцы с центральным круговым отверстием подвергались одноосному статическому растяжению на испытательной машине «Instron-1195» при скорости нагружения $8,33 \cdot 10^{-5} \text{ мс}^{-1}$.

Измерение поверхностной температуры плоских образцов в процессе статического растяжения производилось при помощи тепловизионной системы «ТКВр-ИФП». Термочувствительность системы составляет 0,028 К. Спектральная чувствительность детектора ИК-излучения составляет $2,65 \div 3,05 \text{ мкм}$. Измерение распределения температуры с поверхности образцов проводилось на расстоянии 0,3 м, при котором поле зрения камеры составляет $0,09 \times 0,09 \text{ м}$. Термограммы сохраняются на персональный компьютер в режиме реального времени с частотой 20 кадров в секунду.

Таким образом, тепловизионная система позволяет получить функцию распределения температуры по поверхности образца в зависимости от времени $\bar{T}(x, y, t)$.

Определение текучести материала по термопластическому эффекту

На рисунке 1 приведен начальный участок условной диаграммы деформирования 1 статически растягиваемого гладкого образца и кривая изменения температуры 2. Из рисунка видно, что в точке пересечения с пунктирной линией А минимум функции на кривой изменения температуры совпадает с верхним пределом текучести стали (для образцов с ярко выраженной площадкой текучести (а) и без площадки текучести (б)).

Во втором столбце таблицы 1 приведены значения относительного удлинения сталей δ_T , соответствующие текучести материала σ_T , определённые по стандартной методике из диаграммы деформирования. В четвертом столбце – значения удлинения δ_T^* , определённые по минимуму на кривой изменения температуры.

Относительные удлинения сталей δ_T^* , приведенные в четвертом столбце, определены из данных тепловизионных измерений температуры по формуле

$$\delta_T^* = \frac{n \cdot \delta}{N}, \quad (1)$$

где N – общее количество измерений тепловизионной системы за время t растяжения образца;

n – номер измерения, соответствующий минимуму функции температуры, определяемый графически (рисунок 1 – пунктирная линия A);

δ – относительное удлинение после разрыва образца, определенное по диаграмме деформирования.

Таблица 1 – Значения предела текучести и удлинения, определенные по различным методикам

Марка стали	Стандартные механические испытания		Данные, полученные по изменению температуры	
	$\delta_T, \%$	$\sigma_T, \text{МПа}$	$\delta_T^*, \%$	$\sigma_T^*, \text{МПа}$
18Г2С	2,4	413	2,3	411
09Г2С	2,0	412	2,1	405
10ХСНД	4,0	393	3,9	391

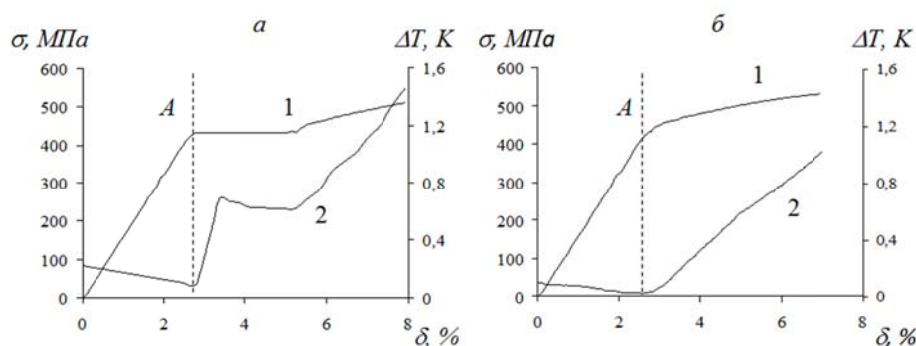


Рисунок 1 – Диаграмма деформирования 1, совмещенная с изменением температуры 2 стали, в зависимости от относительного удлинения:

а – с ярко выраженной площадкой текучести, б – без площадки текучести

Значения напряжений σ_T^* , соответствующие относительному удлинению δ_T^* и представленные в пятом столбце таблицы 1, получены графически, как показано на рисунке 1.

Значения относительного удлинения и предела текучести, определенные из тепловизионных измерений (таблица 1), хорошо согласуются с данными, полученными по стандартной методике. Погрешность определения δ^* при скорости деформирования $\dot{\epsilon} = 1,8 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ не превышает 4 %.

Определение момента локализации пластических деформаций по термопластическому эффекту

Методика определения момента локализации пластических деформаций по термопластическому эффекту основана на значительном повышении скорости разогрева материала в области «шейки» по отношению к скорости приращения температуры на стадии равномерного удлинения.

Плоские гладкие образцы, изготовленные согласно ГОСТ 1497–84 «Методы испытаний на растяжение» и ГОСТ 11701–84 «Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент», подвергались статическому одноосному растяжению на испытательной машине. Поскольку скорость деформирования в области «шейки» выше, чем на стадии равномерного удлинения, введем отношение

$$k_1 = \dot{\epsilon}_2 / \dot{\epsilon}_1, \quad (2)$$

где $\dot{\epsilon}_2$ – скорость деформирования на стадии локализации пластических деформаций,

$\dot{\varepsilon}_1$ – скорость деформирования на стадии равномерного удлинения. Изменение температуры образца на стадиях равномерного удлинения и локализации пластических деформаций определяется соотношением скоростей приращения температуры (рисунок 2).

$$k_2 = \tan \beta / \tan \alpha \quad . \quad (3)$$

Из условия пропорциональности изменения отношений скоростей деформирования и приращения температуры $k_1 = k_2$ устанавливается момент времени τ_2 , соответствующий локализации пластических деформаций при относительном удлинении δ^* (рисунок 2). По диаграмме деформирования определяется напряжение σ_B^* , соответствующее моменту локализации пластических деформаций δ^* .

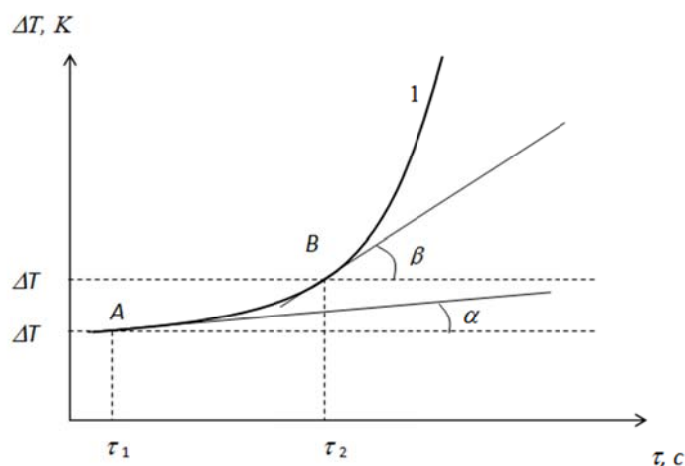


Рисунок 2 – Определение момента времени, соответствующего началу локализации пластических деформаций по кривой приращения температуры 1 в зависимости от времени

Значения относительных удлинений сталей и соответствующие им пределы прочности, определенные по стандартной и разработанной методике, для сравнения приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Значения относительного удлинения и пределов прочности сталей, определенные по стандартной и разработанной методике

Марка стали	Стандартные механические испытания		Данные полученные по термопластическому эффекту	
	δ , %	σ_B , МПа	δ^* , %	σ_B^* , МПа
18Г2С	20,8	567	19,6	560
10ХСНД	21,3	575	20,3	574

Как видно из таблицы, погрешность определения относительного удлинения δ^* , соответствующего моменту локализации пластических деформаций, не превышает 5 %. Значения напряжений σ_B^* , определенные по термопластическому эффекту, хорошо согласуются со значениями предела прочности, определенными по стандартной методике. Методика определения момента локализации пластических деформаций по термопластическому эффекту позволяет установить момент локализации пластических деформаций на плоских гладких образцах из конструкционных сталей.

Оценка достижения предельного состояния образцов из сталей с центральным круговым концентратором напряжений

Поскольку тепловизионная система позволяет измерять температуру с видимой поверхности образца, описанная выше методика применима и для плоских образцов с различными типами концентраторов напряжений, в том числе для системы концентраторов,

позволяя экспериментально обнаружить и установить момент потери устойчивости пластических деформаций.

При расчетах на прочность элементов конструкций с концентраторами напряжений для определения действующих значений напряжений и деформаций в пластической области широко применяются различные расчетные формулы. Наибольшее распространение получили формулы Нейбера, Хардрата – Омана и их модификации.

Н.А. Махутовым на основе большого количества экспериментальных данных предложено при расчете коэффициента концентрации напряжений K_σ и коэффициента концентрации деформаций K_ϵ учитывать не только геометрию концентратора напряжений, но и характеристики материала, определяемые из стандартных механических испытаний гладкого образца на растяжение [11]:

$$\frac{K_\epsilon \cdot K_\sigma}{\alpha_\sigma^2} = F_2[\alpha_\sigma, \bar{\sigma}_n, f(\bar{\sigma}_n, \bar{\epsilon}_n)] \quad (4)$$

где α_σ – коэффициент концентрации упругих напряжений,

F_2 – некоторая функция, численные значения которой убывают до определенных минимальных величин при увеличении упругопластических деформаций, соответствующих моменту потери устойчивости пластической деформации в зоне концентрации напряжений [11],

$f(\bar{\sigma}_n, \bar{\epsilon}_n)$ – кривая деформирования в упругопластической области в относительных координатах,

$\bar{\sigma}_n = \sigma_n / \sigma_T$ – относительное напряжение,

$\bar{\epsilon}_n = \epsilon_n / \epsilon_T$ – относительная деформация.

В работе [12] исследована функция F_2 и получено аналитическое решение при минимуме функции $\frac{\partial F_2}{\partial \bar{\sigma}_n} = 0$:

$$\bar{\sigma}_{nA} = \frac{1}{\alpha_\sigma} \sqrt[3]{\frac{(1+\alpha_\sigma)^2}{2}} \quad (5)$$

из которого следует, что напряжение, при котором происходит потеря устойчивости пластических деформаций, является функцией коэффициента концентрации напряжений и не зависит от деформационных характеристик материала.

Численный расчет значений функции F_2 , проведенный в [12] подтверждает, что значения напряжений $\bar{\sigma}_{nч}$ являются функцией только α_σ . Экспериментальные результаты, полученные ими на материалах Д19АТ, В95 и ВСт3сп5 методами муаровых полос и голографической интерферометрии, удовлетворительно совпадают с расчетами по аналитической формуле (5) и численным расчетом функции F_2 .

Определение момента потери устойчивости пластических деформаций по термопластическому эффекту.

В настоящей работе статическому растяжению были подвергнуты плоские образцы с центрально расположенным круговым отверстием из сталей 10кп5, 10ХСНД и 18Г2С при скоростях нагружения от $2 \cdot 10^{-3}$ до $20 \cdot 10^{-3}$ м·с⁻¹. Геометрические размеры рабочей части образцов следующие: 230×100×1,5 мм с отверстием диаметром Ø20 мм для стали 10кп5; 100×30×2,1 мм и Ø 6 мм – 10ХСНД; 90×30×2,6 мм и Ø6 мм – 18Г2С. Коэффициент концентрации упругих напряжений α_σ (по «брутто» сечению) для данных образцов составляет 3,14 [13].

Измерение температуры статически растягиваемого образца производится при помощи тепловизионной камеры. По кривой изменения температуры деформируемого образца устанавливается момент времени τ_1 , соответствующий минимуму функции $T(\tau)$ (рисунок 3 – пересечение кривой изменения температуры 2 с пунктирной линией А). По диаграмме деформирования при относительном удлинении $\delta(\tau_1)$ в момент времени τ_1 определяется номинальное напряжение $\sigma_{нТ}$. Определенное таким образом номинальное напряжение $\sigma_{нТ}$ соответствует минимуму функции на кривой изменения температуры (рисунок 3).

Номинальные напряжения σ_n , соответствующие моменту потери устойчивости пластических деформаций и определенные различными способами приведены в таблице 3. Во втором столбце приведены номинальные напряжения $\sigma_{нА}$, определенные по аналитическому выражению (5), где $\sigma_{нА} = \bar{\sigma}_{нА} \cdot \sigma_T$, $\bar{\sigma}_{нА} = 0,65$.

В третьем столбце таблицы 3 представлены номинальные напряжения $\sigma_{нЧ}$, определенные по относительному напряжению $\bar{\sigma}_{нЧ} = 0,7$, рассчитанного численным методом для $\alpha_\sigma = 3,14$ [12].

Таблица 3 – Номинальные напряжения, соответствующие потери устойчивости пластических деформаций в случае концентрации напряжений

Марка стали	$\sigma_{нА}$, МПа	$\sigma_{нЧ}$, МПа	$\sigma_{нТ}$, МПа
10кп5	179	193	187
10ХСНД	257	275	282
18Г2С	269	289	286

В четвертом столбце приведены номинальные напряжения, соответствующие минимуму на кривой изменения температуры (рисунок 3) статически растягиваемого образца с круговым отверстием $\sigma_{нТ}$. Как видно из таблицы 3, разность между значениями номинальных напряжений $\sigma_{нТ}$, определенными по термопластическому эффекту дают несколько завышенные значения по отношению к напряжениям $\sigma_{нА}$, полученным по выражению в [12]. Однако, разность между ними не превышает 10%, а для номинальных напряжений $\sigma_{нЧ}$, рассчитанных численным методом, не превышает 5 %.

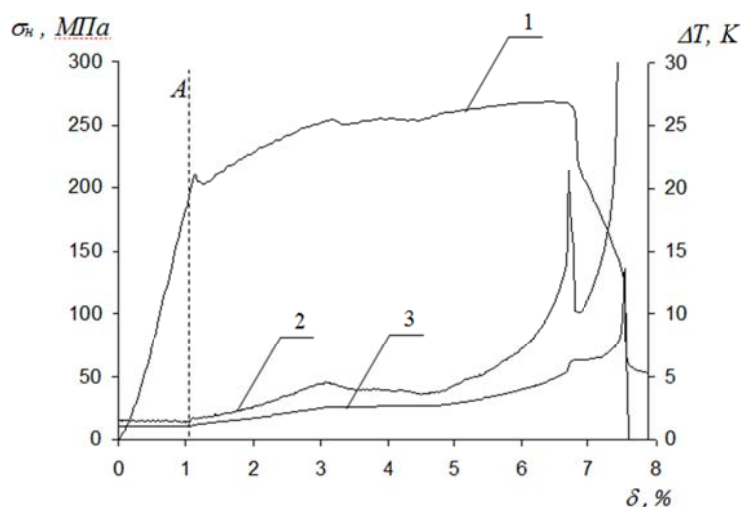


Рисунок 3 – Диаграмма деформирования плоского образца с круговым отверстием из стали 10кп (1), графики изменения максимальной (2) и средней (3) температур на рабочем участке поверхности образца

Таким образом, номинальные напряжения $\sigma_{нТ}$, определенные по минимальному значению на кривой изменения температуры, удовлетворительно согласуются с результатами расчетных данных $\sigma_{нА}$ и $\sigma_{нЧ}$. Следовательно, минимум функции изменения температуры статически растягиваемого образца с круговым отверстием соответствует моменту потери устойчивости пластических деформаций.

Заключение

В настоящей статье представлено применение тепловизионного метода при исследовании упругопластических деформаций. Исследованию подвергнуты малоуглеродистые низколегированные конструкционные стали. Тепловизионная камера, регистрирующая изменение температурного поля статически растягиваемых образцов, позволяет установить момент наступления текучести материала. Переход от упругих

деформаций к пластическим, определяется по термоупругому и термопластическому эффектам.

Преимуществом использования тепловизионной системы при исследовании упругопластических деформаций является высокая экспрессность данного метода и возможность проведения исследований в широком интервале деформаций. Тепловизионный метод позволяет установить момент локализации пластических деформаций для плоских гладких образцов из конструкционных сталей.

Показано, что применение тепловизионной системы позволяет провести оценку достижения предельного состояния образцов из конструкционных сталей в условиях концентрации напряжений. Приведенные экспериментальные данные свидетельствуют о возможности оценки потери устойчивости пластических деформаций с использованием тепловизионной системы. Проведен сравнительный анализ данных с результатами, полученными по аналитическому выражению [12], а также численным методом. Показано, что номинальные напряжения σ_{HT} , определенные по минимальному значению на кривой изменения температуры, удовлетворительно согласуются с результатами расчетных данных σ_{HA} и $\sigma_{HЧ}$. Минимум функции изменения температуры статически растягиваемого образца с круговым отверстием соответствует моменту потери устойчивости пластических деформаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ерасов, В.С. Определение скорости пластической деформации при испытании на растяжение // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2014. – Т.80, №5. – С. 61–63.
2. Ицкович, Г.М. Соппротивление материалов. – М.: Высшая школа, 2001. – 368 с.
3. Махутов, Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. – М.: Машиностроение, 1981. – 274 с.
4. Носов, В.В. Оценка прочности и ресурса сварных конструкций на основе микромеханической модели акустической эмиссии при статическом нагружении // Деформация и разрушение материалов. – 2016. – №11. – С. 38–45.
5. Пустовой, В.Н. Неконтактный метод исследования концентрации напряжений в металлоконструкциях грузоподъемных машин: Учеб. пособие. – М.: В/О «Мортехинформреклама», 1991. – 48 с.
6. Кристал, М.М. Эволюция температурного поля и макролокализация деформации при прерывистой текучести // Металловедение и термическая обработка материалов. – 2003. – №4. – С. 27–32.
7. Pieczyska, E.A. Temperature evolution during simple shear test of steel / Proceedings of Eurotherm Seminar // Quantitative infrared thermography 4, QIRT98, No. 60. – Lodz, Poland, 2000. – PP. 112–116.
8. Pieczyska, E.A. Rate of energy storage during consecutive deformation of steel / Proceedings of Eurotherm Seminar // Quantitative infrared thermography 5, QIRT2000, No. 64. – Reims, France, 2000. – PP. 260–264.
9. Thompson, (Lord Kelvin). On the Dynamical theory of heat // Transactions of the Royal Society of Edinburgh. – 1853. – Vol. 20. – PP. 261–283.
10. Jordan, E.H. Journal of Testing Evaluation. JTEVA. – 1978. – Vol. 6, No. 6. – PP. 325–331.
11. Махутов, Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчета элементов конструкций на прочность. – М.: Машиностроение, 1981. – 272 с.
12. Новопашин, М.Д. Известия СО АН СССР. Сер. техн. Наук. – 1989. – Вып. 2. – С. 97–101.
13. Петерсон, Р. Коэффициенты концентрации напряжений. – М.: Мир, 1977. – 304 с.

Лукин Евгений Саввич

Федеральное Государственное Бюджетное Учреждение Науки Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН
кандидат технических наук, старший научный сотрудник
677980, Россия, г. Якутск, ул. Октябрьская, д.1
8 (411–2) 39–05–75
lukin@iptpn.ysn.ru

DETERMINATION OF LOCAL FLUIDITY OF METAL MATERIALS BY THERMOVISION METHOD

Abstract. *The article deals with the evaluation of the achievement of the limiting state of structural elements made of steels made in the form of flat smooth samples and samples with central circular stress concentrators. The estimation of the limiting state is carried out in the process of elastoplastic deformation of structural steels, with the use of thermal imaging diagnostic tools. A thermal imaging camera allows to measure the intensity of infrared radiation from the surface of a deformable sample, forming a two-dimensional temperature distribution over the surface. The moment of reaching the ultimate state of the material is made on the basis of thermoelastic and thermoplastic effects, which manifest themselves in the process of elastoplastic deformation. It is shown that the thermal imaging method makes it possible to determine the instant of onset of local fluidity for smooth samples and samples with stress concentrators, and also to establish the moment of loss of stability of plastic deformations. The results of the estimation of the limiting state on the basis of the thermal-thermal method are in satisfactory agreement with the data obtained by the established methods.*

Keywords. *Local fluidity, thermoelastic effect, thermoplastic effect, thermovision system, elastic-plastic deformation.*

BIBLIOGRAPHY

1. Erasov V.S., Bajramukov R.R., Nuzhnyj G.A. Opređenje skorosti plasticheskoj deformacii pri ispytanii na rastyazhenie // Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. – 2014. – T.80, №5. – P. 61–63.
2. Ickovich G.M. Soprotivlenie materialov. – M.: Vysshaya shkola, 2001. – 368 p.
3. Mahutov N.A. Deformacionnye kriterii razrusheniya i raschet ehlementov konstrukcij na prochnost. – M.: Mashinostroyeniye, 1981. – 274 p.
4. Nosov V.V., Yamilova A.R., Zelenskiy N.A., Matviyan I.V. Ocenka prochnosti i resursa svarnykh konstrukcij na osnove mikromekhanicheskoy modeli akusticheskoy ehmissii pri staticheskom nagruzhении // Deformatsiya i razrusheniye materialov. – 2016. – №11. – P. 38–45.
5. Pustovoj V.N. Nekontaktnyj metod issledovaniya koncentracii napryazhenij v metallokonstrukciyah gruzopod'emnykh mashin: Ucheb. posobie. – M.: V/O «Mortekhinformreklama», 1991. – 48 p.
6. Krishtal M.M. EHvolyuciya temperaturnogo polya i makrolokalizatsiya deformacii pri preryvistoj tekuchesti // Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka materialov. – 2003. – №4. – P. 27–32.
7. Pieczyska E.A., Gadaj S.P., Nowacki W.K. Temperature evolution during simple shear test of steel / Proceedings of Eurotherm Seminar // Quantitative infrared thermography 4, QIRT98, No. 60. – Lodz, Poland, 2000. – P. 112–116.
8. Pieczyska E.A., Gadaj S.P., Nowacki W.K. Rate of energy storage during consecutive deformation of steel / Proceedings of Eurotherm Seminar // Quantitative infrared thermography 5, QIRT2000, No. 64. – Reims, France, 2000. – P. 260–264.
9. Thompson (Lord Kelvin). On the Dynamical theory of heat // Transactions of the Royal Society of Edinburgh. – 1853. – Vol. 20. – P. 261–283.
10. Jordan E.H., Sandor B.I. // Journal of Testing Evaluation. JTEVA. – 1978. – Vol. 6, No. 6. – P. 325–331.
11. Mahutov N.A. Deformacionnye kriterii razrusheniya i rascheta ehlementov konstrukcij na prochnost. – M.: Mashinostroyeniye, 1981. – 272 p.
12. Novopashin M.D., Bochkarev L.I., Ivanov A.M. // Izvestiya SO AN SSSR. Ser. tekhn. Nauk. – 1989. – Vyp. 2. – P. 97–101.
13. Peterson R. Koehfficienty koncentracii napryazhenij. – M.: Mir, 1977. – 304 p.

Lukin Evgeny Savvich

Federal State Budgetary Institution of Science

Institute of physical and technical problems of the North named by V.P. Larionov SB RAS

philosophical doctor (technical science), head science worker

677980, Russia, Yakutsk, Oktyabryskaya str., 1

8 (411-2) 39-05-75

lukin@iptn.ysn.ru

МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ **И ОБОРУДОВАНИЕ**

УДК 621.7.013

Н.В. КАНАТНИКОВ, А.А. ГУКОВ, П.А. КАНАТНИКОВА, А.С. ПАШМЕНТОВА

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖУЩЕЙ ЧАСТИ ИНСТРУМЕНТА НА МАКСИМАЛЬНУЮ ТЕМПЕРАТУРУ, ВОЗНИКАЮЩУЮ В ПРОЦЕССЕ ОБРАБОТКИ КОНИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Аннотация. В работе приведены результаты экспериментального исследования температур, возникающих при резании конических зубчатых колес. Был использован метод измерения температуры по инфракрасному излучению. Для обработки данных использованы методы робастного планирования эксперимента и дисперсионного (ANOVA) анализа. Результаты показали значимость изменения геометрических параметров режущего инструмента (переднего и заднего угла резания и радиуса закругления вершины резца) на максимальные температуры. В исследуемом диапазоне изменения значений параметров, максимальное влияние на температуры оказывает радиус закругления вершины резца. Работа выполнена при поддержке Гранта Президента РФ для молодых ученых – кандидатов наук МК–107.2017.8.

Ключевые слова: обработка резанием, конические зубчатые колеса, температура резания, робастное планирование эксперимента, дисперсионный анализ

Введение

При обработке ответственных рабочих поверхностей деталей машин понимание условий теплообразования и распределения тепла в инструменте, заготовке и стружке становится критично для уменьшения негативного влияния тепла на работоспособность инструмента и формирование эксплуатационных свойств изделий. Обработка конических зубчатых колес – одна из наиболее ответственных операций, требующая оптимизации геометрии зубьев колес, с целью достижения требуемых эксплуатационных характеристик передачи. В таких условиях важность приобретает задача рационального подбора конструктивных параметров инструмента (переднего и заднего углов, радиуса закругления вершины резца) для обеспечения требуемой точности и качества обрабатываемой поверхности, а также максимальной стойкости инструмента. Понимание степени влияния геометрии режущей части инструмента на тепловые явления, возникающие в инструменте и заготовке, имеет критическое значение для прогнозирования результатов обработки. Однако, в справочной и научной литературе отсутствуют данные, позволяющие прогнозировать стойкость специального зуборезного инструмента, точность и качество получаемого зубчатого профиля.

Исследования тепловых процессов в зоне механической обработки тесно связаны с проведением экспериментов по измерению температур на различных участках инструмента, детали, стружки или других элементов технологической системы. Такие эксперименты необходимы для разработки эмпирических моделей, а также для проверки и корректировки результатов математического моделирования.

На современном этапе исследований измерение температуры при резании может осуществляться несколькими методами [15]: метод использования искусственной и полусинтетической термопары; метод измерения по инфракрасному излучению; метод разрезного резца; метод структурных превращений. Метод измерения по инфракрасному излучению отличается простотой тарирования и высокая точность результатов.

Исследование направлено на решение задачи развития теории и технологии обработки конических зубчатых колес путем выявления зависимостей, связывающих конструктивные параметры режущей части инструмента (передний и задний углы резания,

радиус закругления вершины резца) с тепловыми процессами, возникающими в инструменте и заготовке (максимальными температурами).

Робастное планирование эксперимента

Основные аспекты методов робастного планирования эксперимента (методов Тагучи) опубликованы в работах Pease [8], Phadke [12], Ross [9] и Roy [10]. Вводные обзоры идей Тагучи о качестве и его улучшении можно найти в работах Barker [2], Kackar [4] и Noori [7]. В методологии Тагучи качество выражается через противоположное понятие – общие потери, обусловленные функциональной изменчивостью и неблагоприятными побочными эффектами, связанными с соответствующим продуктом. Таким образом, появляется возможность измерить качество в количестве потерь, чем больше потери качества, тем ниже само качество.

Ключевой принцип измерения качества: необходимо минимизировать изменчивость в ответ на факторы шума (находятся вне контроля оператора), максимизируя при этом изменчивость в ответ на управляющие факторы (устанавливаются или управляются оператором). Улучшение качества достигается установлением наилучших значений управляющих факторов, которые включены в производственный процесс для того, чтобы максимизировать отношение сигнал–шум (С/Ш).

Отношения С/Ш, описанные далее, были предложены Тагучи [11].

Меньше – лучше. Если необходимо минимизировать число появлений некоторых дефектов продукта, вычисляется следующее отношение С/Ш:

$$\text{Eta} = -10 * \log_{10} [(1/n) * (y_i^2)] \quad (1)$$

где Eta – является результирующим отношением С/Ш,

n – число наблюдений,

y – значение исследуемого параметра.

Множитель «–10» указывает на то, что это отношение измеряет величину, противоположную «плохому качеству». Максимизация этого отношения приводит к возрастанию качества.

Номинальное – наилучшее значение. Имеется фиксированное значение величины сигнала (номинальное значение), и дисперсия вокруг этого значения рассматривается как результат действия шумов:

$$\text{Eta} = 10 * \log_{10} (\text{Mean}^2 / \text{Variance}) \quad (2)$$

Такое отношение С/Ш может использоваться, когда идеальное качество совпадает с конкретным номинальным значением.

Больше – лучше. Здесь используется следующее отношение С/Ш:

$$\text{Eta} = -10 * \log_{10} [(1/n) * (1/y_i^2)] \quad (3)$$

Тагучи разработал систему планов, которые позволяют оценить максимальное число главных эффектов при помощи минимального числа опытов в эксперименте. Многие стандартные ортогональные массивы, предложенные Тагучи, идентичны подробно факторным двухуровневым планам экспериментов, планам Плакетта–Бермана, планам Бокса–Бенкена, латинским квадратам, греко–латинским квадратам и др. Большая часть робастных планов эквивалентна дисперсионному анализу для соответствующих отношений С/Ш, в котором игнорируются взаимодействия второго порядка и выше.

Исследования [1, 3, 14] показали, что использование методов робастного планирования эксперимента может значительно упростить процедуру оптимизации для определения параметров резания при операциях механической обработки. В результате, с практической точки зрения, метод Тагучи является наиболее подходящим для эмпирического определения оптимальных параметров резания [6]. Монтгомери [5] подчеркивает, что теория Тагучи в отношении процессов механической обработки имеет широкое применение.

Методика экспериментальных исследований

Планирование, обработка и анализ экспериментальных исследований были проведены по методикам робастного планирования эксперимента. Экспериментальные исследования были произведены в следующей последовательности:

- 1) определение допустимых интервалов значений геометрических параметров инструмента;
- 2) построение ортогональной матрицы значений параметров;
- 3) проведение экспериментов;
- 4) анализ полученных данных;
- 5) проведение подтверждающих экспериментов;
- 6) определение конечных результатов экспериментальных исследований.

Непосредственно для экспериментальных исследований была использована специальная резцовая головка, позволяющая моделировать исследуемый рез в заданных условиях, рисунке 1. Резцовая головка состоит из корпуса (1), в котором закреплены резцы (7, 8, 9) и проставки (2, 3). Точность расположения режущих лезвий относительно оси головки достигается перемещением резцов с помощью винтов (5, 6) в нужном направлении. Закрепление резцов в корпусе производится винтами (4).

Взаимное расположение режущих лезвий зуба инструмента в процессе резания воспроизводится с помощью резцов 7, 8, 9. Резец 7 ограничивает длины режущих лезвий головки в соответствии с моделируемым резом. Резец 8 предназначен для гарантии определенной геометрии срезаемого слоя металла резцом 9. Резец 9 моделирует исследуемый рез и затачивается соответствующим образом.

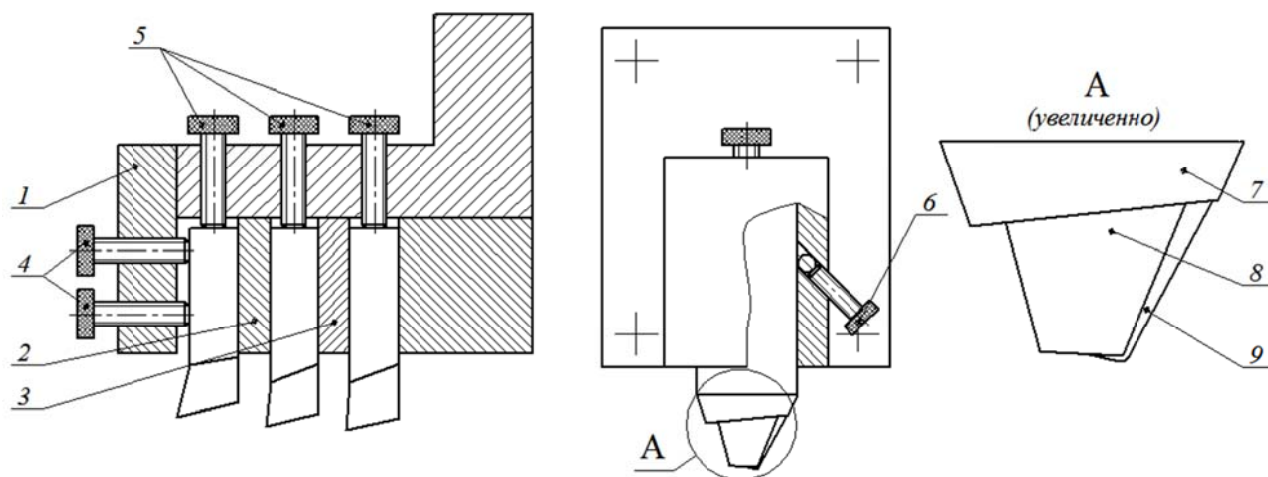


Рисунок 1 – Схема специальной резцовой головки

Использование специальной резцовой головки позволило моделировать процесс резания без необходимости изготовления специального инструмента для каждого отдельного эксперимента.

Эксперимент производился на поперечно-строгальном станке ГД-320. Для экспериментального исследования тепловых явлений был использован метод измерения по инфракрасному излучению, для измерений использовался тепловизор модели Testo 875-2.

Схема исследуемого реза приведена на рисунке 2, геометрические параметры исследуемого реза приведены в таблице 1.

Было проведено девять различных экспериментов с разными сочетаниями переднего угла резания, заднего угла резания и радиуса закругления вершины резца. Передний угол принимал значения: 6, 9 и 12 градусов, задний угол: 5, 10 и 15 градусов, радиуса закругления вершины резца: 0,1, 0,2 и 0,3 мм. Каждый эксперимент был проведен три раза, в качестве результата принималось среднее арифметическое значение.

В процессе проектирования эксперимента, в соответствии с методикой робастного планирования эксперимента, были выбраны три уровня геометрических параметров режущего инструмента, таблица 2.

В экспериментальном исследовании использовался ортогональный массив L9 с четырьмя столбцами и девятью строками. Этот массив имеет восемь степеней свободы и может быть использован при эксперименте с тремя независимыми параметрами. Каждому

геометрическому параметру присваивается столбец, доступны девять комбинаций геометрических параметров. План эксперимента с использованием ортогонального массива L9 представлен в таблице 3. Ортогональный массив L9 имеет четыре столбца, один столбец массива остается пустым [13].

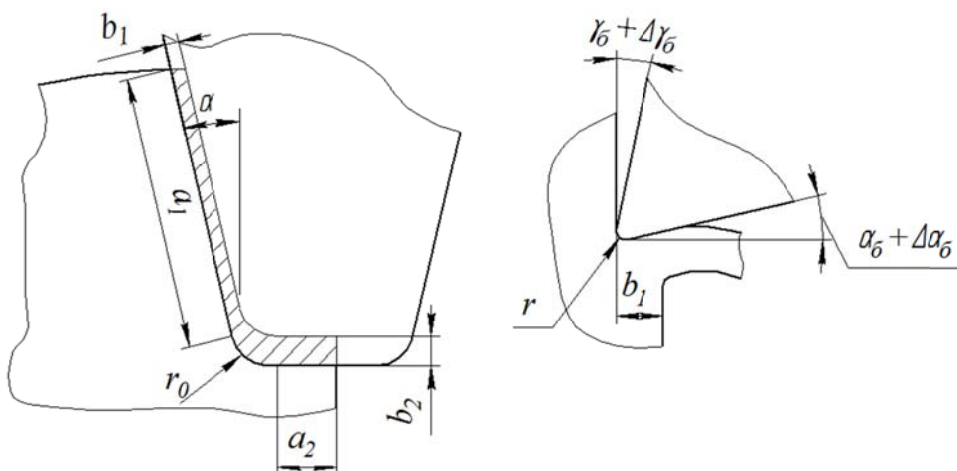


Рисунок 2 – Расчетная схема для экспериментального моделирования

Таблица 1 – Исходные данные для экспериментального моделирования

Параметр процесса резания	Значение
Толщина стружки, снимаемой боковой режущей кромкой b_1 , мм	0,04
Толщина стружки, снимаемой вершинной режущей кромкой b_2 , мм	0,06
Длина боковой режущей кромки a_1 , мм	2,9
Длина вершинной режущей кромки a_2 , мм	0,4
Профильный угол резца α , град	20
Радиус закругления режущих кромок r , мм	0,01
Скорость резания V , м/мин;	20
Материал инструмента	Карбид вольфрама
Материал заготовки	40X

Таблица 2 – Геометрические параметры инструмента и их уровни

Обозначение	Параметр	Единица измерения	Уровень 1	Уровень 2	Уровень 3
A	Передний угол	Град	6	9	12
B	Задний угол	Град	5	10	15
C	Радиус закругления	мм	0,1	0,2	0,3

Таблица 3 – План экспериментальных исследований

№ Эксперимента	A, передний угол	B, задний угол	C, Радиус закругления	D, ошибка
1	1	1	1	
2	1	2	2	
3	1	3	3	
4	2	1	2	
5	2	2	3	
6	2	3	1	
7	3	1	3	
8	3	2	1	
9	3	3	2	

Экспериментальные исследования и анализ полученных данных

В таблице 4 приведены результаты экспериментальных исследований максимальной температуры резания и расчетных значений отношения С/Ш. Расчетное отношение С/Ш определяется по формуле 1.

Таблица 4 – Результаты эксперимента по определению максимальной температуры и расчету отношения S/N

№ Эксперимента	A, передний угол	B, задний угол	C, Радиус скругления	Максимальная температура инструмента, С	S/N отношение
1	6	5	0,1	348	-50,83
2	6	10	0,2	345	-50,76
3	6	15	0,3	347	-50,81
4	9	5	0,2	350	-50,88
5	9	10	0,3	329	-50,34
6	9	15	0,1	362	-51,17
7	12	5	0,3	352	-50,93
8	12	10	0,1	366	-51,27
9	12	15	0,2	360	-51,13

Рассчитали среднее значение отношения С/Ш для переднего угла на уровнях 1, 2 и 3 путем усреднения отношения С/Ш для экспериментов 1–3, 4–6 и 7–9 соответственно. Аналогично рассчитали среднее значение отношения С/Ш для заднего угла и радиуса закругления. Результаты расчета занесли в таблицу 5.

Таблица 5 – Среднее значение отношения С/Ш для рассматриваемых уровней

Символ	Параметр	Уровень 1	Уровень 2	Уровень 3	Max–Min
A	Передний угол	-50,80	-50,80	-51,11	0,31
B	Задний угол	-50,88	-50,79	-51,04	0,25
C	Радиус закругления	-51,09	-50,92	-50,69	0,40

На рисунке 3 показаны графики изменения среднего значения отношения С/Ш в зависимости от геометрических параметров режущего инструмента, используемых в эксперименте. Минимальное значение среднего отношения С/Ш соответствует лучшему сочетанию исследуемых геометрических параметров.

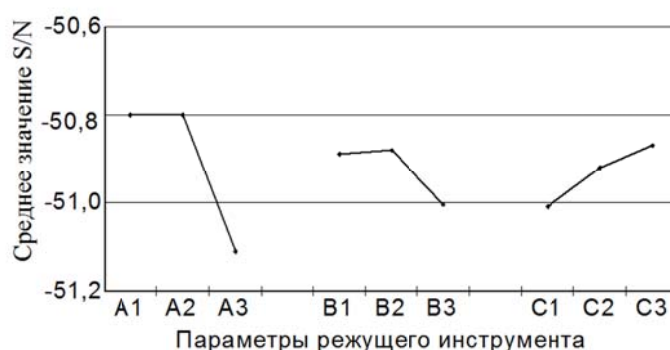


Рисунок 3 – График изменения среднего значения отношения С/Ш

График показывает, что сочетание A1B2C3 (минимальное значение переднего угла резания, среднее значение заднего угла резания и максимальное значение радиуса закругления) является оптимальным из условия максимального уменьшения температуры резания.

После выбора оптимального сочетания конструктивных параметров следующим этапом является прогнозирование максимальной температуры и экспериментальная проверка прогнозного значения. Для расчета прогнозного значения максимальной температуры использовали зависимость 4:

$$C/Ш_{\text{сред.опт.}} = C/Ш_{\text{сред}} + \sum_{i=1}^n (C/Ш_{i\text{сред}} - C/Ш_{\text{сред}}) \quad (4)$$

$C/Ш_{\text{сред.опт.}}$ – среднее значение отношения $C/Ш$ на оптимальном уровне,

$C/Ш_{\text{сред}}$ – общее среднее значение отношения $C/Ш$,

n – количество проектных параметров, которые влияют на характеристику качества.

В таблице 6 показано сравнение прогнозируемой максимальной температуры резания с результатами, полученными экспериментальным путем, наблюдается хорошее совпадение прогнозируемого и фактического значений, отличие составляет 0,9%.

Таблица 6 – Сравнение расчетных результатов с результатами эксперимента

Уровень	A1B2C3	A1B2C3
	Расчет	Эксперимент
Максимальная температура, С	334	339
C/Ш	-50,48	-50,6

В таблице 7 представлены результаты дисперсионного анализа.

Таблица 7 – Результаты дисперсионного анализа

	Сумма квадратов	Количество степеней свободы	Дисперсия	Критерий Шифера, F	Доверие	Вклад, %
A	0,1920	1	0,19201	11,4738	98,05%	35,53
B	0,0925	1	0,09249	5,5269	93,45%	17,11
C	0,2392	1	0,23923	14,2960	98,71%	44,26
Error	0,0837	5	0,01673	1	50,00%	3,10
Total	0,6074	8	0,54046			100

«Доверие» более 90% для каждого из исследуемых конструктивных параметров, свидетельствует о том, что каждый из них оказывает значимое влияние на максимальную температуру. В пределах исследуемого диапазона параметров, наибольшее влияние имеет значение радиус закругления (44,26%). Передний угол резания и задний угол резания оказывают меньшее влияние (35,53% и 17,11 % соответственно).

Выводы

По результатам выполнения экспериментальных исследований и анализа экспериментальных данных, можно сделать следующие выводы:

1. Использование робастного планирования эксперимента обеспечивает простую, систематическую и эффективную методологию оптимизации параметров обработки.

2. При выборе геометрических параметров инструмента можно рекомендовать выбирать минимальный передний угол, среднее значение заднего угла и максимальное значение радиуса закругления вершины для снижения максимальной температуры резания.

3. Отклонения между фактическим и прогнозируемым значением максимальной температуры резания незначительно.

Коллектив авторов выражает благодарность Совету по грантам Президента Российской Федерации поддержавшему исследование Грантом Президента РФ для молодых ученых – кандидатов наук МК–107.2017.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abuelnaga, A.M. Optimization methods for metal cutting //International Journal of Machine Tool Design and Research. – 1984. – Т. 24. – №. 1. – С. 11–18.;
2. Barker, T.B. Quality engineering by design: Taguchis philosophy //Quality Progress. – 1986. – Т. 19. – №. 12. – С. 32–42.
3. Chua, M. S. et al. Determination of optimal cutting conditions using design of experiments and optimization techniques //International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 1993. – Т. 33. – №. 2. – С. 297–305.
4. Kackar, R.N. Robust design: a cost-effective method for improving manufacturing processes //AT&T technical journal. – 1986. – Т. 65. – №. 2. – С. 39–50.
5. Montgomery, D.C. Statistical quality control. – New York: Wiley, 2009. – Т. 7.
6. Nian, C.Y. Optimization of turning operations with multiple performance characteristics //Journal of Materials Processing Technology. – 1999. – Т. 95. – №. 1–3. – С. 90–96.
7. Noori, H. The Taguchi methods: Achieving design and output quality //The Academy of Management Executive. – 1989. – Т. 3. – №. 4. – С. 322–326.
8. Peace, G.S. Taguchi methods: a hands-on approach. – Addison Wesley Publishing Company, 1993.
9. Ross, P.J. Taguchi Methods for Quality Engineering. – 1988.
10. Roy, R.K. A primer on the Taguchi method, competitive manufacturing series //New York. – 1990. – С. 7–80.
11. Taguchi, G., Taguchi methods: Orthogonal arrays and linear graphs: tools for quality engineering. – American Supplier Institute, 1987.
12. Taguchi, G. Quality engineering through design optimization //Quality Control, Robust Design, and the Taguchi Method. – Springer, Boston, MA, 1989. – С. 77–96.
13. Yang, W. H. Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method //Journal of materials processing technology. – 1998. – Т. 84. – №. 1–3. – С. 122–129.
14. Zhou, C. An integrated system for selecting optimum cutting speeds and tool replacement times //International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 1992. – Т. 32. – №. 5. – С. 695–707.
15. Кушнер, В.С. Теория стружкообразования. / В. С. Кушнер, О. Ю. Бургонова. – Омск: Изд-во ОмГТУ. – 2011. – 176 с.

Канатников Никита Владимирович
ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева» г. Орел
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Конструкторско-технологическое обеспечение
машиностроительных производств»
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95
Тел.: + 7 (4862) 419895
E-mail: NKanatnikov@yandex.ru

Гуков Артем Андреевич
ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева» г. Орел
магистр кафедры «Программная инженерия»
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95
тел.: + 7 (4862) 419895
e-mail: a.gukov123@gmail.com

Канатникова Полина Андреевна
ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева» г. Орел
магистр кафедры «Программная инженерия»
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95
тел.: + 7 (4862) 419895
e-mail: polinakanatnikova@yandex.ru

Пашментова Анна Сергеевна
ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева» г. Орел
аспирант кафедры «Конструкторско-технологическое
обеспечение машиностроительных производств»
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95
тел.: + 7 (4862) 419895
e-mail: adjourn@yandex.ru

N.V. KANATNIKOV, A.A. GUKOV, P.A. KANATNIKOVA, A.S. PASHMENTOVA

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF GEOMETRIC PARAMETERS OF THE CUTTING PART OF THE TOOL ON THE MAXIMUM TEMPERATURE THAT ARISES IN THE PROCESS OF PROCESSING OF THE BEVEL GEAR WHEELS

Abstract. *In this paper the results of an experimental study of the temperatures of bevel gears arising during cutting are presented. The method of measuring the temperature by infrared radiation was used. For the data*

processing methods of robust planning of the experiment and dispersion (ANOVA) analysis were used. The results showed the importance of changing the geometric parameters of the cutting tool (front and rear cutting angle and tip radius) to the maximum temperatures. In the investigated range of variation of the parameter values, the maximum influence on the temperature is exerted by the radius of curvature of the tip of the tool. This work was supported by the Presidential Grant for young scientists – Candidates of Sciences MK-107.2017.8.

Keywords: *cutting of metals, gear wheels, hybrid modeling, prognostic modeling, finite element method, design and technological preparation of production*

BIBLIOGRAPHY

1. Abuelnaga A. M., El-Dardiry M. A. Optimization methods for metal cutting //International Journal of Machine Tool Design and Research. – 1984. – T. 24. – №. 1. – С. 11–18.;
2. Barker T. B. Quality engineering by design: Taguchis philosophy //Quality Progress. – 1986. – T. 19. – №. 12. – С. 32–42.
3. Chua M. S. et al. Determination of optimal cutting conditions using design of experiments and optimization techniques //International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 1993. – T. 33. – №. 2. – С. 297–305.
4. Kackar R. N., Shoemaker A. C. Robust design: a cost-effective method for improving manufacturing processes //AT&T technical journal. – 1986. – T. 65. – №. 2. – С. 39–50.
5. Montgomery D. C. Statistical quality control. – New York: Wiley, 2009. – Т. 7.
6. Nian C. Y., Yang W. H., Tarn Y. S. Optimization of turning operations with multiple performance characteristics //Journal of Materials Processing Technology. – 1999. – Т. 95. – №. 1–3. – С. 90–96.
7. Noori H. The Taguchi methods: Achieving design and output quality //The Academy of Management Executive. – 1989. – Т. 3. – №. 4. – С. 322–326.
8. Peace G. S. Taguchi methods: a hands-on approach. – Addison Wesley Publishing Company, 1993.
9. Ross P. J. Taguchi Methods for Quality Engineering. – 1988.
10. Roy R. K. A primer on the Taguchi method, competitive manufacturing series //New York. – 1990. – С. 7–80.
11. Taguchi G., Konishi S. Taguchi methods: Orthogonal arrays and linear graphs: tools for quality engineering. – American Supplier Institute, 1987.
12. Taguchi G., Phadke M. S. Quality engineering through design optimization //Quality Control, Robust Design, and the Taguchi Method. – Springer, Boston, MA, 1989. – С. 77–96.
13. Yang W. H., Tarn Y. S. Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method //Journal of materials processing technology. – 1998. – Т. 84. – №. 1–3. – С. 122–129.
14. Zhou C., Wysk R. A. An integrated system for selecting optimum cutting speeds and tool replacement times //International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 1992. – Т. 32. – №. 5. – С. 695–707.
15. Kushner V. S., Burgonova O. Yu. Теория стружкообразования. / V. S. Kushner, O. Yu. Burgonova. – Omsk: OmGTU. – 2011. – 176 с.

Kanatnikov Nikita Vladimirovich

«OSU named after I.S. Turgenev» Orel
Cand. of Tech. Sc., associate professor
of the department «Design-technological maintenance
of mechanical engineering productions»,
302026, Orel, Komsomolskaya st., 95
Ph.: + 7 (4862) 419895
E-mail: NKanatnikov@yandex.ru

Kanatnikova Polina Andreevna

«OSU named after I.S. Turgenev» Orel
Master student of the department «Software
engineering»
302026, Orel, Komsomolskaya st., 95
Ph.: + 7 (4862) 419895
E-mail: polinakanatnikova@yandex.ru

Gukov Artem Andreevich

«OSU named after I.S. Turgenev» Orel
Master student of the department «Software engineering»
302026, Orel, Komsomolskaya st., 95
Ph.: + 7 (4862) 419895
E-mail: a.gukov123@gmail.com

Pashmentova Anna Sergeevna

«OSU named after I.S. Turgenev» Orel
PhD student of the department
«Design-technological maintenance of mechanical
engineering productions»
302026, Orel, Komsomolskaya st., 95
Ph.: + 7 (4862) 419895
E-mail: adjourn@yandex.ru

УДК 621.9.08 + 62–503.55

В.Б. САМОЙЛОВ, Т.А. ОСИПОВ

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ОБЪЕМНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ УЧЕБНОГО ГРАВИРОВАЛЬНО–ФРЕЗЕРНОГО СТАНКА МЕТОДАМИ ПРОГРАММНОЙ КОРРЕКЦИИ

Аннотация. В работе выполнен анализ возникновения погрешностей основных параметров объемной геометрической точности оборудования – плоскостности стола станка, прямолинейности движения портала шпиндельной бабки и точности ее позиционирования. Исследованы причины, вызывающие данные ошибки, проведены измерения указанных характеристик. Показано, что поддерживать работоспособное состояние объекта исследования возможно, как путем проведения стандартных мероприятий по реновации узлов трения в направляющих, так и программной коррекцией с использованием числового программного управления станком. Проведены эксперименты с применением оригинальных измерительных систем и соответствующего программного обеспечения в автоматизированном режиме, позволившие создать геометрический образ рабочего объема станка с картой погрешностей, которые возможно компенсировать программным способом при обработке детали на станке.

Ключевые слова: точность, объемная точность, программная коррекция.

Введение

Современное станкостроение практически исчерпало возможности по повышению точности выпускаемого оборудования, основываясь на повышении качества обработки несущих систем станка и их сборочных процессах. Дальнейшее ужесточение требований точности размеров, качества сопрягаемых поверхностей, их формы и взаимного расположения деталей станков становится экономически нецелесообразным. Кроме того, физические процессы, происходящие в системах станка, приводят к изменению пространственного положения инструмента и заготовки и, как следствие, к возникновению погрешности обработки. Принципиально важно, что эти процессы взаимосвязаны, и их синергетический эффект может быть непредсказуемым.

Так, изменение условий контакта сопряжений в направляющих под действием, например, сил резания, приводит к изменению не только контактной жесткости, но и условий износа, что может приводить к перераспределению контактных давлений, которые в свою очередь вызывают изменение условий теплопередачи в стыке. Тепловые потоки в корпусных деталях деформируют их, а при обработке заготовки эти детали непрерывно перемещаются в пространстве относительно друг друга, меняя условия теплообмена в несущей системе станка. В следствии этого, происходят относительные деформации деталей станков, меняются условия контакта в стыках, меняется его жесткость, и он воспринимает силы резания уже не в первоначальном состоянии. Такое термогеометрическое взаимодействие по замкнутому контуру необходимо рассматривать еще с учетом времени протекания не только тепловых процессов в системе, но и упругих деформаций под действием сил резания и гравитации, а также процессов старения и износа, что представляет собой очень трудоемкую задачу.

Для ее решения основные производители станочного оборудования вводят в системы управления станком обратные связи как по физическому состоянию отдельных узлов, так и по фактическому пространственному расположению инструмента и заготовки. Такие методы и средства повышения объемной точности металлорежущего оборудования являются дорогостоящими, но вынужденными мероприятиями. Очевидно, что применяемые алгоритмы коррекции являются не только достаточно сложными, но и составляют основу ноу-хау производителей систем ЧПУ станков [1 – 3].

В настоящей работе сделана попытка реализовать программную коррекцию взаимного расположения инструмента и заготовки учебного гравировально–фрезерного станка, что может быть востребовано в условиях импортозамещения при создании новых систем числового программного управления.

Основная часть

В качестве объекта исследования был выбран низкобюджетный станок модели Laseraxe 1015, поставляемый в виде полного набора комплектующих деталей для сборки [4]. Использование его как универсального конструктора позволяет студентам приобрести навыки самостоятельной сборки механических, электронных частей станка и программирования системы ЧПУ. Для расширения технологических возможностей кроме шпинделя, в который устанавливается фреза, возможно докупить полупроводниковый лазер мощностью до 2,5 Вт, с помощью которого наносится изображение на различные неметаллические поверхности. На рисунке 1 показан общий вид станка.



Рисунок 1 – Общий вид станка Laseraxe 1015

Мощность двигателя главного движения составляет 60 Вт с регулируемой частотой вращения шпинделя до 1000 об/мин. При использовании твердосплавного гравера диаметром 3 мм и углом заточки 35 градусов возможно обрабатывать за один проход глубиной до 0,2 мм заготовки из легких сплавов. Рабочий объем станка составляет 100x150x50 мм, заготовку на стол можно закреплять в тисках или прижимными планками. Вес станка 6,5 кг.

В комплект поставки входят детали несущей системы станка, выполненные частью из листового бакелита и станочного алюминиевого профиля, направляющие качения круглого поперечного профиля, приводы подач с шаговыми двигателями и передачами винт-гайка скольжения с механизмом выбора осевого зазора. Система управления представляет собой печатную плату Arduino Nano, построенную на микроконтроллере ATmega328, которая устанавливается на плату с тремя разъемами драйверов шаговых двигателей. Кроме подключения двигателей, эта плата позволяет управлять частотой вращения шпинделя или напряжением питания лазера мощностью до 7 Вт, имеет также разъемы для подключения питания, интерфейс микро USB и разъемы конечных выключателей, ограничивающие длины ходов. В качестве драйверов шаговых двигателей использованы микросхемы A4988 с максимальным током до 2 А и напряжением 12...24 В. Применены шаговые двигатели серии NEMA17 с количеством импульсов 200 на оборот, а драйверы позволяют делить угол поворота на 16, тогда при использовании многозаходного ходового винта с шагом 6 мм

теоретическая точность позиционирования может составлять около 2 мкм при заявленной производителем точности обработки в 0,1 мм.

На рисунке 2 показана схема сборки основания станка с цилиндрическими направляющими портала (3). Стол станка состоит из двух деталей алюминиевого станочного профиля 2080 (2), две детали профиля 2040 (1) придают жесткость конструкции, ходовой винт (4) приводится во вращение через муфту шаговым двигателем. По направляющим перемещается основание портала из профиля 2040 (5) с установленными картриджами направляющих качения.

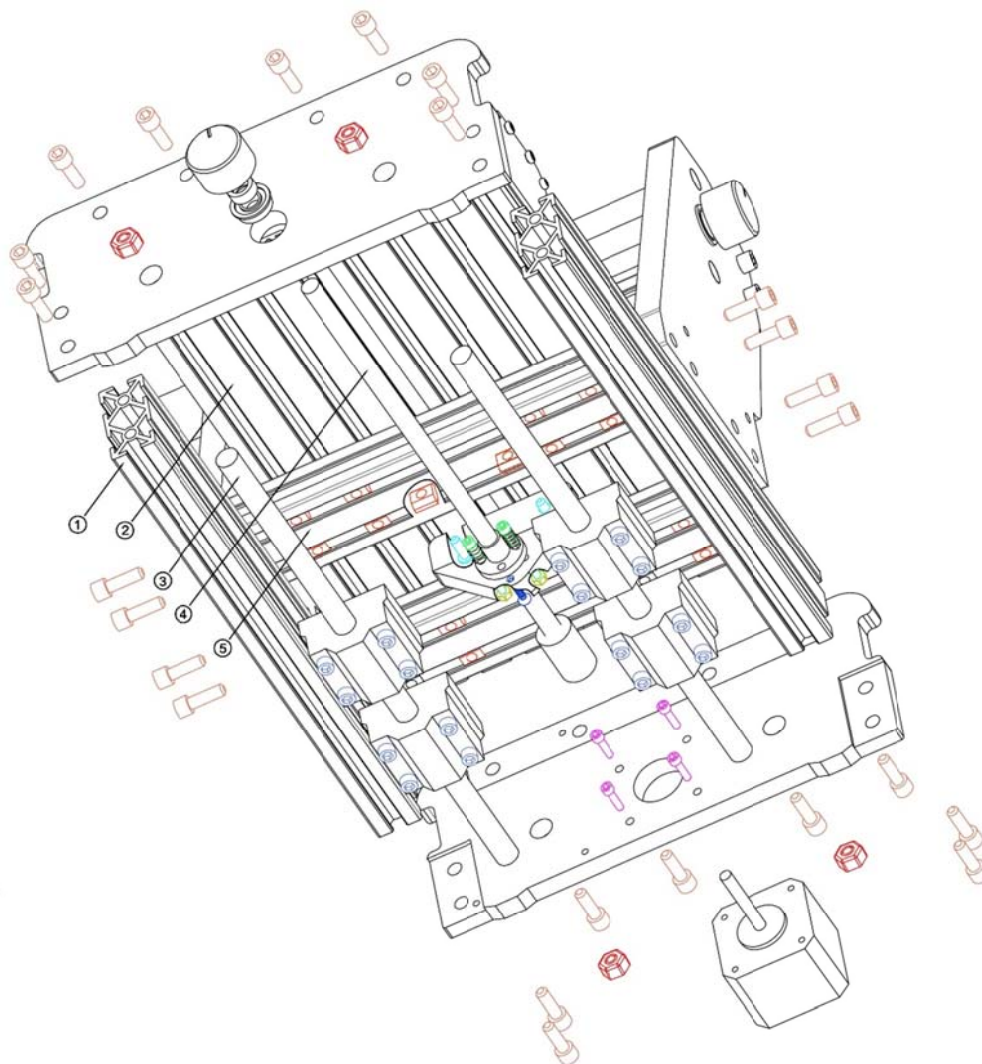


Рисунок 2 – Схема сборки основания

При сборке и последующей эксплуатации станка должны быть обеспечены параллельность осей направляющих плоскости стола. На точность движения портала будут так же влиять точность изготовления и сборки направляющих и расположение в пространстве ходового винта, выполненного по двухопорной схеме. Сборка конструкции осуществляется при помощи винтов М6, неравномерная затяжка которых может привести к упругим деформациям несущей системы станка. Поскольку сам стол состоит из двух деталей, возможно появление отклонений от плоскостности его рабочей поверхности.

За основу для проведения теоретических и экспериментальных исследований был взят комплект нормативно–технической документации международной организации по стандартизации ISO, описывающий затрагиваемый круг вопросов. Часть этих документов доступна в виде российских и межгосударственных стандартов на русском языке [5 – 7].

Наибольший интерес при фрезеровании заготовок по программе вызывает точность взаимного расположения вершины режущего инструмента и заготовки, закрепленной на столе

станка, поскольку в этом случае будут одновременно задействованы три координатные оси с их погрешностями. Реальные объемные погрешности в общем случае могут быть представлены в виде рисунка 3 [8].

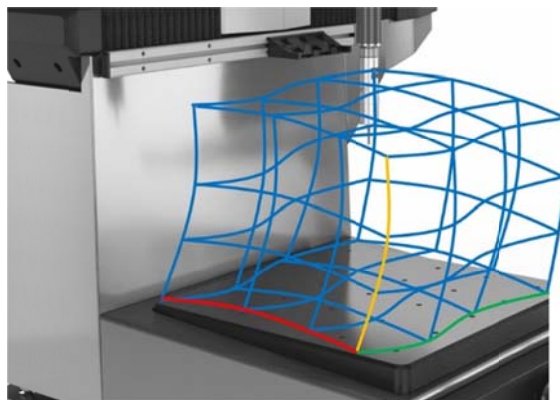


Рисунок 3 – Объемные погрешности фрезерного станка

Первоначально были проведены стандартные проверки станка на прямолинейность перемещений рабочих органов и точность позиционирования, которые показали соответствие оборудования заявленным характеристикам.

На следующем этапе исследования была проверена геометрическая точность перемещения портала шпиндельной бабки по двум координатам и построены таблицы отклонений от плоскостности при максимальном вылете шпинделя. Использовался цифровой индикатор фирмы SHANE диапазоном 0...12,7 мм и ценой деления 0,001 мм, установленный в переходном приспособлении на месте режущего инструмента. Измерения проводились в полуавтоматическом режиме с вводом данных с индикатора через интерфейс USB в таблицу MS Excel. Шаг измерений был выбран в соответствии с общепринятыми рекомендациями, результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Плоскостность стола

Протокол измерения объёмной геометрической точности фрезерно-гравировального станка - плоскостность стола										
Подача 100/70 мм/мин			Длина 145мм			Дата: 27.10.17		Фамилия: Осипов Т. А.		
Модель сатнка: Laseraxe 1015			Т. окр. среды: 25,0 гр. С			Отклонение от плоскостности: 308мкм				
Отклонение координаты Z, мм										
x \ y	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0	0.01	0.052	0.07	0.077	0.025	-0.058	-0.133	-0.19	-0.243
10	0.015	0.017	0.04	0.067	0.065	-0.025	-0.02	-0.088	-0.153	-0.22
20	0.005	0.012	0.035	0.05	0.05	0.03	-0.028	-0.068	-0.133	-0.2
30	-0.018	0.01	0.03	0.04	0.052	0.03	-0.01	-0.058	-0.115	-0.18
40	-0.02	-0.01	0.022	0.037	0.04	0.032	-0.01	-0.048	-0.103	-0.165
50	-0.073	-0.038	-0.015	0.015	0.027	0.02	-0.008	-0.048	-0.103	-0.158
60	-0.108	-0.055	-0.018	0.007	0.02	0.019	-0.015	-0.053	-0.093	-0.148
70	-0.105	-0.075	-0.025	0.002	0.02	0.017	-0.01	-0.04	-0.083	-0.133
80	-0.188	-0.1	-0.06	-0.02	-0.003	0.005	-0.015	-0.05	-0.083	-0.133
90	-0.168	-0.115	-0.065	-0.03	0	0.002	-0.015	-0.033	-0.078	-0.123
100	-0.185	-0.135	-0.08	-0.04	-0.015	0	-0.02	-0.038	-0.075	-0.11
110	-0.2	-0.15	-0.105	-0.063	-0.028	-0.015	-0.028	-0.04	-0.078	-0.11
120	-0.223	-0.175	-0.125	-0.075	-0.055	-0.03	-0.045	-0.078	-0.1	-0.133
130	-0.248	-0.2	-0.143	-0.105	-0.065	-0.05	-0.06	-0.085	-0.1	-0.14
140	-0.278	-0.233	-0.178	-0.133	-0.093	-0.073	-0.08	-0.085	-0.11	-0.135

Максимальное отклонение составило 0, 308 мм, что объясняется учебным назначением указанного оборудования и соответствующей квалификацией сборщиков.

На рисунке 4 показана форма поверхности стола станка, построенная по данным таблицы 1.

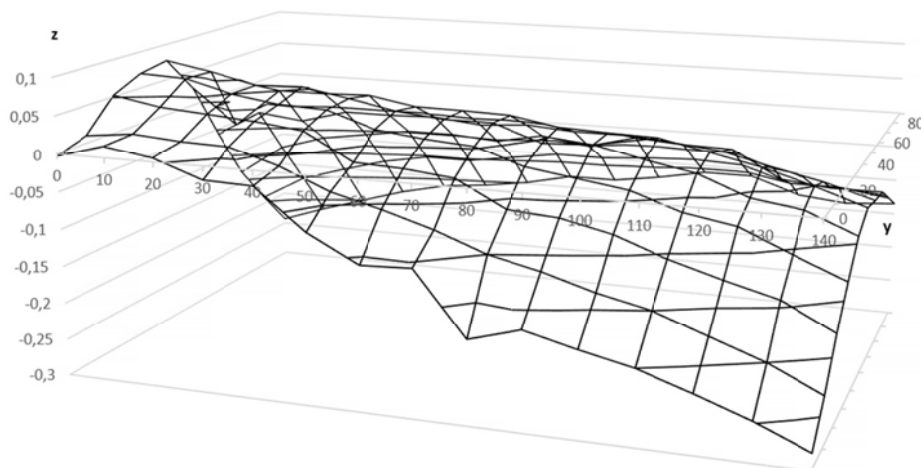


Рисунок 4 – Отклонения от плоскостности стола учебного гравировально-фрезерного станка

По мере приобретения опыта сборочных операций возможно снижение указанной погрешности до десятых долей мм. Дальнейшее повышение точности координатных перемещений станка должно быть связано с разработкой методов и средств программной коррекции. Теоретические основы этой работы заложены в [9].

Очевидно, что при работе системы числового программного управления станком задание отклонений от плоскостности в виде таблицы будет создавать неопределенность в промежуточных точках, поэтому была применена бикубическая интерполяция [10], как функция двух переменных, значения которой заданы на двумерной регулярной сетке.

Поверхность, полученная в результате такой интерполяции является гладкой функцией, в отличие от поверхностей, полученных в результате билинейной интерполяции или интерполяции методом ближайшего соседа. В случае бикубической интерполяции значение функции в искомой точке вычисляется через её значения в 16 соседних точках. Кроме того, такой подход позволяет сохранить достаточно большой шаг сетки измерений без снижения точности интерполяции, что существенно снижает необходимый объем измерительной информации. В дальнейшем, при работе станка по программе, вычисляемые по указанному алгоритму значения координаты Z , учитываются при задании необходимого вертикального перемещения шпинделя.

Следующей задачей была отработка методики автоматической компенсации неплоскостности стола станка с учетом возможностей системы ЧПУ. В качестве щупа используется вершина реального режущего инструмента, заготовка при этом должна быть электропроводной, поскольку будет фиксироваться электрический контакт инструмента и заготовки. Предварительно задаются размеры поля сканирования по координатам X и Y , количество точек замеров по этим координатам, смещение вершины щупа относительно инструмента (если необходимо), безопасная высота сканирования (принимается равную 0,4 мм), предельная длина хода щупа (принимается равной 0, если сканирование начинать из начала координат станка с самым низким местом). Так же задается скорость сканирования, обычно 100 мм/мин. Процесс сканирования можно наблюдать визуально в виде симуляции в программной среде GRBL. Формируется и сохраняется файл геометрического образа погрешностей станка для определенного вылета шпинделя. При последующей обработке заготовки по загружаемой программе значения отклонений от плоскостности в рассматриваемом сечении автоматически компенсируются.

Заключение

Для каждой программы обработки заготовки в зависимости от ее положения в рабочем объеме станка можно иметь свою корректирующую таблицу для интерполяции по предложенному алгоритму. Дополнительным применением указанного способа компенсации погрешностей является использования его при формировании управляющей программы для гравировки фасонной поверхности с учетом макрогеометрии заготовки. Так же возможно

использование одной программы для выполнения обработки поверхностей заготовок, имеющих заданную форму поверхности.

Результат работы программной коррекции по компенсации неплоскостности стола учебного гравировально-фрезерного станка представлен на рисунке 5.

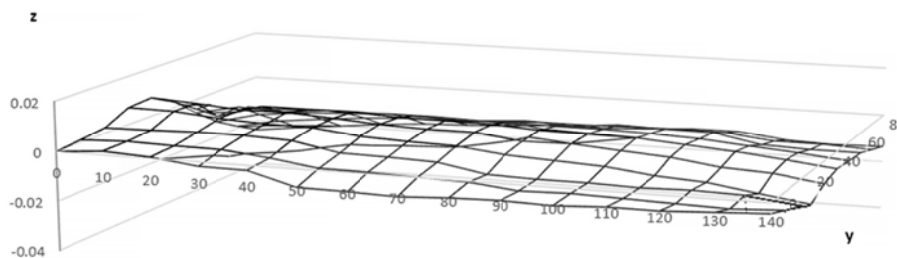


Рисунок 5 – Отклонения от плоскостности стола учебного гравировально-фрезерного станка при использовании программной коррекции

Результаты замеров показывают уменьшение погрешности практически в 10 раз.

В дальнейшем планируется распространить результаты работы на многокоординатные станки с ЧПУ, применяемые в современном машиностроительном производстве, основываясь на [11].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пушков, Р.Л. Проблемы компенсации погрешностей перемещений в современных системах ЧПУ / Р.Л. Пушков, С.В. Евстафиева, Е.В. Саламатин. // XII всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014 – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2014. С. 4645–4655.
2. Кольцов, А. Г. Методы компенсаций погрешностей станков с ЧПУ / А. Г. Кольцов // Омский научный вестник. – 2014. – № 1 (127). – С. 100–102.
3. U. Mutilba, Gomez Acedo La compensación volumétrica de los errores geométricos en máquinas-herramienta 13/06/2016 <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/158159-La-compensacion-volumetrica-de-los-errores-geometricos-en-maquinas-herramienta.html>
4. Laseraxe Mini 3 Axis USB Desktop CNC Router Wood PCB Milling Engraving Machine Kit [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://www.laseraxe-customize.com/online-store/Laseraxe-Mini-3-Axis-USB-Desktop-CNC-Router-Wood-PCB-Milling-Engraving-Machine-Kit-p105357133>. (27.05.2018)
5. ГОСТ 8–82. Станки металлорежущие. Общие требования к испытаниям на точность. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 14 с.
6. ГОСТ Р ИСО 230–1–2010. Испытания станков. Часть 1. Методы измерения геометрических параметров. – М.: Изд-во стандартов, 2011. – 90 с.
7. ISO/TR 230–9:2005 Test code for machine tools – Part 9: Estimation of measurement uncertainty for machine tool tests according to series ISO 230, basic equations s.32 // ISO copyright office. – 2005.
8. Accuracy for Machines [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://www.afm-tec.com/>. (10.05.2018)
9. Geometric error measurement and compensation of machines / H. Schwenke, W. Knapp, H. Haitjema et al. // An update. CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 57, 2008, P. 660–675
10. Бикубическая интерполяция [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/бикубическая_интерполяция. (3.06.2018)
11. ГОСТ ISO/TR 16907–2017 Станки металлорежущие. Коррекция геометрических погрешностей с помощью ЧПУ.

Самойлов Владимир Борисович

ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н.Э. Баумана», г. Москва
Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Технологии обработки материалов»
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1
Тел. 8(499)2670236, 8(903)5920661
E-mail: samoylov.v@bmsu.ru

Осипов Тимофей Алексеевич

ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н.Э. Баумана», г. Москва
Магистр кафедры
«Технологии обработки материалов»
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1
Тел. 8(499)2670236
E-mail: t.osipov@bk.ru

V.B. SAMOYLOV, T.A. OSIPOV

RENOVATION OF VOLUME GEOMETRIC ACCURACY OF EDUCATIONAL GRAVING–MILLING MACHINE BY METHODS OF SOFTWARE CORRECTION

Abstract. *The analysis of errors in the basic parameters of the geometric accuracy of the equipment – the flatness of the table of the machine, the straightness of the movement of the spindle head portal and the accuracy of its positioning are analyzed. The reasons causing these errors are investigated, and the indicated characteristics are measured. It is shown that it is possible to maintain the operational state of the research object both by carrying out standard measures for renovating the friction units in the guides and by program correction using the numerical program control of the machine. Experiments were carried out with the use of original measuring systems and corresponding software in an automated mode, which made it possible to create a geometric image of the working volume of the machine with a map of errors that can be compensated programmatically by machining a part on a machine.*

Keywords: *accuracy, volumetric accuracy, software correction.*

BIBLIOGRAPHY

1. Pushkov, R.L. Problemy kompensatsii pogreshnostej peremeshchenij v sovremennyh sistemah CHPU / R.L. Pushkov, S.V. Evstafieva, E.V. Salamatina. // XII vsrossijskoe soveshchanie po problemam upravleniya VSPU–2014 – M.: Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN. 2014. S. 4645–4655.
2. Kolcov A. G., Samojlov V.S. Metody kompensatsij pogreshnostej stankov s CHPU / A. G. Kolcov // Omskij nauchnyj vestnik. – 2014. – № 1 (127). – S. 100–102.
3. U. Mutilba, Acedo La compensación volumétrica de los errores geométricos en máquinas–herramienta 13/06/2016
4. Laseraxe Mini 3 Axis USB Desktop CNC Router Wood PCB Milling Engraving Machine Kit [EHlektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: URL: <https://www.laseraxe-customize.com/online-store/Laseraxe-Mini-3-Axis-USB-Desktop-CNC-Router-Wood-PCB-Milling-Engraving-Machine-Kit-p105357133>. (27.05.2018)
5. GOST 8–82. Stanki metallovezhushchie. Obshchie trebovaniya k ispytaniyam na tochnost. – M.: Izd–vo standartov, 1982. – 14 s.
6. GOST R ISO 230–1–2010. Ispytaniya stankov. CHast 1. Metody izmereniya geometricheskikh parametrov. – M.: Izd–vo standartov, 2011. – 90 s.
7. SO/TR 230–9:2005 Test code for machine tools – Part 9: Estimation of measurement uncertainty for machine tool tests according to series ISO 230, basic equations s.32 // ISO copyright office. – 2005.
8. Accuracy for Machines [EHlektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: URL: <http://www.afm-tec.com/>. (10.05.2018)
9. Geometric error measurement and compensation of machines / H. Schwenke, W. Knapp, H. Haitjema et al. // An update. CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 57, 2008, P. 660–675
10. Bikubicheskaya interpolyaciya [EHlektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/bikubicheskaya_interpolyaciya. (3.06.2018)
11. GOST ISO / TR 16907–2017 Stanki metallovezhushchiye. Korrektsiya geometricheskikh pogreshnostey s pomoshchyu CHPU.

Samoylov Vladimir Borisovich

Bauman Moscow State Technical University
Ph.D, Associate Professor of the department
«Materials processing technologies»
ul. Baumanskaya 2–ya, 5, Moscow
Tel. 8(499)2670236, 8(903)5920661
E–mail: samoylov.v@bmstu.ru

Osipov Timofei Alekseevich

Bauman Moscow State Technical University
Master of the department
«Materials processing technologies»
ul. Baumanskaya 2–ya, 5, Moscow
Tel. 8(499)2670236
E–mail: t.osipov@bk.ru

А.А. ШАТУЛЬСКИЙ, А.В. ГОЛУБЕНЦЕВ

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ОТВЕТСТВЕННЫХ ОТЛИВОК ГТУ НА ОСНОВЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ЛИТЬЯ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Аннотация. Установлено, что причиной усталостного разрушения рабочих лопаток ГТУ является неудовлетворительное состояние макро и микроструктуры, получаемой в процессе литья и термической обработки. Предложены методики выбора технологических параметров литья и режима термической обработки, позволяющие повысить усталостные свойства отливок.

Ключевые слова: никелевые жаропрочные сплавы, лопатки ГТУ, параметры литья, поверхностное модифицирование, термовременные параметры термической обработки

Введение

Как известно, ресурс газотурбинных установок в значительной степени зависит от надежности работы лопаток турбины, которые эксплуатируются в экстремальных условиях, подвергаясь воздействию высоких температур (800...1200 °С) и сочетаниям статических, циклических и вибрационных нагрузок. В этих условиях происходит постепенное накопление повреждений, приводящее к образованию трещин, их развитию, усталостному разрушению и преждевременному выходу из строя лопаток турбины, что обусловлено недостаточной усталостной прочностью применяемых жаропрочных никелевых литейных сплавов, которые являются сложными многокомпонентными гетерофазными системами. Известно, что механические свойства данной группы сплавов [1], такие как жаропрочность, пластичность, сопротивление усталости напрямую зависят от структуры и фазового состава, при этом существует большое количество технологических методов воздействия на процесс формирования структуры. Однако можно констатировать, что на текущий момент не выработано единого подхода по их применению для решения проблемы повышения усталостной прочности материала лопаток. Поэтому исследования для выявления возможностей различных технологических методов воздействия на структуру и свойства применительно к конкретному сплаву и к конкретной отливке и разработка на этой основе комплексной методики повышения усталостной прочности лопаток являются, несомненно, актуальными.

Цель работы повышение усталостных характеристик рабочих лопаток 1 ступени газотурбинной установки из никелевого жаропрочного сплава ЧС88 на основе совершенствования технологии литья, модифицирования расплава и термической обработки.

На первом этапе исследований было установлено, что встречается два типа разрушения: лопаток в процессе эксплуатации:

- *усталостное разрушение*, в частности на рисунке 1, а показан обрыв по хвостовому сечению (замку) рабочей лопатки 1 ступени, повлекший за собой веерообразное повреждение лопаток последующих ступеней.

- *термоусталостное разрушение* на рисунке 1, б показаны термоусталостные трещины в радиусе перехода пера к полке замка с переходом на полку замка.

Основная часть

Как было установлено, основными причинами их появления является неудовлетворительное состояние материала лопаток по микроструктуре и механическим свойствам, что заключается в наличие в теле отливки литейных пор и рыхлот, способствующих быстрому развитию и распространению усталостных трещин, другими словами, наличие в лопатке литейных дефектов, возникающих на стадии затвердевания отливки.

Для выявления закономерностей распределения подобных дефектов в теле отливки были рассмотрены и систематизированы результаты люминесцентного проникающего контроля (ЛЮМ) и рентгенографического (рентген) контроля отливок лопаток в количестве 150 штук. Установлено, что в материале лопаток в одних и тех же сечениях (на замках) присутствуют, недопустимые по ТУ литейные дефекты типа «усадочная пористость и рыхлота» (рисунок 2), что свидетельствует о несовершенстве принятого при изготовлении рабочих лопаток 1 ступени технологического процесса литья

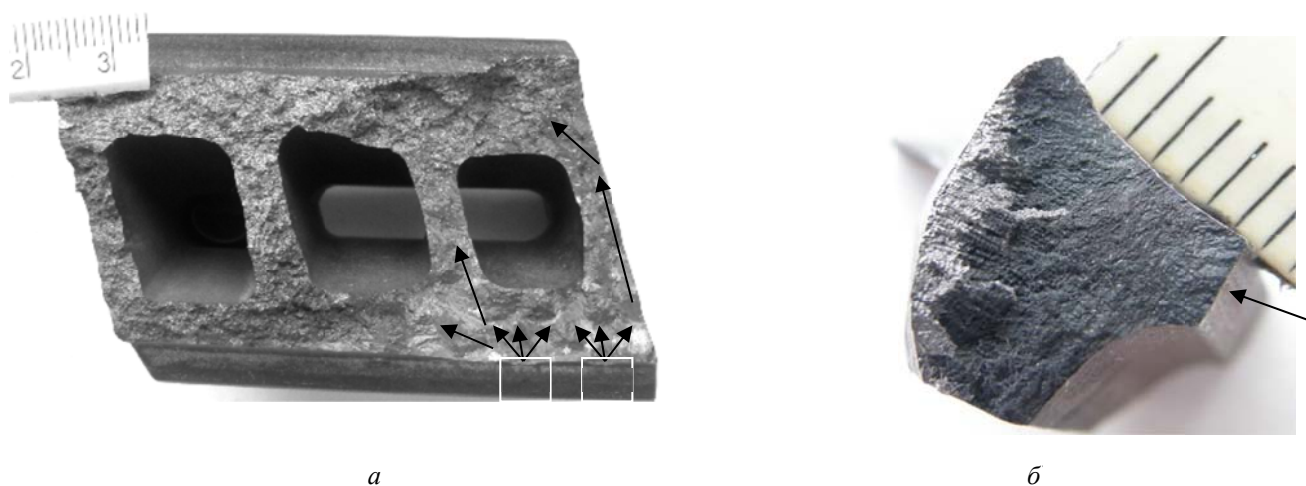


Рисунок 1 – Разрушение рабочих лопаток 1 ступени из сплава ЧС88У–ВИ (вид изломов):
а – усталостное; б – термоусталостное

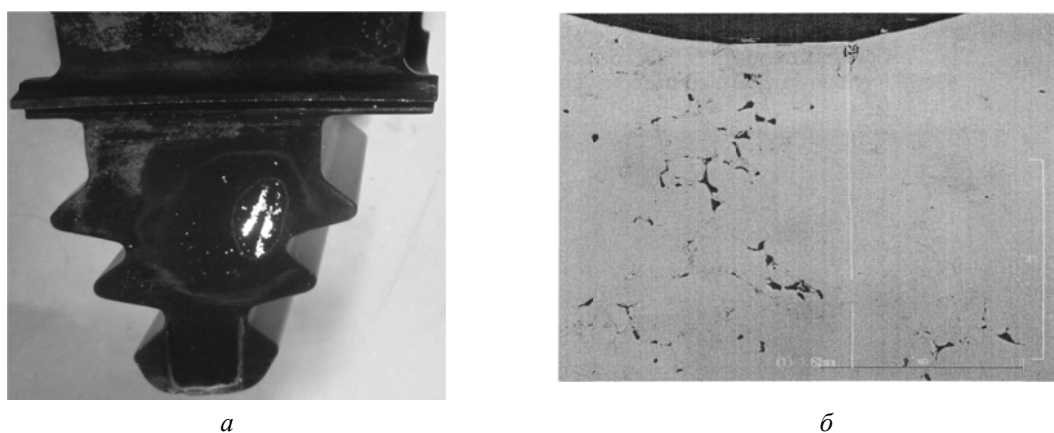


Рисунок 2 – Характерный вид литейных дефектов типа «усадочная пористость и рыхлота» в замках рабочих лопаток 1 ступени из сплава ЧС88У–ВИ:
а – при ЛЮМ контроле; б – в микроструктуре материала, увеличение $\times 100$

Для анализа причин возникновения усадочных дефектов в замках рабочих лопаток 1 ступени с использованием систем ProCAST и LVM FLOW было проведено моделирование процессов заполнения литейной формы и затвердевания отливки, изготавливаемых по серийной технологии. В результате было установлено (рисунок 3,а), что в период затвердевания замковых частей отливок лопаток условия «питания» ухудшаются, так как в зоне контакта кристаллизующихся слоев с расплавом, поступающим из прибыли, объем твердой фазы составляет уже более 20–40 %. В этих условиях увеличение доли твердой фазы приводит к тому, что в объеме отливки в изолированных зонах, отдаленных от потоков движения жидкого расплава, в условиях прекращения питания, образуются межкристаллические усадочные поры (рисунок 3, б).

Для обеспечения благоприятных условий кристаллизации путем поддержания металла в прибыли в жидком состоянии, а, следовательно, и положительного температурного

градиента в системе прибыль отливка в течение всего периода затвердевания была предложена схема обмотки блоков керамическим войлоком рисунок 4. Первоначально рассматривались несколько вариантов утепления литейной формы (5, 6, 7, 8, 10 слоев изоляции на прибыльной части и 1, 2 слоя на пере лопатки). По каждому варианту проводили моделирование процесса затвердевания отливки. В результате было установлено, что наиболее целесообразным оказался следующий вариант: на литниковой воронке восемь слоев, и один слой на пере. Результаты моделирования процесса затвердевания отливки с усовершенствованной схемой обмотки приведены на рисунке 4,б.

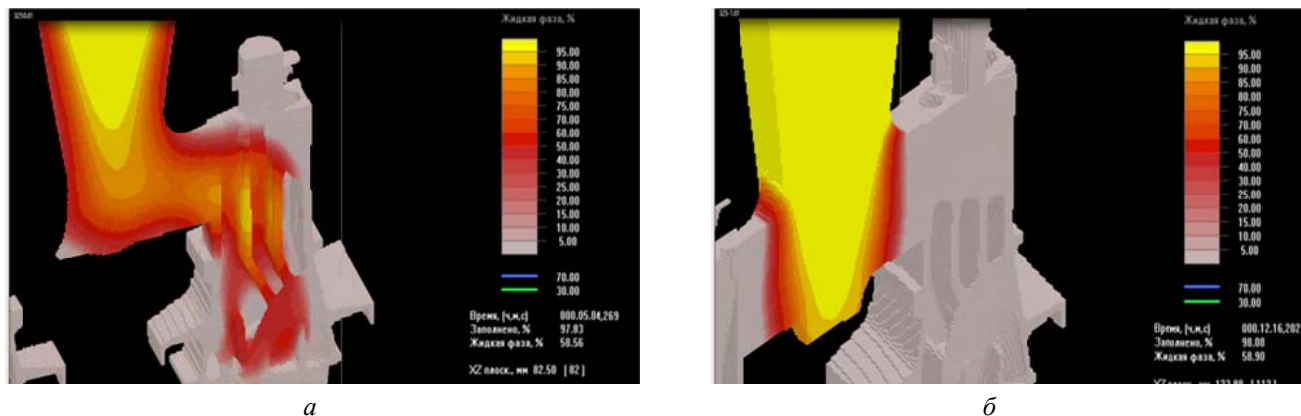


Рисунок 3– Температурные поля литейной формы во время затвердевания: а – при существующей технологии; б – при новой технологии



Рисунок 4 – Схема обмотки керамической формы войлоком

Исследования опытных рабочих лопаток 1 ступени из сплава ЧС88У–ВИ, отлитых с применением усовершенствованной схемой обмотки блоков подтвердили повышение металлургического качества отливок. При ЛЮМ контроле на замках лопаток недопустимых по ТУ свечений не выявлено.

Разработанная технология изготовления литейной формы с утеплителем была внедрена в технологический процесс изготовления крупногабаритных рабочих лопаток 1 ступени, что позволило устранить дефект по недопустимой «усадочной пористости и рыхлоты» в замковых частях отливок. Однако изменение условий затвердевания замковой части отливки привело к формированию там зоны столбчатых кристаллов (рисунок 5, а), что также могло привести к образованию усталостных трещин при эксплуатации.

Для устранения этой проблемы было проведено исследование по определению влияния поверхностного модифицирования на структуру и усталостные характеристики отливок «Лопатка рабочая 1 ступени» из никелевого жаропрочного сплава ЧС88У–ВИ.

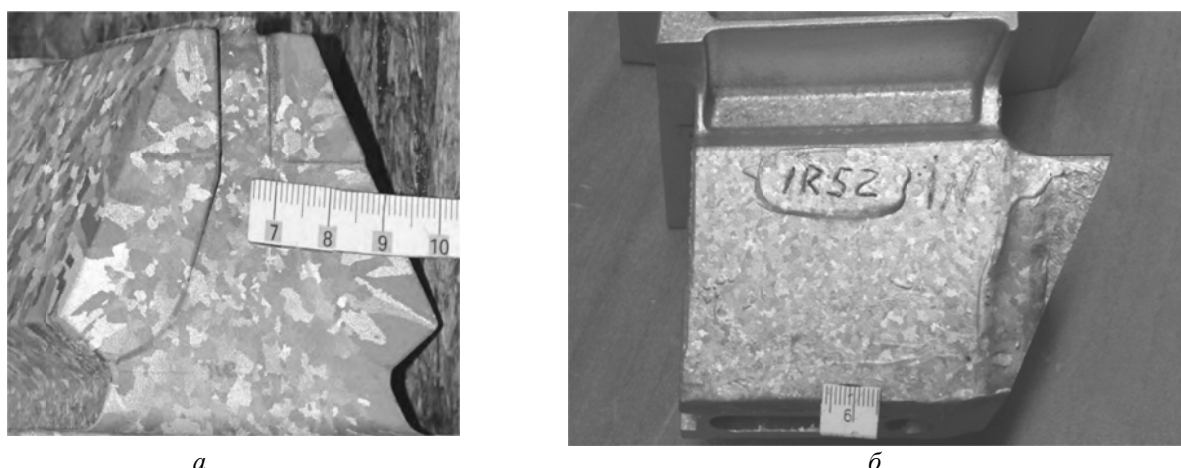


Рисунок 5 – Макроструктура замковой части отливки:
а – без модифицирования, б – с поверхностным модифицированием

Для экономии материала и исключения затрат, связанных с изготовлением натуральных крупногабаритных рабочих лопаток 1 ступени и для минимизации времени испытаний при определении усталостных характеристик сплава ЧС88У–ВИ исследования производили на специальных «экспериментальных» образцах, форма которых была разработана с учетом конструктивных особенностей рабочих лопаток, что в свою очередь позволило с большой долей вероятности аппроксимировать полученные результаты на натурные лопатки.

Экспериментальные образцы изготавливали из сплава ЧС88У–ВИ методом литья по выплавляемым моделям по серийной технологии. Всего было отлито две группы экспериментальных образцов. На образцах первой группы искусственные центры кристаллизации (модификаторы) вводились непосредственно в облицовочный (первый) слой литейной формы, в качестве модификатора использовали алюминат кобальта $\text{CoO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$. Экспериментально было установлено, что для получения однородной мелкозернистой макроструктуры образцов (рисунок 5, б) с размером зерна 0,4–1,5 мм необходимое количество модификатора составляет 12 % от веса наполнителя суспензии. Дальнейшее увеличение количества модификатора до 16%, 18%, 20% не приводит к заметным изменениям макроструктуры образцов, размеры зерен остаются практически на прежнем уровне 0,4 – 1,3 мм (относительно образцов отлитых с 12% количеством модификаторов) рисунок 6.

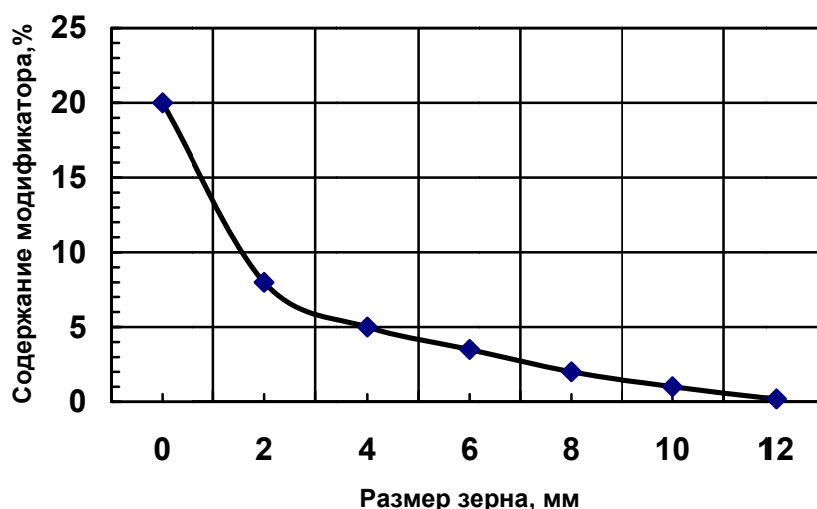


Рисунок 6 – Зависимость размеров зерна по макроструктуре образцов из сплава ЧС88У–ВИ от процентного содержания модификаторов

При изготовлении образцов второй группы процесс поверхностного модифицирования не использовался.

Анализ результатов проведенных исследований [2] показал, что технологический процесс поверхностного модифицирования устраняет разнотернистость сплава ЧС88У–ВИ, формирующуюся при литье по выплавляемым моделям в нагретые до температуры более 900 С° формы, и позволяет получать по всей высоте образцов с поверхности на глубину порядка (2 мм) однородную мелкозернистую макроструктуру с размером зерна 0,4–1,5 мм. Микроструктура сплава ЧС88У–ВИ при поверхностном модифицировании остается неизменной. Полученное изменение макроструктуры поверхностного слоя отливки позволило обеспечить повышение предела выносливости сплава ЧС88У–ВИ на 20 % с 290 МПа до 370 МПа. Также была выявлена тенденция повышения длительной прочности, пластичности, пределов прочности и текучести материала. Таким образом, задача повышения долговечности рабочих лопаток турбины ГТУ была решена.

Однако, было установлено, что применяемый в производственных условиях режим термической обработки (гомогенизации) не обеспечивает устранения дендритной ликвации в сплаве, возникающей в процессе литья и приводит к получению неоднородной структуры: в микроструктуре материала лопаток остаются области, в которых наблюдаются скоагулированные частицы γ' – фазы, что и вызывает нестабильность свойств.

С использованием метода микрорентгеноспектрального анализа на электронном микроскопе JEOL JSM–6610LV были определены значения концентраций элементов в осях дендритов и межосных пространствах и рассчитаны значения коэффициентов ликвации легирующих элементов в сплаве ЧС88У–ВИ в состоянии после литья и гомогенизации при различной продолжительности выдержек (таблица 1).

Таблица 1– Значения коэффициентов ликвации легирующих элементов

Образец	Место Анализа	Содержание элементов, % (по массе) и величина ($K_{л,i}$) соответствующего элемента					
		Ti	W	Al	Ni	Cr	Co
в литом состоянии	ось дендрита	3,71	6,33	4,09	61,64	16,43	8,48
	междендритное пространство (МП)	5,46	4,79	3,44	57,70	17,97	9,04
	($K_{л,i}$)	1,47	– 1,32	– 1,2	– 1,1	1,1	1,06
после гомогенизации 2 часа	ось дендрита	4,48	5,66	4,00	60,87	17,19	8,40
	МП	5,72	3,83	3,53	59,23	18,25	8,71
	($K_{л,i}$)	1,28	– 1,47	– 1,14	– 1,09	1,06	1,04
после гомогенизации 3 часа	ось дендрита	4,70	5,93	3,72	59,13	17,11	8,55
	МП	5,50	4,24	3,47	57,92	17,97	8,67
	($K_{л,i}$)	1,17	– 1,42	– 1,07	– 1,02	1,05	1,01
после гомогенизации 5 часов	ось дендрита	4,85	5,57	3,71	57,95	17,74	8,74
	МП	5,20	4,40	3,59	57,39	18,58	8,99
	($K_{л,i}$)	1,07	– 1,26	– 1,03	– 1,01	1,05	1,03
После гомогенизации 7 часов	ось дендрита	4,80	5,20	3,83	59,72	16,19	8,62
	МП	5,80	3,93	3,57	56,86	17,80	9,15
	($K_{л,i}$)	1,21	– 1,32	– 1,08	– 1,05	1,1	1,06

Используя решение 2–ого уравнения Фика, и допуская, что диффузия происходит из источника с ограниченным количеством вещества, была получена зависимость «время выдержки – температура гомогенизации – коэффициент ликвации в литом состоянии –

коэффициент диффузии» для определения оптимального времени выдержки при гомогенизации для никелевого жаропрочного сплава ЧС88У–ВИ.

$$\tau = \frac{0,1086 \cdot r^2}{\frac{D_0 \exp(-E)}{RT} \lg 1 K_i^{t_0}}$$

где D_0 – предэкспоненциальный множитель, м²/с;

E – энергия активации диффузии, Дж/моль;

T – температура гомогенизации, К;

$R = 8,31441$ – универсальная газовая постоянная, Дж/моль×К;

$K_i^{t_0}$ – коэффициент ликвации i -ого легирующего элемента в сплаве в литом состоянии;

r – расстояние от оси дендрита до междендритной области, мкм.

Значения предэкспоненциального множителя D_0 и энергия активации диффузии E были определены по известному уравнению Аррениуса, при этом в качестве базовых точек использовали распределение легирующих элементов в сплаве до и после высокотемпературной гомогенизации.

Адекватность полученной зависимости подтверждена экспериментально при проведении термической обработки отливок, обеспечивающих устранение ликвации легирующих элементов в сплаве ЧС88У. Доказано, что формула применима для любой температуры гомогенизации, поскольку в ней использован коэффициент диффузии, рассчитанный на основе предэкспоненциального множителя и энергии активации процесса, ограничения составляют – нижний предел температуры, который должен быть выше $T_{п.р.}$, и верхний предел, определяемый температурой оплавления эвтектической ($\gamma + \gamma'$) – фазы ($T_{эвт.}$).

На основании проведенных исследований с использованием полученной формулы был предложен [3] режим термической обработки крупногабаритных рабочих лопаток 1 ступени из сплава ЧС88У, обеспечивающий максимально возможное устранение степени дендритной ликвации в сплаве, получение удовлетворительной микроструктуры (рисунок 5) и механических свойств, соответствующих требованиям технических условий на лопатки.

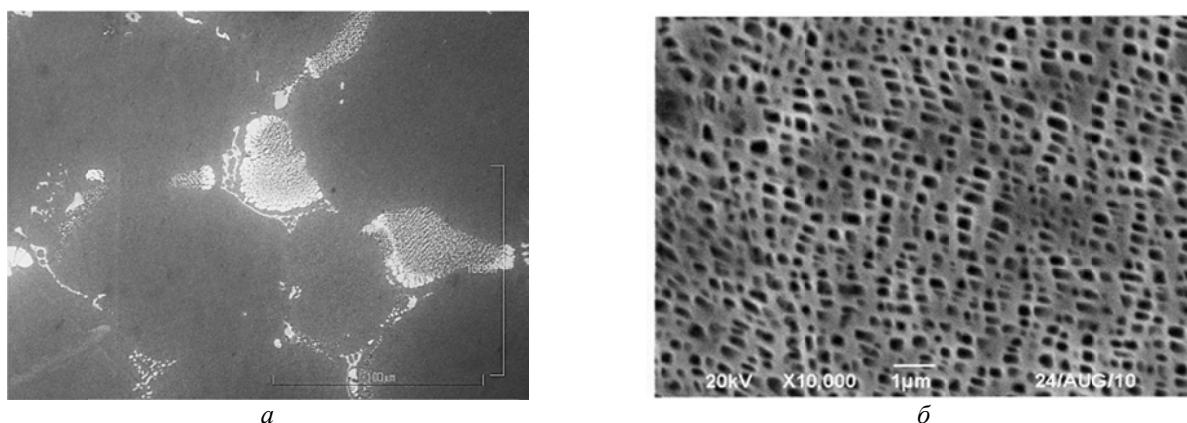


Рисунок 5– Микроструктура материала лопатки, после термической обработки по предложенному режиму: а) остаточные выделения эвтектической ($\gamma + \gamma'$)–фазы, огибающие границы зерен– увеличение 500; б) вид γ' –фазы в осях и межосных пространствах дендритов– увеличение $\times 10000$

Выводы:

1. Установлено, что основными причинами появления микротрещин, приводящих к усталостному разрушению лопаток являются: низкое металлургическое качество литых заготовок, а также неоднородная макро и микроструктура материала лопаток.

2. Выявлены закономерности изменения структуры поверхностного слоя отливки при модифицировании, позволившие предложить технологические режимы литья, обеспечивающие повышение усталостных характеристик сплава.

3. Определены значения коэффициентов ликвации и диффузии легирующих элементов сплава ЧС88У–ВИ, позволившие получить зависимость для выбора параметров гомогенизирующего отжига, обеспечивающего устранение дендритной ликвации после литья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шатульский, А.А. Проектирование литниковых систем для отливок из никелевых сплавов / Шатульский А.А., Изотов В.А. – М.:Спутник+. – 2016. – 124 с.
2. Шатульский, А.А. Повышение выносливости рабочих лопаток газотурбинных двигателей на основе совершенствования технологии литья / А.А. Шатульский, А.В. Голубенцев // Заготовительные производства в машиностроении. – 2015. – № 6. – С. 3–6.
3. Голубенцев, А.В. Совершенствование режимов термической обработки рабочих лопаток ГТД из сплава ЧС88 / Голубенцев А.В., Шатульский А.А // Вестник РГАТУ им. П.А. Соловьева. – №1 (32). – 2015. – С. 99–104.

Шатульский Александр Анатольевич

П. А. Соловьев, Рыбинский государственный авиационный технический университет
Доктор технических наук. Наук, профессор,
заведующий отделом материалов, литейного производства, сварки Рыбинск, Пушкина, 53
Телефон (4855) 280479
E-mail: shatulsky@rgata.ru

Голубенцев Артем Валерьевич

П. А. Соловьев, Рыбинский государственный авиационный технический университет
главный инженер, начальник отдела материаловедения, литейного производства, сварки
Рыбинск, Пушкина, 53
Телефон (4855) 280479
E-mail: shatulsky@rgata.ru

A.A. SHATULSKY, A.V. GOLUBENTSEV

IMPROVING THE RELIABILITY AND DURABILITY OF RESPONSIBLE CASTINGS OF THE GAS TURBINE BY ADVANCEMENT OF CASTING TECHNOLOGY AND HEAT TREATMENT

Abstract. *It is established that the cause of fatigue distress of the rotor blades of gas turbines is the poor state of macro and microstructure, which is obtained in the casting process and heat treatment. Proposed methods of choice of technological parameters of molding and a mode of thermal treatment are allowed to increase fatigue properties of castings.*

Keywords: *Nickel superalloys, the blades of the gas turbine, the casting parameters, surface modification, thermoremanence parameters of thermal treatment.*

BIBLIOGRAPHY

1. Shatulsky, A.A. Proektirovanie litnikovyykh system dlya otlivok iz nikel'evykh splavov / Shatulsky A.A., Izotov V.A //– Sputnik+/-2016. – 124 s.
2. Shatulsky, A.A. Povyshenie vynoslivosti rabochikh lopatok gazoturbinnnykh dvigateley na osnove sovershenstvovaniya tekhnologii litya / Shatulsky, A.A, Golubenzev A.V. // Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii.–2015.–№6.– S.3–6.
3. Golubenzev A.V. Sovershenstvovanie rezhimov termicheskoy obrabotki rabochikh lopatok GTD iz splava CHS88 / Golubenzev A.V, Shatulsky, A.A. // Vestnik RGATU im. P.A.Solovieva.–№1 (32).–2015.–S. 99–104.

Shatulsky Aleksandr Anatolevich

P.A.Soloviev, Rybinsk State Aviation Technical University
Doctor of Techn. Sciences, Full professor, Head of department of Material, Foundry, Welding Rybinsk, Pushkina, 53
Tel. (4855) 280479
E-mail: shatulsky@rgata.ru

Golubenzev Artem Valerievich

P.A.Soloviev, Rybinsk State Aviation Technical University
principal engineer, Head of department of Material, Foundry, Welding Rybinsk, Pushkina, 53
Tel. (4855) 280479
E-mail: shatulsky@rgata.ru

УДК 62–122.83

Ю.Л. РАПАЦКИЙ, В.Я. КОПП, В.М. ЛИПКА

ИССЛЕДОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ЛИНИИ СБОРКИ С ГИБКОЙ СТРУКТУРОЙ

Аннотация. *Исследуется проблема недостаточной надежности процесса автоматизированной сборки сложных изделий машиностроения (ИМ). Предлагается использовать гибкую структуру автоматизированной линии сборки, позволяющую повысить надежность и производительность сборочного процесса. Для оценки эффективности автоматизированной сборочной линии с гибкой структурой построена полумарковская математическая модель. Полученные результаты могут быть применены для повышения производительности автоматизированных линий сборки сложных ИМ путем введения структурной гибкости.*

Ключевые слова: *автоматизированная сборка, надежность сборочного процесса, автоматизированная линия сборки, резьбовое соединение*

Введение

Для автоматизированной сборки сложных изделий машиностроения (автомобильные, тракторные, судовые, авиационные двигатели, компрессоры, редукторы, гидронасосы, холодильные машины и др.) распространенной проблемой является недостаточная надежность сборочного процесса, осуществляемого на автоматизированных линиях, что приводит к снижению эффективности производства [1, 2, 3, 4, 5]. Сборочное производство характеризуется большой сложностью, высокой стохастичностью и недостаточной надежностью, что в современных условиях неизбежно приводит к необходимости изыскания резервов для повышения его эффективности [6, 7]. Одним из наиболее значительных резервов является снижение потерь от недовыпуска продукции, связанных с выявлением брака в ИМ в процессе сборки и в ходе приемосдаточных испытаний [3]. В литературных источниках [1, 3, 4, 5, 6, 7] и других, посвященных автоматизированным линиям сборки (АЛС), приводятся их математические модели, но все они ориентированы на специфику исследуемых объектов определенного класса и имеют ограниченную область применимости. Разработка универсальной математической модели для различных АЛС практически невозможна, ввиду существенных различий структуры и характера взаимного влияния отдельных единиц основного и вспомогательного технологического оборудования в процессе функционирования линий.

По результатам экспериментальных исследований, выполненных на ряде машиностроительных предприятий и анализа процесса функционирования АЛС, можно сделать вывод, что наиболее распространенными причинами отказов в ходе сборочного процесса являются низкое качество деталей, входящих в состав резьбовых соединений (РС) и несовершенная технология их сборки. [1, 2, 3] В качестве объекта для исследований, рассмотрим автоматизированную линию сборки (АЛС) в сборочном цехе завода, выпускающего силовые агрегаты для легковых автомобилей, где были выполнены экспериментальное исследование и математическое моделирование процесса её функционирования.

Цель исследований – синтез рациональной структуры АЛС, позволяющей без замены технологического оборудования повысить надежность сборочного процесса и фактическую производительность линии.

Основная часть

Исходная структура АЛС [3,7] представлена на рисунке 1. Основные характеристики исследуемой АЛС: общая длина 180 м, ширина 5 м, проектная производительность 45 изделий в час, что соответствует 150 000 шт. в год, при двухсменной работе, либо 75 000 шт. в год при односменной. АЛС состоит из семи сборочных технологических ячеек (ТЯ), на каждой из которых предусмотрен выборочный пооперационный технический контроль. Конструктивно каждая ТЯ представляет собой автоматизированную линию, входящую в состав общей транспортно–накопительной системы АЛС. Гибкая однопоточная связь между

всеми ТЯ осуществляется посредством шести межоперационных накопителей (Н) $H_2 \dots H_7$, что обеспечивает асинхронный режим работы технологического оборудования. Наличие накопителей в структуре АЛС придает ей гибкость живучести (резервирования), что позволяет частично либо полностью скомпенсировать потери производительности из-за отказов основного технологического оборудования. [7] На каждой ТЯ выполняется не менее двух технологических операций, что позволяет сократить время на межоперационное транспортирование.

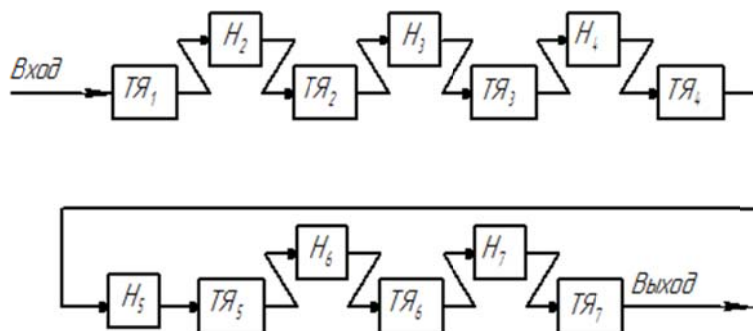


Рисунок 1 – Исходная структура однопоточной гибкой АЛС ИМ

На ТЯ₁ осуществляется комплектование и предварительная сборка ИМ, на ТЯ₂ мойка и сушка, на ТЯ₃ – контроль герметичности и отбраковка негодных корпусных деталей, на ТЯ₄ – сборка блока цилиндров (БЦ) с коленчатым валом, на ТЯ₅ – сборка БЦ с шатунно-поршневой группой, на ТЯ₆ – окончательная сборка, регулировка и комплектование изделия; на ТЯ₇ – установка коробки передач и стартера. [3]

Основные материальные потоки организованы в АЛС по вертикально-замкнутой двухуровневой схеме: по верхнему уровню на ТЯ подаются приспособления – спутники с собираемыми ИМ, а по нижнему происходит возврат пустых спутников к началу линии. Перемещение базовых деталей – блоков цилиндров осуществляется порталным манипулятором. Структура и состав транспортно – накопительной и загрузочной системы однопоточной АЛС позволяют, при необходимости, локально менять расположение имеющихся ТЯ и встраивать новое оборудование, что обеспечивает её структурно-организационную и технологическую гибкость. Управление АЛС осуществляется с помощью промышленной компьютерной сети (ПКС), построенной на базе центрального сервера, восьми рабочих станций, программируемых контроллеров, а также панелей оператора фирмы “Siemens” (Германия). Данные по отдельным экземплярам и партиям продукции, выпущенной на АЛС, с учетом вариантов конструктивных исполнений отдельных ИМ и информация о выявленных случаях брака и отказах оборудования регистрируются, накапливаются и хранятся в памяти ПКС. [3]

В результате обработки результатов производственных экспериментов, проведенных на АЛС, получены значения интенсивностей потоков отказов, восстановлений и средних величин заполнения накопителей, приведенные в таблице 1.[3,7] Значение коэффициента готовности АЛС за период эксперимента (суммарно более 12000 часов работы линии, исключая простои по организационным причинам и плановые остановки для профилактики) составило 0,902, средняя производительность 40,59 изделий в час.

В ходе производственного эксперимента было предложено организовать материальные потоки на АЛС по схеме, представленной на рисунке 2, для повышения надежности сборочного процесса. Следует отметить, что такое изменение организации материальных потоков технически возможно не на всех АЛС, что сужает сферу применимости предлагаемых организационно-технических решений. Вместе с тем, предлагаемая структура, по данным экспериментов и моделирования, является одним из наиболее эффективных средств повышения производительности АЛС.

Таблица 1 – Значения интенсивностей потоков отказов, восстановлений и средних величин заполнения накопителей по результатам производственного эксперимента на АЛС

Устройство	Интенсивность отказов	Интенсивность восстановлений	Время обработки, ч	Емкость накопителя	Длина очереди
Ячейка $ТЯ_1$	0,02	2,10	0,02	–	–
Накопитель H_2	0,001	99,00	–	10	5,984
ячейка $ТЯ_2$	0,01	1,43	0,0192	–	–
Накопитель H_3	0,001	99,00	–	10	5,923
ячейка $ТЯ_3$	0,02	1,47	0,0183	–	–
Накопитель H_4	0,001	99,00	–	15	8,817
ячейка $ТЯ_4$	0,02	1,58	0,02	–	–
Накопитель H_5	0,03	99,00	–	20	11,046
ячейка $ТЯ_5$	0,03	2,02	0,0203	–	–
Накопитель H_6	0,02	99,00	–	28	11,861
ячейка $ТЯ_6$	0,04	1,96	0,0203	–	–
Накопитель H_7	0,02	99,00	–	20	4,724
ячейка $ТЯ_7$	0,03	2,21	0,0192	–	–

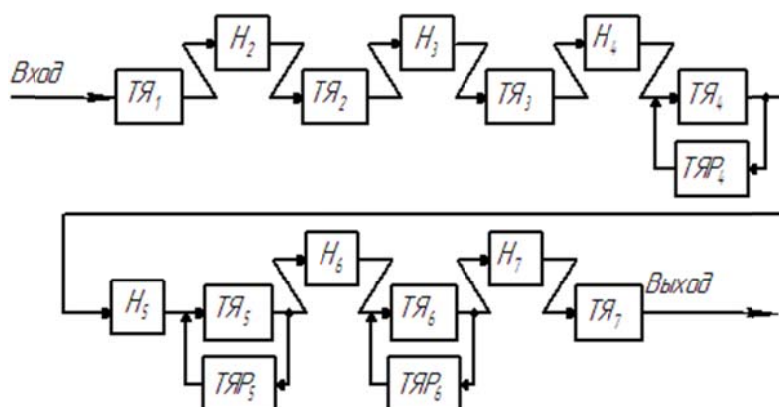


Рисунок 2 – Структура однопоточной ГАЛ сборки ИМ с тремя ремонтными ТЯ: ТЯР₄...ТЯР₆

В процессе сборки ИМ на отдельных операциях может возникать потребность возврата до 10–15% от общего количества ИМ после промежуточного контроля для частичной разборки и устранения выявленного брака РС. Например, если на исследуемой АЛС при установке в ТЯ₆ головки цилиндров на блок цилиндров, в процессе затяжки РС, будет выявлен недопустимо малый момент затяжки хотя бы одного из болтов, либо из-за возникновения натяга между резьбовыми деталями (РД) затяжка будет автоматически остановлена до окончания свинчивания, либо возникнет какой-либо иной дефект в собираемом соединении, ИМ целесообразно снять с АЛС для исправления брака. Аналогичные ситуации могут возникать при затяжке других ответственных РС: на ТЯ₅ при монтаже крышек коренных подшипников коленчатого вала и нижних головок шатунов, на ТЯ₇ в процессе установки маховика и т.д. Представляется наиболее рациональным решением для исправления брака в отдельных единицах продукции не останавливать АЛС полностью, ритм работы которой соответствует выпуску одного ИМ в среднем за 1,35 мин, а задействовать часть объема каждого из накопителей H_4 , H_5 , H_6 в качестве ремонтных технологических ячеек (ТЯР₄, ТЯР₅, ТЯР₆ на рисунке 2) для обеспечения возможности оперативного исправления брака в ИМ, снятых с выхода соответствующих ячеек – ТЯ₄, ТЯ₅, ТЯ₆.

Для количественной оценки эффективности предложенной организации материальных потоков на АЛС наиболее целесообразно использование метода построения итерационных полумарковских математических моделей, рассмотренного в [3, 5, 6, 7, 8] и других публикациях. В [6, 7, 8] предложены полумарковские математические модели, позволяющие описать процесс функционирования АЛС, так называемого, нормального вида (т.е. между любыми двумя ТЯ расположен один накопитель Н), показанной на рисунке 2, а также имеющей структуру с ремонтными ячейками ТЯР, установленными параллельно каждой из основных ТЯ. В моделях [7, 8] не предусмотрено ограничение на количество m возвратов объектов производства на ТЯР и затем обратно на ТЯ, что для практических целей нецелесообразно, а для условий завода, на котором проводился эксперимент, предлагается ограничить m не более 3. На различных предприятиях, с учетом специфики выпускаемой продукции, m может иметь другие значения. Кроме того, в реальных производственных условиях нет необходимости применять ТЯР для каждой из основных ТЯ. Таким образом, необходима математическая модель для описания АЛС предлагаемой структуры, показанной на рисунке 2. Для моделирования АЛС, показанной на рисунке 2, целесообразно построить математическую модель на основе методик, предложенных в [5, 6, 7], но с учетом специфики исследуемого объекта.

Функции распределения (ФР) случайных величин (СВ) $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_3$, соответствующих временам обслуживания на ячейках ТЯ₁, ТЯ₂, ..., ТЯ _{n} , обозначим $F_1(t), F_2(t), \dots, F_n(t)$. Вероятность выхода годной продукции с последней ячейки ТЯ _{n} обозначим P .

Заменим все ячейки, охваченные обратными связями, т.е. ТЯР₄, ТЯР₅, ТЯР₆, эквивалентными элементами, для которых ФР времени обслуживания продукции $K_k(t)$, ($k = \overline{1, n}$) [3, 7].

Поскольку длительности повторного обслуживания ИМ на ТЯР₄, ТЯР₅, ТЯР₆ отличаются друг от друга, то для их эквивалентной замены применим выражение:

$$K_1(t) = pF(t) + p \sum_{m=1}^{\infty} (1-p)^m F^{(*)m}(t)$$

Тогда ФР времени $\varphi_n(t)$ между событиями в выходном потоке АЛС имеет вид:

$$\begin{aligned} \overline{\varphi_n(t)} = & \sum_{k=1}^n \overline{K_k^{\Sigma}(t)} - \sum_{1 \leq k_1 < k_2 \leq n} \overline{K_{k_1}^{\Sigma}(t)} \overline{K_{k_2}^{\Sigma}(t)} + \\ & + \sum_{1 \leq k_1 < k_2 < k_3 \leq n} \overline{K_{k_1}^{\Sigma}(t)} \overline{K_{k_2}^{\Sigma}(t)} \overline{K_{k_3}^{\Sigma}(t)} - \dots + (-1)^{n-1} \overline{K_1^{\Sigma}(t)} \overline{K_2^{\Sigma}(t)} \dots \overline{K_n^{\Sigma}(t)}. \end{aligned}$$

Причем $\overline{K_k^{\Sigma}(t)} = 1 - \overline{K_k(t)}$, $\overline{\varphi(t)} = 1 - \overline{\varphi(t)}$.

В предлагаемой структуре АЛС, когда число повторных обслуживаний на ТЯ _{k} ограничено и не может превышать значения $m = 3$, а времена повторных обслуживаний различны и описываются ФР $F_k^g(t)$, где $k = \overline{1, n}$ – номер ТЯ в АЛС, а $g = \overline{1, m}$ – номер повторного обслуживания. [3, 7, 8]

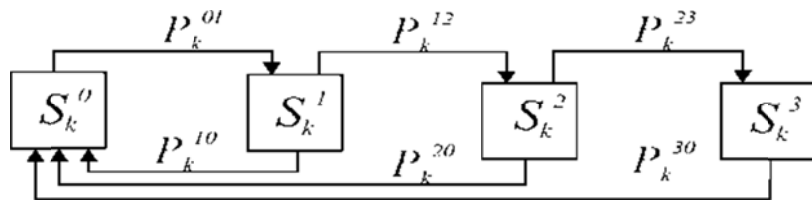
Для того чтобы определить ФР времени, затрачиваемого на 1, 2 либо 3 повторных обслуживания, необходимо построить полумарковский процесс в дискретном фазовом пространстве с использованием графа состояний, представленного на рисунке 3.

Считаем, что процесс марковского восстановления [6,7] задается двухкомпонентной цепью Маркова ($S_n, \theta_n; n \geq 0$), с вероятностями переходов:

$$P\{S_{n+1} = r, \theta_{n+1} \leq t / S_n = k\} = Q_{kr}(t).$$

В данном случае компоненты S_n и θ_n условно независимы, то есть выполняется равенство

$$P\{S_{n+1} = r, \theta_{n+1} \leq t / S_n = k\} = P\{S_{n+1} = r / S_n = k\} \cdot P\{\theta_{n+1} \leq t / S_n = k\}.$$


 Рисунок 3 – Граф состояний k -й ТЯ при количестве повторных обслуживаний $0 \leq m \leq 3$

Тогда компоненты полумарковской матрицы для дискретного фазового пространства состояний $E = \overline{(1, n)}$ равны:

$$Q_{kr}(t) = P_{kr} G_k(t), \quad k, r \in E,$$

где $\sum_{r \in E} Q_{kr}(t) = P\{\theta_{n+1} \leq t / S_n = k\} = G_k(t), k \in E$.

Определим стационарное распределение $\pi = (\pi_k^g; g \in E)$ полумарковский процесс (ПМП) в фазовом пространстве E по формулам, приведенным в [7]:

$$\pi_k^g = \rho_k^g M_k^g / M; \quad (1)$$

$$M = \sum_{g \in E} \rho_k^g M_k^g, \quad g \in E,$$

где $\rho = (\rho_k^g; g \in E)$ – стационарное распределение вложенной цепи Маркова;

M_k^g – средние времена пребывания в состояниях полумарковского процесс ИМ.

Величины ρ_k^g определяются решением системы уравнений (1):

$$\rho_k^g = \sum_{r \in E} \rho_r P_{rk}, \quad (2)$$

причем $\sum_g \rho_k^g = 1$.

Состояния графа:

S_k^0 – мгновенное состояние, соответствующее моменту окончания обслуживания и выдачи продукции;

S_k^1 – первое обслуживание с ФР $F_k^1(t)$ и математическим ожиданием M_k^1 ;

S_k^2 – второе обслуживание с ФР $F_k^2(t)$ и математическим ожиданием M_k^2 ;

S_k^3 – третье обслуживание с ФР $F_k^3(t)$ и математическим ожиданием M_k^3 .

Составим на основе (2) систему уравнений для определения $\rho_k^g, g = \overline{(0, m)}$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_k^0 = \rho_k^1 \cdot P_k^{10} + \rho_k^2 \cdot P_k^{20} + \rho_k^3 \cdot P_k^{30} + \dots \\ + \rho_k^g \cdot P_k^{g0} + \dots + \rho_k^m \cdot P_k^{m0} = \sum_{i=1}^m \rho_k^i \cdot P_k^{i0}; \\ \rho_k^1 = \rho_k^0 \cdot P_k^{01} \\ \rho_k^2 = \rho_k^1 \cdot P_k^{12} = \rho_k^0 \cdot P_k^{01} \cdot P_k^{12}; \\ \rho_k^3 = \rho_k^2 \cdot P_k^{23} = \rho_k^0 \cdot P_k^{01} \cdot P_k^{12} \cdot P_k^{23}. \end{array} \right. \quad (3)$$

Условие нормировки:

$$\sum_{g=1}^m \rho_k^g = 1. \quad (4)$$

В случае, если вероятности выхода годной продукции при повторных обслуживаниях одинаковы, то:

$$\begin{cases} P_k^{10} = P_k^{20} = P_k^{30} = \\ = \dots = P_k^{g0} = \dots = P_k^{m-1,0} = p_k; \\ P_k^{m0} = 1; \\ P_k^{01} = 1; \\ P_k^{12} = P_k^{23} = (1 - p_k). \end{cases} \quad (5)$$

Подставив все значения для ρ_k^g , $g = (\overline{0, m})$ из (3) в условие нормировки (4) получим

$$\rho_k^0 (1 + P_k^{01} + P_k^{01} \cdot P_k^{12} + P_k^{01} \cdot P_k^{12} \cdot P_k^{23}) = 1.$$

Откуда

$$\rho_k^0 = (1 + P_k^{01} + P_k^{01} \cdot P_k^{12} + P_k^{01} \cdot P_k^{12} \cdot P_k^{23})^{-1}. \quad (6)$$

Подставив выражения (6) в (3), (5) окончательно имеем:

$$\begin{cases} \rho_k^0 = \left[\frac{2 + (1 - p_k) + (1 - p_k)^2 + \dots}{1 + \dots + (1 - p_k)^{m-1}} \right]^{-1}; \\ \rho_k^1 = \rho_k^0; \\ \rho_k^2 = \rho_k^0 \cdot (1 - p_k); \\ \rho_k^3 = \rho_k^0 \cdot (1 - p_k)^2. \end{cases} \quad (7)$$

На основе (1) и (7) определяем стационарное распределение полумарковского процесса:

$$M = \sum_{i=0}^m \rho_k^i \cdot M_k^i = \sum_{i=0}^m [\rho_k^0 (1 - p_k)^{i-1}] \cdot M_k^i + \rho_k^0 \cdot M_k^0; \quad \pi_k^i = \frac{\rho_k^i \cdot M_k^i}{M}. \quad (8)$$

Задачу определения ФР времени обслуживания на ТЯ с возвратом продукции на ТЯР на повторное обслуживание, как и в [7], будем решать, используя формулу полной вероятности.

Для этого примем следующие гипотезы:

H_1 — выполняется первое обслуживание;

H_2 — выполняется второе обслуживание

H_3 — выполняется третье обслуживание.

Вероятности этих гипотез с учетом (8) равны:

$$\begin{cases} P(H_1) = \pi_k^1 = \frac{\rho_k^1 \cdot M_k^1}{M}; \\ P(H_2) = \pi_k^2 = \frac{\rho_k^2 \cdot M_k^2}{M}; \\ P(H_3) = \pi_k^3 = \frac{\rho_k^3 \cdot M_k^3}{M}. \end{cases} \quad (9)$$

Введем событие A , под которым будем понимать обслуживание продукции на ячейке. Условные вероятности события A при выполнении гипотез H_1, H_2, H_3 равны:

$$\begin{cases} P(A/H_1) = p\{t_1 < t\} = F_{k,1}(t); \\ P(A/H_2) = p\{t_1 + t_2 < t\} = F_{k,2}(t) = F_{k,1,2}^{(*)2}(t); \\ P(A/H_3) = p\{t_1 + t_2 + t_3 < t\} = F_{k,3}(t) = F_{k,1,...,3}^{(*)3}(t). \end{cases} \quad (10)$$

где $(*)m$ — обозначение операции m — кратной свертки;

$t_i, (i = \overline{1, m})$ — случайные величины, являющиеся временами повторных обслуживаний. [3, 7] ФР времени между заявками в прореженном потоке событий определяется по формуле полной вероятности с учетом выражений (9) и (10):

$$K_k(t) = P(A) = \sum_{g=1}^m P(H_g)P(A/H_g) = \sum_{g=1}^m \pi_k^g \cdot F_{k,1,...,g}^{(*)g}(t). \quad (11)$$

В модели нужно учесть, что некоторые ИМ после m обслуживаний остаются бракованными (в случаях неисправимого брака) и снимаются с АЛС для полной разборки и частичной либо полной утилизации. Вероятность того, что ИМ после m обслуживаний на одной из ТЯР будет исправным, равна [7]:

$$p_k^{zod} = p \sum_{g=1}^m (1-p)^{g-1} = 1 - (1-p)^m. \quad (12)$$

Соответственно вероятность выпуска бракованных ИМ определяется из выражения:

$$p_k^{bp} = 1 - p_k^{zod} = (1-p)^m.$$

Далее необходимо осуществить разрежение потока продукции, выходящего с ТЯ_k, что позволит окончательно получить ФР $K_k^\Sigma(t)$ времени между событиями в потоке годной продукции, выходящей с k -ой ячейки, охваченной обратной связью. Для этого необходимо в формулу $K_1(t) = pF(t) + p \sum_{m=1}^{\infty} (1-p)^m F^{(*)m}(t)$ подставить значения величин $K_k(t)$ и p_k^{zod} из выражений (11), (12):

$$K_k^\Sigma(t) = p_k^{zod} K_k(t) + p_k^{zod} \sum_{i=1}^{\infty} (1 - p_k^{zod})^m K_k^{(*)i}(t). \quad (13)$$

Выражение (13) позволяет ячейку, охваченную обратной связью, заменять эквивалентной ячейкой, представляющей простейший элемент с двумя факторными состояниями: отказовым и рабочим.

Подставляя (13) в (11), окончательно получаем ФР $\overline{\varphi_n}(t)$ времени обслуживания единицы продукции (ФР времени между событиями в выходном потоке).

При моделировании СВ $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, соответствующие временам обслуживания на ТЯ₁, ТЯ₂, ТЯ₃ считались распределенными по обобщенным законам Эрланга второго порядка с ФР $F_1(t), F_2(t), F_3(t)$ и математическими ожиданиями $m\alpha_1, m\alpha_2, m\alpha_3$ соответственно. При заданных математических ожиданиях СВ $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ их дисперсии выбирались из соотношения:

$$D(\alpha_i) = \frac{[m\alpha_i]^2}{1,5}, (i = 1, 2, 3).$$

После такой замены структура АЛС приводится к нормальному виду и для её моделирования возможно применение математической модели, приведенной в [7]. Результаты моделирования участка АЛС, содержащего ТЯ₄...ТЯ₆ и установленные параллельно им ТЯР₄...ТЯР₆, при емкости накопителей $m_k = 20$ мест и значениях времени обслуживания единицы продукции на них, соответственно: $t_4=0,017$ ч, $t_5=0,017$ ч, $t_6=0,017$ ч,

представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты моделирования участка АЛС с ТЯР

p	$\lambda_{k_{01}}, l/ч$	$\mu_{k_{10}}, l/ч$	K_2	$P_{лин}, дем/ч$	$L_5, дем$	$L_6, дем$
0,9	4	0,2	0,906	43,1	14,67	11,04
		0,25	0,885	42,1	15,73	11,16
		0,33	0,851	40,5	15,00	10,80
	2	0,2	0,808	38,4	15,36	10,16
		0,25	0,768	36,5	15,58	9,79
		0,33	0,708	33,7	15,87	9,30
0,8	4	0,2	0,907	37,1	14,65	11,4
		0,25	0,886	36,2	15,70	10,88
		0,33	0,853	34,9	14,96	10,82
	2	0,2	0,813	33,2	15,31	10,27
		0,25	0,774	31,6	15,52	9,85
		0,33	0,715	29,2	15,7	9,24

Максимальное количество обслуживаний m равно 3, а математические ожидания времен повторных обслуживаний соответственно приняты меньше предыдущих на 5% [3]. В общем случае, для различных АЛС, с учетом специфики ИМ, математические ожидания времен повторных обслуживаний могут быть одинаковыми между собой, а также соответственно меньше предыдущих на некоторую фиксированную величину.

При разработке модели АЛС с обратной связью, оперирующей с ФР экспоненциального вида, необходимо использовать полумарковский процесс (ПМП), построенный в дискретном фазовом пространстве при создании модели, рассмотренной выше, и найти математические ожидания времен затрачиваемых на m повторных обслуживаний каждой ячейкой. Для этого используются вероятности π_k^i , ($i = \overline{1, m}$) стационарного распределения ПМП. Предполагается, что в общем случае математические ожидания каждого из повторных обслуживаний известны и отличаются друг от друга. Тогда математическое ожидание времени, затрачиваемого на m повторных обслуживаний, будет определяться из выражения:

$$\bar{t}_{k\varnothing} = \sum_{i=1}^m \pi_k^i \cdot M_k^i,$$

где $\bar{t}_{k\varnothing}$ – математические ожидания времени, затрачиваемого на m повторных обслуживаний k -ой ячейкой;

π_k^i – вероятности, определяемые по формуле (8);

M_k^i – математическое ожидание i -го обслуживания.

Так как после m обслуживаний некоторая (случайная) доля ИМ остается бракованной и покидает систему, необходимо разредить поток, выходящий с ТЯ. Вероятность того, что продукция после m обслуживаний будет годной, определяется формулой (12). Поэтому в модель АЛС нормального вида, для использования ее при моделировании линии с обратной связью с ограниченным числом повторных обслуживаний, необходимо внести следующие изменения: в качестве времен обслуживания на ТЯ_к ($k = \overline{1, n}$) использовать полученные математические ожидания времен, затрачиваемых на m повторных обслуживаний k -ми ячейками ТЯ_к; для определения λ_k с учетом разрежения потока применять формулу:

$$\lambda_k = \frac{1}{t_{k-1\max}} \frac{\mu_{k-1,20}}{\mu_{k-1,20} + \lambda_{k-1,02}} \times (1 - (1-p)^m) \cdot \prod_{j=2}^{k-1} P_j.$$

Для построения модели АЛС необходимо эквивалентно (по производительности) заменить структуру, состоящую из параллельно соединенных ячеек $ТЯ_k$ и $ТЯР_k$ (например, $ТЯ_5$ и $ТЯР_5$ на рисунке 2), одним простейшим элементом.

Указанная замена производится аналогично тому, как это было сделано при эквивалентной замене ячейки, охваченной обратной связью. Для того чтобы определить ФР времени, затрачиваемого на m повторных обслуживаний, включая обслуживание на $ТЯР$, необходимо построить полумарковский процесс в дискретном фазовом пространстве с использованием приведенного ранее графа состояний. В данном случае меняются только ФР времен пребывания системы в состояниях графа, что ведет к изменению математических ожиданий времен пребывания системы в состояниях графа, следовательно и стационарного распределения ПМП. Кроме этого, меняются и условные вероятности появления события А, под которым понимается обслуживание продукции на ячейке, при выполнении введенных ранее гипотез $H_1, \dots, H_n$. Обозначим СВ $t_i^k, (i = \overline{1, m})$ времена повторного обслуживания продукции на $ТЯ_k$; СВ $t_j^k, (j = i - 1; j = \overline{1, m - 1})$ времена повторного обслуживания продукции на $ТЯ_k$.

Время обслуживания продукции на ячейке, охваченной обратной связью, в которую входит $ТЯР$, в данном случае состоит из ряда циклов, длительность T_k^g которых в общем случае равна:

$$T_1^k = t_1^k; T_2^k = t_2^k + t_1^k; T_3^k = t_3^k + t_2^k; \dots; T_g^k = t_g^k + t_{g-1}^k; \dots; T_m^k = t_m^k + t_{m-1}^k.$$

В рассматриваемом случае ФР СВ T_g^k определяются как ФР суммы независимых СВ (через свертки). Таким образом, в предыдущей модели вместо СВ времен t_i^k берутся СВ T_g^k с соответствующими ФР. Таким образом, математическая модель построена.

В случае, если изменяется вероятность выхода годной продукции при повторном обслуживании на $ТЯ_i$, то дискретная случайная величина принимает значения $\bar{t}_i, 2\bar{t}_i, 3\bar{t}_i, \dots, k \cdot \bar{t}_i, \dots, m \cdot \bar{t}_i$, которым соответствуют вероятности $p_1, p_2(1-p_1), p_3(1-p_1)(1-p_2), \dots, p_k \prod_{k=1}^m (1-p_{k-1})$. В данном выражении $p_0 = 0$, т.е. случай, когда обслуживание не производится, не рассматриваем.

Система уравнений для определения $\rho_k^g, g = (\overline{0, m})$ и условие нормировки аналогичны (3) и (4) соответственно.

Для данного случая вероятности переходов равны:

$$\begin{cases} P_k^{10} = p_1; \\ P_k^{20} = p_2; \\ P_k^{g0} = p_g; \\ P_k^{m-1,0} = p_{m-1}; \\ P_k^{m0} = 1; \\ P_k^{01} = 1; \\ P_k^{12} = (1-p_1); \\ P_k^{23} = (1-p_2). \end{cases} \quad (14)$$

Подставляя выражения для вероятностей переходов из (14) в (3) и решая полученную систему, определяем стационарное распределение вложенной цепи Маркова ρ_k^g , $g = (\overline{0, m})$. Ввиду громоздкости данные выражения не приводятся. Далее, по формуле (1) определяем стационарное распределение ПМП. [3, 7, 8]

Задачу определения ФР времени обслуживания на ячейке с возвратом продукции на повторное обслуживание, как и ранее, будем решать, используя формулу полной вероятности. Гипотезы такие же, как и в предыдущем случае. Их вероятности вычисляются по формуле (9). Условные вероятности события A , под которым понимается обслуживание продукции на ячейке, определяются из выражения (10).

ФР времени между заявками в прореженном потоке событий определяется по формуле полной вероятности (11) с учетом (9), (10).

В модели нужно учесть, что некоторая часть продукции после m обслуживаний остается бракованной и покидает систему. Вероятность того, что продукция после m обслуживаний будет годной p_k^{zod} равна сумме первых m членов ряда $p_1, p_2(1-p_1),$

$$p_3(1-p_1)(1-p_2), \dots, p_k \prod_{i=1}^m (1-p_{i-1}): p_k^{zod} = \sum_{k=1}^m p_k \prod_{i=1}^m (1-p_{i-1}).$$

Далее, как и в предыдущей модели, необходимо осуществить с вероятностью p_k^{zod} разрежение потока продукции, выходящего с $ТЯ_k$, и определить ФР $K_k^{\Sigma}(t)$ времени между событиями в потоке годной продукции, выходящей с k -ой ячейки, охваченной обратной связью, используя выражение: [3, 7]

$$G_2(t) = p\varphi(t) + p \sum_{n=1}^{\infty} (1-p)^n \varphi^{*(n)}(t).$$

В таблице 3 представлены фотографии отдельных ТЯ и ТЯР в составе автоматизированной линии сборки (АЛС) ИМ, сделанные в ходе производственного эксперимента. В частности, показан пример выявленного брака резьбового отверстия, устранение которого в предлагаемой структуре АЛС предусмотрено в ТЯР₆.

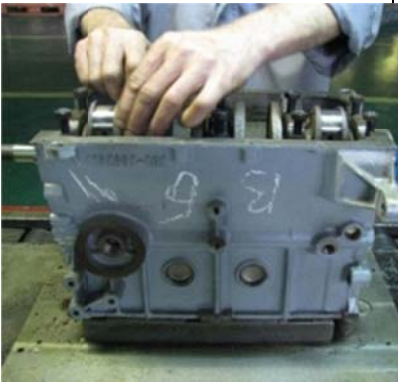
Выводы

Анализ результатов расчетов по приведенной выше полумарковской математической модели в среде Maple 15 показал, что фактическая производительность АЛС за счет рационального введения ремонтных технологических ячеек может возрасти на 2,5...3%, что позволяет выпустить в течение года дополнительно до 2000 единиц готовой продукции (при двухсменной работе). [3, 7, 8] Таким образом, можно сделать вывод о целесообразности предлагаемых организационно-технических решений. Вместе с тем, внедрение полученных результатов возможно при условии проведения технико-экономического анализа, позволяющего установить целесообразность введения гибкой структуры для определенной АЛС, в соответствующих условиях эксплуатации. [1, 9, 10, 11] Необходимо также в обязательном порядке учитывать специфику конструкции и технологии сборки, техническую возможность и экономическую целесообразность возврата на повторное обслуживание на ТЯР для устранения брака, а также годовую программу выпуска ИМ. [1, 11, 12, 14, 15] В отдельных случаях, целесообразно изменение конструкции ИМ и технологии сборки, для обеспечения технической возможности возврата на частичную либо полную разборку и повторное обслуживание.

Направление дальнейших исследований связано с совершенствованием предложенной математической модели и разработкой мероприятий по повышению надежности сборочного оборудования, применяемого на АЛС, а также модернизацией технологии сборки РС в ИМ. Следует отметить большое влияние качества всех компонентов, особенно резьбовых деталей, входящих в состав РС, на надежность ИМ при эксплуатации. Представляется целесообразным комплексный подход к обеспечению надежности РС в ИМ на всех этапах их

жизненного цикла. [1, 13, 14, 15]

Таблица 3 – ТЯ и ТЯР в составе АЛС ИМ

Позиция установки коленчатого вала – ТЯ ₄	Позиция комплектования шатунно–поршневой группы в ТЯ ₅	Выявленный брак резьбового отверстия (ТЯР ₆)
		
Позиция сборки шатуна с поршнем в ТЯ ₅	Позиция сборки блока цилиндров (ТЯ ₅)	Блоки цилиндров в ремонтной ячейке ТЯР ₆
		
Позиция приемо–сдаточных испытаний ИМ после АЛС	Накопитель готовых ИМ с ТЯ ₇	
		

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технология автоматической сборки/ А.Г. Холодкова, М.Г. Кристаль, Б.Л. Штриков и др., Под ред. А.Г. Холодковой. – М.: Машиностроение, 2010. – 560 с.
2. Липка, В.М. Анализ результатов производственного эксперимента по контролю качества резьбовых деталей, применяемых для сборки силовых агрегатов автомобилей / В.М. Липка, В.Я. Копп, Ю.Л. Рапацкий // Вестник СевНТУ. Сер. Машиностроение и транспорт: сбор.науч. трудов – Севастополь, изд-во СевНТУ, 2013 – Вып. 140.– С. 58–62.
3. Липка, В.М. Выбор и исследование рациональной структуры гибкой автоматизированной линии

сборки силовых агрегатов на Мелитопольском моторном заводе / В.М. Липка, В.Я. Копп, Ю.Л. Рапацкий. – Вестник Кременчугского Национального Университета им. Михаила Остроградского. – Вып. 1, 2014 –С. 112–118.

4. Tolio, T. Design of Flexible Production Systems: Methodologie sand Tools. – Berlin: Springer, 2009. – 352 с.

5. Копп, В.Я. Моделирование автоматизированных линий / В.Я Копп, Ю.Е. Обжерин, И.В Олышанская, А.И. Песчанский. – Севастополь: СевНТУ, 2009. – 212 с.

6. Копп, В.Я. Моделирование переналаживаемых автоматизированных производственных систем / В.Я. Копп, Ю.Е. Обжерин, А.И. Песчанский и др.– Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. – 232 с

7. Копп, В.Я. Моделирование автоматизированных производственных систем: монография. — Севастополь: СевНТУ, 2012. — 700 с.

8. Копп, В.Я. Модель асинхронной автоматизированной линии с обратными связями, обусловленными количеством постов контроля /В.Я.Копп, А.И. Балакин //Projektowanie i automatyzacjaprocessowprodukcyjnych; Red. A. Swic. – Lublin: WydawnictwaUczelnianePolitechnikiLubelskiej, 2005. – P.31–37.

9. Гибкие производственные системы сборки / П.И. Алексеев, А.Г. Герасимов, Э.П. Давыденко и др.; Под ред. А.И. Федотова. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. – 349 с.

10. Ямпольский, Л.С. Гибкие компьютеризированные системы: проектирование, моделирование и управление / Л.С. Ямпольский, П.П. Мельничук, Б.Б. Самотокин и др. – Житомир: ЖДТУ, 2005. – 680 с.

11. Лищинский, Л.Ю. Структурный и параметрический синтез гибких производственных систем /Л.Ю. Лищинский. – М.: Машиностроение, 1990. – 312 с.

12.Копп, В.Я. Определение эффективности использования методики оптимизации переналаживаемых автоматизированных производственных систем при ограниченной сумме вкладываемых средств / В.Я. Копп, О.П. Чуб, С.Н. Фисун // Вестник Национального технического университета «ХПИ»: Сб. науч. тр. Тематический выпуск: новые решения в современных технологиях. — Харьков: НТУ «ХПИ» — 2011. — №43 — С.106 — 115.

13. Меткин, Н.П. Технологическая подготовка гибких автоматизированных сборочно–монтажных производств в машиностроении / Н.П. Меткин, М.С. Лапин, В.И. Гольц. – Л.: Машиностроение, 1988. – 192с.

14. Суслов, А.Г. Научные основы технологии машиностроения / А.Г. Суслов, А.М. Дальский// М.: Машиностроение, 2002. — 684 с.

15. Суслов, А.Г. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений. / А.Г. Суслов, В.П. Федоров, О.А. Горленко и др. Под общ. ред. А.Г. Суслова. —М.: Машиностроение, 2006. — 448 с.

Рапацкий Юрий Леонидович,
ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет»
299053 г. Севастополь
ул. Университетская,33
канд. техн. наук, доц., директор
Центра оценки качества
образования
u.l.rapatskiy@mail.ru.

Копп Вадим Яковлевич,
ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет»
299053 г. Севастополь
ул. Университетская,33
доктор техн.наук, проф.
v_kopp@mail.ru

Липка Виктория Михайловна
Филиал ФГБОУ ВО
«ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова» в г.
Севастополь,
магистр, ст. преподаватель,
аспирант,
299001 г. Севастополь
ул. Героев Севастополя,7
lipka.vita@yandex.ru,

Yu.L. RAPATSKIY, V.Ya. KOPP, V.M. LYPKA

RESEARCH AND SIMULATION OF AUTOMATED ASSEMBLING LINE WITH FLEXIBLE STRUCTURE

Abstract. *The problem of insufficient reliability of the process of automated assembly of complex engineering products (MI) is investigated. It is proposed to use the flexible structure of the automated assembly line, which allows increasing the reliability and productivity of the assembly process. To evaluate the efficiency of an automated assembly line with a flexible structure, a semi-Markov mathematical model is constructed. The obtained results can be applied to increase the productivity of automated lines of assembly of complex MIs by introducing structural flexibility.*

Keywords: *automated assembly, reliability of assembly process, automated assembly line, threaded connection.*

BIBLIOGRAPHY

1.Tekhnologiya avtomaticheskoy sborki/ A.G. Kholodkova, M.G. Kristal, B.L. Shtrikov i dr., Pod red. A.G. Kholodkovoy. – М.: Mashinostroyeniye, 2010. – 560 s.

2. Lipka, V.M. Analiz rezultatov proizvodstvennogo eksperimenta po kontrolyu kachestva rezbovykh detaley, primenyayemykh dlya sborki silovykh agregatov avtomobiley / V.M. Lipka, V.YA. Kopp, YU.L. Rapatskiy // Vestnik SevNTU. Ser. Mashinostroyeniye i transport: sbor.nauch. trudov – Sevastopol, izd–vo SevNTU, 2013 – Vyp. 140.– S. 58–62.
3. Lipka, V.M. Vybory i issledovaniye ratsionalnoy struktury gibkoy avtomatizirovannoy linii sborki silovykh agregatov na Melitopolskom motornom zavode / V.M. Lipka, V.YA. Kopp, YU.L. Rapatskiy. – Vestnik Kremenchugskogo Natsionalnogo Universiteta im. Mikhaïla Ostrogradskogo. – Vyp. 1, 2014 –S. 112–118.
4. Tolio, T. Design of Flexible Production Systems: Methodologie sand Tools. – Berlin: Springer, 2009. – 352 s.
5. Kopp, V.YA. Modelirovaniye avtomatizirovannykh liniy / V.YA Kopp, YU.Ye. Obzherin, I.V Olshanskaya, A.I. Peschanskiy. – Sevastopol: SevNTU, 2009. – 212 s.
6. Kopp, V.YA. Modelirovaniye perenalazhivayemykh avtomatizirovannykh proizvodstvennykh sistem / V.YA. Kopp, YU.Ye. Obzherin, A.I. Peschanskiy i dr.– Sevastopol: Izd–vo SevNTU, 2007. – 232 s
7. Kopp, V.YA. Modelirovaniye avtomatizirovannykh proizvodstvennykh sistem: monografiya. — Sevastopol: SevNTU, 2012. — 700 s.
8. Kopp, V.YA. Model asinkhronnoy avtomatizirovannoy linii s obratnymi svyazyami, obuslovlennymi kolichestvom postov kontrolya /V.YA.Kopp, A.I. Balakin //Projektowanie i automatyzacjaprocessowprodukcyjnych; Red. A. Swic. – Lublin: WydawnictwaUczelnianePolitechnikiLubelskiej, 2005. – R.31–37.
9. Gibkiye proizvodstvennyye sistemy sborki / P.I. Alekseyev, A.G. Gerasimov, E.P. Davydenko i dr.; Pod red. A.I. Fedotova. – L.: Mashinostroyeniye. Leningr. otd–niye, 1989. – 349 s.
10. Yampolskiy, L.S. Gibkiye kompyuterizirovannyye sistemy: proyektirovaniye, modelirovaniye i upravleniye / L.S. Yampolskiy, P.P. Melnichuk, B.B. Samotokin i dr. – Zhitomir: ZHDTU, 2005. – 680 s.
11. Lishchinskiy, L.YU. Strukturnyy i parametricheskyy sintez gibkikh proizvodstvennykh sistem /L.YU. Lishchinskiy. – M.: Mashinostroyeniye, 1990. – 312 s.
- 12.Kopp, V.YA. Opredeleniye effektivnosti ispolzovaniya metodiki optimizatsii perenalazhivayemykh avtomatizirovannykh proizvodstvennykh sistem pri ogranichennoy summe vkladyvayemykh sredstv / V.YA. Kopp, O.P. Chub, S.N. Fisun // Vestnik Natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta «KHPI»: Sb. nauch. tr. Tematicheskyy vypusk: novyye resheniya v sovremennykh tekhnologiyakh. — Kharkov: NTU «KHPI» — 2011. — №43 — S.106 – 115.
13. Metkin, N.P. Tekhnologicheskaya podgotovka gibkikh avtomatizirovannykh sborochno–montazhnykh proizvodstv v mashinostroyenii / N.P. Metkin, M.S. Lapin, V.I. Golts. – L.: Mashinostroyeniye, 1988. – 192s.
14. Suslov, A.G. Nauchnyye osnovy tekhnologii mashinostroyeniya / A.G. Suslov, A.M. Dalskiy// M.: Mashinostroyeniye, 2002. — 684 s.
15. Suslov, A.G. Tekhnologicheskoye obespecheniye i povysheniye ekspluatatsionnykh svoystv detaley i ikh soyedineniy. / A.G. Suslov, V.P. Fedorov, O.A. Gorlenko i dr. Pod obshch. red. A.G. Suslova. – M.: Mashinostroyeniye, 2006. — 448 s.

Rapatskiy Yuri Leonidovich

Sevastopol State University, Director of the Center for Educational Quality Assessment, Associate Professor of Chair «Instrumentation systems and automation of technological processes»
299053
Sevastopol,
33, University street
+7(978)7679650
u.l.rapatskiy@mail.ru.

Kopp VadimYakovlevich

Sevastopol State University, Doctor of Technical Sciences, Professor of Chair «Instrumentation systems and automation of technological processes»
299053
Sevastopol,
33, University street
v.kopp@mail.ru.

Lypka Victoria Mikhailovna

Postgraduate student, Chair of Technology of Mechanical Engineering, Polytechnic Institute, Sevastopol State University
Senior Lecturer,
Philal FGBOU VO
“State Maritime University named after Admiral F.F. Ushakov”
in the city of Sevastopol
299001
Sevastopol,
7 Heroes of Sevastopol street
+7(978)7673271
lipka.vita@yandex.ru

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ЗНАКОПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗКАХ

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы повышения износостойкости рабочих поверхностей в режимах нестационарного нагружения. Установлено, что под воздействием циклических механических и тепловых нагрузок в процессе эксплуатации они изменяют геометрические размеры (изгибаются). Отмечено, что это приводит к значительной неэквидистантности гладильных плоскостей, возникают напряжения приводящие к деформации поверхности.

Ключевые слова: поверхность, напряжения, температура, технология.

Введение

Рабочие поверхности гладильных подушек эксплуатируются в режимах нестационарного нагружения. Под воздействием циклических механических и тепловых нагрузок в процессе эксплуатации они изменяют геометрические размеры (изгибаются), что приводит к значительной неэквидистантности гладильных плоскостей, возникают напряжения приводящие к деформации поверхности.

Основная часть

Основной причиной их деформации является усталостная прочность. При этом на предел усталости силуминов существенно влияют размер зерна, легированность твердого раствора, а также форма и характер распределения хрупких включений. Такое положение подтверждается установленным для бинарных силуминов влиянием на предел усталости модифицирования эвтетических сплавов.

Усталостную прочность силуминов можно повысить пластическим деформированием сплава, т. е. ликвидацией в процессе обработки давлением микропор и рыхлот, которые при знакопеременной нагрузке превращаются в островершинные трещины, распространяющиеся по границам зерен. Достижимый эффект сохраняется до температур более 573,15 К, что более чем удовлетворяет условиям работы рабочих поверхностей гладильных подушек.

Подобно усталостной прочности сопротивляемость силуминов термической усталости (термоциклическая стойкость) значительно возрастает при обработке давлением. Термоциклическая стойкость тесно связана с пластичностью сплава при повышенной температуре, а их взаимосвязь обусловлена снижением уровня возникающих в нем термических напряжений за счет их релаксации по мере повышения пластичности материала. На пластичность алюминиевых сплавов отрицательно влияют включения хрупких фаз и если эти включения не растворяются при повышении температуры, то низкая пластичность у сплава сохраняется и при высоких температурах. Этим и обусловлена низкая термоциклическая стойкость силуминов, в которых первичные кристаллы кремния являются концентраторами напряжений, сохраняющихся и при повышенных температурах. Особый вид усталости – “усталостное смятие”, т.е. пластическое деформирование материала под действием циклических механических нагрузок, не превышающих предел упругости сплава. При этом “усталостное смятие” обуславливает низкую долговечность деталей.

При многократном циклическом воздействии (50000 циклов приложения нагрузки) на детали из легированных силуминов с различной концентрацией кремния, “усталостное смятие” при содержании в сплаве Si до 18 % сначала резко возрастает, а при концентрации Si = 20 – 26 % сохраняется на одном уровне. В первом случае это объясняется образованием вокруг кристаллов первичного кремния зон алюминиевого твердого раствора. Во втором случае увеличение концентрации включений фаз–упрочнителей на единицу объема подавляет процессы накопления микродеформаций в материале под действием напряжений ниже предела усталости. Появление же вокруг относительно больших включений зон твердого раствора вызывает сильное пластическое деформирование и снижает сопротивляемость “усталостному смятию”.

Нагружение рабочей поверхности в процессе ВТО после ее деформации в результате термоциклического воздействия происходит по ее краям. При этом в рабочей поверхности возникают напряжения, величины которых зависят от размеров поперечного сечения и степени получения термоциклической деформации. Такое положение обуславливает

неравномерность распределения нагрузки по длине и, если напряжения достигнут предела текучести, рабочая поверхность получит остаточную деформацию.

Существующие технологии изготовления рабочих поверхностей из известных алюминиевых сплавов, характеризующиеся рядом способов литья и механической обработки, не обеспечивают стабильность геометрических размеров под воздействием знакопеременных циклических тепловых и механических нагрузок, обуславливающих накопление остаточных деформаций в процессе эксплуатации гладильных подушек.

Такое состояние объясняется многообразием выполняемых рабочими органами функций влажно-тепловой обработки швейных изделий и отсутствием научно-обоснованного подхода к проектированию технологических процессов их изготовления, а также методических рекомендаций по определению их параметров.

Установлено, что оптимальными материалами для изготовления рабочих поверхностей гладильных подушек, обладающими высокими теплопроводностью, теплоемкостью, температуропроводностью и тепловой активностью являются алюминиевые сплавы – силумины В124 и АЛ9. Толщина плиты рабочей поверхности по теплотехническим показателям не должна быть меньше 10 мм.

Конструктивно каждая рабочая поверхность представляет плиту, внешняя часть которой является гладильной поверхностью, а внутренняя, совместно с боковыми стенками и ребрами жесткости, образуют полость пропаривания. Боковыми стенками рабочая поверхность нижней подушки устанавливается на стальном корпусе, образуя камеру пропаривания.

При этом на первом этапе исследований проведено аналитическое описание процесса изгиба объекта исследований – рабочих поверхностей верхней и нижней подушек, на втором – после изгиба, а на третьем – экспериментальные исследования.

Поскольку обе подушки идентичны и работают в одинаковых условиях, моделирование проводилось одной рабочей поверхностью.

При воздействии на рабочую поверхность знакопеременных механических и тепловых нагрузок в ней возникают соответствующие напряжения, и происходит ее деформация. Для упрощения задачи их определения рабочая поверхность представлена в форме прямоугольной пластины с началом координат в центре симметрии опорной плоскости. При этом ось O_z направлена вертикально вверх, оси O_y и O_x – вдоль осей симметрии нижней части рабочей поверхности так, чтобы система координат O_{xyz} (рисунок 1) была правой. Тогда уравнения равновесия рабочей поверхности имеют вид:

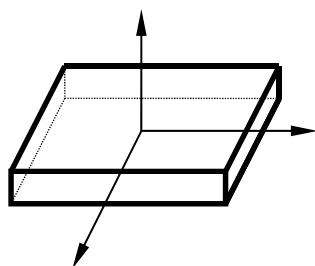


Рисунок 1 - рабочая поверхность в прямоугольной системе координат

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = -\rho \cdot g - \alpha \cdot \frac{dT}{dz} \cdot \frac{E}{3(1-2\sigma)} \end{cases} \quad (1)$$

где ρ – плотность материала рабочей поверхности,

g – ускорение силы тяжести, α – коэффициент теплового расширения материала рабочей поверхности,

E – модуль Юнга,

σ – коэффициент Пуассона материала,

y – плотность материала.

Поскольку система уравнений в частных производных (1) линейна, поэтому вместо нее рассмотрим две системы, первая из которых описывает деформации и напряжения при приложении внешней нагрузки, а вторая – деформации и напряжения, связанные с тепловым расширением, обусловленные градиентом температуры по толщине рабочей поверхности.

Ниже приведенные формулы, описывают напряжения и деформации при нагружении рабочей поверхности внешним давлением и под влиянием собственного веса:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx}^{(1)} = \sigma_{yx}^{(1)} = \sigma_{xz}^{(1)} = \sigma_{yy}^{(1)} = \sigma_{yz}^{(1)} = 0 \\ \sigma_{zz}^{(1)} = -P - \rho \cdot g \cdot (H_z - Z)\end{aligned}\quad (2)$$

где H_z – толщина рабочей поверхности.

$$\begin{cases} n_x^{(1)} = \frac{\sigma}{E} [P + \rho \cdot g \cdot (H_z - Z)] \cdot x; \\ n_y^{(1)} = \frac{\sigma}{E} [P + \rho \cdot g \cdot (H_z - Z)] \cdot y; \\ n_z^{(1)} = \frac{1}{2E} [2P \cdot Z + \rho \cdot g (2H_z \cdot Z - Z^2)] \end{cases} \quad (3)$$

Формулы [4, 5], описывают напряжения и деформации связанные с тепловым воздействием на рабочую поверхность гладильной подушки:

$$\tilde{Z}_{ij} = Z_{ij} + n_z(x_i, y_j) = f(x_i + n_x(x_i, Z_{ij}))y_j + n_y(y_j, Z_{ij}) \quad (4)$$

$$\begin{aligned}\sigma_{xx}^{(2)} &= \frac{E}{(1+\sigma)(1-2\sigma)} \cdot [(1-\sigma) \cdot n_{xx} + \sigma \cdot (n_{yy} + n_{zz})] \\ \sigma_{yy}^{(2)} &= \frac{E}{(1+\sigma)(1-2\sigma)} \cdot [(1-\sigma) \cdot n_{yy} + \sigma \cdot (n_{xx} + n_{zz})] \\ \sigma_{zz}^{(2)} &= \frac{E}{(1+\sigma)(1-2\sigma)} \cdot [(1-\sigma) \cdot n_{zz} + \sigma \cdot (n_{xx} + n_{yy})]\end{aligned}\quad (5)$$

Расчет суммарных напряжений σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} , σ_{xz} , σ_{yz} при механическом и тепловом воздействии определяется:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= \sigma_{xx}^{(1)} + \sigma_{xx}^{(2)}; \quad \sigma_{yy} = \sigma_{yy}^{(1)} + \sigma_{yy}^{(2)}; \quad \sigma_{zz} = \sigma_{zz}^{(1)} + \sigma_{zz}^{(2)}; \\ \sigma_{xz} &= \frac{E}{1+\sigma} \cdot n_{xz} = \frac{E}{1+\sigma} \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{\partial n_x}{\partial z} + \frac{\partial n_z}{\partial x} \right); \\ \sigma_{yz} &= \frac{E}{1+\sigma} \cdot n_{yz} = \frac{E}{1+\sigma} \cdot \frac{1}{2} \left(\frac{\partial n_y}{\partial z} + \frac{\partial n_z}{\partial y} \right); \\ \sigma_{xy} &= 0.\end{aligned}\quad (6)$$

В результате решения полученных уравнений и массива данных при фиксированной длине рабочей поверхности и ее материала (В124 и АЛ9) получены гладкие зависимости деформации рабочей поверхности от количества циклов нагружения.

Формула (7) позволяет вычислять значение сплайн-функции $g(x, y)$ в произвольной точке (x, y) и таким образом построить сплайн-интерполяцию изогнутой рабочей поверхности гладильной подушки.

$$\begin{cases} g(x, y) = g_{xx}(x_{i-1}, y) \cdot \frac{(x_i - x)^3}{6h_i} + g_{xx}(x_i, y) \cdot \frac{(x - x_{i-1})^3}{6h_i} + \\ + \left(g(x_{i-1}, y) - \frac{g_{xx}(x_{i-1}, y) \cdot h_i^2}{6} \right) \cdot \frac{x_i - x}{h_i} + \\ + \left(g(x_i, y) - \frac{g_{xx}(x_i, y) \cdot h_i^2}{6} \right) \cdot \frac{x - x_{i-1}}{h_i} \end{cases} \quad (7)$$

Задача сплайн – интерполяции решена методом прогонки или факторизации.

Решение полученных уравнений позволило определить максимальный изгиб рабочей поверхности в зависимости от ее материала в процессе циклического механического и теплового нагружения (рисунок 2).

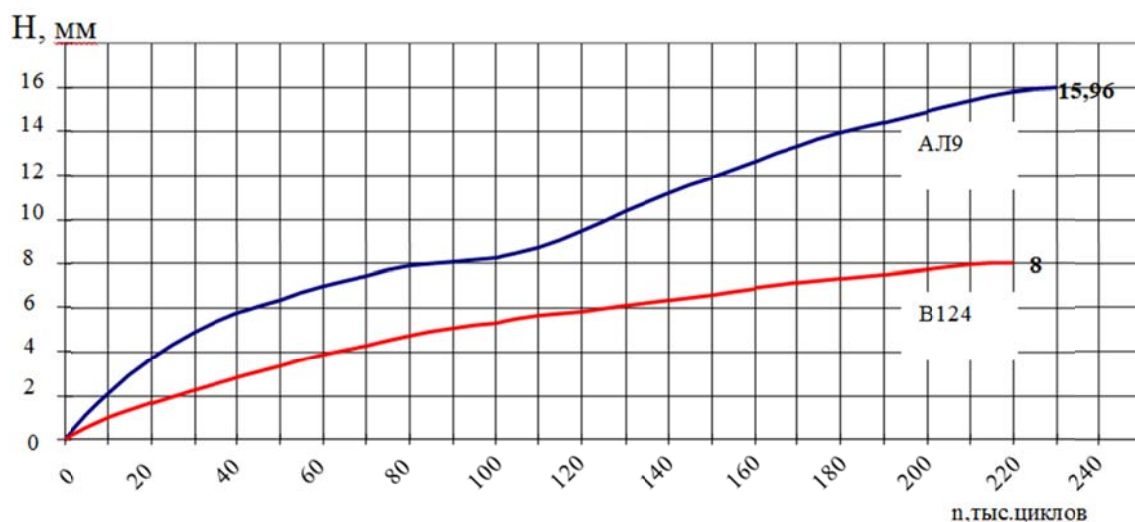


Рисунок 2 – Зависимость максимального изгиба рабочей поверхности из сплавов В124 и АЛ9 от циклического механического и теплового нагружения

Для проведения исследований рабочая поверхность была представлена, как некая тонкая оболочка.

Известно, что при изгибе оболочки энергия деформации растяжения значительно превышает энергию чистого изгиба. При выравнивании же изогнутой оболочки деформация в основном, сопровождается деформацией чистого изгиба при небольших деформациях растяжения.

Для получения уравнений, описывающих деформацию оболочки в процессе выравнивания, вычислим отдельно энергию деформации чистого изгиба и энергию деформации чистого растяжения.

При чистом изгибе в качестве нейтральной поверхности принималась поверхность, расположенная посередине оболочки, с началом системы координат в центральной точке рабочей поверхности и осью O_z , направленной вертикально. Предполагалось, что оболочка подвергается тепловому расширению, связанному с ее нагревом, и нагружению вертикальной, равномерно распределенной нагрузке G . При чистом изгибе принято, что смещения в горизонтальной плоскости равны нулю. Тогда вектор смещения $u^0 = (u_x^0, u_y^0, u_z^0)$ точек нейтральной поверхности определяется уравнениями:

$$u_x^0 = 0; \quad u_y^0 = 0; \quad u_z^0 = \vartheta(x, y) \quad (8)$$

Поскольку оболочка тонкая, то для изгиба, требуется приложить к ее поверхности силы, значительно меньшие, чем внутренние напряжения, возникающие внутри деформированной оболочки благодаря имеющим в ней место растяжениям и сжатиям. Поэтому в граничных условиях можно пренебречь возникающими внешними силами, что дают нам уравнения:

$$\sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0; \quad \sigma_{zz} = 0 \quad (9)$$

где $\sigma_{xz}, \sigma_{yz}, \sigma_{zz}$ – компоненты тензора деформации.

Дальнейшие вычисления проводились с использованием градиентных методов вычислительной математики и вариационных методов Галеркина с последующей численной реализацией.

При этом уравнение (19) позволяет определять форму подушки после выпрямления, под воздействием силовой нагрузки и градиента температур.

$$\vartheta(x, y) = \sum_{k=0}^M \sum_{n+m=k} \gamma_{nm}^* Q_{nm}(x, y) \quad (10)$$

Был выполнен системный анализ повышения износостойкости рабочих поверхностей гладильных подушек.

Первым этапом системного подхода является качественный анализ рабочих поверхностей верхней и нижней гладильных подушек как функциональной системы. При этом общей задачей является формулировка целевого назначения рабочих поверхностей.

Из литературных и научно технических источников определено целевое назначение рабочих поверхностей: равномерное распределение тепла по гладильным поверхностям, обеспечение подачи гладильной поверхности требуемого количества тепла с заданной температурой за определенный отрезок времени, равномерное распределение механического давления по гладильным плоскостям с заданным давлением, равномерное распределение воздушного потока и охлаждение гладильных плоскостей за заданное время.

Основной задачей данного анализа является выявление подсистем и их элементов, а также установление целевых функций, т. е. определение структуры рабочих поверхностей: материал, условия эксплуатации, способ изготовления.

Их целевыми функциями являются:

материал рабочих поверхностей – равномерно распределить тепло по гладильным поверхностям, обеспечить подачу гладильным поверхностям требуемого количества тепла с заданной температурой за определенное время, равномерно передать механическое давление рабочим поверхностям, обеспечить снижение температуры гладильных плоскостей за определенное время, обеспечить коррозионную стойкость в среде водяного пара;

условия эксплуатации рабочих поверхностей – циклическое воздействие тепла (водяного пара), циклическое воздействие механического давления, циклическое воздействие холодного воздуха из окружающей среды;

способ изготовления рабочих поверхностей – экономическая эффективность, геометрические размеры, стабильность геометрических размеров в условиях эксплуатации.

Анализ требований к рабочим органам и целевых задач позволил определить систему параметров каждой подсистемы, в том числе: химический состав материала, форму и шаг отверстий, теплопроводность, удельную теплоемкость, толщину рабочих поверхностей и их плотность, воздухопроницаемость, относительное удлинение, предел прочности, коэффициент линейного расширения, химический состав, параметры температуры и длительность цикла ее воздействия, параметры механического давления и длительность нагружения, показатели производительности и разрежения вакуумного прососа, стоимость материала и изготовления рабочих поверхностей и срок их службы, максимальную величину прогиба, длительность накопления остаточных напряжений.

На основе выполненного анализа разработана структурная схема исследований рабочих поверхностей и разработки эффективного способа и технологического процесса их изготовления.

В соответствии со структурной схемой на первом этапе количественного анализа устанавливаются числовые значения параметров рабочих органов, непосредственно связанных с условиями эксплуатации: теплопроводность, удельная теплоемкость, относительное удлинение, предел прочности, коррозионная стойкость, химический состав и др. Набор известных значений этих параметров может служить основой при определении материала рабочих поверхностей.

Отдельной задачей является определение геометрических размеров изогнутой рабочей поверхности в зависимости от ее материала и длины.

Использование результатов исследований по динамике температурного градиента, динамике силового воздействия и по кинетике изгиба рабочих поверхностей позволит оптимизировать режимы и параметры процесса выравнивания каждой рабочей поверхности и даст возможность разработать эффективный технологический процесс ее изготовления с учетом условий выполнения операций ВТО.

Заключение

1. Разработана математическая модель процесса изгиба рабочей поверхности гладильной подушки, позволяющая определять деформации и напряжения в ней при циклическом тепловом и механическом воздействии.

2. Построена математическая модель рабочей поверхности гладильной подушки после изгиба, что позволяет вычислять сплайн–функцию в произвольной точке и таким образом построить сплайн–интерполяцию изогнутой рабочей поверхности, а также рассчитывать максимальное и минимальное значение ее изгиба в зависимости от материала подушки.

3. На основе математических моделей процесса изгиба рабочей поверхности гладильной подушки и рабочей поверхности после изгиба построена система проектирования и изготовления гладильных подушек, обеспечивающая в рабочем состоянии в процессе теплового и механического воздействия требуемую форму рабочей поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Эффективные способы и технологические процессы внутрипроцессной влажно –тепловой обработки деталей швейных изделий / Болотских Д.И., Черепенько А.А., Черепенько А.П. // «Швейная промышленность». 2009. № 3. с. 45–46.
2. Эффективные способы и технологические процессы внутрипроцессной влажно –тепловой обработки деталей швейных изделий / Болотских Д.И., Черепенько А.А., Черепенько А.П. // «Швейная промышленность». 2009. № 6. С. 22.
3. Аналитические исследования геометрии рабочей поверхности гладильной подушки после изгиба в процессе эксплуатации / Черепенько А.А., Черепенько А.П., Жаворонков А.И. // «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». 2013. № 5 (301). с. 115–121.
4. Аналитические исследования процесса изгиба рабочей поверхности гладильной подушки / Черепенько А.А., Черепенько А.П., Жаворонков А.И. // «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». 2013. № 6 (302). с. 89–99.

Селеменова Елена Михайловна
ФГБОУ ВО ОГУ имени И.С.
Тургенева, г.Орел
Студентка кафедры «Технология и
предпринимательство»
Тел 89102036687,
E-mail: selemenevae@mail.ru

Губарева Людмила Ивановна
ФГБОУ ВО ОГУ имени И.С.
Тургенева, г.Орел
Кандидат педагогических наук,
доцент кафедры
«Профессионального обучения и
бизнеса»
Тел 89102676005,
E-mail: gubareva16@yandex.ru

Черепенько Аркадий Анатольевич
ФГБОУ ВО ОГУ имени И.С.
Тургенева, г.Орел
Доктор технических наук, профессор
кафедры «Машиностроения»
Тел 89107486625,
E-mail: arkan@nxt.ru

E.M. SELEEMENEVA, L.I. GUBAREVA, A.A. CHEREPENKO

INCREASE OF WEAR-RESISTANCE OF WORKING SURFACES OF IRONING PILLOWS WITH SIGNIFICANT LOADS

Abstract. *In the article the questions of increase of wear resistance of working surfaces of ironing pads in modes of non-stationary loading are considered. It is established that under the influence of cyclic mechanical and thermal loads in the process of operation they change the geometric dimensions (bend). It is noted that this leads to considerable non-equidistance of the ironing planes, stresses leading to deformation of the surface arise.*

Keywords: *cushion surfaces, stresses, temperature, technology.*

1. Effective methods and technological processes of in-process wet-heat treatment of parts of garments // Bolotskikh D.I., Cherepenko A.A., Cherepenko A.P. «Sewing Industry». 2009. № 3. With. 45–46.
2. Effective methods and technological processes of in-process wet-heat treatment of parts of garments // Bolotskikh D.I., Cherepenko A.A., Cherepenko A.P. «Sewing Industry». 2009. № 6. P. 22.
3. Analytical studies of the geometry of the working surface of the ironing pad after bending during operation. // Cherepenko A.A., Cherepenko A.P., Zhavoronkov A.I. «Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology». 2013. No. 5 (301). from. 115–121.
4. Analytical studies of the process of bending the working surface of an ironing pad Cherepenko A.A., Cherepenko A.P., Zhavoronkov A.I. «Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology». 2013. No. 6 (302). from. 89–99.

Selemeneva Elena Mikhailovna
FGBOU IN OSU named after I.S.
Turgenev, the city of Orel
Student of the department
«Technology and Entrepreneurship»
Tel 89102036687,
E-mail: selemenevae@mail.ru

Gubareva Lyudmila Ivanovna
FGBOU IN OSU named after I.S.
Turgenev, the city of Orel
Candidate of Pedagogical Sciences,
Associate Professor of the
Department of «Professional Training
and Business»
Phone 89102676005,
E-mail: gubareva16@yandex.ru

Cherepenko Arkady Anatolyevich
FGBOU IN OSU named after I.S.
Turgenev, the city of Orel
Doctor of Technical Sciences,
Professor of the Department of
«Machine Building»
Tel 89107486625,
E-mail: arkan@nxt.ru

УДК 621.91.01

А.В. КИРЕЙНОВ, В.Б. ЕСОВ

ВЛИЯНИЕ ПОЛУСИНТЕТИЧЕСКОЙ СОЖ С МЕТАЛЛООРГАНИЧЕСКИМИ ПРИСАДКАМИ НА ИЗНОС ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ ТОЧЕНИИ КОРРОЗИОННОСТОЙКОЙ СТАЛИ 12Х18Н10Т

Аннотация. В работе представлены результаты проведения эксперимента при точении заготовок из коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т режущими пластинами из твердого сплава с использованием смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), модифицированной металлоорганическими присадками на основе меди. При использовании экспериментальной СОЖ зафиксировано уменьшение износа по вспомогательной задней поверхности по сравнению с использованием базовой СОЖ. Методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) исследованы рабочие поверхности режущих пластин.

Ключевые слова: резание металлов, коррозионностойкие стали, смазочно-охлаждающие технологические средства, смазочно-охлаждающие жидкости, присадки.

Введение

Коррозионностойкие стали широко применяют в разных отраслях промышленности благодаря возможности их применения в агрессивных средах и при повышенных температурах. Низкая теплопроводность способствует возникновению высоких температур на режущих поверхностях инструмента при обработке резанием коррозионностойких сталей. Возникают большие силы резания, образование нароста на режущих кромках, происходит адгезионный и диффузионный износ инструмента [1, 2, 3].

В работе [4] авторами были обозначены современные тенденции применения смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) при обработке труднообрабатываемых материалов (ТМ). Несмотря на недостатки смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) и ужесточение экологических требований, применение СОЖ в настоящее время остается актуальным при обработке ТМ, так как позволяет повысить стойкость инструмента и обеспечить хорошее качество обработанной поверхности детали.

Работа посвящена изучению влияния полусинтетической СОЖ, модифицированной металлоорганическими присадками на основе меди, на износ твердосплавных режущих пластин при точении заготовок из коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т.

Методика проведения эксперимента

Эксперимент проводился на кафедре «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Оборудование – лабораторный стенд на базе модернизированного токарно-винторезного станка 16К20Ф3 с системой ЧПУ Flex NC. Инструмент – твердосплавные пластины Zhuzhou Cemented carbide cutting tool (ZCCCT, Китай) с защитным покрытием (TiN). Обработка заготовок диаметром 50 мм производилась при фиксированном режиме резания: $S = 0,1$ мм/об; $t = 0,5$ мм; $V = 220$ м/мин.

Исследуемые составы СОЖ приведены в таблице 1. В качестве базовой СОЖ (СОЖ № 1) выбрана полусинтетическая жидкость отечественного производства марки Велс-1М («Пермский завод смазок и СОЖ»). Для эксперимента был приготовлен 1 экспериментальный состав СОЖ с содержанием присадки 0,6 м. % (СОЖ № 2). Концентрация СОЖ – 5 %. Сравнение производилось с базовой СОЖ без присадок (СОЖ № 1). Всего произведено по 1 эксперименту для каждого типа СОЖ. Время обработки составляло 16 мин.

Таблица 1 – Исследуемые составы СОЖ

Наименование композиции	Состав композиции
СОЖ-1	Велс-1М
СОЖ-2	Велс-1М + 0,6 % присадки

Износ передней, задней главной и вспомогательной поверхностей фиксировался с помощью оптического микроскопа марки Optika с цифровой камерой Optika B5 после снятия резца со станка. Измерение износа режущих пластин и площадей контакта стружки с резцом производилось на фотографиях в программе КОМПАС-3D.

Исследование элементного состава поверхностей режущих пластин производилось на сканирующем электронном микроскопе марки Phenom Pro X с энергодисперсионным рентгеновским спектрометром.

Результаты эксперимента

На рисунке 1 представлены характерные фотографии рабочих поверхностей резцов после точения коррозионностойкой стали 12X18H10T с использованием базовой СОЖ-1 (Велс-1М) и СОЖ-2 (Велс-1М + 0,6 % присадки).

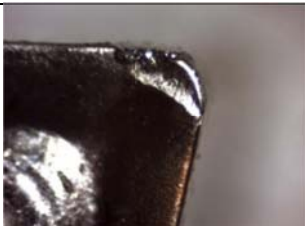
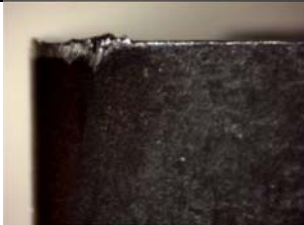
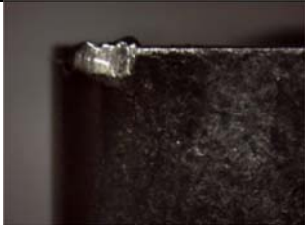
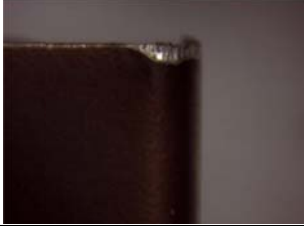
Поверхность пластины	СОЖ-1	СОЖ-2
Передняя		
Главная задняя		
Вспомогательная задняя		

Рисунок 1 – Характер износа передней, главной задней и вспомогательной задней поверхностей при точении коррозионностойкой стали с использованием СОЖ-1 и СОЖ-2. Время обработки – 16 мин

На фотографиях видно образование лунок износа на передней поверхности резца и площадок износа на задних поверхностях. Стоит отметить, что при использовании СОЖ-2 площадь контакта стружки с передней поверхностью резца меньше на 18 % по сравнению с использованием СОЖ-1, что косвенно свидетельствует об уменьшении коэффициента трения между стружкой и передней поверхностью резца.

На главной задней поверхности режущих пластин видно образование нароста как при точении с использованием СОЖ-1, так и с использованием СОЖ-2. Однако площадь нароста при точении с использованием СОЖ-2 значительно больше площади нароста при точении с использованием СОЖ-1 (рисунок 1). Из-за образовавшегося нароста определить величину износа по главной задней поверхности и произвести корректное сравнение не удалось. Износ по вспомогательной задней поверхности уменьшился на 16 %.

С целью выявления образования наростов и медных пленок при точении стали 12X18H10T с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) марки Phenom Pro X были проведены исследования химического состава поверхностей режущих пластин после обработки с использованием СОЖ-2. Исследовались зона 1 на передней поверхности и зоны 2, 3 на задней главной и вспомогательной поверхностях соответственно (рисунок 3).

Результаты элементного анализа передней и задних поверхностей представлены на рисунке 4. Видно, что образование медных пленок происходит на передней и вспомогательной задней поверхностях. На передней поверхности медь занимает

значительную площадь как в зоне контакта стружки с резцом, так и за ее пределами на защитном покрытии инструмента. На вспомогательной задней поверхности высокая концентрация меди наблюдается вблизи от режущей кромки в зоне наростообразования. На главной задней поверхности медь не обнаружена, так как проникновение СОЖ в эту зону затруднено или вообще не происходит.

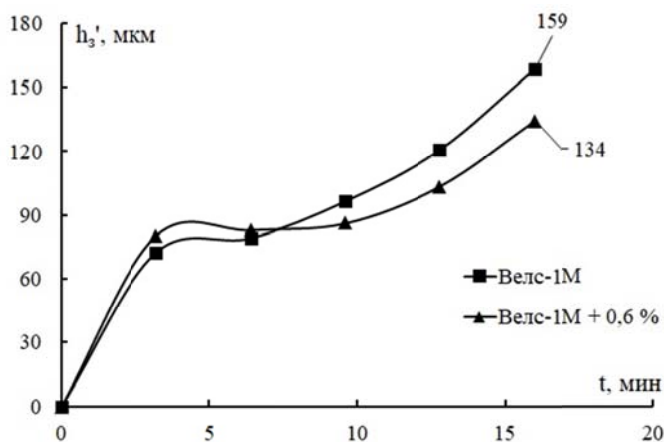


Рисунок 2 – Износ по вспомогательной задней поверхности

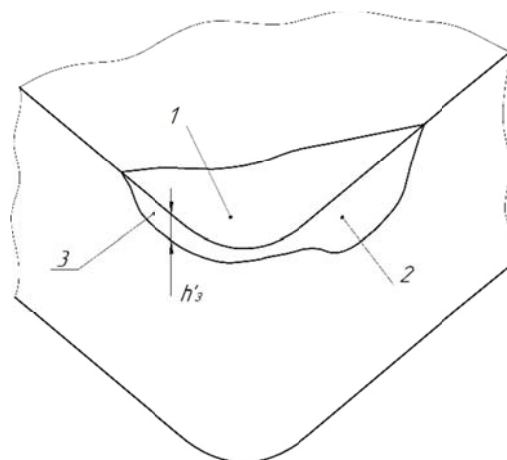


Рисунок 3 – Характерные зоны износа режущих пластин при точении стали 12Х18Н10Т

Передняя поверхность (зона 1, рисунок 4)		Главная задняя поверхность (зона 2, рисунок 4)		Вспомогательная задняя поверхность (зона 3, рисунок 4)	
Fe (31,5 %)	Cr (9,3 %)	Fe (50,2 %)	Cr (13,8 %)	Fe (35,2 %)	Cr (9,8 %)
Ni (3 %)	Al (5,4 %)	Ni (4,8 %)	Al (9,6 %)	Ni (2,9 %)	Al (3 %)
			-		
Ti (11,9 %)	Cu (0,9 %)	Ti (13,8 %)	Cu (0 %)	Ti (13,3 %)	Cu (1,5 %)

Рисунок 4 – Результаты элементного анализа передней и задних поверхностей режущей пластины при точении с использованием СОЖ-2

На основе полученных данных можно предположить, что образование медных пленок происходит преимущественно в областях наростообразования на контактных поверхностях и способствуют снижению интенсивности схватывания обрабатываемого и инструментального материалов вследствие разъединения трущихся поверхностей [3]. Вероятно, это объясняет уменьшение площади контакта стружки с резцом при точении с СОЖ-2.

Заключение

- Проведенные эксперименты показали положительное влияние металлоорганических присадок на снижение интенсивности износа режущего инструмента.

- При использовании СОЖ-2 площадь контакта стружки с резцом меньше на 18 % по сравнению с использованием СОЖ-1.
- Обнаружено образование медных пленок на передней и вспомогательной задней поверхностях режущей пластины.
- Проведенные эксперименты показали целесообразность организации полномасштабных исследований по определению областей эффективного использования металлоорганических присадок на основе меди при точении твердосплавными резцами коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энтелис, С.Г. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием. Москва, Машиностроение, 1986, 351 с.
2. M'Saoubi, R. High performance cutting of advanced aerospace alloys and composite materials. CIRP Annals - Manufacturing Technology; 2015, vol. 64, issue 2, pp. 557-580.
3. Подураев, В. Н. Резание труднообрабатываемых материалов, М. «Выш. школа», 1974.
4. Кирейнов, А.В. Современные тенденции применения СОТС при высокопроизводительной лезвийной обработке труднообрабатываемых материалов, Инженерный журнал: Наука и инновации, № 2 (62), 2017.

Кирейнов Алексей Валерьевич

МГТУ им. Н.Э. Баумана
аспирант каф. МТ-13 «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, г.Москва, ул. 2-я Бауманская 5, стр.1
8-915-474-58-83
E-mail: alexkireinov@gmail.com

Есов Валерий Балахметович

МГТУ им. Н.Э. Баумана
к.т.н., доцент каф. МТ-13 «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, г.Москва, ул. 2-я Бауманская 5, стр.1
8-916-590-50-26
E-mail: esov@bmstu.ru

A.V. KIREINOV, V.B. ESOV

THE INFLUENCE OF SEMI-SYNTHETIC CUTTING FLUID WITH ORGANOMETALLIC ADDITIVES ON TOOL WEAR IN TURNING OF STAINLESS STEEL 12H18N10T

Abstract. *This paper presents the results of an experiment with turning workpieces made of stainless steel 12H18N10T by carbide tool using cutting fluid, modified by organometallic additives based on copper. It is found that experimental cutting fluid can reduce the tool wear when compared to the base cutting fluid. Working surfaces of cutting tool were investigated by scanning electron microscopy (SEM).*

Keywords: *cutting, stainless steel, cutting fluid, additives.*

BIBLIOGRAPHY

1. Jentelis, S.G. Smazochno-ohlazhdajushhie tehnologicheskie sredstva dlja obrabotki metallov rezaniem [Cutting fluids for metal cutting]. Moskva, Mashinostroenie, 1986, 351 p.
2. M'Saoubi, R. High performance cutting of advanced aerospace alloys and composite materials. CIRP Annals - Manufacturing Technology; 2015, vol. 64, issue 2, pp. 557-580.
3. Poduraev, V. N. Rezanie trudnoobrabatyvaemyh materialov, M. «Vyssh. shkola», 1974.
4. Kirejnov, A.V. Sovremennye tendencii primeneniya SOTS pri vysokoproizvoditel'noj lezviyjnoj obrabotke trudnoobrabatyvaemyh materialov, Inzhenernyj zhurnal: Nauka i innovacii, № 2 (62), 2017.

Kireinov Aleksey Valerievich

Bauman Moscow State Technical University.
postgraduate,
Material Processing Technology Department, Bauman Moscow State Technical University.
105005, g. Moskva, ul. 2-ya Baumanskaya 5, str.1
Ph: 8-915-474-58-83
E-mail: alexkireinov@gmail.com

Esov Valeriy Balahmetovich

Bauman Moscow State Technical University, Moscow
Cand. Sci. (Engineering)
Material Processing Technology Department, Bauman Moscow State Technical University.
105005, g. Moskva, ul. 2-ya Baumanskaya 5, str.1
Ph: 8-916-590-50-26
E-mail: esov@bmstu.ru

МАШИНОВЕДЕНИЕ И МЕХАТРОНИКА

УДК 621.311.24

Р.Н. ПОЛЯКОВ, П.И. РЫЖЕНКО

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ ВЕТРОГЕНЕРАТОР С АДАПТИВНО ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ МОМЕНТОМ ИНЕРЦИИ

Аннотация. В статье рассматриваются базовые принципы функционирования ветрогенератора с адаптивно изменяющимся моментом инерции, который позволяет повысить энергоэффективность и целесообразность использования ветроэлектрической установки (ВЭУ) в качестве альтернативного источника энергии. Механизм работы ветрогенератора предполагает работу с меньшим моментом инерции при малых скоростях ветра и работу в режиме маховика при больших ветровых нагрузках, что также снижает порог срабатывания ветрогенератора по скорости ветра и открывает перспективы установки ветряных электростанций в регионах с небольшими среднегодовыми скоростями ветра. Описывается принципиальная возможность использования элементов механизма изменения инерции в качестве автобалансирующего устройства, что, в свою очередь, позволяет снижать динамические нагрузки на конструкцию ВЭУ в целом.

Ключевые слова: альтернативная энергетика, ветрогенератор, адаптивный момент инерции, самобалансировка, равномерность вращения.

Введение

Развитие новой энергетики, основанной на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ), обусловлено истощением энергетических ресурсов и экологическими проблемами в масштабе планеты. В последние годы ресурсы ископаемого топлива ограничены и оказывают неблагоприятное воздействие на окружающую среду, поэтому задача по снижению экономической зависимости от энергии ископаемого топлива является первостепенной. В мае 2013 года правительство подписало пакет мер поддержки ВИЭ. Постановление Правительства от 28.05.2013 № 449 и распоряжение Правительства от 28.05.2013 № 861-р.

Среди существующих ВИЭ использование ветра является наиболее перспективным, особенно в масштабах РФ. Максимальный уровень российских энергетических ресурсов ветра, измеряемый валовым потенциалом, а именно средней долгосрочной энергией ветра, доступной для использования на территории РФ в течение года, составляет 2 571 843 ТВт в год [1].

В отличие от солнечной энергии, ветер распределяется более равномерно по всей стране. Северная часть РФ, а также юго-запад имеет богатые ветроэнергетические ресурсы, скорость ветра легко превышающая 8 м/с при высоте 100 метров. Карта РФ средней скорости ветра на высоте 50 м показана на рисунке 1. При данных условиях техническая генерация электричества может достигать около 12 ГВтч в год.

Благоприятными областями для развития ветроэнергетики являются северо-западные части страны (Мурманск и Ленинградская области), северные территории Урала, Курганская область, Калмыкия, Краснодарский край и Дальний Восток. Морские побережья (с высокой разницей в температуре) имеют наибольший потенциал для ветра, а также степи и некоторые горные районы [2].

На Дальнем Востоке России располагается около 30% всего ветрового потенциала страны. Еще 16% находятся в западной и восточной Сибири. Северная Сибирь и Крайний Север имеют 14% ветрового потенциала [3]. К сожалению, большинство из этих мест не близки к регионам с большой численностью населения.

Однако помимо наличия территорий с малой численностью населения и условиями невысокой скорости ветра, существуют и другие недостатки, связанные с существующими решениями добычи электроэнергии из ВИЭ. Одной из важных проблем является невысокий

КПД ветровых агрегатов. Поэтому необходимо повышать энергоэффективность существующих электроустановок, таким образом, разрабатывая новые решения.

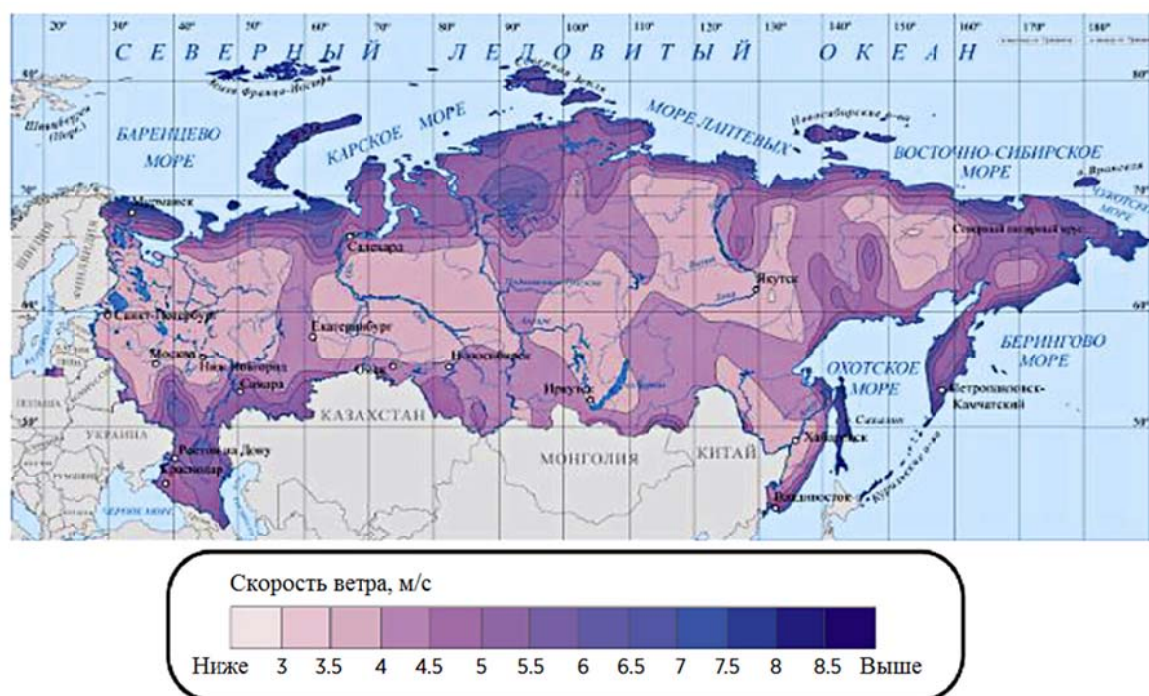


Рисунок 1 – Карта РФ средней скорости ветра на высоте 50 м [4]

Основная часть

На данный момент существует проблема электрификации отдаленных населенных пунктов, а также отдельных потребителей в труднодоступных местах, у которых отсутствует доступ к централизованной электросети. Для обеспечения электроснабжения таких потребителей используются малогабаритные ветрогенераторы. Из-за малых габаритов и невысокой необходимой мощности часто используют ветрогенераторы с вертикальной осью вращения. Причем в условиях небольших скоростей ветра использование данного типа ветроустановок наиболее эффективно.

Однако конструкции вертикальных ветрогенераторов различаются и имеют свои как преимущества, так и недостатки. Рассмотрим основные виды.

Ортогональный ветрогенератор (рисунок 2а) имеет в своей конструкции несколько параллельных лопастей, расположенных на одинаковом расстоянии от оси вращения. Преимущество такого исполнения это низкие затраты на его обслуживание, так как ветроколесо можно расположить на уровне земли. Недостатками являются большой вес лопастной системы и низкий срок службы опорных узлов [5].

Ветрогенератор с ротором Савониуса (рисунок 2б). Лопастей данного типа ветрогенераторов представляют собой полуцилиндры. Преимущества: высокие пусковые крутящие моменты, работа при более низких скоростях ветра, высокая технологичность производства. Недостатки: высокая материалоемкость, низкий КПД в сравнении с быстроходными горизонтально-осевыми ветрогенераторами [5].

Ветрогенератор с ротором Дарье (рисунок 2в) имеет вертикальную ось вращения, его лопасти представляют собой пластину, не имеющую специфического аэродинамического профиля, закрепленную на вершине и у основания оси вращения. Достоинства: отсутствие необходимости ориентировать ветрогенератор на ветер, простота изготовления лопастей, простота обслуживания. Недостатки: невозможность самостоятельного запуска при равномерном набегающем потоке ветра, низкий КПД, низкий ресурс вращающихся узлов [5].

Геликоидный ветрогенератор (рисунок 2, г) является модифицированным ортогональным ротором. Лопастей данного ротора закручены по дуге, что позволяет ему

вращаться более плавно, чем ортогональному. Достоинства: низкие динамические нагрузки, высокий ресурс всех подвижных узлов. Недостатки: сложная технология изготовления закрученных лопастей, высокая стоимость [5].

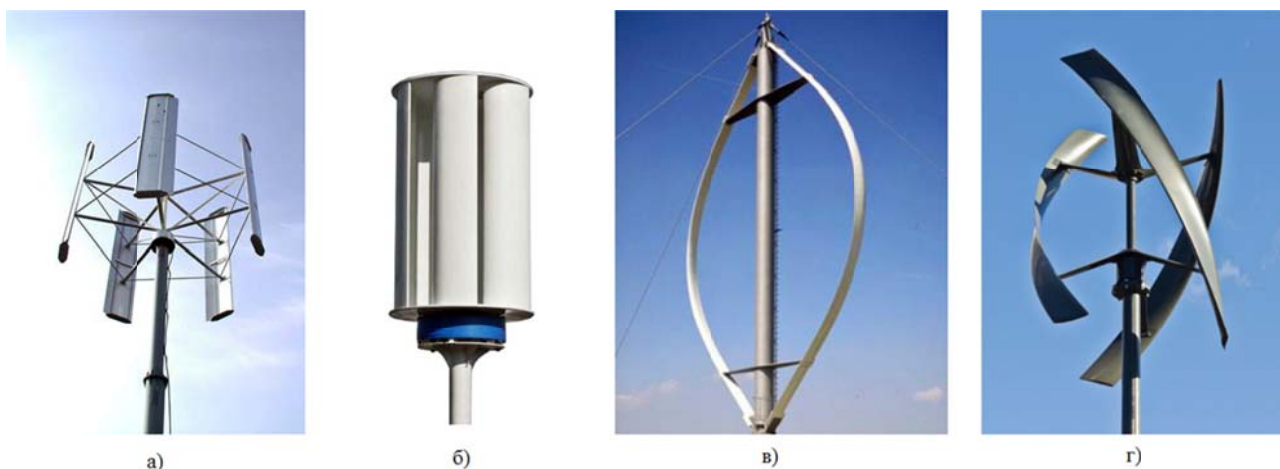


Рисунок 2 – Виды ветрогенераторов с вертикальным ротором:
 а – ортогональный ветрогенератор, б – ветрогенератор с ротором Савониуса,
 в – ветрогенератор с ротором Дарье, г – геликоидный ветрогенератор

При нулевой скорости вращения полезный крутящий момент, возникающий от давления воздуха на поверхность лопасти, должен преодолеть момент сопротивления магнитного поля и момент инерции ветроколеса. В зависимости от конструкции ветроколеса, как правило, момент срабатывания происходит при скорости ветра порядка 2–3 м/с. Отсюда вытекает основное противоречие создания ветрогенераторов: для получения большей энергии нужны ветроколеса больших диаметров, но при малой скорости ветра они не вырабатывают энергию. Передовые конструкции ветрогенераторов снабжены дополнительными приводами, которые вращают ветроколесо большого момента инерции при малых скоростях ветра чтобы не дать ему остановиться, но это требует дополнительных затрат энергии и снижает общий коэффициент полезного действия.

Существуют различные конструкторские решения, которые позволяют частично решить эту проблему путем адаптивного управления моментом инерции ветроколеса за счет перемещения грузов в радиальном направлении. Базовый алгоритм достаточно прост: при малой скорости ветра груз должен быть как можно ближе к центру, при большой скорости ветра груз должен быть как можно дальше от центра (рисунок 3а).

Основным недостатком таких конструктивных решений является то, что груз должен иметь отдельный привод, например, согласно описанию патента [6] для перемещения груза вдоль оси лопасти ветроколеса необходим отдельный механический, электрический, пневматический или гидравлический привод, что подразумевает наличие дополнительного источника энергии и снижает энергоэффективность ветряного колеса.

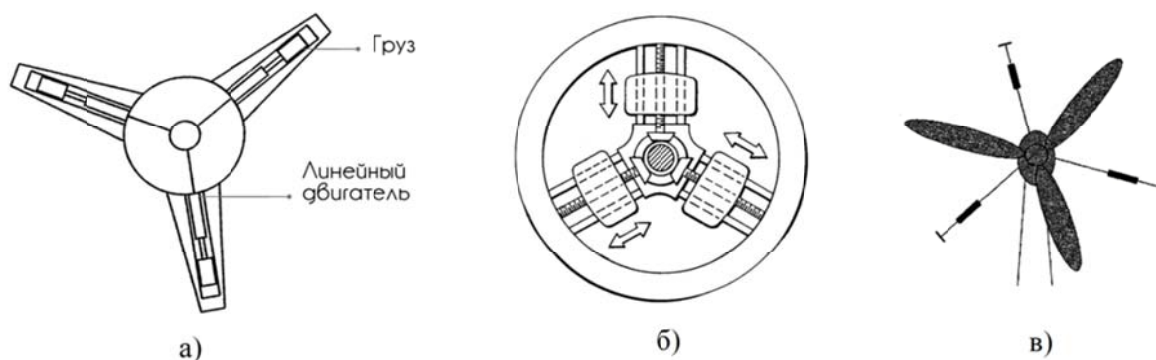


Рисунок 3 – Конструкции ветроколес с переменным моментом инерции:
 а – патент WO 2004/011801A1, б – патент EP0508790A1, в – US20030011197A1

Авторами статьи предложено оригинальное решение данной проблемы, заключающиеся в использовании принципа саморегулирования положения груза в канале за счёт использования баланса центробежных, магнитных и сил упругости.

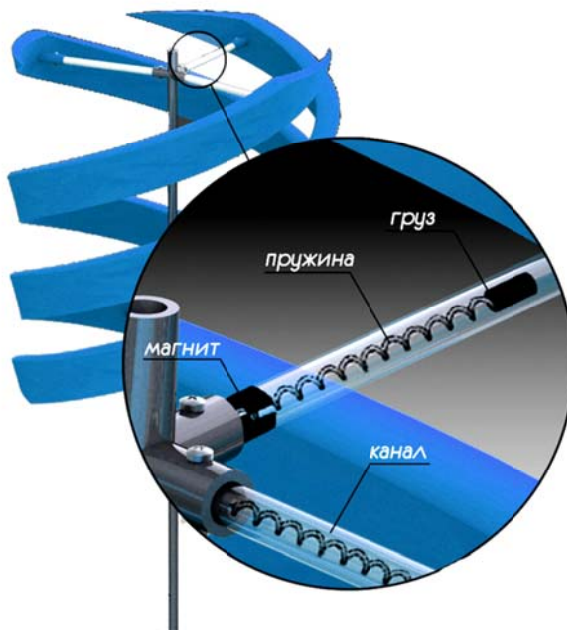


Рисунок 4 – Механизм изменения момента инерции винта вертикального исполнения

По сравнению с существующими конструкциями механизм саморегулируемого изменения момента инерции позволяет получить следующие преимущества:

- повышенная энергоэффективность от 5 до 20%;
- саморегулируемая автономная (без дополнительных затрат энергии) система изменения момента инерции ветроколеса;
- меньший порог срабатывания ветрогенератора по скорости ветра;
- большая равномерность вращения колеса и уменьшение перепадов мощности в сети;
- простая технология изготовления деталей и узлов ветроколеса;
- возможность применения механизма адаптивно изменяемого момента инерции в ветрогенераторах с горизонтальной и вертикальной осью, маховиках двигателей внутреннего сгорания и др. технологических машин, супермаховиках механических накопителей энергии;
- ожидаемая себестоимость ветроколеса ветрогенератора, выполненного с помощью аддитивных технологий изготовления, на 60% меньше, чем имеющихся аналогов, изготовленных по традиционной технологии.

Обоснование базового преимущества ветроколеса с переменным моментом инерции базируется на следующих математических положениях. Для построения математической модели ветрогенератора используются уравнение движения ветроколеса и механические характеристики, которые являются функциональными зависимостями выходной механической мощности P_m и движущего момента $M_{дв}$ от угловой скорости ветроколеса при различной скорости ветра V . Таким образом, динамическая модель ветрогенератора представляет математическую запись:

$$J_i \frac{d\omega}{dt} = M_{дв} - M_{Г} - M_{В} \quad (1)$$

где J_i – момент инерции ветрогенератора, зависящий от положения груза;

ω – угловая скорость ветряного колеса;

$M_{дв}$ – движущий момент от давления воздуха на лопасти ветроколеса,

$M_{дв} = \frac{P}{\omega}$, здесь P – мощность потока воздуха;

$M_{Г}$ – электромагнитный момент генератора;

$M_{В}$ – момент трения лопаток в воздушной среде.

Энергия, заключенная в ветре, находится в кубической зависимости от величины скорости ветра. Мощность, которую передает ветер ветряному колесу, с учетом коэффициента порывистости ветра имеет вид [7]:

$$P = \frac{C_P \rho A V^3}{2K_{\text{пор}}} \quad (2)$$

где C_P – коэффициент использования энергии ветра;

ρ – плотность воздуха;

A – площадь, ометаемая ветряным колесом;

V – средняя скорость ветра;

$K_{\text{пор}}$ – коэффициент порывистости ветра.

Также такая динамика вариаций скорости может привести к разрушению ветроагрегата. Порывистость ветра характеризуется коэффициентом, равным отношению максимальной измеренной скорости ветра к средней за определенный временной интервал (обычно менее двух минут):

$$K_{\text{пор}} = \frac{V_{\text{max}}}{V} \quad (3)$$

где V_{MAX} – максимальная измеренная скорость ветра, м/с;

V – средняя скорость ветра, м/с.

Из формулы мощности (3) вытекает возможность воздействия на коэффициент порывистости $K_{\text{пор}}$, а следовательно, и на КПД ветрогенератора. Данная возможность реализуется с использованием механизма саморегулирования момента инерции ветроколеса. Тогда скачки скорости ветра по времени, показанные на рисунке 5, сгладятся, как показано на рисунке 7.

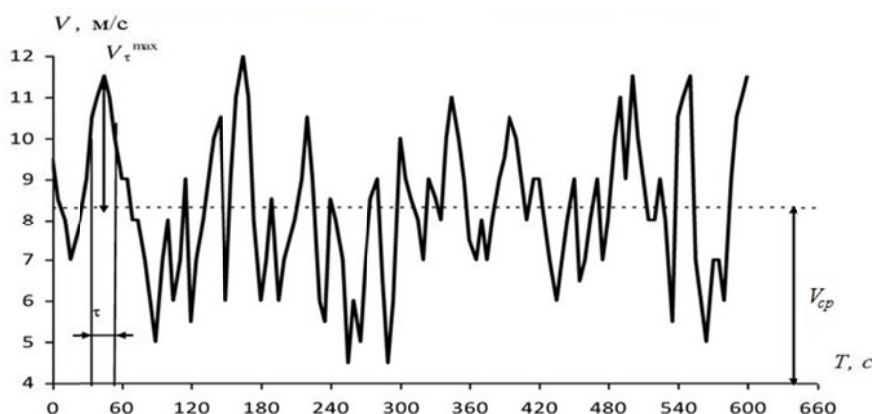


Рисунок 5 – Порывистость ветра

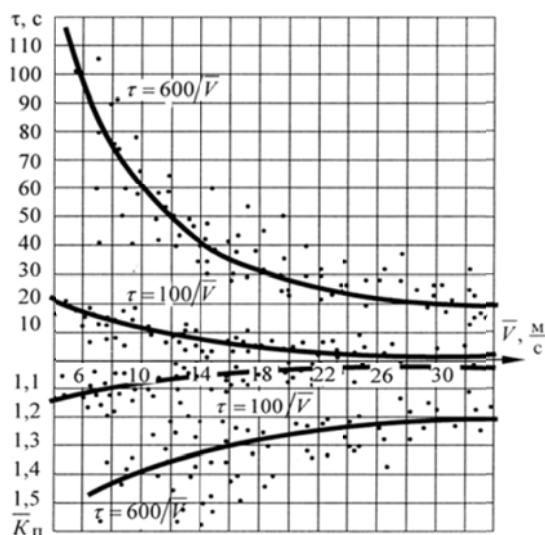


Рисунок 6 – Продолжительность порывов ветра

Повторяемость $K_{ПОР} = 1,05-1,10$, составляет около 40 %. Повторяемость $K_{ПОР} = 1,2-1,3$ не превышает 12 %, а обеспеченность порывов при $K_{ПОР} > 1,3$ составляет менее 4 %. В самых сильных порывах $K_{ПОР} = 1,6-1,7$, однако их повторяемость составляет всего лишь 0,002 %.

При сглаживании скачков скорости ветра из формулы (1) видно, что коэффициент порывистости стремится к равным одному $K_{ПОР} \rightarrow 1$, так как значение отклонения максимальной скорости ветра и минимальной от средней стремиться к 0, т. е. максимальная и минимальная скорости ветра стремятся стать равными средней скорости V_{MIN} и $V_{MAX} \rightarrow V$. Таким образом, КПД повышается от 5 до 30 %.

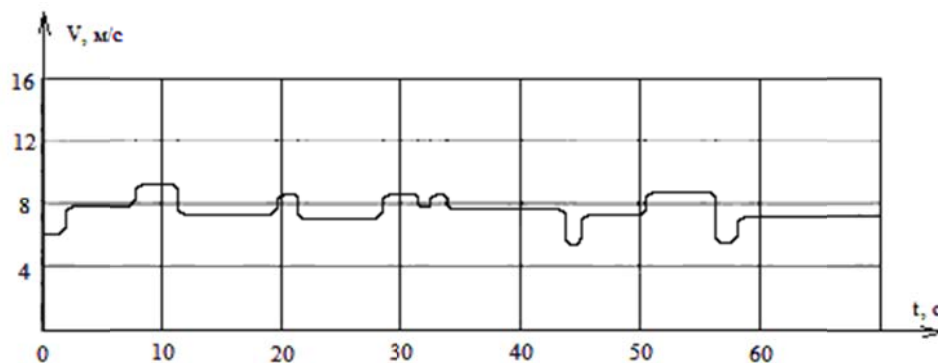


Рисунок 7 — График скорости ветра по времени (скачки скорости сглажены)

Заключение

Проект направлен на создание энергоэффективного ветрогенератора с адаптивно изменяемым моментом инерции и дешевой технологии создания ветряного колеса с помощью аддитивных технологий изготовления. Переменный момент инерции колеса, адаптивно изменяющийся скорости ветра, позволяет повысить энергоэффективность ветрогенератора за счет малого момента инерции при небольшом ветре и работе в режиме маховика при больших скоростях ветра. Заявленный эффект достигается путем применения оригинального механизма, который в отличие от подобных устройств не требует дополнительных приводов и затрат энергии. Адаптивно изменяемый момент инерции ветряного колеса позволит повысить энергоэффективность ветрогенератора на 5...20% по сравнению с существующими конструкциями.

С учетом того, что мощность ветродвигателя пропорциональна скорости ветра в кубе, то использование механизма переменного момента инерции позволит ощутимо увеличить энергию, генерируемую ветроэлектростанцией за счет более эффективной отдачи на переходных режимах и меньших пульсаций угловой скорости. Таким образом, при прочих равных условиях – габаритах ветроколеса, геометрии лопастей и др. – управление моментом инерции позволит существенно снизить удельную стоимость киловатта ветряной энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. APREN (2016), <http://www.apren.pt/pt/>, accessed 15 December 2016.
2. IRENA (2017), REmap 2030 Renewable Energy Prospects for Russian Federation, Working paper, IRENA, Abu Dhabi. www.irena.org_remap.
3. WWEA (World Wind Energy Association) (2012), Wind Power Status in the CIS Countries, WWEA, Bonn.
4. Попель, О.С., Фортов В.Е., Возобновляемая энергетика в современном мире, Издательский дом, Москва, 2015.
5. Reon: ОАО «Конструкторское бюро» Дисплей»: Энергия ветра: Вертикальные ветрогенераторы – URL: <http://reon.by/index.php/ob-energetike/energiya-vetra/80-001>. Дата обращения: 3.02.2018.
6. Pat. WO 2004/011801 A1 WIPO, A03B 9/02. WIND TURBINE WITH BLADES OF VARIABLE INERTIA /Bankuta, Attila. 31.07.2002.
7. Луговский, В.В. Динамика моря. Л., Судостроение, 200 с., 1976.

Поляков Роман Николаевич

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел
Доктор технических наук, доцент кафедры
«Мехатроника, механика и робототехника»
302009, г. Орёл, ул. Гайдара, д. 48, кв. 152
Тел.: 89038819381
E-mail: romanpolak@mail.ru

Рыженко Павел Игоревич

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел
Аспирант
302028, г. Орёл, ул. Бульвар Победы, д. 5, кв. 37
Тел.: 89536173365
E-mail: wesstnik@yandex.ru

R.N. POLYAKOV, P.I. RYZHENKO

**ENERGY EFFICIENT WIND TURBINE
WITH ADAPTLY VARIABLES INERTIA**

Abstract. *The article deals with the basic principles of the functioning of a wind generator with an adaptively changing moment of inertia, which makes it possible to increase the energy efficiency and expediency of using a wind power plant (VEU) as an alternative energy source. The mechanism of operation of the wind generator assumes work with a smaller moment of inertia at low wind speeds and operation in the flywheel mode with large wind loads, which also reduces the threshold of operation of the wind generator by wind speed and opens the prospect of installing wind power stations in regions with small average annual wind speeds. The principal possibility of using the elements of the inertia change mechanism as an auto-balancing device is described, which, in turn, makes it possible to reduce the dynamic loads on the design of the wind turbine as a whole.*

Keywords: *alternative energy, wind turbine, adaptive the moment of inertia, self-balancing, the uniformity of rotation.*

BIBLIOGRAPHY

1. APREN (2016), <http://www.apren.pt/pt/>, accessed 15 December 2016.
2. IRENA (2017), REmap 2030 Renewable Energy Prospects for Russian Federation, Working paper, IRENA, Abu Dhabi. www.irena.org_remap.
3. WWEA (World Wind Energy Association) (2012), Wind Power Status in the CIS Countries, WWEA, Bonn.
4. Popel O.S., Fortov V.E., Vozobnovlyаемая энергетика в современном мире, Izdatelskiy dom MEI, Moskva, 2015.
5. Reon: ОАО «Конструкторское бюро» Display, Energiya vetra: Vertikalnie vetrogeneratory ветрогенераторы – URL: <http://reon.by/index.php/ob-energetike/energiya-vetra/80-001>. Data obrasheniya: 3.02.2018.
6. Pat. WO 2004/011801 A1 WIPO, A03B 9/02. WIND TURBINE WITH BLADES OF VARIABLE INERTIA /Bankuta, Attila. 31.07.2002.
7. Lugovskiy, V.V., Dinamika moray. L., Sudostroenie, 200 s., 1976.

Polyakov Roman Nikolaevich

ФГБОУ ВО «ОГУ named after I.S.Turgenev», Orel
Doctor of technical Sciences, associate Professor of
«Mechatronics, mechanics and robotics»
302009, Orel, Gaydara st., 48–152
Tel.: 89038819381
E-mail: romanpolak@mail.ru

Ryzhenko Pavel Igorevich

ФГБОУ ВО «ОГУ named after I.S.Turgenev», Orel
PhD student
302028, Orel, Bulvar Pobedy st., 5–37
Tel.: 89536173365
E-mail: wesstnik@yandex.ru

УДК 621.867.61

Е.В. САФРОНОВ, А.Л. НОСКО

ВЫБОР ПЕРЕДАТОЧНОГО ОТНОШЕНИЯ МУЛЬТИПЛИКАТОРА ФРИКЦИОННОГО ТОРМОЗНОГО РОЛИКА

Аннотация. Тормозной ролик гравитационного стеллажа для паллет не может обеспечить допустимой скорости движения грузов без использования мультипликатора в его конструкции. В статье представлены критерии выбора минимального и максимального передаточного отношения мультипликатора. Минимальное передаточное отношение определяется из условия обеспечения работоспособности упора устройства остановки и разделения паллет, а максимальное передаточное отношение – условиями работы быстроходной ступени мультипликатора, на котором установлен центробежный тормоз. Приведенный пример расчета показывает, что передаточное отношение мультипликатора лежит в диапазоне $u = 20 \dots 120$. На практике, как правило, используются передаточные отношения $u = 24 \dots 35$. Исходя из полученных данных, наиболее рациональным типом мультипликаторов является двух- или трехступенчатый планетарный мультипликатор, размещенный внутри тормозного ролика.

Ключевые слова: тормозной ролик, гравитационный роликовый конвейер, гравитационный стеллаж, паллета, мультипликатор.

Введение.

Гравитационные стеллажи для паллет являются системой хранения с высокой плотностью и представляют собой гравитационные роликовые конвейеры (ГРК), установленные под углом в стеллажной конструкции [1]. Основными физическими источниками опасности для погрузочно-разгрузочной техники и персонала склада являются перемещаемые паллеты [2]. При этом наибольшую опасность представляет падение паллеты в процессе её разгрузки из гравитационного стеллажа из-за давления следующих паллет на разгружаемую, вследствие которого возникает дополнительный опрокидывающий момент, действующий на погрузчик. Для предотвращения возникновения дополнительного опрокидывающего момента используется устройство остановки и разделения паллет [3]. Скорость паллет, регулируемая тормозными роликами, должна обеспечивать работоспособность устройства остановки и разделения паллет в процессе всего срока службы гравитационного стеллажа.

Согласно проведенному анализу патентов и научно-технической литературы в области тормозных роликов и ГРК наиболее часто используемой на практике конструкцией является тормозной ролик с центробежным тормозом, установленном на быстроходном валу мультипликатора, необходимого для обеспечения допустимых скоростей движения паллет на ГРК [4].

Авторам не удалось найти публикаций в научной литературе по выбору передаточного отношения мультипликатора, определяющего его тип и кинематическую схему. В связи с этим актуальной задачей является разработка методики выбора передаточного отношения мультипликатора фрикционного тормозного ролика.

Критерий выбора передаточного отношения мультипликатора

Тормозной ролик прямого действия (рисунок 1) состоит из тормозной вставки 1, выполненной в виде законченной сборочной единицы, которая устанавливается (запрессовывается) внутрь обечайки 2 ролика. Неподвижная ось 5 тормозной вставки 1 является одной из двух опор ролика. Вторая опора 6 ролика выполняется в виде типового подшипникового узла или второй тормозной вставки. Тормозная вставка 1, оснащена мультипликатором 3 и фрикционным тормозом 4 центробежного типа, состоящем из фрикционной накладкой 8, закрепленной на тормозном рычаге 7 и обечайки 9 тормозной вставки 1.

При движении паллеты происходит её удар по упору устройства остановки и разделения паллет, в связи с чем при большой скорости паллеты возможна поломка упора. Таким образом, скорость паллеты в процессе торможения не должна превышать допустимых значений $[v]$, которое обеспечивается центробежным тормозом и передаточным отношением u_{min} .

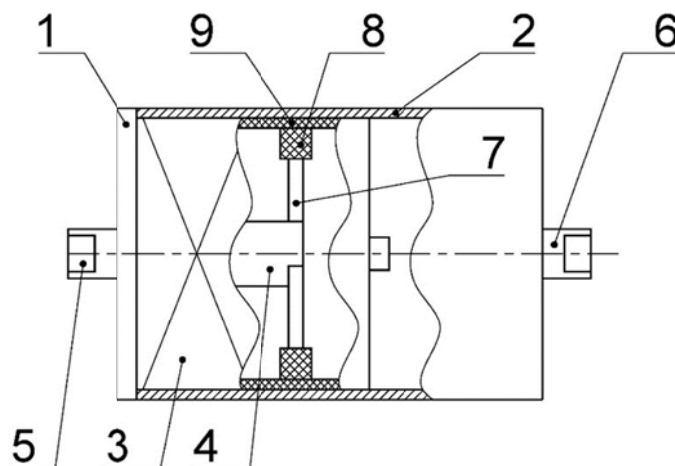


Рисунок 1 – Тормозной ролик прямого действия

С учетом малости угла наклона ГРК в стеллаже (уклон 2...5%), передаваемые мультипликатором моменты не превышают 25...30 Нм. Исходя из этого, мультипликатор, как правило, выполнен из полиамидов [5], обеспечивающих уменьшенную массу и необходимую прочность при количестве сателлитов первой ступени не менее 3-х. При этом максимальное передаточное отношение мультипликатора определяется из условия не превышения допустимых скоростей скольжения ступицы 4 центробежного тормоза по неподвижной оси 5 ролика. Согласно [6, 7] максимальные скорости скольжения для подшипников, выполненных из полиамидов, по стали составляют 3–4 м/с.

Минимальное передаточное отношение мультипликатора

Допустимая скорость движения паллет из условия обеспечения работоспособности упора устройства остановки и разделения паллет может быть рассчитана по методике, подробно описанной в [8], по формуле

$$[v] = [\sigma] \sqrt{\frac{2}{M} \cdot \frac{\left(\frac{K_{U_{изг}}}{E \cdot I_X} + \frac{K_{U_{кр}}}{G \cdot I_P} + K_{пал} \right)}{\left(\frac{K_{Mи}}{W_X} \right)^2 + 3 \left(\frac{K_{Mк}}{W_P} \right)^2}}, \quad (1)$$

где $[\sigma]$ – допустимые напряжения материала упора устройства остановки и разделения паллет;

M – масса паллеты (поддона с грузом);

$K_{U_{изг}}, K_{U_{кр}}$ – коэффициенты потенциальной энергии деформации упора от действия изгибающего и крутящего моментов;

E, G – модуль Юнга и модуль сдвига материала упора;

I_X, I_P – момент инерции сечения упора относительно оси изгиба и полярный;

$K_{Mи}, K_{Mк}$ – коэффициент изгибающего и крутящего моментов, действующего на упор;

W_X, W_P – сопротивление сечения упора изгибу относительно оси изгиба и кручению;

$K_{пал}^{сж}$ – коэффициент потенциальной энергии сжатия поддона.

Коэффициенты $K_{Mи}, K_{Mк}, K_{U_{изг}}, K_{U_{кр}}, K_{пал}^{сж}$ зависят от конструкции поддона и его материала.

Для деревянных *EUR*- и *FIN*-поддонов [9] коэффициент потенциальной энергии сжатия:

$$K_{пал}^{сж} = \frac{l_{гр}}{E_{пал}} \left(\frac{l_1^2}{F_1} + \frac{l_2^2}{2F_2} \right)$$

где $l_{гр}$ – длина поддона;

$E_{пал}$ – модуль упругости материала поддона (для дерева $E_{пал} = 10$ ГПа [10]);

F_1 – площадь торца крайней доски основания;

F_2 – площадь торца средней доски основания.

Определение коэффициентов $K_{Ми}$, $K_{МК}$, $K_{Uизг}$, $K_{Uкр}$ подробно изложено в работе [8].

Значения допустимой скорости $[v]$ деревянных *EUR*– и *FIN*–поддонов, определенные по формуле (1) в зависимости от массы груза для наиболее часто используемой конструкции упора [8] показаны на рисунке 2.

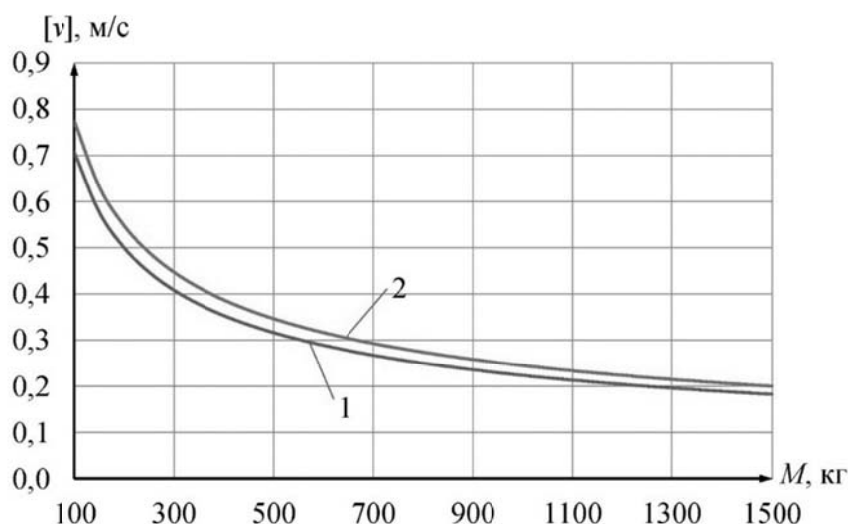


Рисунок 2 – Зависимости допустимой скорости $[v]$ деревянных *EUR*– (1) и *FIN*–поддонов (2) от массы M груза

С учетом того, что мультипликатор должен использоваться для всего диапазона масс грузов, то его передаточное отношение должно обеспечивать минимальную допустимую скорость $[v] = 0,2$ м/с, соответствующей максимальной массе груза на паллете $M = 1500$ кг.

С другой стороны, скорость установившегося движения паллеты на тормозном ролике может быть определена из математической модели процесса торможения паллеты по расчетной зависимости, предлагаемой в методике, опубликованной в работе [11], с учетом сопротивления передвижению паллеты по ГРК.

$$V = \frac{D_p}{2u} \sqrt{\frac{1}{r \cdot c \cdot m_{\Gamma}} \left[\frac{D_p \cdot M \cdot g \cdot (\tan \alpha - w)}{i \cdot D_{\text{ТОРМ}} \cdot f \cdot (1 + u \cdot \eta_{\text{ТР}})} \cdot (a - f \cdot b) + \frac{K}{2} \cdot (k_1 + k_2) \right]}, \quad (2)$$

где D_p – диаметр тормозного ролика;

u – передаточное отношение мультипликатора;

r – радиус действия центробежной силы;

m_{Γ} – масса одного тормозного рычага;

M – масса паллеты;

g – ускорение свободного падения;

$\tan \alpha$ – уклон роликового полотна ГРК;

w – сопротивление передвижению паллеты на ГРК;

i – количество тормозных рычагов ($i=2$);

f – коэффициент трения между накладкой и обечайкой;

$D_{\text{ТОРМ}}$ – диаметр торможения;

$\eta_{\text{ТР}}$ – КПД тормозного ролика;

a, b, c, k_1, k_2 – плечи действия соответственно сил нормального давления фрикционной накладки на обечайку тормозного ролика, трения, центробежной силы и сил размыкающих пружин;

K – сила упругости размыкающей пружины.

Точное значение минимально необходимого передаточного отношение мультипликатора $u_{\min}$ может быть найдено из уравнений (1) и (2), исходя из выбранных материалов фрикционной пары, т.е.

$$[V] = \frac{D_p}{2u_{min}} \sqrt{\frac{1}{r \cdot c \cdot m_\Gamma} \left[\frac{D_p \cdot M \cdot g \cdot (\tan \alpha - w)}{i \cdot D_{ТОРМ} \cdot f \cdot (1 + u_{min} \cdot \eta_{ТР})} \cdot (a - f \cdot b) + \frac{K}{2} \cdot (k_1 + k_2) \right]}.$$

После преобразований получим

$$[V]^2 = \frac{D_p^2}{4 \cdot u_{min}^2 \cdot r \cdot c \cdot m_\Gamma} \cdot \left[\frac{D_p \cdot M \cdot g \cdot (\tan \alpha - w)}{i \cdot D_{ТОРМ} \cdot f \cdot (1 + u_{min} \cdot \eta_{ТР})} \cdot (a - f \cdot b) + \frac{K}{2} \cdot (k_1 + k_2) \right],$$

или

$$C_3 u_{min}^3 + C_2 u_{min}^2 - C_1 u_{min} - C_0 = 0$$

где

$$\begin{cases} C_0 = \frac{D_p^3 2 M g (\tan \alpha - w) (a - f \cdot b)}{i D_{ТОРМ} f} + D_p^2 K (k_1 + k_2) \\ C_1 = D_p^2 K (k_1 + k_2) \eta_{ТР} \\ C_2 = 8 \cdot [V]^2 r c m_\Gamma \\ C_3 = C_2 \cdot \eta_{ТР} \end{cases}.$$

Для фрикционной пары вальцованный ФПМ / Сталь [12] и различных положений фрикционной накладки 8 на тормозном рычаге 7 (определяется углом β) расчетные данные показаны на рисунке 3. Исходные данные для расчета приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные для расчета скорости паллеты V от угла установки накладки β и передаточного отношения мультипликатора u

Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение
Диаметр ролика D_p , мм	89	Уклон роликового полотна $\tan \alpha$	0,04	КПД тормозного ролика $\eta_{ТР}$	0,7
Радиус действия центробежной силы r , мм	24	Соппротивление передвижению паллеты по полотну w	0,02	Сила упругости пружины K , Н	4
Плечо действия центробежной силы c , мм	27	Количество тормозных рычагов i , шт.	2	Плечо действия первой пружины k_1 , мм	16,3
Масса тормозного рычага с накладкой m_Γ , кг	0,04	Диаметр торможения $D_{ТОРМ}$, мм	83	Плечо действия второй пружины k_2 , мм	42,7
Масса паллеты M , кг	1500	Коэффициент трения накладки f	0,44		

Анализ представленного графика показывает, что условие не превышения допустимой скорости движения паллет, равной 0,2 м/с, достигается при минимальных значениях передаточного отношения $u_{min} = 20$.

Максимальное передаточное отношение мультипликатора

Максимальное значение передаточного отношения u_{max} определяется условиями работы быстроходной ступени мультипликатора. С учетом конструктивных ограничений тормозного ролика, а также малости передаваемых моментов, на быстроходной ступени используются подшипников скольжения. Как правило, ступица центробежного тормоза выполнена из полимерных материалов, например, полиамидов, которые не требуют установки дополнительных подшипников.

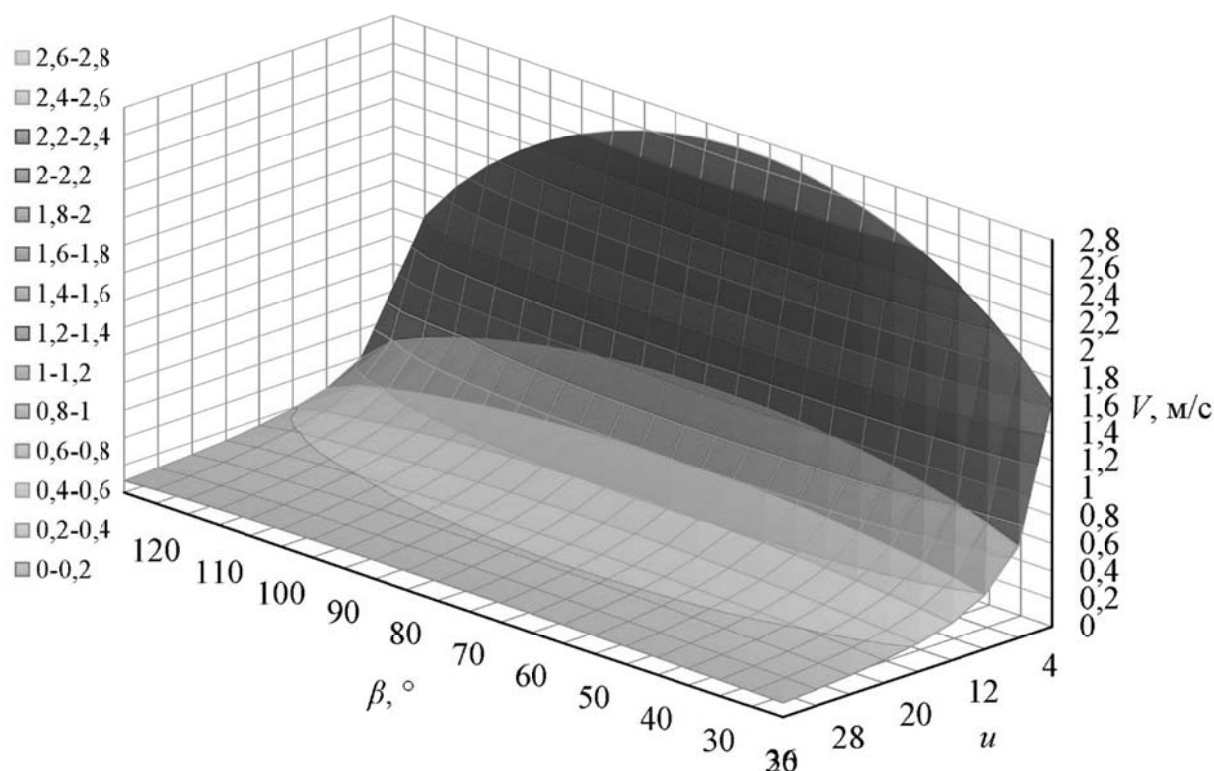


Рисунок 3 – Скорость V паллеты от угла установки β и передаточного отношения и мультипликатора

Как уже было отмечено, максимальные скорости скольжения для подшипников, выполненных из полиамидов, по стали составляют 3–4 м/с [6, 7]. Таким образом, при использовании допустимой скорости $[v] = 0,2$ м/с для паллет с максимальной массой груза, допустимая скорость скольжения быстроходной ступени определяется выражением

$$\frac{[v_6]}{d_{\text{подш}}} = \frac{[v]}{D_p} u_{\text{max}}$$

или

$$u_{\text{max}} = \frac{[v_6]}{[v]} \cdot \frac{D_p}{d_{\text{подш}}}$$

где $d_{\text{подш}}$ – посадочный диаметр подшипника;

$[v_6]$ – допустимая скорость скольжения быстроходной ступени, $[v_6] = 3 \dots 4$ м/с.

Тогда максимальное передаточное отношения мультипликатора для $D_p = 89$ мм:

- $u_{\text{max}} = 89 \dots 118$ – для $d_{\text{подш}} = 15$ мм;
- $u_{\text{max}} = 66 \dots 89$ – для $d_{\text{подш}} = 20$ мм.

Заключение

1. Приведен критерий выбора передаточного отношения мультипликатора тормозного ролика, и методика расчета его минимальных и максимальных значений;

2. Минимальное передаточное отношение выбирается, исходя из обеспечения работоспособности устройства остановки и разделения паллет.

3. Максимальное передаточное отношение выбирается из условия работы быстроходной ступени мультипликатора, на которой расположен центробежный тормоз. При использовании мультипликаторов, выполненных из полимерных материалов, например, полиамидов, максимальная скорость скольжения ступицы центробежного тормоза составляет 3–4 м/с.

4. Приведенный пример расчета показывает, что передаточное отношение мультипликатора лежит в диапазоне $u = 20 \dots 120$. На практике, как правило, используются передаточные отношения $u = 24 \dots 35$.

5. С учетом высоких значений передаточных отношений, а также конструктивных ограничений, используемых в гравитационных стеллажах ГРК, наиболее рациональным типом мультипликаторов является двух– или трехступенчатый планетарный мультипликатор, размещенный внутри тормозного ролика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Vujanac, R. Dynamic storage systems, ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering, Tome XIV, 79–82
2. Охрана труда при складировании материалов. ПОТ Р О–14000–007–98. Санкт–Петербург, ЦОТПБСП, 2003.
3. Шарифуллин, И. А. Обзор и анализ конструкций устройств остановки и разделения паллет роликовых гравитационных конвейеров // Journal of advanced research in technical science, 2018, № 8, с. 18–29.
4. Сафронов, Е.В. Анализ конструкций тормозных роликов гравитационных конвейеров для паллет // Наземные транспортно–технологические средства: проектирование, производство, эксплуатация: Материалы I Всероссийской заочной научно–практической конференции, ответственный редактор С.П. Озорнин, Чита: Забайкальский государственный университет, 2016. – С. 53–62.
5. Компаид Инженерные пластики – Полиамид 6(ПА6, РА6) // <http://www.kompamid.ru/materialy/poliamid-6-ra6-ra6.php> (дата обращения: 22.05.2018).
6. Полимеры в узлах трения машин и приборов: Справочник. / А.В. Чичинадзе, А.Л. Левин, М.М. Бородулин, Е.В. Зиновьев; Под ред. А. В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 1988. 328 с.
7. Анурьев, В. И. Справочник конструктора–машиностроителя: В 3–х томах, Том 2. – 9–е изд., перераб. и доп. / Под ред. И. Н. Жестковой. – М.: Машиностроение, 2006. – 960 с.
8. Носко, А.Л. Методика определения максимально допустимой скорости движения поддона на гравитационном роликовом конвейере // Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2017, № 8, с. 32–40
9. ГОСТ 33757–2016 Поддоны плоские деревянные. Технические условия. М., Стандартинформ, 2016, 22 с.
10. Арленинов, Д.К. Переменный модуль упругости древесины // Вестник МГСУ, 2011, №1, с. 150–152
11. Носко, А.Л. Методика расчета тормозного ролика центробежного типа применительно к гравитационным роликовым конвейерам для паллет // Механизация строительства, 2017, Том 78, № 6, с. 26–31.
12. ГОСТ 15960–96 Материалы асбестовые фрикционные эластичные и изделия из них. Технические условия. М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. 15 с.

Сафронов Евгений Викторович

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, г Москва
аспирант, кафедра «Подъемно–транспортные системы»
105005, г. Москва, 2–я Бауманская ул., дом 5, стр. 1,
Тел. 8 (926) 683–31–17
E–mail: gen–s@mail.ru

Носко Андрей Леонидович

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, г Москва
доктор технических наук; профессор; кафедра
«Подъемно–транспортные системы»
105005, г. Москва, 2–я Бауманская ул., дом 5, стр. 1
Тел. 8 (905) 506–35–25
E–mail: dr.nosko@mail.ru

E.V. SAFRONOV, A.L. NOSKO

SELECTION OF THE GEAR RATIO OF THE MULTIPLICATOR OF FRICTION BRAKE ROLLER

Abstract. *The brake roller of the pallet flow rack cannot provide the permissible speed of movement of goods without using a multiplier in its design. The article presents the criteria for selecting the minimum and maximum gear ratio of the multiplier. The minimum gear ratio is determined from the condition that the stopper of the stopping device and the pallet separation is operable, and the maximum gear ratio is determined by the operating conditions of the high–speed stage of the multiplier on which the centrifugal brake is installed. The above calculation example shows that the ratio of the multiplier is in the range $u = 20 \dots 120$. In practice, as a rule, the gear ratios $u = 24 \dots 35$ are used. Proceeding from the received data, the most rational type of multipliers is a two– or three–stage planetary multiplier located inside the brake roller.*

Keywords: *brake roller, gravitational roller conveyor, gravity rack, pallet, multiplier.*

BIBLIOGRAPHY

1. Vujanac R., Miloradovic N., Vulovic S. (2016), Dynamic storage systems, ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering, Tome XIV, 79–82
2. Okhran truda pri skladirovanii materialov. POT R O–14000–007–98. Sankt–Peterburg, TSOTPBSP, 2003.
3. Sharifullin I. A., Safronov Ye. V., Nosko A. L. Obzor i analiz konstruktsey ustroystv ostanovki i razdeleniya pallet rolikovykh gravitatsionnykh konveyerov // Journal of advanced research in technical science, 2018, № 8, с. 18–29.
4. Safronov Ye. V. Analiz konstruktsey tormoznykh rolikov gravitatsionnykh konveyerov dlya pallet // Nazemnyye transportno–tekhnologicheskiye sredstva: proyektirovaniye, proizvodstvo, ekspluatatsiya: Materialy I Vserossiyskoy zaochnoy nauchno–prakticheskoy konferentsii, otvetstvennyy redaktor S.P. Ozornin, Chita: Zabaykalskiy gosudarstvennyy universitet, 2016. – S. 53–62.
5. Kompamid Inzhenernyye plastiki – Poliamid 6(PA6, PA6) // <http://www.kompamid.ru/materialy/poliamid-6-pa6-pa6.php> (data obrashcheniya: 22.05.2018).
6. Polimery v uzlakh treniya mashin i priborov: Spravochnik. / A.V. Chichinadze, A.L. Levin, M.M. Borodulin, Ye.V. Zinoviyev; Pod red. A. V. Chichinadze. M.: Mashinostroyeniye, 1988. 328 s.
7. Anuryev V. I. Spravochnik konstruktora–mashinostroitelya: V 3–kh tomakh, Tom 2. – 9–ye izd., pererab. i dop. / Pod red. I. N. Zhestkovoy. – M.: Mashinostroyeniye, 2006. – 960 s.
8. Nosko A. L., Safronov Ye. V. Metodika opredeleniya maksimalno dopustimoy skorosti dvizheniya poddona na gravitatsionnom rolikovom konveyere // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye, 2017, № 8, s. 32–40
9. GOST 33757–2016 Poddony ploskiye derevyannyye. Tekhnicheskiye usloviya. M., Standartinform, 2016, 22 s.
10. Arlenin D.K., Arlenin P.D. Peremennyy modul uprugosti drevesiny // Vestnik MGSU, 2011, №1, s. 150–152
11. Nosko A. L., Safronov Ye. V. Metodika rascheta tormoznogo rolika tsentrobezhnogo tipa primenitelno k gravitatsionnym rolikovym konveyeram dlya pallet // Mekhanizatsiya stroitelstva, 2017, Tom 78, № 6, s. 26–31.
12. GOST 15960–96 Materialy asbestovyye friktsionnyye elastichnyye i izdeliya iz nikh. Tekhnicheskiye usloviya. M.: IPK Izdatelstvo standartov, 2003. 15 s.

Safronov Evgeniy Viktorovich

Bauman Moscow State Technical University, Moscow
Post–graduate, «Hoisting and transport systems»
department
105005, Moscow, Russian Federation, 2nd
Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1
Ph. 8 (926) 683–31–17
E–mail: gen–s@mail.ru

Nosko Andrey Leonidovich

Bauman Moscow State Technical University, Moscow
Doctor of Science (Eng.), Professor, «Hoisting and transport
systems» department
105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya
St., Bldg. 5, Block 1
Ph. 8 (905) 506–35–25
E–mail: dr.nosko@mail.ru

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ РОБОТА–ОРНИТОПТЕРА С ПАССИВНО СКЛАДЫВАЮЩИМИСЯ КРЫЛЬЯМИ

Аннотация. Статья посвящена описанию и исследованию робота–орнитоптера с крыльями, которые во время взмахов пассивно складываются и раскладываются за счет конструктивных особенностей устройства, управление этим процессом не предусмотрено. Представлено детальное описание конструкции робота и его основных узлов, на основании которого предложена расчетная схема механизма взмахов крыльев с учетом их сложения/разложения. Проведен кинематический анализ механизма, определены радиус–векторы основных точек робота. Представлены результаты численного моделирования взмахов крыльев, установлено влияние на характер аэродинамических сил, а также величину их наибольшего и наименьшего значений площади крыльев и способа ее достижения (за счет изменения длины и ширины), соотношения площадей полностью сложенного и полностью разложенного крыла. Даны рекомендации по проектированию крыльев орнитоптера.

Ключевые слова: робот–орнитоптер, сложение/разложение крыльев, механизм взмахов крыльев, механизм сложения крыльев, аэродинамические силы.

Введение

Причиной интенсивных теоретических, экспериментальных, инженерных исследований роботов–орнитоптеров является тот факт, что такие системы обладают рядом достоинств, к которым можно отнести малый уровень шума, возможность эффективно работать при различных режимах движения объекта, высокие маневренные качества [1–6]. Области применения орнитоптеров можно разделить на военные и гражданские. В первом случае такие роботы могут использоваться для сбора информации о противнике, обследовании районов боевых действий, определения наличия в воздухе веществ, относящихся к химическому и биологическому оружию и т. д. К гражданским областям применения орнитоптеров можно отнести следующие: мониторинг нефтегазопроводов и линий электроснабжения, контроль экологической обстановки, контроль дорожного движения и государственной границы и т. п. [7–10].

В данной работе рассматривается робот–орнитоптер, полет которого осуществляется за счет пассивного сложения/разложения крыльев в процессе взмахов, реализуемого специальным механизмом, предложена конструктивная схема робота, описано устройство и принцип работы основных узлов. Представлены результаты моделирования взмахов устройства, которые необходимо учитывать для эффективного проектирования таких устройств.

1. Описание робота–орнитоптера

В работе рассматривается орнитоптер, у которого разница в значениях аэродинамической силы при взмахе крыльями вверх/вниз достигается за счет изменения их площади, обеспечиваемого конструктивной схемой робота. На рисунке 1 представлен общий вид проектируемого орнитоптера. Устройство состоит из корпуса 1 (на рисунке 1 показаны только две его продольные планки), крыльев 2, хвоста 3, а также механизма 4, обеспечивающего взмахи крыльев, механизма 5, посредством которого изменяется площадь крыльев во время полета, и механизма 6 поворота хвоста.

Механизм взмахов крыльев показан на рисунке 2 и состоит из двигателя, редуктора и кривошипно–кулисного механизма. На рисунке 2,а представлена часть этого механизма, а именно двигатель и редуктор. Между двух продольных планок 7 и 8 корпуса орнитоптера установлены опоры 9 и 10 редуктора. На опоре 10 закреплен электропривод 11, вал которого соединяется с входным валом редуктора. Последний представляет собой открытую двухступенчатую цилиндрическую передачу, образованную зубчатыми колесами 12 – 15, валы 16 и 17 ступеней вращаются в подшипниках скольжения, установленных в опорах 9 и 10. На рисунке 2,а показаны только подшипники 18 и 19 в опоре 10. В целях минимизации массы всей конструкции редуктор выполнен в виде открытой передачи.

На рисунке 2,б показан кривошипно–кулисный механизм, который преобразует вращательное движение выходного звена редуктора в возвратно–поступательное движение крыльев, т.е. зубчатое колесо 15 редуктора выступает в данном механизме в роли кривошипа. Основными компонентами этого механизма являются: кривошип 15, шатун 20,

планки крыльев (кулисы) 21 и оси крыльев 22, неподвижно установленные в отверстиях 23 опор 9 и 10 редуктора. Шатун соединяет между собой крипошип и планки крыльев (кулисы), которые за счет соединения с осями при помощи отверстий 24 специальной формы (формы шпоночного паза для призматической шпонки) совершают качательное движение и осуществляют взмахи крыльев вверх/вниз.

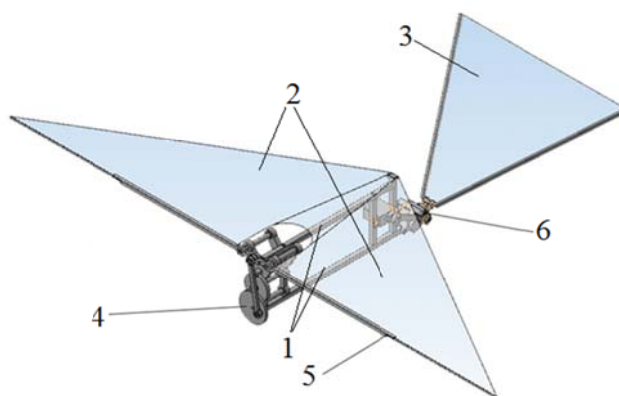


Рисунок 1 – Общий вид орнитоптера

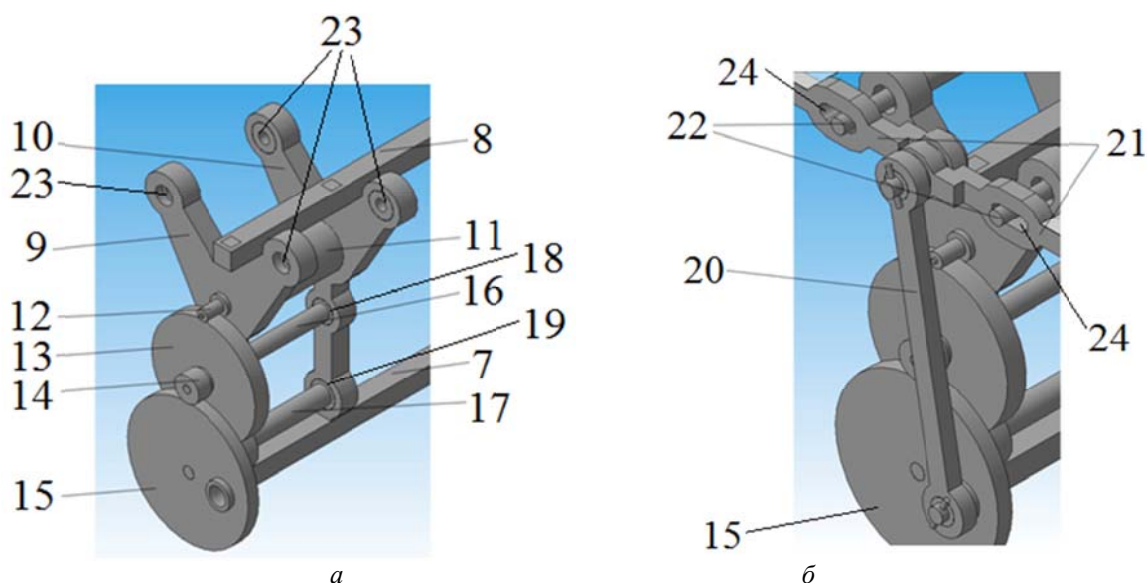


Рисунок 2 – Механизм, обеспечивающий взмахи крыльев:

а – двигатель и цилиндрический двухступенчатый редуктор, б – крипошипно-кулисный механизм

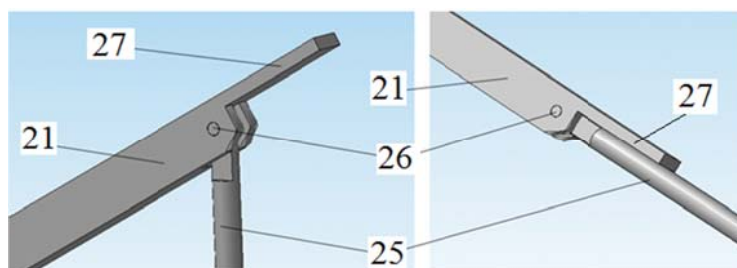


Рисунок 3 – Механизм изменения площади крыльев орнитоптера

На рисунке 3 показан механизм изменения площади крыльев при взмахах вверх/вниз. Каждое крыло орнитоптера состоит из двух звеньев, одно из них – это планка крыла 21, а второе – складывающаяся часть 25. Звенья крыла соединены между собой при помощи цилиндрического шарнира 26. На звене 21 расположен упор 27, в который при движении крыла вниз упирается его звено 25, площадь крыла при этом максимальна, а при движении крыла вверх этот упор не препятствует сложению звеньев крыла в шарнире 26, площадь крыла при этом минимальна.

Для управления углами крена и тангажа орнитоптера используется хвост, поворачиваемый двумя сервоприводами через специальный механизм, как показано на рисунке 4.

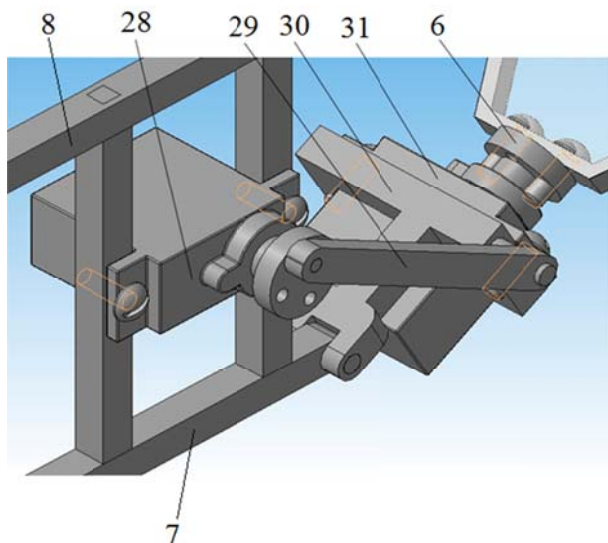


Рисунок 4 – Механизм поворота хвоста

На продольных планках 7 и 8 корпуса робота установлен сервопривод 28, вал которого через рычаг 29 соединен с креплением 30 другого сервопривода 31, вал которого в свою очередь соединен с хвостом 6 орнитоптера. Для изменения угла тангажа робота необходимо повернуть выходной вал сервопривода 28, при этом хвост вместе с приводом 31 будет наклоняться вверх/вниз относительно продольной оси устройства. Для управления углом крена используется поворот вала сервопривода 31.

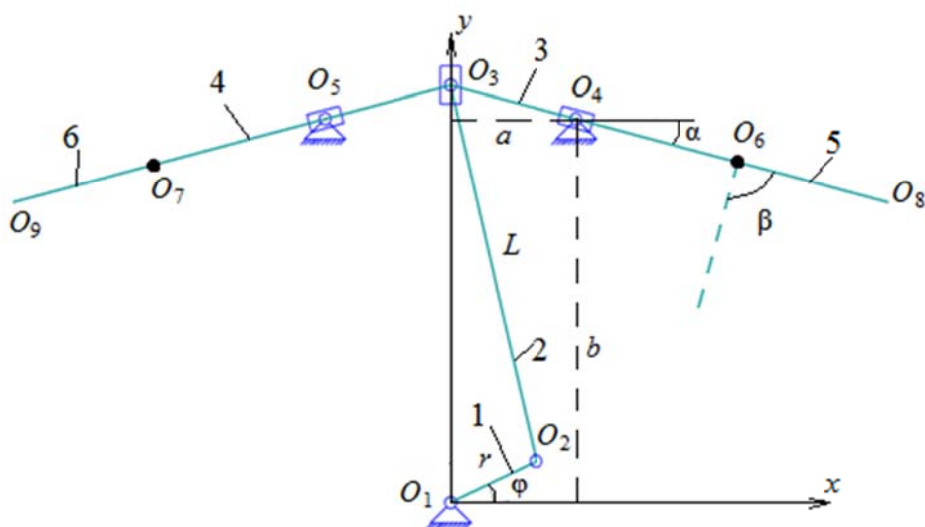


Рисунок 5 – Расчетная схема механизма взмахов крыльев

2. Кинематический анализ механизма взмахов крыла

В дальнейшем остановимся на рассмотрении взмахов крыльев и работы соответствующего кривошипно–кулисного механизма в плоскости O_1x . Расчетная схема приведена на рисунке 5, где приняты следующие обозначения: 1 – кривошип, 2 – шатун, 3, 4 – нескладывающиеся части крыльев, 5, 6 – складывающиеся части крыльев. Будем рассматривать случай, когда кривошип длиной r вращается с угловой скоростью $\dot{\varphi}$, направление вращения отсчитывается от оси O_1x против часовой стрелки. Шатун имеет длину L , точки O_4 и O_5 удалены от точки O_1 на расстояния a и b вдоль осей системы координат, нескладывающаяся часть крыла имеет длину $O_3O_6=O_3O_7=k$, складывающаяся часть крыла – длину $O_6O_8=O_7O_9=p$.

Ниже приведены радиус–векторы основных точек механизма для крыла 4. Точка O_1 совпадает с началом координат:

$$\bar{r}_{O1} = (0 \ 0)^T. \quad (1)$$

Радиус–вектор точки O_2 :

$$\bar{r}_{O2} = \begin{pmatrix} r \cos \varphi \\ r \sin \varphi \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Точка O_3 имеет следующие координаты:

$$\bar{r}_{O3} = \begin{pmatrix} 0 \\ r \sin \varphi + \sqrt{L^2 - r^2 \cos^2 \varphi} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Координаты точки O_4 можно записать следующим образом:

$$\bar{r}_{O4} = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Положение крайней точки нескладывающейся части крыла O_6 описывается радиус–вектором:

$$\bar{r}_{O6} = \begin{pmatrix} k \cos \alpha \\ r \sin \varphi + \sqrt{L^2 - r^2 \cos^2 \varphi} + k \sin \alpha \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где

$$\alpha = \arctg \left(\frac{b - r \sin \varphi + \sqrt{L^2 - r^2 \cos^2 \varphi}}{a} \right). \quad (6)$$

Крайняя точка крыла O_8 имеет следующие координаты:

$$\bar{r}_{O8} = \begin{pmatrix} k \cos \alpha + p \cos(\alpha - \beta) \\ r \sin \varphi + \sqrt{L^2 - r^2 \cos^2 \varphi} + k \sin \alpha + p \sin(\alpha - \beta) \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где $\beta \in [0, \pi/2]$ – угол между звеньями 3 и 5, при полностью разложенном крыле $\beta = 0$, при полностью сложенном $\beta = \pi/2$.

Данный кинематический анализ необходим для дальнейшего моделирования возникающей при взмахах крыльев аэродинамической силы, которую будем определять по формуле

$$R = C_R \rho S v_{O6}^2 / 2, \quad (8)$$

где C_R – безразмерный коэффициент полной аэродинамической силы,
 S – эффективная площадь крыла,
 ρ – массовая плотность воздуха,
 v_{O6} – скорость точки O_6 приложения аэродинамической силы.

Сложенное/разложенное крыло будем считать имеющим форму прямоугольника, площадь разложенного крыла будем определять следующим образом:

$$S_{\max} = S_1 + S_2, \quad (9)$$

где $S_1 = kw$ – площадь несгибаемой части крыла,
 $S_2 = pw$ – площадь сгибаемой части крыла,
 w – ширина крыла.

Площадь сложенного крыла равна

$$S_{\min} = S_1. \quad (10)$$

Причем будем считать, что сложение и разложение крыла происходит не мгновенно, эффективная площадь крыла во время взмаха определяется по формуле:

$$S = \begin{cases} S_{\min}, & \beta = \pi/2, \\ S_{\max}, & \beta = 0, \\ S_{\min} + S_2 \cos \beta, & 0 < \beta < \pi/2, \end{cases} \quad (11)$$

причем положим, что $\dot{\beta} \cong \dot{\varphi}$.

3. Результаты численного моделирования

В данном разделе представлены результаты численного моделирования движения крыльев орнитоопера при условии, что скорость их взмахов существенно больше вертикальной скорости корпуса орнитоопера, т.е. рассматривается случай, когда корпус не движется вдоль вертикальной оси. Целью проводимых исследований является установление влияния на аэродинамические силы площади крыльев при условии, что их масса настолько мала, что не изменяется при варьировании площади. Все результаты представлены в безразмерном виде.

Для удобства оценки результатов численного моделирования введем коэффициент μ соотношения площади складывающейся части крыла и площади полностью разложенного крыла

$$\mu = \frac{S_2}{S_{\max}} \quad (12)$$

а также коэффициент ψ отношения максимального и минимального значений аэродинамической силы

$$\psi = \frac{R_{\max}}{R_{\min}} \quad (13)$$

На рисунке 6 представлены временные зависимости аэродинамической силы при разных значениях коэффициента μ . По данным графикам видно, что при движении крыла вниз (отрицательная часть графика) качественные и количественные характеристики изменения аэродинамической силы одинаковы для разных значений μ , а при движении вверх качественный характер графиков остается неизменным, а количественные характеристики меняются: по мере увеличения коэффициента μ создается меньшая аэродинамическая сила, препятствующая подъему крыла.

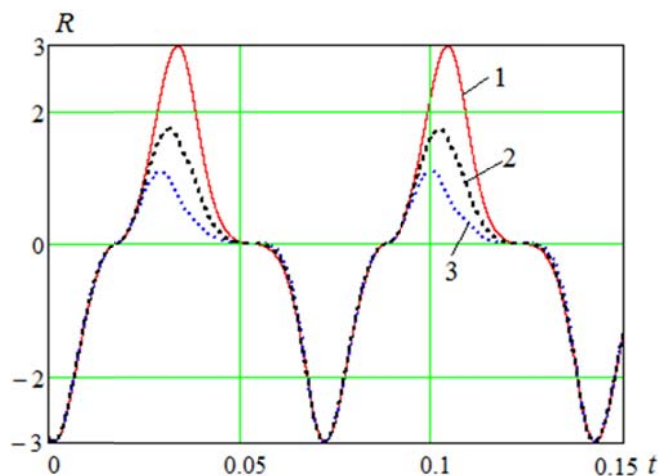


Рисунок 6 – Графики временных зависимостей $R(t)$ при $S_{\max}=0.05$, $(p+k)=0.3$: 1 – $\mu=0$, 2 – $\mu=0.2$, 3 – $\mu=0.4$

На рисунках 7 и 8 представлены зависимости наибольшей аэродинамической силы при движении крыла вверх, а также соотношения наибольшего и наименьшего значений этой силы в зависимости от значения коэффициента μ , причем графики рисунка 7 справедливы для изменения площади полностью разложенного крыла за счет его ширины, а графики рисунка 8 – за счет его длины.

По рисунку 7,а видно, что значение $R_{\max}$ по мере роста значения коэффициента μ убывает по закону, близкому к гиперболическому, причем с увеличением площади полностью разложенного крыла $S_{\max}$ графики располагаются выше относительно нуля. Изменение коэффициента ψ имеет аналогичный характер, причем при $\mu=0$ (т.е. когда площади при взмахах вверх и вниз равны) $\psi=1$, т.е. силы аэродинамического сопротивления при движении крыльев вверх/вниз одинаковы, полет орнитоопера невозможен (рисунок 7,б). Отметим, что значение ψ при одном и том же коэффициенте μ не меняется при варьировании площади $S_{\max}$.

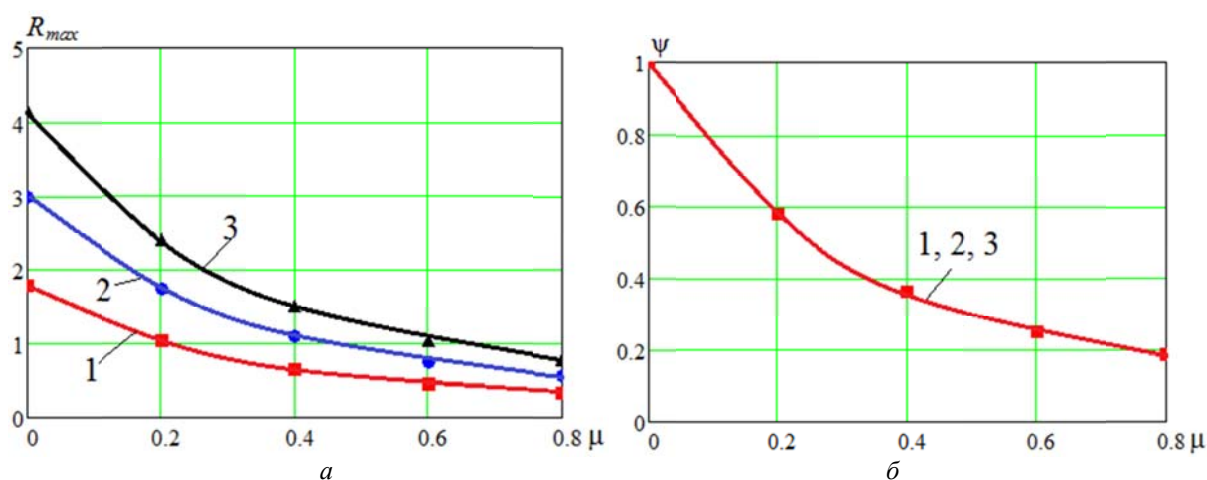


Рисунок 7 – Графики: а – $R_{max}(\mu)$, б – $\psi(\mu)$ при $(p+k)=0.3$, 1 – $S_{max}=0.03$, 2 – $S_{max}=0.05$, 3 – $S_{max}=0.07$

Те же самые зависимости, но при изменении площади крыла за счет варьирования его длины, имеют аналогичный характер (рисунок 8). При этом численные значения наибольшей аэродинамической силы при одной и той же площади S_{max} в этом случае существенно выше (при $S_{max}=0.05$ в 3 раза, при $S_{max}=0.07$ – в 6.3 раза для $\mu=0$). Значение коэффициента ψ в этом случае зависит от величины S_{max} , чем меньше S_{max} , тем меньше ψ , при $\mu=0$ независимо от S_{max} коэффициент $\psi=1$.

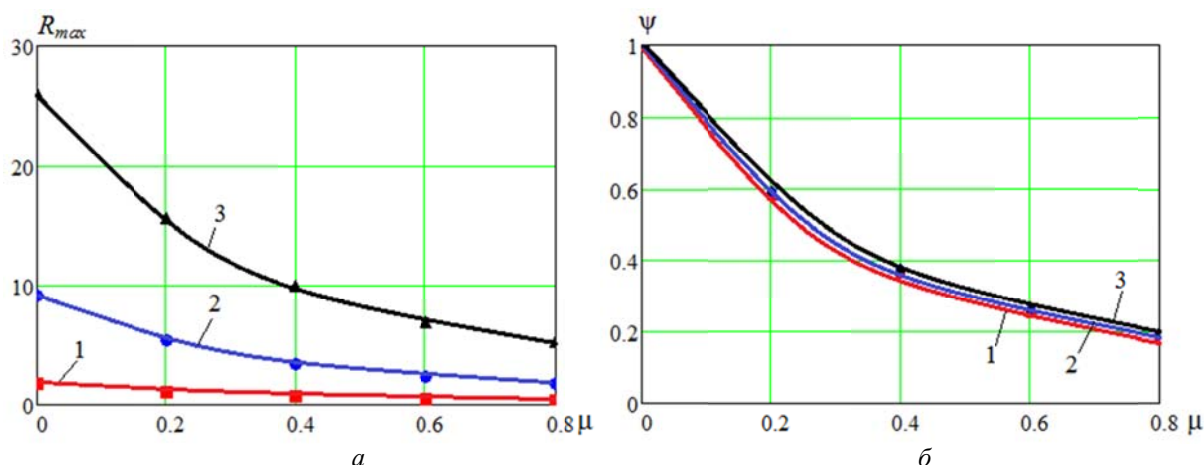


Рисунок 8 – Графики: а – $R_{max}(\mu)$, б – $\psi(\mu)$ при $w=0.1$, 1 – $S_{max}=0.03$, 2 – $S_{max}=0.05$, 3 – $S_{max}=0.07$

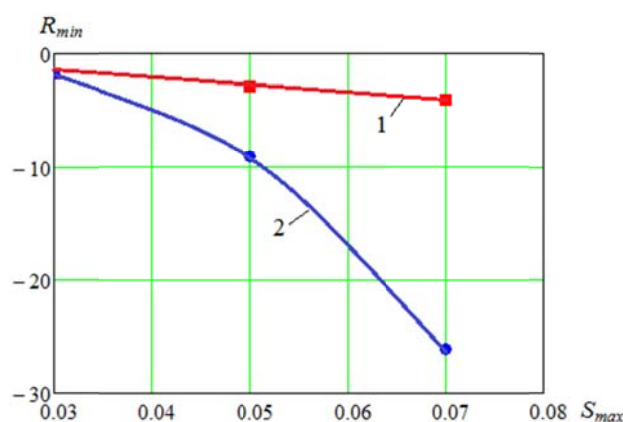


Рисунок 9 – Графики $R_{min}(S_{max})$: 1 – $(p+k)=0.3$, 2 – $w=0.1$

Рисунок 9 иллюстрирует изменение наименьшего значения аэродинамической силы (при движении крыла вниз) от площади полностью разложенного крыла. По графикам видно, что по мере роста S_{max} величина R_{min} убывает. Причем при увеличении площади крыла за

счет его удлинения характер убывания $R_{\min}$ более крутой. Это означает, что для более эффективного полета орнитооптера необходимо достигать требуемой площади крыльев путем минимизации их ширины и максимализации длины.

Заключение

Работа посвящена роботу–орнитооптеру с гибкими крыльями, которые складываются и раскладываются во время взмахов за счет специального механизма, являющегося конструктивной особенностью устройства. Управление процессом сложения/разложения крыльев не предусмотрено. Работа состоит из двух частей. В первой из них детально описана конструкция проектируемого орнитооптера, рассмотрено устройство основных узлов, к которым относятся механизмы взмаха крыльев, их сложения/разложения, а также механизм управления хвостом. Во второй части осуществлен переход к расчетной схеме механизма без учета хвоста, определены необходимые кинематические соотношения механизма, которые используются для определения качественных и количественных характеристик генерируемых крыльями аэродинамических сил. В результате проведенного численного моделирования взмахов крыльев установлено влияние на наибольшие (при движении крыла вверх) и наименьшие (при движении крыла вниз) значения аэродинамической силы площади крыльев, их длины и ширины, а также соотношения площадей полностью сложенного и полностью разложенного крыльев.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-08-00787.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. DeLaurier, J. D. An ornithopter wing design / J. D. DeLaurier // Canadian aeronautics and space journal. – 1994. Vol. 40. – N. 1. – P. 10–18.
2. Brooks, A. N. Development of a wing-flapping flying replica of the largest Pterosaur / A. N. Brooks // AIAA. – 1985. – P. 85–1446.
3. DeLaurier, J. D. The development of an efficient ornithopter wing / J. D. DeLaurier // The aeronautical journal of the royal aeronautical society. – 1993. – P. 153–161.
4. Craparo, E. A micro-sized ornithopter wing design / E. Craparo, B. Ingram // 41st aerospace sciences meeting and exhibit. – 2003. – P. 1–9.
5. Baek, S. S. Flight control for target seeking by 13 gram ornithopter / S. S. Baek, F. L. Garcia Bermudez, R. S. Fearing // Intelligent Robots and System, San Francisco, CA, USA. – 2011.
6. Grauer, J. A. Multibody Model of an Ornithopter / J. A. Grauer, J. E. Hubbard // J. of Guidance, Control, and Dynamics. – 2009. – Vol. 32. – N. 5. – P. 1675–1679.
7. Lee, J.-S. Longitudinal Flight Dynamics of Bioinspired Ornithopter Considering Fluid-Structure Interaction / J.-S. Lee, J.-K. Kim, D.-K. Kim, J.-H. Han // J. of Guidance, Control, and Dynamics. – 2011. – Vol. 34. – N. 3. – P. 667–677.
8. Ворочаева, Л.Ю. Моделирование движения летательного аппарата с машущим крылом / Л.Ю. Ворочаева, С.В. Ефимов, О.Г. Локтионова, Б.В. Лушников, С.Ф. Яцун // Cloud of Science. – Т. 3. – № 4. – 2016. – С. 603–616.
9. Vorochaeva, L.Yu. Modeling the Motion of a Flapping Wing Aerial Vehicle / L.Yu. Vorochaeva, S.V. Efimov, O.G. Loktionova, B.V. Lushnikov, S.F. Jatsun // MATEC Web of Conferences, 2017, CMTAI2016. – 2017. – P. 1–6.
10. Jatsun, S.F. Modelling of the motion of an insectopter / S.F. Jatsun, P.A. Bezmen, L.Yu. Vorochaeva, S.V. Efimov // 14th IFToMM World Congress, Taipei, Taiwan. – 2015. – P. 1–6.

Локтионова Оксана Геннадьевна

ФГБОУ ВО Юго–Западный
государственный университет, г. Курск
доктор технических наук, профессор
проректор по учебной работе
305040 г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, к. 218
тел. +7(4712)222518
e-mail: rector@swsu.ru

Ворочаева Людмила Юрьевна

ФГБОУ ВО Юго–Западный
государственный университет, г. Курск
кандидат технических наук
доцент кафедры
механики, мехатроники и робототехники
305040 г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, к. 218
тел. +7(4712)222626
e-mail: mila180888@yandex.ru

Яцун Сергей Федорович

ФГБОУ ВО Юго–Западный
государственный университет, г. Курск
доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой механики, мехатроники и робототехники
305040 г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, к. 218
тел. +7(4712)222626
e-mail: teormeh@inbox.ru

Мальчиков Андрей Васильевич

ФГБОУ ВО Юго–Западный
государственный университет, г. Курск
кандидат технических наук
доцент кафедры
механики, мехатроники и робототехники
305040 г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, к. 218
тел. +7(4712)222626
e-mail: zveroknp@gmail.com

O.G. LOKTIONOVA, S.F. JATSUN, L.Yu. VOROCHAEVA, A.V. MALCHIKOV

DESIGN AND RESEARCH OF THE ROBOT-ORNITHOPTER WITH PASSIVE FOLDING WINGS

Abstract. *The article is devoted to the description and investigation of the robot-ornithopter with wings that passively fold and decompose during the sweeps due to the design features of the device, this process is not provided for. A detailed description of the design of the robot and its main components is presented, on the basis of which the design scheme of the wing swing mechanism is proposed taking into account their addition / decomposition. The kinematic analysis of the mechanism is carried out, the radius vectors of the main points of the robot are determined. The results of numerical modeling of wing flaps are presented, the effect on the nature of aerodynamic forces, as well as the magnitude of their largest and smallest wings area and the method of its achievement (due to changes in length and width), the ratio of the areas of fully folded and fully decomposed wing are established. Recommendations are given on the design of the wings of the ornithopter.*

Keywords: *robot-ornithopter, addition, decomposition of wings, mechanism of wing flaps, mechanism of the addition of wings, aerodynamic forces*

BIBLIOGRAPHY

1. DeLaurier, J. D. An ornithopter wing design / J. D. DeLaurier // Canadian aeronautics and space journal. – 1994. Vol. 40. – N. 1. – P. 10–18.
2. Brooks, A. N. Development of a wing-flapping flying replica of the largest Pterosaur / A. N. Brooks // AIAA. – 1985. – P. 85–1446.
3. DeLaurier, J. D. The development of an efficient ornithopter wing / J. D. DeLaurier // The aeronautical journal of the royal aeronautical society. – 1993. – P. 153–161.
4. Craparo, E. A micro-sized ornithopter wing design / E. Craparo, B. Ingram // 41st aerospace sciences meeting and exhibit. – 2003. – P. 1–9.
5. Baek, S. S. Flight control for target seeking by 13 gram ornithopter / S. S. Baek, F. L. Garcia Bermudez, R. S. Fearing // Intelligent Robots and System, San Francisco, CA, USA. – 2011.
6. Grauer, J. A. Multibody Model of an Ornithopter / J. A. Grauer, J. E. Hubbard // J. of Guidance, Control, and Dynamics. – 2009. – Vol. 32. – N. 5. – P. 1675–1679.
7. Lee, J.-S. Longitudinal Flight Dynamics of Bioinspired Ornithopter Considering Fluid-Structure Interaction / J.-S. Lee, J.-K. Kim, D.-K. Kim, J.-H. Han // J. of Guidance, Control, and Dynamics. – 2011. – Vol. 34. – N. 3. – P. 667–677.
8. Vorochaeva, L.Yu. Modelirovaniye dviganiya letatel'nogo apparata s mashushim krylom / L.Yu. Vorochaeva, S.V. Efimov, O.G. Loktionova, B.V. Lushnikov, S.F. Jatsun // Cloud of Science. – T. 3. – N. 4. – 2016. – P. 603–616.
9. Vorochaeva, L.Yu. Modeling the Motion of a Flapping Wing Aerial Vehicle / L.Yu. Vorochaeva, S.V. Efimov, O.G. Loktionova, B.V. Lushnikov, S.F. Jatsun // MATEC Web of Conferences, 2017, CMTAI2016. – 2017. – P. 1–6.
10. Jatsun, S.F. Modelling of the motion of an insectopter / S.F. Jatsun, P.A. Bezmen, L.Yu. Vorochaeva, S.V. Efimov // 14th IFToMM World Congress, Taipei, Taiwan. – 2015. – P. 1–6.

Loktionova Oksana Gennadiyevna

Southwest state university, Kursk
PhD, vice-rector for academic affairs
305040 Kursk, 50 let Oktyabrya, 94, room 218
tel. +7(4712)222518
e-mail: rector@swsu.ru

Vorochaeva Lyudmila Yurievna

Southwest state university, Kursk
PhD, senior lecturer of department
of mechanics, mechatronics and robotics
305040 Kursk, 50 let Oktyabrya, 94, room 218
tel. +7(4712)222626
e-mail: mila180888@yandex.ru

Jatsun Sergey Fedorovich

Southwest state university, Kursk
PhD, head of department
of mechanics, mechatronics and robotics
305040 Kursk, 50 let Oktyabrya, 94, room 218
tel. +7(4712)222626
e-mail: teormeh@inbox.ru

Malchikov Andrey Vasilievich

Southwest state university, Kursk
PhD, senior lecturer of department
of mechanics, mechatronics and robotics
305040 Kursk, 50 let Oktyabrya, 94, room 218
tel. +7(4712)222626
e-mail: zveroknnp@gmail.com

ВИБРОЗАЩИТНЫЕ СИСТЕМЫ С РЕКУПЕРАТОРАМИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Аннотация. В статье приведены результаты исследований базовых моделей виброзащитных систем с рекуператорами механической энергии, как периодически подзаряжаемых источников энергии. Процесс рекупераций потенциальной энергии или кинетической энергии осуществляется посредством чередования двух комбинаций встречных подключений упругого элемента или инерционного звена между объектом и подвижным основанием. Найдены оптимальные синтезирующие функции управления сингулярного типа, которые позволяют обеспечить наилучшие показатели вибрационной безопасности в соответствии с принятым критерием качества. Установлено, что в данных системах резонансные явления не проявляются: значения коэффициентов динамичности меньше единицы и монотонно уменьшаются с увеличением частоты кинематического возмущения. При этом в области высоких частот значения коэффициентов динамичности меньше предельных значений коэффициентов динамичности линейной системы без демпфирования.

Ключевые слова: виброзащитная система, рекуператор потенциальной энергии, рекуператор кинетической энергии, динамика, оптимальное управление.

Введение

Модернизацию существующих и создание новых машин и механизмов высокой производительности, долговечности и надежности осуществляют на базе современных достижений науки в данной предметной области. Следует особо выделить актуальность решения научных проблем связанных с защитой машин и человека–оператора от вибрации, поскольку эксплуатация технических объектов, как правило, происходит в условиях интенсивных динамических воздействий, что характерно практически для всех отраслей промышленности и транспорта [1, 2, 3].

Обеспечение нормативных показателей вибрационного состояния в различных зонах машин во многом зависит от эффективности используемых для этих целей виброзащитных систем, функционирование которых носит циклический характер – потенциальная энергия упругих звеньев и кинетическая энергия подвижных масс рассматривается как положительная периодически возрастающая и убывающая функция относительно нулевого уровня. При этом часть энергии системы неизбежно рассеивается в окружающую среду. Однако эти потери компенсируются за счет энергии, которая поступает в систему в результате кинематических и силовых воздействий. Если потоками данной энергии управлять оптимальным образом, то это позволит обеспечить положительный эффект виброзащиты, сопоставимый с тем, который достигается активными системами [4, 5]. Естественно, что для циклически изменяющихся потоков энергии положительный эффект виброзащиты достигается тогда и только тогда, когда существует процесс рекуперации энергии, то есть существуют чередующиеся циклы накопления и возвращения энергии для повторного использования в системе [6].

Качественно новые возможности и перспективы практического использования имеют виброзащитные системы с рекуператорами механической (потенциальной и кинетической) энергией [7, 8, 9]. Это связано с тем, что управляя потоками потенциальной энергией упругих звеньев и потоками кинетической энергией подвижных масс, данные системы обеспечивают положительный эффект виброзащиты, сопоставимый с тем, который достигается эталонными активными системами [10, 11].

Рекуператоры энергии – это сложные мехатронные устройства (рисунок 1), которые реализуют чередования двух комбинаций встречных подключений упругого или инерционного звена между объектом и подвижным основанием. При оптимальном алгоритме подключений данных звеньев формируемые ими компенсационные воздействия обеспечивают активный режим виброзащиты объекта [12, 13].

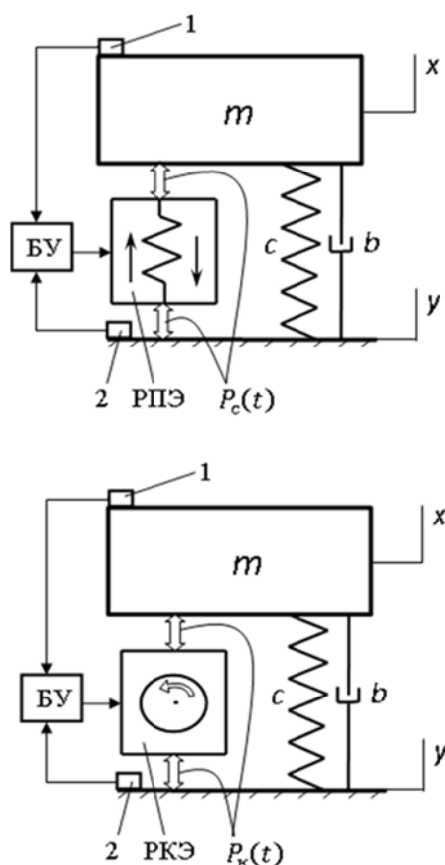


Рисунок 1 – Расчетно-функциональные схемы виброзащитных систем с рекуператорами потенциальной и кинетической энергии:

РПЭ – рекуператор потенциальной энергии; РКЭ – рекуператор кинетической энергии;
 $P_c(t)$ и $P_k(t)$ – компенсационные воздействия; БУ – блок управления; 1, 2 – датчики скорости

Основные трудности на пути реализации процессов рекуперации в системах виброзащиты связаны с нахождением оптимальных синтезирующих функций управления, которые позволяют обеспечить наилучшие показатели вибрационной безопасности в соответствии с принятым критерием качества [14, 15].

Оптимизация, моделирование и анализ динамических процессов

Ориентируясь на расчетно-функциональные схемы виброзащитных систем, представленных на рисунке 1, можно записать следующие дифференциальные уравнения, которые позволяют воспроизводить динамику вибрационных процессов с учетом рекуперации энергии.

Для базовой модели виброзащитной системы с рекуператором потенциальной энергии (БМ–РПЭ) имеем:

$$m\ddot{x} + b(\dot{x} - \dot{y}) + c(x - y) + u_c(t)cr(x - y) = 0. \quad (1)$$

Аналогичное дифференциальное уравнение запишем и для базовой модели виброзащитной системы с рекуператором кинетической энергии (БМ–РКЭ):

$$m\ddot{x} + b(\dot{x} - \dot{y}) + c(x - y) + u_k(t)mr(\ddot{x} - \ddot{y}) = 0. \quad (2)$$

Здесь приняты следующие специальные обозначения:

$u_c(t)$, $u_k(t)$ – сингулярные (программные) функции управления;

cr – приведенная жесткость упругого элемента рекуператора потенциальной энергии;

mr – приведенная масса инерционного звена рекуператора кинетической энергии.

Формируемые рекуператорами компенсационные воздействия:

$$P_c(t) = u_c(t)cr(x - y), \quad (3)$$

$$Pk(t) = u_k(t)mr(\ddot{x} - \ddot{y}). \quad (4)$$

Преобразуем базовые модели (1) и (2) к безразмерному каноническому виду:

$$\dot{x}_0 = x_1, \quad \dot{x}_1 = -u_c(\tau)\lambda(x_0 - \vartheta) - \frac{\varepsilon}{\eta}(x_1 - \dot{\vartheta}) - \frac{1}{\eta^2}(x_0 - \vartheta); \quad (5)$$

$$\dot{x}_0 = x_1, \quad \dot{x}_1 = \frac{1}{1 + \mu \cdot u_k(\tau)} \left[\mu \cdot u_k(\tau) \ddot{\vartheta} - \frac{\varepsilon}{\eta}(x_1 - \dot{\vartheta}) - \frac{1}{\eta^2}(x_0 - \vartheta) \right], \quad (6)$$

где $\eta = \omega/k$ – безразмерная частота (ω – характерная частота кинематического возмущения,

$k = \sqrt{c/m}$ – собственная частота системы);

$\varepsilon = b/mk$ – относительное демпфирование;

λ – коэффициент отношений приведенной жесткости упругого элемента рекуператора к жесткости несущего элемента;

μ – коэффициент отношения приведенной массы инерционного звена рекуператора к массе защищаемого объекта;

$x_0 = x/y_0$, $x_1 = \dot{x}/y_0\omega$, $\vartheta = y/y_0$, $\dot{\vartheta} = \dot{y}/y_0\omega$, $\ddot{\vartheta} = \ddot{y}/y_0\omega^2$ – безразмерные переменные (y_0 – амплитуда кинематического возмущения),

$\tau = \omega t$ – безразмерное время.

Постановка оптимизационной задачи.

Требуется найти оптимальные алгоритмы переключений программных функций управлений $\tilde{u}_c(\tau)$ и $\tilde{u}_k(\tau)$ сингулярного типа, соответственно, для систем уравнений (5) и (6), при которых динамические процессы, связанные с рекуперацией потенциальной и кинетической энергией, обеспечивают достижение минимума интегрального функционала:

$$J = \int_0^T x_1^2 d\tau \rightarrow \min. \quad (7)$$

Кроме того, требуется перейти от программных управлений к позиционным (синтетическим) управлениям, то есть произвести следующие замены в системах уравнений (4) и (5): $\tilde{u}_c(t) \rightarrow \tilde{u}_c(x)$ и $\tilde{u}_k(t) \rightarrow \tilde{u}_k(x)$.

Оптимальные программные управления сингулярного типа будем искать, используя пошаговую минимаксную процедуру принципа минимума [12]. Данная процедура определяет прямой метод оптимального синтеза параметров и переменных базовых моделей при численном интегрировании исходных уравнений состояния системы. Общий алгоритм решения динамической задачи оптимизации колебательных систем, представлен схематично на рисунке 2 в виде блок–схемы.

На рисунке 3 приведены выборочные результаты моделирования динамических процессов связанных с рекуперацией потенциальной и кинетической энергии, которые были получены в ходе реализации минимаксной процедуры принципа минимума при интегрировании систем уравнений (5) и (6) – базовых моделей БМ–РПЭ и БМ–РКЭ.

Отмечается качественное совпадение динамических процессов рекуперации в исследуемых базовых моделях. Формируемые компенсационные воздействия противодействуют возрастанию скорости защищаемого объекта, – видно, что графики соответствующих зависимостей находятся в противофазе. При этом различаются две характерные периодически чередующиеся фазы рекуперации энергии: короткая фаза – накопления энергии и длинная фаза – возвращения энергии в систему с положительным эффектом. Смены фаз происходят в моменты сингулярных (скачкообразных со сменой знака) изменений программных функций управлений $u_c(\tau)$ и $u_k(\tau)$.

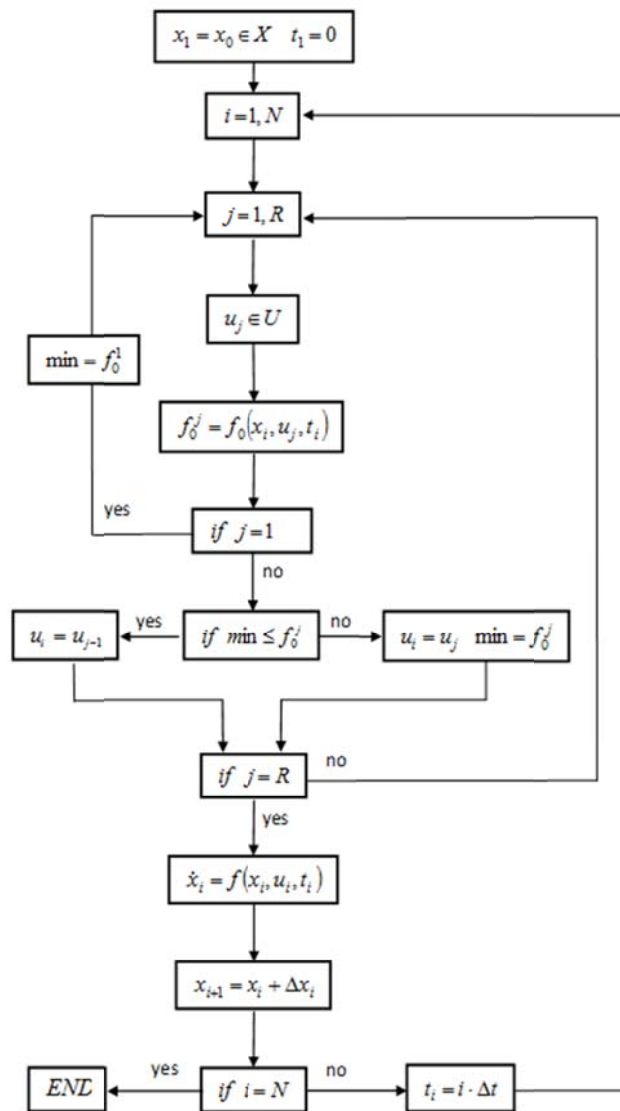


Рисунок 2 – Блок– схема для решения задачи оптимизации по принципу минимума

Из анализа графических зависимостей, отображающих компоненты вектора состояния системы и сингулярные программные функции управления, легко установить, что оптимальные сингулярные синтетические функции управления для базовых моделей идентичны и их можно представить в следующем виде:

$$\tilde{u}_c(x) = \text{sign}[x_1(x_0 - \vartheta)], \quad \tilde{u}_k(x) = \text{sign}[x_1(x_0 - \vartheta)]. \quad (8)$$

Заметим, что рекуператор потенциальной энергии может выполняться в двух модификациях – с упругим элементом без предварительного натяга или поджатия, как это отображено в модели (5), и с таковыми, то есть с предварительно растянутым или сжатым упругим элементом. В последнем варианте исполнения компенсационное воздействие $P_c(\tau) = u_c(x)\lambda(\delta + x_0 - \vartheta)$, где δ – коэффициент характеризующий величину предварительного натяга или поджатия упругого элемента.

Верификацию функциональных зависимостей для компонент вектора состояния $\tilde{x}(t)$ и управления $\tilde{u}(t)$, полученных в результате применения прямого метода оптимизационного синтеза, можно осуществить, проверяя выполнение условий, которым должен удовлетворять допустимый процесс $\tilde{v} = (\tilde{x}, \tilde{u}) \in V$, то есть использовать методику оценки соответствия (взаимосвязи) между компонентами вектора состояния $x(t)$, присоединенного вектора $p(t)$ и управления $u(t)$, принятую в классической теории управления.

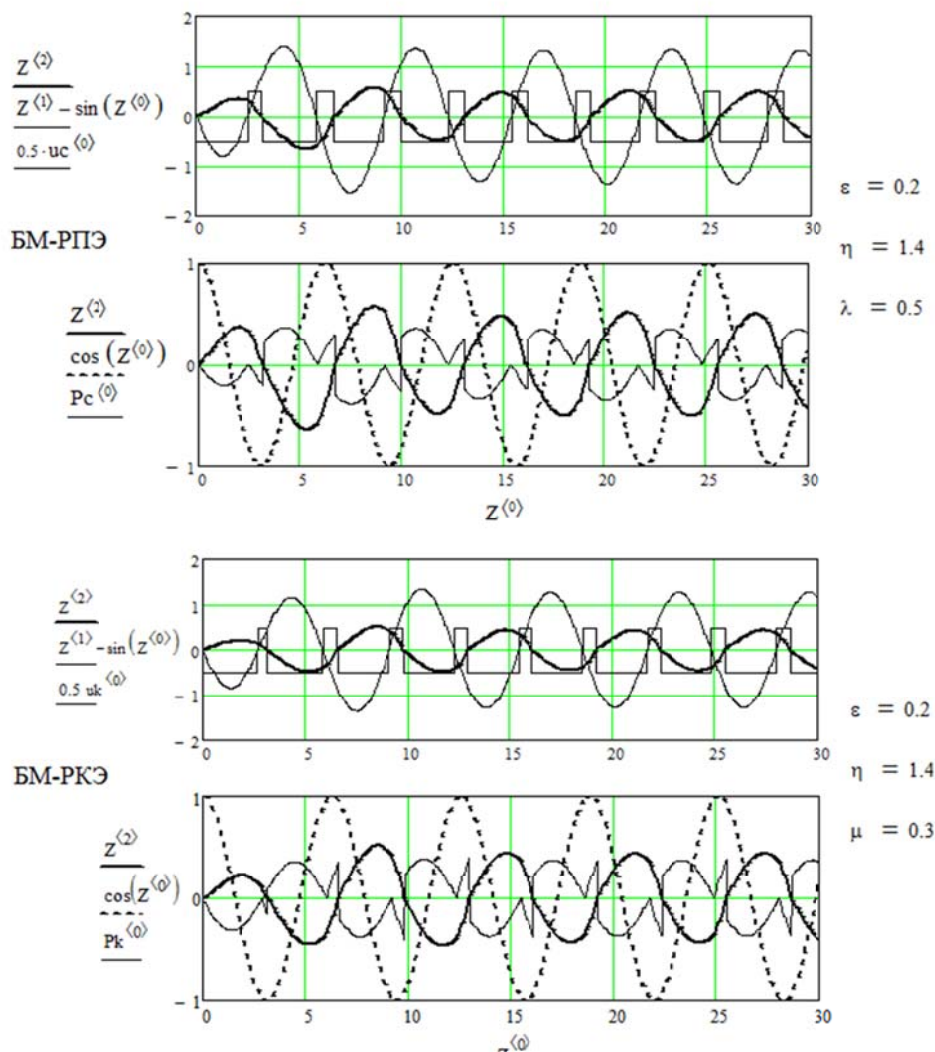


Рисунок 3 – Графическое представление результатов моделирования базовых моделей с рекуператорами энергии

Примечание: $Z^{(0)} \leftrightarrow \tau$; $Z^{(1)} \leftrightarrow x_0$; $Z^{(2)} \leftrightarrow x_1$; $Pc^{(0)} \leftrightarrow Pc(\tau)$; $Pk^{(0)} \leftrightarrow Pk(\tau)$; $uc^{(0)} \leftrightarrow u_c(\tau)$; $uk^{(0)} \leftrightarrow u_k(\tau)$

Для этого, используя гамильтониан системы $H(x, p, u, t)$, необходимо определить оптимальную структуру управления $\tilde{u} = u(x, p)$, записать и проинтегрировать сопряженные уравнения $\dot{p} = -\partial H / \partial x$ при заданных числовых массивах $\tilde{x}$ и конечных условиях

$$x(0) = \infty; \quad x(T) = x_T; \quad p(0) = 0; \quad p(T) = \infty, \quad (9)$$

которые должны выполняться для оптимизационных задач рассматриваемого типа. Если, полученные таким образом компоненты присоединенного вектора $\tilde{p}(t)$, обращают в тождество соотношение

$$u(\tilde{x}, \tilde{p}) = \tilde{u}(t), \quad (10)$$

то результат верификации положителен.

Выполним верификацию оптимального управления для базовой модели БМ–РПЭ.

Составим гамильтониан

$$H = -x_1^2 + p_0 x_1 + p_1 \left[-u_c(\tau) \lambda (x_0 - \vartheta) - \frac{\varepsilon}{\eta} (x_1 - \dot{\vartheta}) - \frac{1}{\eta^2} (x_0 - \vartheta) \right], \quad (11)$$

определим оптимальную структуру управления

$$\max_u H = \max_u \left[-p_1 u_c(\tau) \lambda (x_0 - \vartheta) \right] \rightarrow \tilde{u}_c(x, p) = \text{if} \left[p_1 (x_0 - \vartheta) > 0, -1, +1 \right] \quad (12)$$

и запишем сопряженные уравнения:

$$\dot{p}_0 = -\frac{\partial H}{\partial x_0} = p_1 \tilde{u}_c(x, p) \lambda + \frac{1}{\eta^2} p_1, \quad \dot{p}_1 = -\frac{\partial H}{\partial x_1} = 2x_1 - p_0 + \frac{\varepsilon}{\eta} p_1. \quad (13)$$

Интегрируя сопряженные уравнения (13) при заданных числовых массивах $x_0 \leftrightarrow Z^{(1)}$, $x_1 \leftrightarrow Z^{(2)}$ и начальных условиях $p_0(0) = p_1(0) = 0$, находим, что $\text{sign}[p_1(t)] = \text{sign}[x_1(t)]$.

Результат верификации положительный.

Выполним верификацию оптимального управления для базовой модели БМ–РКЭ.

Составим гамильтониан

$$H = -x_1^2 + p_0 x_1 + p_1 \frac{1}{1 + \mu \cdot u_k(\tau)} \left[\mu \cdot u_k(\tau) \ddot{\theta} - \frac{\varepsilon}{\eta} (x_1 - \dot{\theta}) - \frac{1}{\eta^2} (x_0 - \theta) \right], \quad (14)$$

определим оптимальную структуру управления

$$\max_u H \rightarrow \tilde{u}_k(x, p) = \text{if}[H(x, p, +1, t) > H(x, p, -1, t), +1, -1] \quad (15)$$

и запишем сопряженные уравнения:

$$\dot{p}_0 = -\frac{\partial H}{\partial x_0} = \frac{1}{1 + \mu \cdot \tilde{u}_k(\tau)} \frac{1}{\eta^2} p_1, \quad \dot{p}_1 = -\frac{\partial H}{\partial x_1} = 2x_1 - p_0 + \frac{1}{1 + \mu \cdot \tilde{u}_k(\tau)} \cdot \frac{\varepsilon}{\eta} p_1. \quad (16)$$

Интегрируя сопряженные уравнения (16) при заданных числовых массивах $x_0 \leftrightarrow Z^{(1)}$, $x_1 \leftrightarrow Z^{(2)}$ и начальных условиях $p_0(0) = p_1(0) = 0$, находим, что $\text{sign}[p_1(t)] = \text{sign}[x_1(t)]$.

На рисунке 4 приведена соответствующая программа верификации.

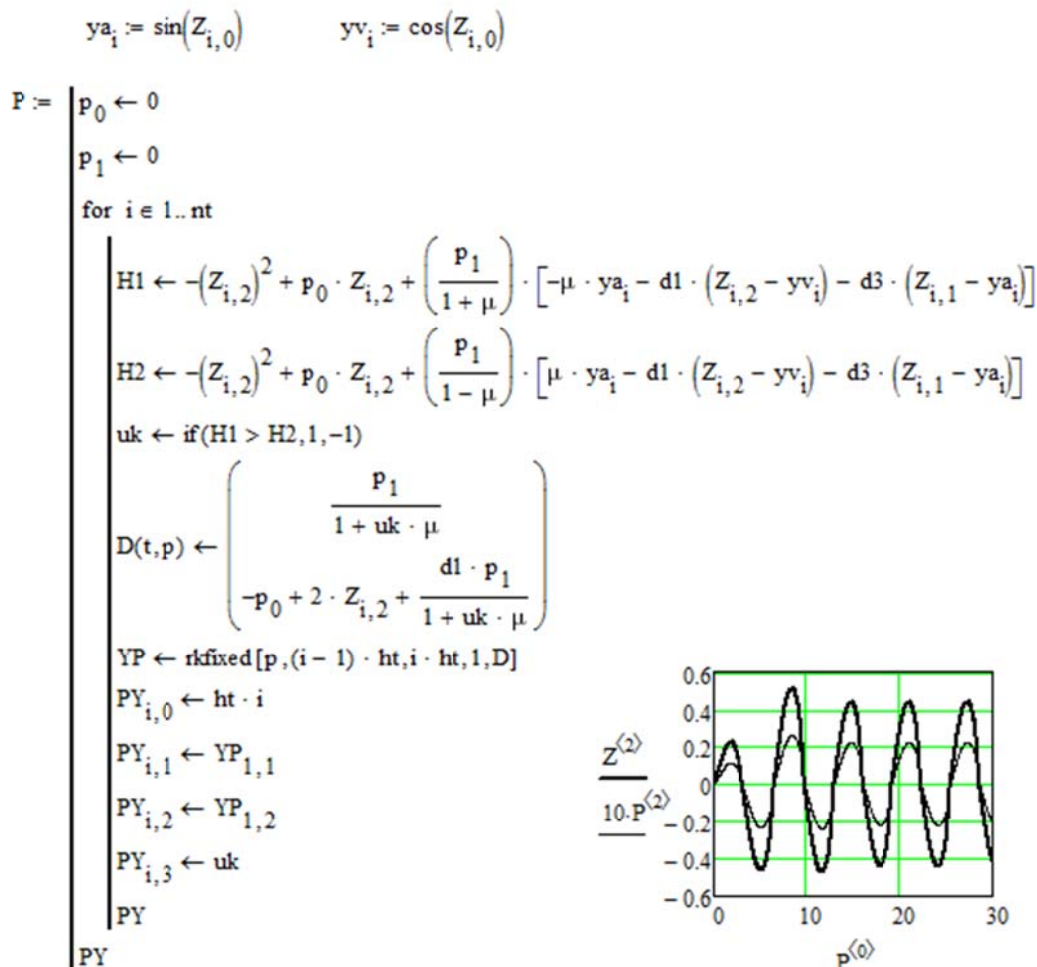


Рисунок 4 – Программа для верификации оптимального управления

В таблице 1 приведены выборочные значения коэффициентов динамичности базовых моделей БМ–РПЭ и БМ–РКЭ.

Из приведенных данных следует, что базовая модель с рекуператором потенциальной энергии позволяет устранить резонансные явления: значения коэффициентов динамичности Kd_c (при параметрах $\delta = 0$ и $\lambda = 0,9$) в рассматриваемом диапазоне частот меньше единицы и монотонно уменьшаются с увеличением частоты кинематического возмущения. При этом в области высоких частот, когда $\eta > 1,41$, значения соответствующих коэффициентов динамичности меньше предельных значений коэффициентов динамичности линейной системы без демпфирования. Установлено, что предварительный натяг или поджатие упругого элемента (когда параметр $\delta = 0,015$) способствует улучшению динамических свойств базовой модели только в области низких и резонансных частот. Этот вывод следует из сопоставления значений коэффициентов динамичности Kd_c и Kd_c^1 .

Таблица 1 – Коэффициенты динамичности

η	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Kd_c	0,732	0,446	0,302	0,224	0,181	0,153	0,127	0,116
Kd_c^1	0,709	0,438	0,296	0,224	0,181	0,153	0,127	0,116
δ	0,015	0,015	0,015	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Kd_k	0,882	0,745	0,619	0,298	0,286	0,225	0,165	0,145
μ	1,02	1,015	0,8	0,6	0,4	0,3	0,25	0,2

Для придания базовой модели с рекуператором кинетической энергии «аналогичных» динамических свойств требуется изменять (настраивать) параметр μ в зависимости от частоты. Следовательно, данный параметр следует рассматривать как дополнительную управляемую переменную, которая зависит от частоты.

Заключение

Поскольку виброзащитные системы совершают колебательные движения, то использование в них рекуператоров механической энергии упругих элементов и инерционных звеньев, как периодически подзаряжаемых источников энергии, позволяет качественно улучшить эффективность процесса виброзащиты. Достигается это посредством чередования двух комбинаций встречных подключений упругого или инерционного звена между объектом и подвижным основанием. При оптимальном алгоритме подключений данных звеньев формируемые ими компенсационные воздействия (восстанавливающие и инерционные силы) обеспечивают активный режим виброзащиты объекта, сопоставимый с тем, который достигается эталонными активными системами.

Для базовых моделей виброзащитных систем, которые позволяют воспроизводить динамику вибрационных процессов с учетом рекуперации энергии, найдены оптимальные синтезирующие функции управления смгулярного типа, которые позволяют обеспечить наилучшие показатели вибрационной безопасности в соответствии с принятым критерием качества.

Установлено, что виброзащитные системы с рекуператором механической энергии позволяют устранить резонансные явления: значения коэффициентов динамичности меньше единицы и монотонно уменьшаются с увеличением частоты кинематического возмущения. При этом в области высоких частот значения коэффициентов динамичности меньше предельных значений коэффициентов динамичности линейной системы без демпфирования.

Представленные в статье результаты исследований были получены в рамках выполнения проектов РНФ № 16–19–00186 «Планирование оптимальных по расходу энергии траекторий движения роторов мехатронных модулей в средах сложной реологии» и ГЗ № 9.2952.2017/4.6 «Создание многофункционального лабораторно–методологического комплекса общинженерной подготовки».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аврамов, К.В. Нелинейная динамика упругих систем. Т.2. Приложения / К.В. Аврамов, Ю.В. Михлин. – М.–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2015. – 700 с.
2. Гусев, А.С. Расчет конструкций при случайных воздействиях / А.С. Гусев, В.А. Светлицкий. – М.: Машиностроение, 1984. – 240 с.
3. Круглов, Ю.А., Ударовиброзащита машин, оборудования и аппаратуры / Ю.А. Круглов, Ю.А. Туманов. – Л.: Машиностроение, 1986. – 222 с.
4. Черноусько, Ф.Л., Методы управления нелинейными механическими системами / Ф.Л. Черноусько, И.М. Ананьевский, С.А. Решмин. – М.: Физматлит, 2006. – 328 с.
5. Троицкий, В.А. Оптимальные процессы колебаний механических систем / В.А. Троицкий. – Л.: Машиностроение, 1976. – 248 с.
6. Гулиа, Н.В. Физика. Парадоксальная механика / Н.В. Гулиа. – М.: Издательство Юрайт, 2018. 148 с.
7. Пат. 2060417 Российская Федерация, МПК F16F9/06. Амортизатор / Чернышев В.И., Росляков В.П.; опубл. 20.05.96. Бюл. № 14.
8. Пат. 2070999 Российская Федерация, МПК F16F7/10. Амортизатор / Чернышев В.И.; опубл. 27.12.96. Бюл. № 36.
9. Пат. 2350807 Российская Федерация, МПК F16H33/02. Рекуаератор механической энергии / Торопов С.Л.; опубл. 27.03.09. Бюл. № 9.
10. Фомина, О.В. Экстремальные задачи и оптимизация: введение в теорию непрямого импульсного управления процессами колебаний / О.В. Фомина, Ю.С. Степанов, В.И. Чернышев. – М.: Издательский дом «Спектр», 2011. – 218 с.
11. Дорф, Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2013. – 832 с.
12. Фомина, О.В., Теоретические аспекты формирования оптимальных управляемых процессов виброзащиты / О.В. Фомина, Л.А. Савин, В.И. Чернышев // Известия юго-западного государственного университета. Серия: техника и технологии Издательство: ЮЗГУ (Курск). – 2013. – №3. – С. 44–50.
13. Дыхта, В.А. Оптимальное импульсное управление с приложениями / В.А. Дыхта, О.Н. Самсонюк. – М.: Физматлит, 2003. – 256 с.
14. Пантелеев, А.В. Теория управления в примерах и задачах / А.В. Пантелеев, А.С. Бортановский. – М.: Высш. шк., 2003. – 583 с.
15. Ивановский, Р.И. Компьютерные технологии в науке и образовании. Практика применения систем Mathcad Pro / Р.И. Ивановский. – М.: Высш. шк., 2003. – 431 с.

Фомина Ольга Владимировна

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент кафедры мехатроники, механики и робототехники
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, д. 95
Тел. (4862) 41–98–41
E-mail: sapr@ostu.ru

O.V. FOMINOVA

VIBROTECTIVE SYSTEMS WITH RECRUITERS MECHANICAL ENERGY

Abstract. *The article presents the results of studies of basic models of vibration protection systems with mechanical energy recuperators, as periodically recharged energy sources. The process of recuperation of potential energy or kinetic energy is carried out by alternating two combinations of opposing connections of an elastic element or inertial link between the object and the moving base. Optimal synthesizing control functions of a singular type are found that make it possible to provide the best vibration safety indices in accordance with the accepted quality criterion. It is established that resonance phenomena do not appear in these systems: the values of the dynamic coefficients are less than one and decrease monotonically with increasing frequency of the kinematic perturbation. At the same time, in the high-frequency region, the values of the dynamic coefficients are less than the limiting values of the dynamic coefficients of the linear system without damping.*

Keywords: *vibration protection system, potential energy recuperator, kinetic energy recuperator, dynamics, optimal control.*

BIBLIOGRAPHY

1. Avramov, K.V. Nelineynaya dinamika uprugikh sistem. T.2. Prilozheniya / K.V. Avramov, YU.V. Mikhlin. – M.–Izhevsk: Institut kompyuternykh issledovaniy, 2015. – 700 s.
2. Gusev, A.S. Raschet konstruksiy pri slu–chaynykh vozdeystviyakh / A.S. Gusev, V.A. Svetlitskiy. – M.: Mashinostroyeniye, 1984. – 240 s.
3. Kruglov, YU.A., Udarovibrozhshchita mashin, obo–rudovaniya i apparatury / YU.A. Kruglov, YU.A. Tumanov. – L.: Mashinostroyeniye, 1986. – 222 s.
4. Chernousko, F.L., Metody upravleniya nelineynymi mekhanicheskimi sistemami / F.L. Chernousko, I.M. Ananyevskiy, S.A. Reshmin. – M.: Fizmatlit, 2006. – 328 s.
5. Troitskiy, V.A. Optimalnyye protsessy kolebaniy mekhanicheskikh sistem / V.A. Troitskiy. – L.: Mashinostroyeniye, 1976. – 248 s.
6. Gulia, N.V. Fizika. Paradoksalnaya mekhanika / N.V. Gulia. – M.: Izdatelstvo Yurayt, 2018. 148 s.
7. Pat. 2060417 Rossiyskaya Federatsiya, MPK F16F9/06. Amortizator / Chernyshev V.I., Roslyakov V.P.; opubl. 20.05.96. Byul. № 14.
8. Pat. 2070999 Rossiyskaya Federatsiya, MPK F16F7/10. Amortizator / Chernyshev V.I.; opubl. 27.12.96. Byul. № 36.
9. Pat. 2350807 Rossiyskaya Federatsiya, MPK F16H33/02. Rekuayerator mekhanicheskoy energii / Toropov S.L.; opubl. 27.03.09. Byul. № 9.
10. Fominova, O.V. Ekstremalnyye zadachi i optimizatsiya: vvedeniye v teoriyu nepryamogo impulsnoy upravleniya protsessami kolebaniy / O.V. Fominova, YU.S. Stepanov, V.I. Chernyshev. – M.: Izdatelskiy dom «Spektr», 2011. – 218 s.
11. Dorf, P. Sovremennyye sistemy upravleniya / R. Dorf, R. Bishop. – M.: Laboratoriya Bazovykh Znaniy, 2013. – 832 s.
12. Fominova, O.V., Teoreticheskiye aspekty formirovaniya optimalnykh upravlyayemykh protsessov vibrozashchity / O.V. Fominova, L.A. Savin, V.I. Chernyshev // Izvestiya yugo–zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: tekhnika i tekhnologii Izdatelstvo: YUZGU (Kursk). – 2013. – №3. – S. 44–50.
13. Dykhta, V.A. Optimalnoye impulsnoye upravleniye s prilozheniyami / V.A. Dykhta, O.N. Samsonyuk. – M.: Fizmatlit, 2003. – 256 s.
14. Panteleyev, A.V. Teoriya upravleniya v primerakh i zadachakh / A.V. Panteleyev, A.S. Bortanovskiy. – M.: Vyssh. shk, 2003. – 583 s.
15. Ivanovskiy, R.I. Kompyuternyye tekhnologii v nauke i obrazova–nii. Praktika primeneniya sistem Mathcad Pro / R.I. Ivanovskiy. – M.: Vyssh. shk., 2003. – 431 s.

Fominova Olga Vladimirovna

Orel State University named after I.S. Turgenev, the city of Orel

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Mechatronics, Mechanics and Robotics

302026, Orel, st. Komsomolskaya, 95

Phone: (4862) 41–98–41

E–mail: sapr@ostu.ru

ПРИБОРЫ, БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 535.37+615.471

Е.В. ПОТАПОВА, В.В. ДРЁМИН, Е.А. ЖЕРЕБЦОВ,
К.В. ПОДМАСТЕРЬЕВ, А.В. ДУНАЕВ

РАЗРАБОТКА ЖИДКОГО ОПТИЧЕСКОГО ФАНТОМА ДЛЯ ФЛУОРЕСЦЕНТНЫХ СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Аннотация. *Регистрация параметров эндогенной флуоресценции in vivo имеет доказанный потенциал для обеспечения важного понимания изменений в ткани при диагностике патологий различного типа. Оценка параметров интенсивности эндогенной флуоресценции при наличии различного количества рассеивателей и поглотителей создает большие трудности для внедрения таких методов в клиническую практику. Изготовление оптического фантома на основе интралипидов, красителя фуксина основного и рибофлавина мононуклеотида, имитирующих спектральные свойства биоткани, может помочь в разработке методики корректировки спектра эндогенной флуоресценции биологической ткани пациента. В работе проведена оценка эффективности изготовленного жидкостного фантома с использованием метода флуоресцентной спектроскопии с длинами волн возбуждения 365 нм и 450 нм.*

Ключевые слова: *оптическая неинвазивная диагностика, флуоресцентная спектроскопия, оптический фантом.*

Введение

Флуоресцентная спектроскопия занимает важное место в оптической биомедицинской диагностике для выявления ранних изменений в биологических тканях человека, позволяя проводить раннюю диагностику различных заболеваний [1–3]. При прогрессировании заболевания ткань претерпевает изменения от нормальной до патологической, которые отражаются в биохимическом и морфологическом составе, различиях в скорости тканевого метаболизма. Эти изменения отражаются на спектрах эндогенной флуоресценции [4, 5], что можно регистрировать с помощью спектроскопических методов или методов визуализации.

Биологическая ткань – это мутная среда, содержащая большое количество флуорофоров, рассеивателей и поглощающих молекул. Флуоресцентный анализ биологических тканей сопряжен с трудностью интерпретации спектральных зависимостей флуоресценции, так как свет, падающий на ткань подвергается в среде как поглощению, так и многократному рассеянию [6]. Проводимые исследования показывают большую вариабельность параметров интенсивности эндогенной флуоресценции как по группе добровольцев, так и индивидуально, у отдельного пациента в одной и той же области исследования в течение времени [7]. Одной из причин появления повышенной дисперсии получаемых значений является влияние поглощения крови на регистрируемые значения интенсивности флуоресценции [8], так как изменение перфузии и оксигенации крови в биоткани является параметром с большой вариабельностью собственных значений, на которые влияют многие физиологические процессы [9, 10].

В настоящее время известна группа методик компенсации кровенаполнения в флуоресцентной диагностике, самым простым из которых является использование нормирования полученных значений спектра на амплитуду обратно-отраженного сигнала [11, 12]. Перспективным является разработка новых, а также адаптация известных методик под конкретные исследовательские задачи.

Распространение света в оптически неоднородной среде, такой как большинство биологических тканей, описывается теорией переноса излучения, учитывающей оптические свойства ткани в форме коэффициентов поглощения и рассеяния [4, 13]. Эти физические величины положены в основу моделирования с помощью тест-объектов (фантомов), имитирующих оптические характеристики реальной ткани. Оптические фантомы обладают близкими к биологическим тканям оптическими свойствами и имитируют спектральные

характеристики для моделирования типичного взаимодействия биологической ткани с оптическим излучением. Фантомы играют важную роль в разработке, стандартизации и калибровке устройств биомедицинской оптики в лабораторных и клинических условиях и служат стандартами для тестирования, калибровки и поверки устройств.

Большинство спектроскопических исследований на основе фантомов, доступных в литературе, основаны на жидких фантомах [14–16]. Жидкий фантом имеет много преимуществ, поскольку его оптические свойства могут быть легко изменены путем добавления небольших количеств калиброванных рассеивающих или поглощающих веществ. Использование таких фантомов позволяет регистрировать отклик оптической системы, даже когда речь идет о небольших изменениях оптических свойств. Жидкие фантомы флуоресценции биологических тканей получают путем смешивания требуемых количеств флуоресцирующего вещества, поглощающей и рассеивающей среды в разбавленных растворах.

Целью данной работы является создание жидкого фантома флуоресценции, имитирующего оптические свойства кожи, который может быть использован для разработки методик корректировки спектра эндогенной флуоресценции биологической ткани. Ожидается, что такой фантом будет способствовать улучшению качества флуоресцентной спектроскопии.

Материалы и методы

Предложены фантомные модели биоткани на основе смеси коллоидного раствора интралипида (моделирование рассеяния), пигментов фуксина (моделирование поглощения) и рибофлавина мононуклеотида (моделирование флуоресценции FAD).

При изготовлении оптических фантомов для имитации рассеяния часто используют интралипид, как хорошо исследованную высокостабильную светорассеивающую среду с известными свойствами рассеяния и поглощения [17]. Интралипид представляет собой эмульсию глицерина, яичного лецитина, соевого масла и воды. Также на предварительном этапе было установлено, что раствор интралипида имеет собственный спектр флуоресценции с одним из пиков (470 нм) близким к пику NADH (470–490 нм). Эти результаты близки к полученным в [18], где был зарегистрирован пик флуоресценции раствора интралипида на длине волны 500 нм. Для приготовления оптического фантома использовался 20% раствор интралипида (Фрезениус Каби, США).

Исследование стабильности рассеивающих свойств интралипида проведено методом лазерной доплеровской флоуметрии путем регистрации сигнала на протяжении 40 мин. Предварительно раствор интралипида взбалтывался, оптическое волокно прибора «ЛАКК–М» (ООО НПП «ЛАЗМА», Россия) фиксировалось вплотную к флакону. Результат исследования приведен на рисунке 1. На протяжении 35 мин уровень сигнала (регистрируемая перфузия ПМ) оставался неизменным, подтверждая высокостабильные рассеивающие свойства интралипида.

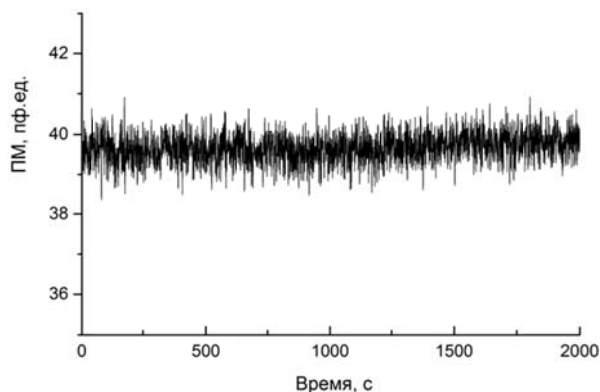


Рисунок 1 – Исследование стабильности рассеивающих свойств интралипида методом лазерной доплеровской флоуметрии

На этапе подбора поглощающего пигмента к нейтральному красителю сформулированы следующие требования: пигмент не должен вступать в химические реакции с другими компонентами разрабатываемого фантома и не должен обладать собственной флуоресценцией высокой интенсивности. Отсутствие собственной флуоресценции красителей проверено с помощью канала флуоресцентной спектроскопии прибора «ЛАКК–М». Проверка изменения оптических свойств в растворе вследствие произошедшей химической реакции осуществлялась следующим образом. Измерена оптическая плотность растворов исходных веществ (пигмента и рибофлавина), а затем оптическая плотность смеси этих веществ на спектрофотометре UNICO 1200 (United Products & Instruments, США). Если аддитивность сохранялась – считалось, что изменением поглощения за счет химического взаимодействия можно пренебречь.

В результате проведенных предварительных исследований было установлено, что заявленным требованиям отвечает фуксин основной и генциан фиолетовый. Максимум поглощения основного фуксина (550 нм) близок к локальному максимуму гемоглобина, в этой связи именно фуксин основной (ООО «НеваРеактив», Россия) был выбран для дальнейших исследований.

Для моделирования спектра флуоресценции FAD использовался рибофлавин мононуклеотид (РФМН) (АО «Фармстандарт», Россия). Этот препарат имеет аналогичный FAD спектр, однако чуть более высокий квантовый выход, при этом в отличие от FAD его квантовый выход в пределах pH 4–8 не зависит от кислотности [19, 20].

Таким образом, подготовленный фантом может воспроизводить некоторые важные свойства биоткани с точки зрения флуоресцентной спектроскопии, такие как поглощение света, рассеяние и флуоресценция.

Измерения флуоресценции оптических фантомов проводились с использованием вышеописанного спектроскопического устройства с длинами волн возбуждения флуоресценции 365 нм и 450 нм. Все составляющие фантома смешивались в лабораторном стеклянном стакане, регистрируемые спектры излучения наблюдались в диапазоне длин волн от 350 до 800 нм.

Результаты и обсуждение

При исследовании оптических флуоресцентных свойств изучаемого оптического фантома были проведены последовательно ряд экспериментов.

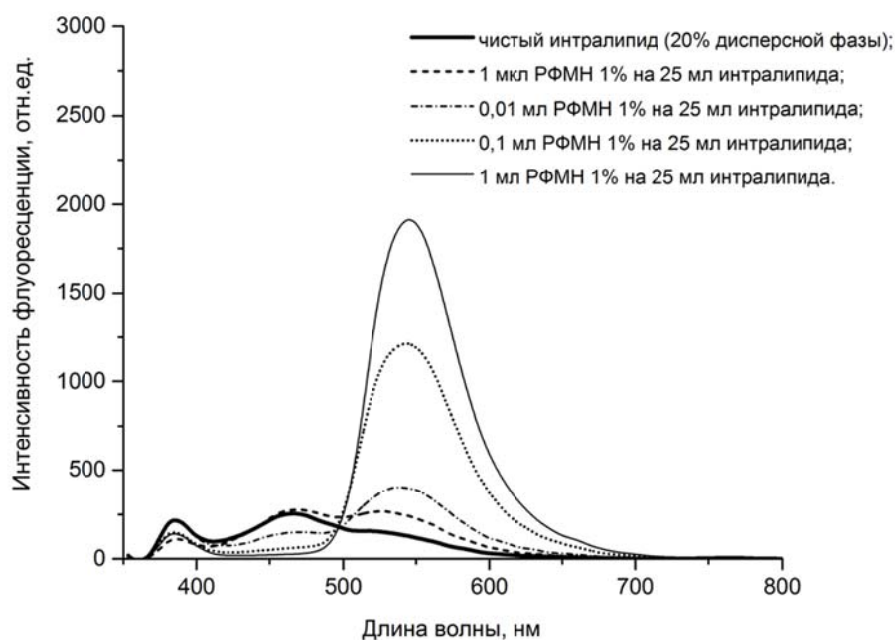


Рисунок 2 – Спектры флуоресценции при разных концентрациях РФМН (1 мл, 0,1 мл, 0,01 мл, 1 мкл РФМН 1% на 25 мл интралипида) при возбуждении на длине волны 365 нм

Для изучения зависимости оптических свойств фантома от содержания флуоресцирующего агента была измерена флуоресценция раствора со следующими концентрациями РФМН в интралипиде: 1 мл, 0,1 мл, 0,01 мл, 1 мкл РФМН 1% на 25 мл интралипида. Спектры флуоресценции полученных растворов при возбуждении на длине волны 365 нм и 450 нм приведены на рисунках 2 и 3, соответственно.

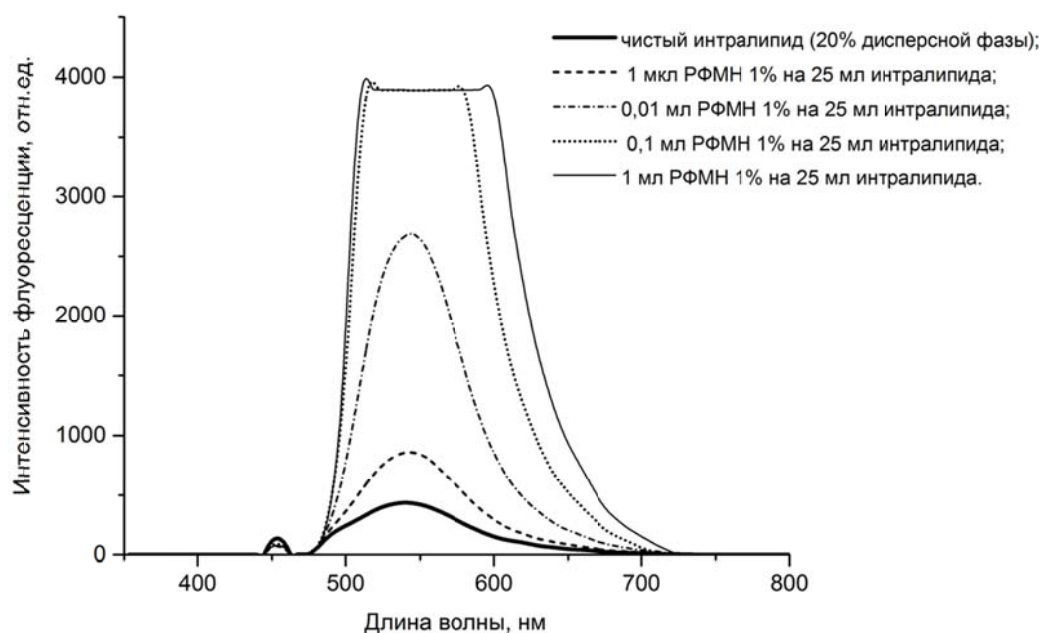


Рисунок 3 – Спектры флуоресценции при разных концентрациях РФМН (1 мл, 0,1 мл, 0,01 мл, 1 мкл РФМН 1% на 25 мл интралипида) при возбуждении на длине волны 450 нм

Анализируя рисунки 2 и 3, можно сказать, что все спектры имели доминирующие пики, соответствующие выходу FAD. Выявлена обратная зависимость интенсивности флуоресценции от концентрации РФМН в интралипиде. При этом концентрация более 0,01 мл РФМН 1 % на 25 мл интралипида вызвала насыщение фотоприемника и большую интенсивность сигнала при возбуждении длиной волны 450 нм. Для основной части экспериментов была выбрана следующая концентрация РФМН в интралипиде: 0.001:25 – 1 мкл 1 % РФМН на 25 мл интралипида 20 %. Это обусловлено тем, что уровень сигнала при такой концентрации на возбуждении длинами волн 365 нм и 450 нм соответствует среднему уровню сигнала, полученному с помощью прибора «ЛАКК–М» на коже человека [7].

Далее экспериментально подбиралась необходимая концентрация пигмента. Изменение спектра флуоресценции регистрировалось при добавлении разных количеств насыщенного при 25 °С раствора фуксина (10; 20; 30 мкл на смесь 25 мл интралипида и 1 мкл РФМН). Спектры флуоресценции полученных растворов при возбуждении длинами волн 365 нм и 450 нм приведены на рисунках 4 и 5, соответственно.

При увеличении концентрации фуксина сигнал флуоресценции уменьшается. Для последующего эксперимента выбрана смесь 30 мкл насыщенного раствора фуксина на 25 мл интралипида 20% и 1 мкл РФМН 1%, так как именно этот состав фантома обеспечивает пик флуоресценции возбужденной длиной волны 365 нм, на длине 450 нм, что соответствует доминирующему пику выхода FAD. А также эта концентрация обеспечивает уровень сигнала возбужденной флуоресценции кожи человека.

Следующей задачей экспериментальных исследований была оценка изменения спектра флуоресценции предложенного фантома при разбавлении водой. Для этого полученный состав разбавлялся в 2 и 10 раз. Результаты экспериментальных исследований на длинах волн 365 нм и 450 нм приведены на рисунках 6 и 7, соответственно.

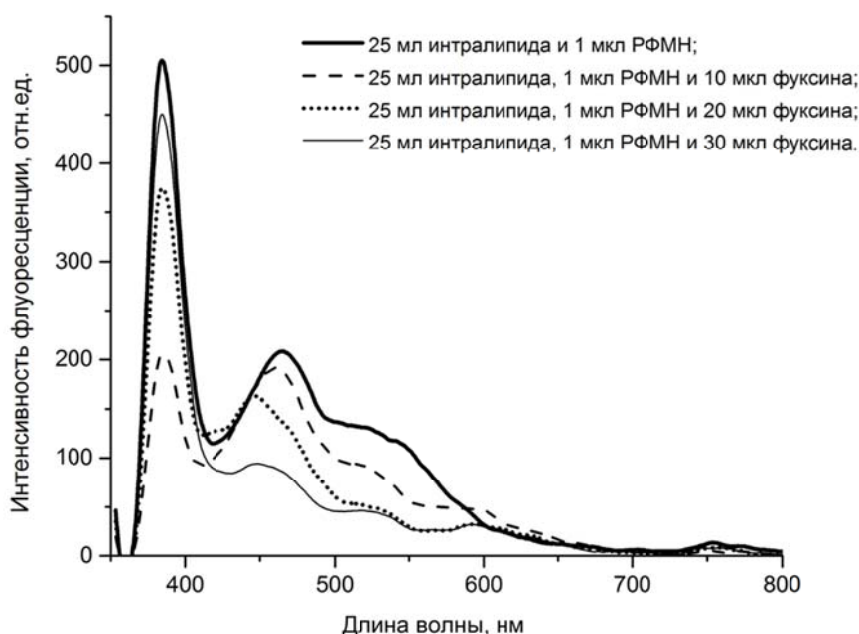


Рисунок 4 – Спектры флуоресценции при добавлении разных количеств насыщенного при 25 °С раствора фуксина (10; 20; 30 мкл на смесь 25 мл интралипида и 1 мкл РФМН) при возбуждении на длине волны 365 нм

Разбавление фантома водой вызвало изменение интенсивности сигнала, что позволяет подготовить оптический фантом для исследований на спектрометрах с разным диапазоном измеряемых значений, оптимально подбирая концентрацию к каждому конкретному прибору.

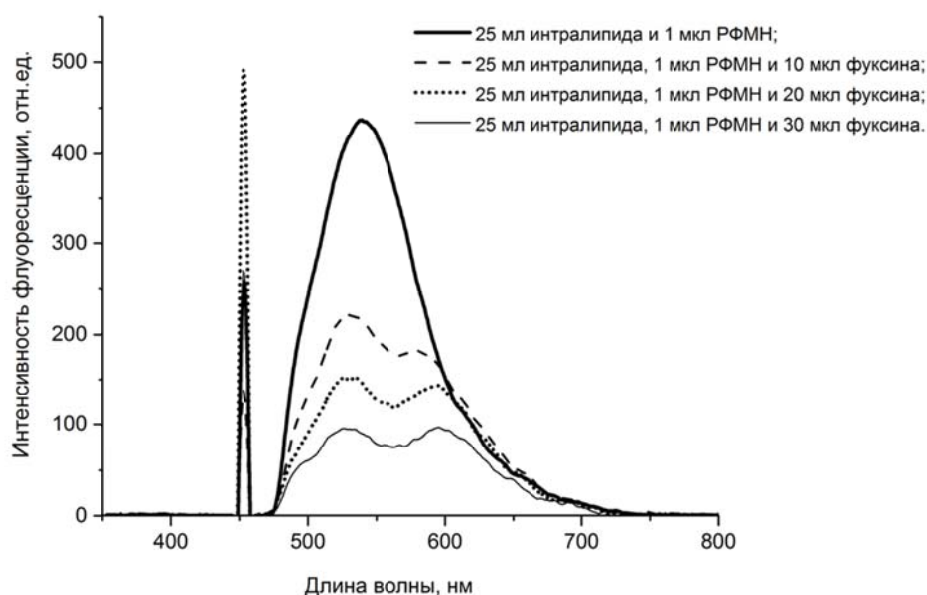


Рисунок 5 – Спектры флуоресценции при добавлении разных количеств насыщенного при 25 °С раствора фуксина (10; 20; 30 мкл на смесь 25 мл интралипида и 1 мкл РФМН) при возбуждении на длине волны 450 нм

На заключительном этапе исследований свойств предложенного фантома было проведено измерение глубины зондирования на длине волны 365 нм. Для исследования глубины рассеяния волоконный зонд погружался в смесь и, находясь в ней, подносился к черной поглощающей нефлуоресцирующей поверхности (рисунок 8). При этом сигнал флуоресценции падал практически до 0. Затем волоконный зонд приподнимался над поглощающей поверхностью контролировалось расстояние, на котором сигнал

флуоресценции на данной длине волны переставал увеличиваться. Таким образом глубина зондирования была оценена на уровне 2 мм.

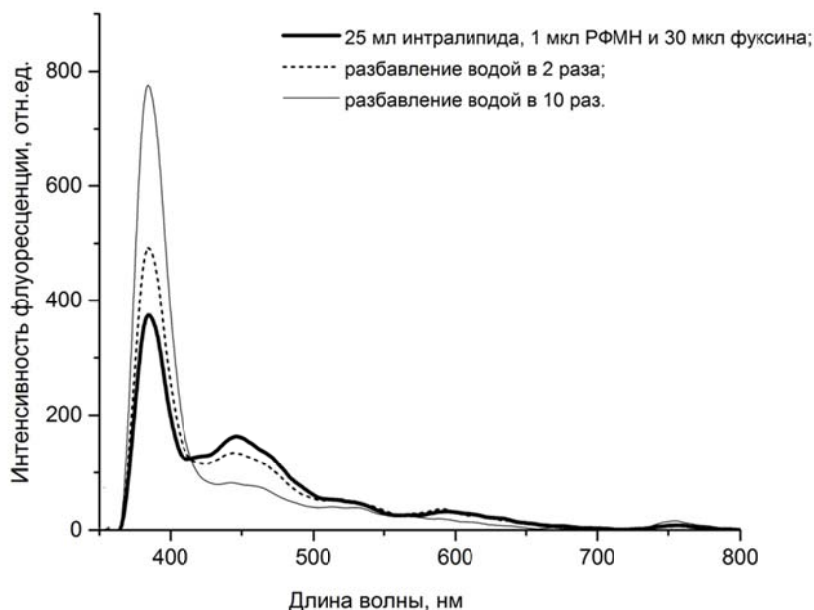


Рисунок 6 – Спектры флуоресценции оптического фантома при разбавлении водой (разбавление в 2 и 10 раз) при возбуждении на 365 нм

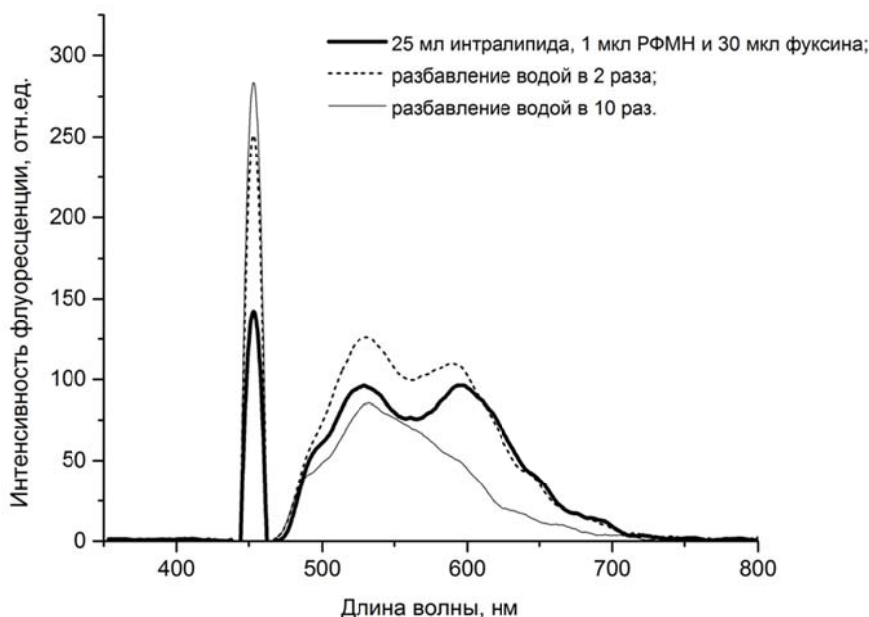


Рисунок 7 – Спектры флуоресценции оптического фантома при разбавлении водой (разбавление в 2 и 10 раз) при возбуждении на 450 нм

Заключение

Верификацию теоретических моделей распространения света в биологической ткани, а также тестирование и оценку рабочих характеристик измерительных устройств чрезвычайно трудно осуществить в экспериментах *in vivo* на реальных биологических объектах, так как при этом приходится сталкиваться с широким разбросом морфологических и биохимических параметров, находящихся вне контроля экспериментатора. Также, в области медицинской биофотоники существует необходимость создания стабильных и воспроизводимых методик калибровки и контроля эксплуатационных параметров приборов и систем, что, в свою очередь, обосновывает потребность в разработке стабильных во

времени и воспроизводимых тест-объектов, имитирующих оптические характеристики реальной ткани (фантомов).



Рисунок 8 – Эксперимент по измерению глубины зондирования

В этом исследовании разработан состав жидкого оптического фантома с подобными коже свойствами рассеяния, поглощения и флуоресценции и подтверждена его эффективность с помощью флуоресцентной спектроскопии. Было проанализировано влияние на оптические свойства тест-объекта различных концентраций флуоресцирующего агента и красителя. Предложенный фантом воспроизводимый, стабильный, простой в приготовлении и имитирует оптические свойства нормальной кожи человека. Такой фантом может быть полезным в разработке методики корректировки спектра эндогенной флуоресценции биологической ткани пациента, а также при оценке чувствительности и разрешения разрабатываемых приборов флуоресцентной спектроскопии.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект №18-02-00669).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shahzad, A. Fluorescence spectroscopy: an emerging excellent diagnostic tool in medical sciences / A. Shahzad, M. Edetsberger, G. Koehler // *Applied Spectroscopy Reviews*, 2010. – 45 (1). P. 1–11.
2. Дрёмин, В.В. Возможности применения сочетанных методов оптической неинвазивной диагностики при исследовании жизнеспособности тканей нижних конечностей пациентов с сахарным диабетом / В.В. Дрёмин, Е.В. Дрёмина, Е.В. Жарких, Е.В. Потапова, Е.А. Алимичева, Г.И. Масалыгина, А.В. Дунаев // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2016. – № 1 (315). – С. 136–142.
3. Shahzad, A. Diagnostic application of fluorescence spectroscopy in oncology field: hopes and challenges / A. Shahzad, M. Knapp, M. Edetsberger, M. Puchinger, E. Gaubitzer, G. Koehler // *Applied Spectroscopy Reviews*, 2010. – 45 (1). – P. 92–99.
4. Тучин, В.В. Оптическая биомедицинская диагностика: в 2-х т.: учебное издание / В.В. Тучин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 559 с.
5. Kandurova, K. Application of the fluorescence spectroscopy for the analysis of the state of abdominal cavity organs tissues in mini-invasive surgery / K. Kandurova, V.V. Dremin, E.A. Zhrebtsov, E.V. Potapova, A.V. Dunaev, A.V. Mamoshin, A.L. Alyanov, V.F. Muradyan // *Proceedings Volume 10685, Biophotonics: Photonic Solutions for Better Health Care VI*, 2018. – P. 171.
6. Muller, M.G. Intrinsic fluorescence spectroscopy in turbid media: Disentangling effects of scattering and absorption / M.G. Muller, I. Georgakoudi, Q. Zhang, J. Wu, M.S. Feld // *Applied Optics*, 2001. – 40 (25). – P. 4633–4646.
7. Dunaev, A.V. Individual variability analysis of fluorescence parameters measured in skin with different levels of nutritive blood flow / A.V. Dunaev, V.V. Dremin, E.A. Zhrebtsov, I.E. Rafailov, K.S. Litvinova, S.G. Palmer, N. A. Stewart, S.G. Sokolovski, E.U. Rafailov // *Medical Engineering & Physics*, 2015. – 37 (6). – P. 574–583.
8. Lim, L. Probe pressure effects on human skin diffuse reflectance and fluorescence spectroscopy

measurements / L. Lim, B. Nichols, N. Rajaram, J.W. Tunnell // *Journal of Biomedical Optics*, 2011. – 16 (1). – P. 011012.

9. Дунаев, А.В. Анализ индивидуальной variability параметров в лазерной флуоресцентной диагностике / А.В. Дунаев, В.В. Дрёмин, Е.А. Жеребцов, С.Г. Палмер, С.Г. Соколовский, Э.У. Рафаилов // *Биотехносфера*, 2013. – № 2 (26). – С. 39–47.

10. Dunaev, A.V. Laser reflectance oximetry and Doppler flowmetry in assessment of complex physiological parameters of cutaneous blood microcirculation / A.V. Dunaev; V.V. Sidorov; N.A. Stewart; S.G. Sokolovski; E.U. Rafailov // *Proceedings Volume 8572, Advanced Biomedical and Clinical Diagnostic Systems XI*, 2013. – P. 857205.

11. de Veld, D.C. Autofluorescence and diffuse reflectance spectroscopy for oral oncology / D.C. de Veld, M. Skurichina, M.J. Witjes, R.P. Duin, H.J. Sterenborg, J.L. Roodenburg // *Lasers in Surgery and Medicine*, 2005. – 36 (5). – P. 356–364.

12. Bradley, R.S. A review of attenuation correction techniques for tissue fluorescence / R.S. Bradley, M.S. Thorniley // *Journal of The Royal Society Interface*, 2006. – 3 (6). – P. 1.

13. Ishimaru, A. Wave propagation and scattering in random media / A. Ishimaru. – New York: Academic Press, 1978. – 600 p.

14. Wang, D. A liquid optical phantom with tissue-like heterogeneities for confocal microscopy / D. Wang, Y. Chen, J.T.C. Liu // *Biomedical Optics Express*, 2012. – 3 (12). – P. 3153.

15. Loginova, D.A. Liquid optical phantoms mimicking spectral characteristics of laboratory mouse biotissues / D.A. Loginova, E.A. Sergeeva, A.D. Krainov, P.D. Agrba and M.Yu. Kirillin // *Quantum Electronics*, 2016. – 46 (6). – P. 528–533.

16. Kleiser, S. Comparison of near-infrared oximeters in a liquid optical phantom with varying intralipid and blood content / S. Kleiser, S. Hyttel-Sorensen, G. Greisen, M. Wolf // *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 2016. – 876. – P. 413–418.

17. Ninni, P. Di. Intralipid: towards a diffusive reference standard for optical tissue phantoms / P.Di. Ninni, F. Martelli, G. Zaccanti // *Physics in Medicine & Biology*, 2011. – 56 (2). – P. N21–N28.

18. Du Le, V.N. Measurements of extrinsic fluorescence in Intralipid and polystyrene microspheres / V.N. Du Le, Z. Nie, J.E. Hayward, T.J. Farrell, Q. Fang // *Biomedical Optics Express*, 2014. – 5 (8). – P. 2726.

19. Drössler, P. pH dependence of the absorption and emission behaviour of riboflavin in aqueous solution / P. Drössler, W. Holzer, A. Penzkofer, P. Hegemann // *Chemical Physics*, 2002. – 282 (3). – P. 429–439.

20. Galbán, J. The intrinsic fluorescence of FAD and its application in analytical chemistry: a review / J. Galbán, I. Sanz-Vicente, J. Navarro, S. de Marcos // *Methods and Applications in Fluorescence*, 2016. – 4 (4). – P. 042005.

Потапова Елена Владимировна

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл,
Россия

Кандидат технических наук, доцент, старший научный
сотрудник Научно-технологического центра
биомедицинской фотоники
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел.: +7-4862-41-98-37
E-mail: potapova_ev_ogu@mail.ru

Дрёмин Виктор Владимирович

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл,
Россия

Кандидат технических наук, научный сотрудник
Научно-технологического центра биомедицинской
фотоники
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел.: +7-4862-41-98-37
E-mail: dremin_viktor@mail.ru

Жеребцов Евгений Андреевич

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл,
Россия

Кандидат технических наук, старший научный
сотрудник Научно-технологического центра
биомедицинской фотоники
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел.: +7-4862-41-98-37
E-mail: zherebzow@gmail.com

Подмастерьев Константин Валентинович

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл,
Россия

Доктор технических наук, профессор, директор
Института приборостроения, автоматизации и
информационных технологий
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел.: +7-4862-41-98-76
E-mail: asms-orel@mail.ru

Дунаев Андрей Валерьевич

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орёл, Россия

Кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Научно-технологического центра
биомедицинской фотоники
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел.: +7-4862-41-98-37
E-mail: inohvat@yandex.ru

E.V. POTAPOVA, V.V. DREMIN, E.A. ZHEREBTSOV,
K.V. PODMASTERYEV, A.V. DUNAEV

LIQUID OPTICAL PHANTOM FOR FLUORESCENCE SPECTROSCOPY

Abstract. *Registration of endogenous fluorescence in vivo has a proven potential for providing important information for the diagnosis of a number of pathologies. Evaluation of the intensity of endogenous fluorescence in the presence of different scatterers and absorbers rises great difficulties in interpretation of the results as well as in the use of such methods in clinical practice. The preparation of a liquid optical phantom based on intralipid, fuchsin base and riboflavin mononucleotide dye simulating the spectral properties of the tissue, can help in the developing a methodology for the correction of the spectrum of endogenous fluorescence of biological tissue. The parameters of the prepared liquid phantoms were estimated using the fluorescence spectroscopy method with excitation wavelengths of 365 nm and 450 nm.*

Keywords: *optical non-invasive diagnostics, fluorescence spectroscopy, liquid optical phantom.*

BIBLIOGRAPHY

1. Shahzad, A. Fluorescence spectroscopy: an emerging excellent diagnostic tool in medical sciences / A. Shahzad, M. Edetsberger, G. Koehler // *Applied Spectroscopy Reviews*, 2010. – 45 (1). P. 1–11.
2. Dremine, V.V. Vozmozhnosti primeneniya sochetannykh metodov opticheskoy neinvazivnoy diagnostiki pri issledovanii zhiznesposobnosti tkanej nizhnih konechnostej pacientov s saharnym diabetom / V.V. Dremine, E.V. Dremine, E.V. Zharkih, E.V. Potapova, E.A. Alimicheva, G.I. Masalygina, A.V. Dunaev // *Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*, 2016. – № 1 (315). – S. 136–142.
3. Shahzad, A. Diagnostic application of fluorescence spectroscopy in oncology field: hopes and challenges / A. Shahzad, M. Knapp, M. Edetsberger, M. Puchinger, E. Gaubitzer, G. Koehler // *Applied Spectroscopy Reviews*, 2010. – 45 (1). – P. 92–99.
4. Tuchin, V.V. Opticheskaya biomedicinskaya diagnostika: v 2–h t.: uchebnoe izdanie / V.V. Tuchin. – M.: FIZMATLIT, 2007. – 559 s.
5. Kandurova K. Application of the fluorescence spectroscopy for the analysis of the state of abdominal cavity organs tissues in mini-invasive surgery / K. Kandurova, V.V. Dremine, E.A. Zherebtsov, E.V. Potapova, A.V. Dunaev, A.V. Mamoshin, A.L. Alyanov, V.F. Muradyan // *Proceedings Volume 10685, Biophotonics: Photonic Solutions for Better Health Care VI*, 2018. – P. 171.
6. Muller, M.G. Intrinsic fluorescence spectroscopy in turbid media: Disentangling effects of scattering and absorption / M.G. Muller, I. Georgakoudi, Q. Zhang, J. Wu, M.S. Feld // *Applied Optics*, 2001. – 40 (25). – P. 4633–4646.
7. Dunaev, A.V. Individual variability analysis of fluorescence parameters measured in skin with different levels of nutritive blood flow / A.V. Dunaev, V.V. Dremine, E.A. Zherebtsov, I.E. Rafailov, K.S. Litvinova, S.G. Palmer, N. A. Stewart, S.G. Sokolovski, E.U. Rafailov // *Medical Engineering & Physics*, 2015. – 37 (6). – P. 574–583.
8. Lim, L. Probe pressure effects on human skin diffuse reflectance and fluorescence spectroscopy measurements / L. Lim, B. Nichols, N. Rajaram, J.W. Tunnell // *Journal of Biomedical Optics*, 2011. – 16 (1). – P. 011012.
9. Dunaev, A.V. Analiz individualnoj variabelnosti parametrov v lazernoj fluorescentnoj diagnostike / A.V. Dunaev, V.V. Dremine, E.A. Zherebtsov, S.G. Palmer, S.G. Sokolovskij, E.U. Rafailov // *Biotekhnosfera*, 2013. – № 2 (26). – S. 39–47.
10. Dunaev, A.V. Laser reflectance oximetry and Doppler flowmetry in assessment of complex physiological parameters of cutaneous blood microcirculation / A.V. Dunaev, V.V. Sidorov, N.A. Stewart, S.G. Sokolovski, E.U. Rafailov // *Proceedings Volume 8572, Advanced Biomedical and Clinical Diagnostic Systems XI*, 2013. – P. 857205.
11. de Veld, D.C. Autofluorescence and diffuse reflectance spectroscopy for oral oncology / D.C. de Veld, M. Skurichina, M.J. Witjes, R.P. Duin, H.J. Sterenborg, J.L. Roodenburg // *Lasers in Surgery and Medicine*, 2005. – 36 (5). – P. 356–364.
12. Bradley, R.S. A review of attenuation correction techniques for tissue fluorescence / R.S. Bradley, M.S. Thorniley // *Journal of The Royal Society Interface*, 2006. – 3 (6). – P. 1.
13. Ishimaru, A. Wave propagation and scattering in random media / A. Ishimaru. – New York: Academic Press, 1978. – 600 p.
14. Wang, D. A liquid optical phantom with tissue-like heterogeneities for confocal microscopy / D. Wang, Y. Chen, J.T.C. Liu // *Biomedical Optics Express*, 2012. – 3 (12). – P. 3153.

15. Loginova, D.A. Liquid optical phantoms mimicking spectral characteristics of laboratory mouse biotissues / D.A. Loginova, E.A. Sergeeva, A.D. Krainov, P.D. Agrba and M.Yu. Kirillin // *Quantum Electronics*, 2016. – 46 (6). – P. 528–533.
16. Kleiser, S. Comparison of near-infrared oximeters in a liquid optical phantom with varying intralipid and blood content / S. Kleiser, S. Hyttel-Sorensen, G. Greisen, M. Wolf // *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 2016. – 876. – P. 413–418.
17. Ninni, P. Di. Intralipid: towards a diffusive reference standard for optical tissue phantoms / P.Di. Ninni, F. Martelli, G. Zaccanti // *Physics in Medicine & Biology*, 2011. – 56 (2). – P. N21–N28.
18. Du Le, V.N. Measurements of extrinsic fluorescence in Intralipid and polystyrene microspheres / V.N. Du Le, Z. Nie, J.E. Hayward, T.J. Farrell, Q. Fang // *Biomedical Optics Express*, 2014. – 5 (8). – P. 2726.
19. Drössler, P. pH dependence of the absorption and emission behaviour of riboflavin in aqueous solution / P. Drössler, W. Holzer, A. Penzkofer, P. Hegemann // *Chemical Physics*, 2002. – 282 (3). – P. 429–439.
20. Galbán, J. The intrinsic fluorescence of FAD and its application in analytical chemistry: a review / J. Galbán, I. Sanz-Vicente, J. Navarro, S. de Marcos // *Methods and Applications in Fluorescence*, 2016. – 4 (4). – P. 042005.

Potapova Elena Vladimirovna

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel,
Russia
Ph.D., senior researcher of Research and Development
Center of Biomedical Photonics
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
Ph.: +7–4862–41–98–37
E-mail: potapova_ev_ogu@mail.ru

Dremin Victor Vladimirovich

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel,
Russia
Ph.D., researcher of Research and Development Center of
Biomedical Photonics
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
Ph.: +7–4862–41–98–37
E-mail: dremin_viktor@mail.ru

Zherebtsov Evgeny Andreevich

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel,
Russia
Ph.D., senior researcher of Research and Development
Center of Biomedical Photonics
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
Ph.: +7–4862–41–98–37
E-mail: zherebzow@gmail.com

Podmasteryev Konstantin Valentinovich

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel,
Russia
Doctor of Technical Sciences, professor, director of
Institute of Instrument Engineering, Automation and
Information Technologies
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
Ph.: +7–4862–41–98–76
E-mail: asms-orel@mail.ru

Дунаев Андрей Валерьевич

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia
Ph.D., leading researcher of Research and Development Center of Biomedical Photonics
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
Ph.: +7–4862–41–98–37
E-mail: inohvat@yandex.ru

УДК 577.3; 621.25.07.99 + 616.711–002–07; 621.3+621.37[(043.2)]

Л.А. БОНДАРЕВА

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ МОБИЛЬНОГО ТЕЛЕФОНА НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА ПО ИЗМЕНЕНИЮ ТЕМПЕРАТУРЫ БАРАБАННОЙ ПЕРЕПОНКИ

Аннотация. В статье приводится обоснование возможности оценки теплового воздействия мобильного телефона на головной мозг человека по изменению температуры барабанной перепонки. Представлены результаты экспериментальных исследований, показавших увеличение температуры барабанной перепонки более чем на $2,5^{\circ}\text{C}$ в процессе ведения разговора по мобильному телефону, а так же рекомендации по изменению существующих гигиенических стандартов.

Ключевые слова: мобильный телефон, электромагнитное излучение, температура, нагрев структур мозга, барабанная перепонка, стандарты ICNIRP.

Введение

Оценка влияния электромагнитного излучения мобильных телефонов на организм человека не теряет своей актуальности. Несмотря на это, результаты проведенных за последние годы достаточно многочисленных исследований так и не дали однозначных ответов на вопросы, касающиеся оценки этого влияния. Вопрос о безопасности использования мобильных телефонов остается до сих пор открытым.

Фактически на сегодняшний день в РФ мобильные сотовые телефоны не входят в перечень объектов, подлежащих обязательной сертификации, целью проведения которой как раз и является подтверждение безопасности. Более того, действующими в настоящее время «Правилами организации и проведения работ по обязательному подтверждению соответствия средств связи» не предусмотрено нанесение какого-либо знака на мобильные сотовые телефоны, а сведения о зарегистрированной декларации соответствия указываются лишь в паспорте и сопроводительной технической документации на средство связи. Тем не менее, нельзя не отметить и того, что каждый заинтересованный пользователь может получить информацию о фактическом значении удельной поглощенной мощности электромагнитного поля его телефона, находящуюся зачастую еще и в свободном доступе на различных сайтах. Однако оценка имеющейся информации также сопряжена с рядом трудностей, т.к. основные принципы санитарно-гигиенического законодательства в России, устанавливающего основы нормирования предельно допустимых уровней ЭМИ, отличаются от принципов других национальных систем.

Теория

В нашей стране в качестве основного нормируемого параметра в СанПиН 2.1.8/2.3.4.1190–03 «Гигиенические требования к размещению и эксплуатации средств сухопутной подвижной радиосвязи» введена плотность потока электромагнитной энергии (ППЭ), которая характеризует количество энергии, переносимой электромагнитной волной в единицу времени через единицу поверхности, перпендикулярной направлению распространения волны. Предельно допустимый уровень ППЭ сотового телефона составляет 100 мкВт/см^2 [1]. При этом зарубежные производители сотовых телефонов выполняют требования европейских и американских стандартов, устанавливающих допустимый уровень воздействия ЭМИ на организм человека по показателю SAR (Specific Adsorption Rate), т.е. удельной поглощенной мощности ЭМИ, выраженной на единицу массы тела или ткани.

Принципиальное отличие заключается в том, что в качестве основного критерия определения предельно допустимого уровня ЭМИ в России принято положение о том, что воздействие не должно вызывать у человека даже временного нарушения гомеостаза, проявляющегося ни в ближайшем, ни в отдаленном периоде времени. Допустимым считается уровень ЭМИ, не вызывающий статистически достоверного нарушения гомеостаза организма абонента (так называемый «дотепловой»). В зарубежных стандартах при определении безопасного уровня исходят из значений интенсивности ЭМИ, при превышении

которых возникают доказуемо опасные последствия воздействия [2]. Разные принципы в определении приводят к тому, что сотовые телефоны, используемые на территории нашей страны, имеющие декларацию соответствия с нормированным и соответствующим требованиям SAR, заведомо не соответствуют российским требованиям, поскольку излучаемые ими электромагнитные поля превышают предельно-допустимые уровни электромагнитного поля в несколько раз. Объясняется это более жесткими требованиями российских норм.

Тем ни менее в настоящее время все чаще поднимается вопрос о пересмотре российских ПДУ ЭМИ сотовой связи и переходе на международные нормативы, т.е. показатели SAR. Этот параметр представляет собой мощность, поглощаемую 1 кг ткани тела человека в реальных условиях и, таким образом, при его определении учитываются многие аспекты, связанные с ЭМП в ближней зоне: характеристики источника, искажения, вносимые телом, неоднородность биологических тканей в отношении диэлектрических свойств, возможный эффект концентрации ЭМП внутри тела [2]. Одним из главных сдерживающих факторов введения этого параметра в широкое использование является не полное его соответствие современному состоянию знаний по вопросу воздействия ЭМП на организм человека.

Для определения SAR принята так называемая «тепловая методика», т.е. оценивается тепловой эффект в биологической ткани (кстати, по аналогии с СВЧ-печами, работающими в близком частотном диапазоне). Однако полученные значения могут серьезно различаться в зависимости от того, по какому стандарту и на какой частоте проводилось определение SAR (американскому или европейскому). В США SAR равна 1,6 Вт/кг (при этом поглощенная мощность излучения приводится к 1 г ткани органов человека), в Европе она больше и равна 2 Вт/кг (поглощенная мощность излучения приводится к 10 г ткани органов человека). Еще одним не бесспорным моментом является методика его определения, вернее расчета, так как на сегодняшний день не существует прямого метода экспериментального измерения этого параметра. Определение SAR проводится либо с помощью «фантома», т.е. копии человеческого тела, либо с помощью компьютерного моделирования. В любом случае приходится оперировать моделью (физической или математической).

Абсолютно уверенным на данный момент можно быть только в том, что чем меньше SAR, тем безопаснее телефон, но вот по поводу того, что приведенные нормы SAR гарантируют не нарушение теплового баланса, все чаще даже у широкого круга потребителей возникают вопросы. Известны данные [3], которые, исходя из информации о SAR мобильного телефона, равной 2 Вт/кг, показывают увеличение температуры в тканях не более чем на 0,3 °С, причем при наиболее долгосрочном воздействии. Увеличение SAR до 10 Вт/кг (что соответствует режиму разогрева микроволновки) приводит к легкому нагреву, когда температура в тканях увеличивается до верхнего предела нормального диапазона (37±1 °С). Однако даже при отсутствии измерительных приборов каждый потребитель в процессе использования мобильного телефона ощущает нагрев в области наружного уха, который значительно больше указанных 0,3 °С. Наибольший интерес, безусловно, вызывает не только нагрев поверхности наружного уха [4], а то, происходит ли этот нагрев и с внутренними структурами уха и головы человека. В связи с этим было проведено экспериментальное исследование, целью которого являлось определение изменения температуры в области барабанной перепонки во время использования мобильного телефона.

Эксперимент

Как известно, анатомическое расположение барабанной перепонки, обладающей обширной кровеносной системой, таково, что значение температуры крови в области барабанной перепонки максимально приближается к значению температуры крови, которой питается гипоталамус. Гипоталамус расположен в самой сердцевине головного мозга и играет большую роль в поддержании постоянства внутренней среды организма, обеспечивая интеграцию функций вегетативной, эндокринной и соматической систем. Эта область мозга получает информацию о любых изменениях в окружающем мире и управляет внутренней средой организма, воздействуя на железы внутренней секреции, тепловой и водно-солевой

баланс, обмен веществ, тонус мышц и сосудов, работу внутренних органов, эмоциональное состояние и психическую активность человека. Соответственно, основываясь на том, что гипоталамус является центром терморегуляции организма, обоснованно считается оптимальным местом для измерения температуры организма именно область барабанной перепонки.

Указанная область является источником инфракрасного излучения, и чем интенсивнее это излучение, тем выше температура тела человека. В качестве экспериментального оборудования был использован инфракрасный термометр, принцип работы которого основан на регистрации инфракрасного излучения, исходящего от тела человека и, в частности, из области барабанной перепонки. Исследование было проведено с использованием инфракрасного бесконтактного термометра Sensites, основные технические характеристики которого представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные технические характеристики инфракрасного термометра

Характеристика	Значение
Диапазон измерения температуры тела, °C	32,0 – 42,5
Точность измерений, °C	0,2
Время измерения, с	0,5
Температура окружающей среды, °C	10,0 – 40,0

В эксперименте участвовало 20 человек в возрасте от 22 до 71 года. Первоначальной целью исследования было определение степени нагрева области барабанной перепонки при использовании мобильного телефона. Для этого каждый исследуемый располагался сидя, в удобной для него позе и проводил сеанс связи по мобильному телефону. Все телефоны, задействованные в эксперименте, имели значение SAR, не превышающее 1,6 Вт/кг, даже существенно более низкое. Длительность разговора ограничивалась 25 мин, при этом каждую минуту телефон отрывался от уха, и проводилось измерение температуры. Результаты, зафиксированные таким образом, предполагали некоторое колебание измеренных значений в связи с тем, что в процессе эксперимента телефон ненадолго (время измерения термометра 0,5 с) отрывался от уха и переставал оказывать воздействие на человека. Действительно в части экспериментальных данных наблюдались спады и подъемы экспериментальной характеристики, которые, однако, позволили проследить достаточно монотонное увеличение температуры в области барабанной перепонки, как это показано на рисунке 1 [5], которое продолжалось в течение всего времени использования телефона.

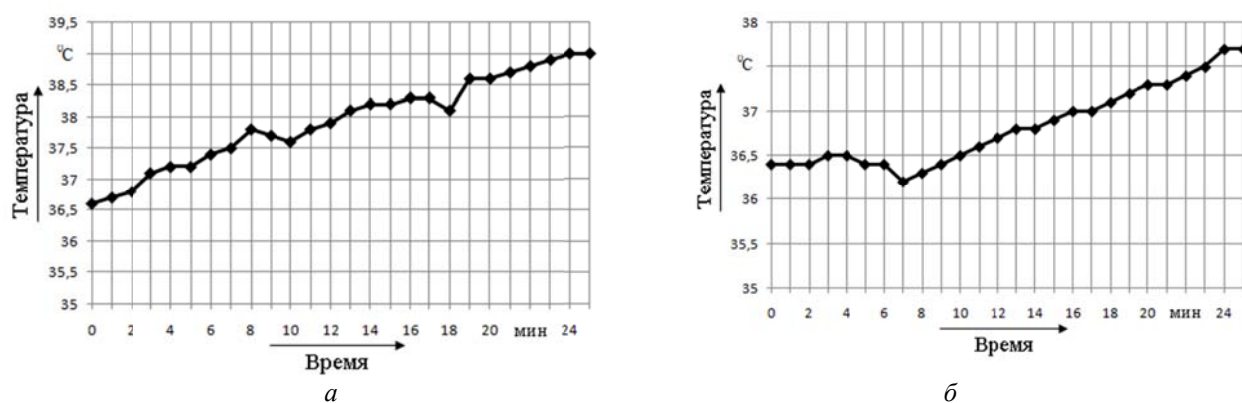


Рисунок 1 – Изменение температуры в области барабанной перепонки в течение 25-минутного разговора по мобильному телефону: а) женщина, 22 года; б) мужчина, 45 лет

Изменение температуры за все время эксперимента на показанном рисунке составило 2,3 °C. При этом обработка всех полученных результатов показала, что изменения,

происходящие в области барабанной перепонки при использовании мобильного телефона, носят закономерный характер, и неизменно наблюдается нагрев, среднее значение которого составило $1,65 \pm 0,15$ °C. Однако также было отмечено то, что чем больше скачков температуры присутствовало на полученных графических зависимостях, тем меньший суммарный нагрев наблюдался во время опыта, а чем стабильнее поведение наблюдавшегося нагрева, тем большее значение температуры было достигнуто в конце. Результатом проведенного исследования можно считать вид полученной зависимости кривой нагрева, которая показала, по результатам визуальной оценки, монотонный характер происходящих изменений температуры в области барабанной перепонки.

Конечно, прерывистый характер исследования предполагал некий дополнительный отвод тепла, происходящий в процессе измерения температуры. Поэтому полученное среднее значение нагрева барабанной перепонки было уточнено в процессе другого исследования, которое отличалось от уже проведенного тем, что измерения температуры проводились два раза: до начала и после окончания сеанса связи. Разговор по мобильному телефону продолжался 30 мин, и сразу по его завершении регистрировалась температура барабанной перепонки. Зафиксированный нагрев составил $2,52 \pm 0,2$ °C, что несколько выше полученного ранее значения, и может быть использовано в качестве значения конечного нагрева барабанной перепонки по истечении 30-минутного разговора по телефону.

В связи с тем, что экспериментально были получены данные, показавшие достаточно сильное влияние измерительной процедуры на конечный нагрев барабанной перепонки, было проведено еще одно исследование, целью которого было установление динамики этого нагрева. Для этого измерение температуры проводилось периодически, а все время сеанса связи было разбито на три одинаковых участка по 15 мин. Таким образом, весь эксперимент составил 45 мин, каждые 15 мин которого, фиксировалась температура барабанной перепонки. В опыте участвовало 10 человек, а усредненная экспериментальная зависимость представлена на рисунке 2.

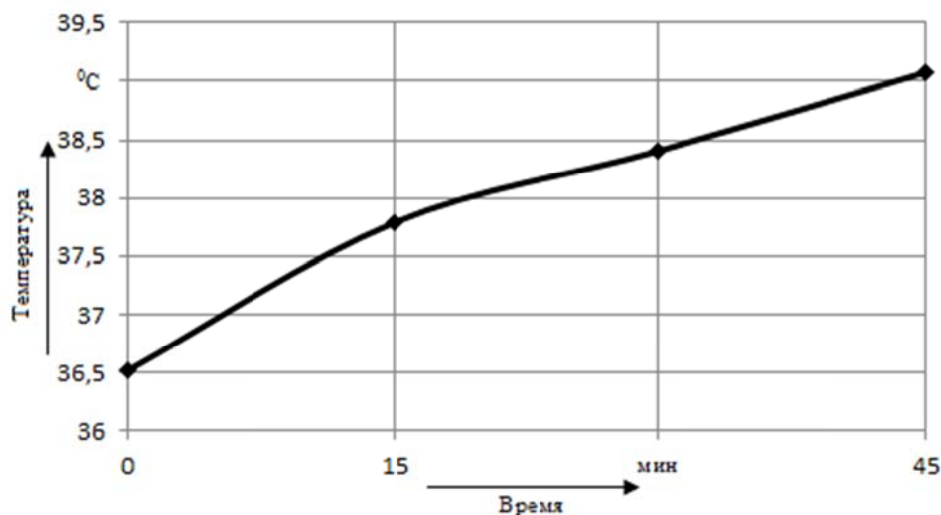


Рисунок 2 – Усредненная зависимость изменения температуры в области барабанной перепонки

Полученная зависимость еще раз подтвердила наличие нагрева, величина которого значительно больше декларируемой широкому кругу общественности. Но здесь крайне интересным явилось ещё и увеличение времени воздействия мобильного телефона на человека до 45 мин. Проведенный анализ прироста температуры за каждые 15 мин эксперимента (таблица 2), показал, что наиболее интенсивно нагревание тканей происходит за первые 15 мин. В дальнейшем нагрев не останавливается, но его интенсивность ослабевает примерно в два раза, и в остальные интервалы времени была примерно одинаковой.

Исходя из полученных данных, можно предположить, что нагрев и в дальнейшем будет продолжаться, поэтому параметр, используемый для учета влияния электромагнитного излучения мобильного телефона, должен быть время зависимой величиной, так как степень воздействия на организм человека мобильного телефона напрямую зависит от времени его использования.

Таблица 2 – Динамика нагрева области барабанной перепонки

Время измерения	Среднее значение прироста температуры за 15 мин, °С	СКО прироста температуры, °С
15-ая мин	1,27	0,19
30-ая мин	0,62	0,07
45-ая мин	0,67	0,07

Возвращаясь к SAR, стоит отметить, что удельная поглощенная мощность усредняется по времени за характерный интервал «времени усреднения», который в разных стандартах варьируется от 6 до 30 мин [2]. На сегодняшний день наиболее громко звучащие рекомендации по этому вопросу поступают, в основном, с двух сторон. Со стороны исследователей, не до конца уверенных в пагубности воздействия мобильного телефона, но проявляющих осторожность, можно часто услышать: «Чем меньше, тем лучше». Но есть сторона совсем другая, предоставляющая услуги мобильной связи, которая открыто заявляет: «Чем больше, тем дешевле». Практически установленных четких норм на сегодняшний день не существует. Но именно время играет немаловажную роль при оценке возможного негативного воздействия на организм человека.

В настоящее время акценты многих исследований в данном направлении сместились с, так называемого, «теплого» на «нетеплое» воздействие, оказываемое мобильными телефонами. Степень изученности проблемы считается вполне достаточной, чтобы обсуждать введение параметра, который не учитывает время, в течение которого осуществлялось воздействие. Но совершенно понятно, что степень воздействия со временем усугубляется, и именно температурные изменения в этом случае выступают неким маркером, который показывает динамику этого воздействия. Использование мобильного телефона в течение нескольких минут или в течение часа априори предполагает разные последствия для биологического организма.

Целый ряд исследований подчеркивает очень интересную особенность, связанную с ЭМИ мобильного телефона. Время прямого воздействия излучения телефона и время прямого отклика организма на оказанное воздействие не совпадают. После завершения сеанса связи в организме еще некоторое время фиксируются изменения, которые были спровоцированы излучением телефона [6]. К этой группе можно отнести и температурные изменения. Зафиксированный нагрев области барабанной перепонки на момент завершения разговора по истечении 5 минут претерпел незначительные изменения. Отводу тепла в этот момент ничего не мешало, слуховой проход был свободен, терморегуляторные механизмы, компенсирующие локальное увеличение температуры, согласованно работали, так как исследования проводились на условно здоровых людях, однако, произошедшее уменьшение температуры составило всего 0,38 °С. На графике (рисунок 3) представлены усредненные значения температуры области барабанной перепонки, полученные до сеанса связи, сразу после его завершения и через 5 мин после его завершения. До начала опытов проведенное измерение исходной температуры показало, что средняя температура для 10 испытуемых составила $36,52 \pm 0,08$ °С, после завершения сеанса связи – $39,08 \pm 0,26$ °С.

Отмеченная динамика очень плохо вписывается в существующие модели и ещё раз подчеркивает необходимость введения четких ограничений как на время разговора по мобильному телефону, так и на время между такими разговорами. Потенциально человек, отвечающий на телефонные звонки, с периодичностью в указанные 5 мин, подвергает себя более серьезному воздействию, так как в организме остается еще не скомпенсированной реакция на предыдущее воздействие, а на него уже оказывается следующее.

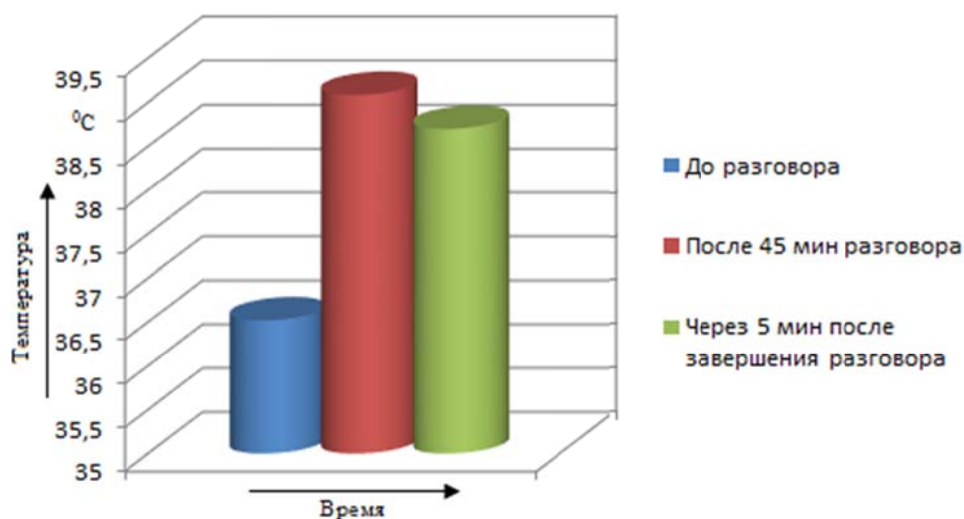


Рисунок 3 – Среднее значение температуры барабанной перепонки до, во время и через 5 минут после использования мобильного телефона

Получаемое таким образом последствие в любом случае крайне неблагоприятно для биологического организма. И в этом случае именно степень нагрева барабанной перепонки опять же может служить индикатором компенсации предыдущего воздействия, так как именно тепловое воздействие достаточно явно проявляется в процессе использования мобильных телефонов.

Заключение

Из-за непосредственной связи уха с гипоталамусом, можно сказать, что при нагреве уха, в гипоталамусе также повышается температура. Гипоталамус, в свою очередь, является регулятором температуры внутренней среды организма, отвечает за эмоции, регуляцию гормонов, поддержание постоянства состава крови, поведенческие реакции. Изменение температуры в гипоталамусе сказывается на его работе, это означает, что огромное количество процессов, происходящих в организме, подвергается неблагоприятным изменениям.

1 В соответствии с имеющейся информацией опытным путем было доказано, что в процессе жизнедеятельности температура тканей мозга может повышаться на 1 °C без видимых последствий [7], а повышение на большую величину может привести к необратимым изменениям в структуре головного мозга. Однако полученные в результате проведенных экспериментов значения температурного нагрева барабанной перепонки составили $2,52 \pm 0,2$ °C, что больше значения, считающегося безопасным для биологического организма.

2 Проведенные исследования показали необходимость более глубокого изучения принципов нормирования существующих параметров электромагнитного излучения мобильного телефона. Получающий все большее распространение показатель SAR устанавливает нормы удельной поглощенной мощности ЭМИ, которые предполагают отсутствие нагрева тканей даже при длительном использовании мобильного телефона. По крайней мере, нагрев в 0,3 °C не определяется человеком без специального оборудования. Практически полученные результаты показали наличие большего нагрева, что хорошо стыкуется с ощущениями большинства абонентов сотовой связи, отмечающих неизменный нагрев области уха во время разговора по мобильному телефону, и доказывает необходимость уточнения существующих норм.

3 Не менее сложным, с точки зрения существующих подходов, является и учет времени использования мобильного телефона. Представленные результаты показывают непрекращающийся рост температуры барабанной перепонки в течение всего времени использования телефона, что четко указывает на нарастающий характер воздействия на биологический организм со стороны мобильного телефона. Фактор времени в этом случае

определяет степень этого воздействия, но этот фактор не учитывается существующими параметрами ЭМИ.

На сегодняшний день четких рекомендаций по этому поводу нет, хотя все чаще подобная информация поступает для широкого обсуждения [2]. Тем не менее общей тенденцией является перевод сотового телефона из категории средства связи в категорию, так называемого, домашнего телефона, использование которого предполагает длительные разговоры, тем более и компании, предоставляющие услуги сотовой связи, всячески поощряют увеличение длительности разговоров по мобильному телефону. Соответственно введение ограничительных временных норм на длительность разговора, а также на минимальный интервал между последующими разговорами, является достаточно актуальной задачей.

4 Однако, наверное, ещё более актуальной задачей является необходимость более широкого оповещения общественности о результатах исследования влияния электромагнитного излучения мобильного телефона на организм человека. Большинство результатов обсуждаются только в узких кругах, заинтересованных в решении именно научной проблемы. Даже такое знаковое событие как призыв ученых по защите от воздействия неионизирующего электромагнитного излучения [8], не был доведен до основной массы населения и не прозвучал ни в одном средстве массовой информации. Однако в эксперименте, который сейчас проводится, задействованы миллиарды людей, и большинство из них о потенциальной опасности использования мобильных телефонов имеют крайне скудную информацию. Введение различных рекомендаций и ограничений будет иметь смысл только в том случае, если они будут реализованы, а на сегодняшний момент большая часть широкого круга потребителей воспринимает мобильный телефон как безопасный.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 СанПиН 2.1.8/2.3.4.1190–03. Гигиенические требования к размещению и эксплуатации средств сухопутной подвижной радиосвязи: утв. глав. гос. санитарным врачом Российской Федерации 19 фев. 2003 г. [Электронный ресурс] // Гарант: инф.-правовой портал. – Режим доступа: <http://ivo.garant.ru/document?id=12076387&byPara=1&sub=174>.

2 Доклад Российского национального комитета по защите от неионизирующих излучений «Санитарно-гигиеническая оценка сотовых телефонов в России: Современные проблемы и пути их решения». – Москва, 2001 г.

3 Radiation and nuclear reviews. Radio waves and our environment. – RadiationandNuclearSafetyAuthority, 2009.

4 Бондарева, Л.А., Березина, А.А. Исследование изменения температуры в области наружного уха во время разговора по мобильному телефону // Л.А. Бондарева, А.А. Березина. – Биомедицинская радилэлектроника. – 2018. – № 3. – С. 4–11.

5 Бондарева, Л.А., Золкина, Е.П. Оценка теплового воздействия электромагнитного излучения мобильного телефона на головной мозг // Л.А. Бондарева, А.А. Березина. – Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – № 2 (322). – 2017. – С. 145–150.

6 Григорьев Ю.Г., Григорьев О.А. Сотовая связь и здоровье. Электромагнитная обстановка. Радиобиологические и гигиенические проблемы. Прогноз опасности: 2-е изд. – М.: Экономика, 2015. – 574 с.

7 IEEEStdC95.1–2005. IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz. – Approved 3 October 2005.

8 International Appeal «Scientists call for Protection from Non-ionizing Electromagnetic Field Exposure» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.emfscientist.org/index.php/emf-scientist-appeal>.

Бондарева Людмила Александровна
ФГБОУ ВО «Орловский государственный
университет имени И.С. Тургенева», г. Орел
Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Приборостроение, метрология и сертификация»
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Телефон: +7 (4862) 41–98–76.
E-mail: 270174@mail.ru

L.A. BONDAREVA

STUDY OF TEMPERATURE EFFECTS OF MOBILE PHONE RADIATION ON THE HUMAN BODY ON CHANGE THE TEMPERATURE AT THE EARDRUM

Abstract. *The article provides a justification for the possibility of assessing the thermal effect of a mobile phone on the human brain by measuring the temperature of the eardrum. Presented the results of experimental studies that showed an increase in the temperature of the eardrum by more than 2.5 °C in the process of talking on a mobile phone, as well as recommendations for changing existing hygiene standards.*

Keywords: *electromagnetic radiation, mobile phone, SAR, temperature, heat structures of the brain, the eardrum.*

BIBLIOGRAPHY

- 1 SanPiN 2.1.8/2.3.4.1190–03. Gigienicheskie trebovaniya k razmeshcheniyu i ehkspluatacii sredstv suhoputnoj podvizhnoj radiosvyazi: utv. glav. gos. sanitarnym vrachom Rossijskoj Federacii 19 fev. 2003 g. [EHlektronnyj resurs] // Garant: inf.-pravovoj portal. – Rezhim dostupa: <http://ivo.garant.ru/document?id=12076387&byPara=1&sub=174>.
- 2 Doklad Rossijskogo nacionalnogo komiteta po zashchite ot neioniziruyushchih izluchenij «Sanitarno–gigienicheskaya ocenka sotovyh telefonov v Rossii: Sovremennye problemy i puti ih resheniya». – Moskva, 2001 g.
- 3 Radiation and nuclear reviews. Radio waves and our environment. – Radiation and Nuclear Safety Authority, 2009.
- 4 Bondareva, L.A., Berezina, A.A. Issledovanie izmeneniya temperatury v oblasti naruzhnogo uha vo vremya razgovora po mobilnomu telefonu // L.A. Bondareva, A.A. Berezina. – Biomedicinskaya radielektronika. – 2018. – № 3. – S. 4–11.
- 5 Bondareva, L.A., Zolkina, E.P. Ocenka teplovogo vozdejstviya ehlektromagnitnogo izlucheniya mobilnogo telefona na golovnoj mozg // L.A. Bondareva, A.A. Berezina. – Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii. – № 2 (322). – 2017. – S. 145–150.
- 6 Grigorev YU.G., Grigorev O.A. Sotovaya svyaz i zdorove. EHlektromagnitnaya obstanovka. Radiobiologicheskie i gigienicheskie problemy. Prognoz opasnosti: 2–e izd. – M.: EHkonomika, 2015. – 574 s.7 IEEEStdC95.1–2005. IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz. – Approved 3 October 2005.
- 8 International Appeal «Scientists call for Protection from Non–ionizing Electromagnetic Field Exposure» [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.emfscientist.org/index.php/emf-scientist-appeal>.

Bondareva Lyudmila Alexandrovna

Oryol State University named after I.S. Turgenev, Oryol
PhD. (Tech. Sciences), Associate Professor of the
Department «Instrumentation, metrology and
certification»,
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
Phone: +7 (4862) 41–98–76.
E-mail: 270174@mail.ru.

УДК 531.74.082.4

А.И. НЕЗНАНОВ, В.Н. ЕСИПОВ

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ МАЯТНИКОВОГО ЭЛЕМЕНТА ДАТЧИКА УРОВНЯ ЖЕЛЕЗНОДРОЖНОГО ПУТИ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ВЛИЯНИЕМ ЖИДКОСТИ

Аннотация. *Получены математические модели, позволяющие на основе результатов измерений параметров свободных колебаний маятниковой пластины в жидкости определить присоединенный момент инерции жидкости, движущейся с маятником, и коэффициент демпфирования маятника гидроакустического датчика уровня железнодорожного пути, в котором маятниковая пластина полностью погружена в однородную вязкую жидкость; приведены результаты экспериментальных исследований*

Ключевые слова: датчик, маятник, свободные колебания маятника, присоединенный момент инерции жидкости, коэффициент демпфирования маятника.

Введение

Техническое состояние железнодорожного пути влияет на безопасность и бесперебойность движения составов, а также определяет динамические нагрузки, действующие на их ходовые части. Для поддержания его в надлежащем состоянии необходимо осуществлять его систематический контроль и ремонт, который осуществляется посредством путевых машин, которые оснащены автоматической системой выправки пути. Важным элементом такой системы выправки является датчик неровности пути, который в динамическом режиме вырабатывает сигнал, пропорциональный относительному расхождению уровней рельс в поперечном профиле.

В результате анализа условий эксплуатации таких датчиков установлено, что полезный сигнал, пропорциональный расхождению уровней рельс, является низкочастотным и, как правило, не превышает по частоте 0,5 Гц. В целях повышения производительности путевых машин стоит задача увеличения частотного диапазона до 1 Гц. Также датчик подвергается воздействиям вибрации, вызванной рабочими органами путевой машины.

В настоящее время базовым прибором, которым комплектуются выправочно-подбивные машины является прибор ELT 133.00 фирмы «Plasser&Theurer» (Австрия). К основным недостаткам указанного прибора относятся большие габариты (350x145x415 мм) и масса (30 кг), а также значительные погрешность АЧХ, составляющая 25 %, и фазовое запаздывание, составляющее 45°, на рабочей частоте 0,5 Гц. В Тульском государственном университете были разработаны средства измерения, реализующие принцип построения указанного прибора на отечественной элементной базе. При этом их характеристики аналогичны характеристикам австрийского прибора [1].

Одним из возможных путей улучшения технических характеристик датчиков уровня железнодорожного пути является использование механического маятника, в виде пластины со смещенным центром масс, помещенного в полость, полностью заполненную жидкостью. Съём информации о неровности пути, которая соответствует угловому рассогласованию между маятником и корпусом, может быть решен посредством ультразвуковых методов измерений [2].

В результате проведенных исследований разработаны принципы построения гидроакустических датчиков контроля уровня железнодорожного пути с механическим маятниковым чувствительным элементом, полностью погруженным в однородную жидкость, обладающую значительной вязкостью, разработаны и изготовлены их опытные образцы и проведены соответствующие экспериментальные исследования, которые показывают

перспективность данного направления [3, 4]. Для практического применения указанных датчиков необходимо иметь методику их проектирования, основанную на математических выражениях, описывающих работу его акустической и механической подсистем. Математическая модель работы акустической подсистемы датчика получена в работе [3], модель механической – в работе [4]. Однако в работе [4] не определены значения для присоединенного момента инерции жидкости и коэффициента демпфирования для маятникового чувствительного элемента датчика, полностью погруженного в жидкость.

Как показывает анализ литературных источников [5, 6] значения этих параметров зависят от различных факторов: геометрических размеров маятниковой пластины, вязкости и плотности жидкости, окружающей маятник, размера полости, в которой установлен маятник, амплитуды и частоты колебаний маятника. Следовательно, теоретическое определение этих параметров присоединенной жидкости является весьма сложной задачей. Рассмотрим основы методики экспериментального определения указанных параметров.

Основная часть

В результате исследований динамических характеристик датчика получено уравнение движения маятникового элемента, выполненного в виде пластины со смещенным центром масс, погруженного в цилиндрическую камеру, полностью заполненную однородной жидкостью, в условиях одновременного воздействия полезного сигнала и вибрации на датчик [4]:

$$\begin{aligned} (md^2 + J)\ddot{\varphi} + b\dot{\varphi} + md(g - L\dot{\gamma}^2 + \ddot{y}_B + x_B\ddot{\gamma} + 2\dot{x}_B\dot{\gamma} - y_B\dot{\gamma}^2)\varphi + K\varphi = \\ = md((L - d)\ddot{\gamma} - g\gamma - \ddot{x}_B + y_B\ddot{\gamma} + 2\dot{y}_B\dot{\gamma} + x_B\dot{\gamma}^2) - K\gamma. \end{aligned} \quad (1)$$

где m – масса маятникового чувствительного элемента;
 d – смещение центра масс маятника относительно оси подвеса;
 J – присоединенный момент инерции жидкости;
 φ – угол отклонения маятника от вертикали;
 b – абсолютный коэффициент демпфирования маятникового элемента;
 g – ускорение свободного падения;
 L – расстояние оси подвеса маятника относительно базовой площадки, совершающей угловые колебания;
 $\gamma = \gamma_0 \sin(\omega t)$ – угол наклона площадки, на которую установлен прибор;
 γ_0 – амплитуда колебаний базовой площадки;
 ω – частота колебаний базовой площадки;
 x_B – виброперемещение по оси Ox , перпендикулярной оси подвеса маятника;
 y_B – виброперемещение по оси Oy , перпендикулярной оси подвеса маятника;
 K – жесткость торсиона, на котором подвешен маятниковый элемент.

На основании уравнения (1) получены выражения для коэффициента динамичности и фазового запаздывания датчика:

$$V = \frac{1 + \frac{md(L-d)}{md^2 + J}\eta^2}{\sqrt{\left[1 - \eta^2 \left(1 + \frac{mdL}{2(md^2 + J)}\gamma_0^2\right)\right]^2 + 4\xi^2\eta^2}}, \quad (2)$$

$$\psi = -\arctg \left(\frac{2\xi\eta}{1 - \eta^2 \left[1 + \frac{mdL}{2(md^2 + J)} \gamma_0^2 \right]} \right), \quad (3)$$

где $\eta = \omega/\omega_0$ – относительная безразмерная частота;

ω_0 – собственная частота колебаний маятника в жидкости;

$\xi = \frac{b}{2(md^2 + J)\omega_0}$ – относительный коэффициент демпфирования;

γ_0 – амплитуда угловых колебаний основания, на котором установлен датчик.

Уравнение свободных колебаний маятниковой пластины, помещенной в условия, обеспечиваемые конструкцией экспериментальной установки, аналогичные условиям, в которых находится маятниковый элемент в исследуемом датчике, имеет вид:

$$(md^2 + J)\ddot{\varphi} + b\dot{\varphi} + (mgd + K)\varphi = 0. \quad (4)$$

Введем следующие обозначения:

$\omega_0^V = \left[(mgd + K)/md^2 \right]^{1/2}$ – собственная частота недемпфированных колебаний пластины в вакууме (близка к частоте в воздухе); $\omega_0 = \left[(mgd + K)/(md^2 + J) \right]^{1/2}$ – собственная частота

колебаний пластины в маловязкой жидкости с плотностью, близкой к плотности рабочей жидкости в камере датчика; $T = 1/\omega_0$ – постоянная времени колебаний пластины в маловязкой жидкости; $\omega_d = \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2}$ – собственная частота демпфированных колебаний пластины в жидкости с плотностью и вязкостью, близкими к рабочей жидкости в камере датчика; $\tau_d = 2\pi/\omega_d$ – период собственных колебаний пластины в демпфирующей жидкости.

Решением уравнения (4) является функция (рисунок 1):

$$\varphi(t) = \varphi_0 \cdot e^{-\xi \frac{t}{T}} \cos(\omega_d t), \quad (5)$$

где φ_0 – отклонение маятника от положения равновесия в начальный момент времени.

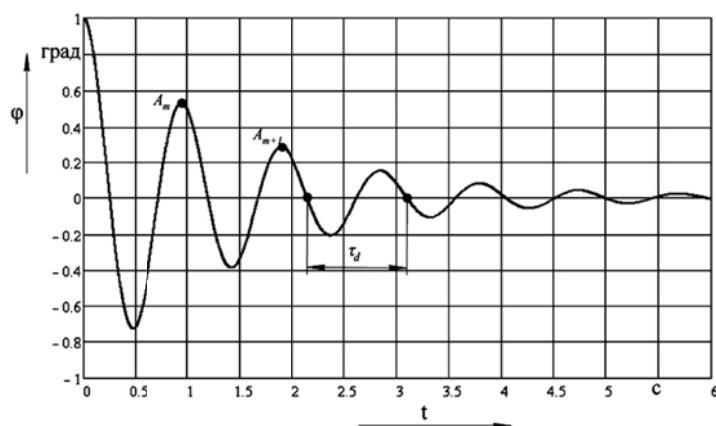


Рисунок 1 – График свободных колебаний маятника

Временная диаграмма свободных колебаний пластины в соответствии с выражением (5) представлена на рисунке 1. Такие диаграммы могут быть получены экспериментально для различных сред: воздуха, жидкости с малой вязкостью, жидкости с параметрами, близкими к параметрам рабочей жидкости. Из рисунка 2 следует, что исходными данными, непосредственно получаемыми при анализе графика свободных колебаний маятника, являются: частота ω_d и период τ_d собственных демпфированных колебаний маятниковой пластины, а также значения двух соседних максимумов A_m и A_{m+1} . Для определения собственной частоты колебаний маятника ω_0 и зависящих от нее параметров присоединенной жидкости J и b необходимо найти относительный коэффициент демпфирования ξ .

Из выражения (5) следует, что если $A_m = \varphi_0 \cdot e^{-\xi \frac{\tau_0}{T}}$, то $A_{m+1} = \varphi_0 \cdot e^{-\xi \frac{\tau_0 + \tau_d}{T}}$. Следовательно, численное значение относительного коэффициента демпфирования может быть найдено из уравнения:

$$\ln\left(\frac{A_m}{A_{m+1}}\right) = 2\pi \cdot \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}. \quad (6)$$

При известных значениях ξ и $\omega_d = 2\pi/\tau_d$ собственная частота колебаний маятниковой пластины в жидкости может быть найдена по формуле:

$$\omega_0 = \frac{\omega_d}{\sqrt{1-\xi^2}}. \quad (7)$$

С учетом ранее введенных обозначений выражение для расчета присоединенного момента инерции жидкости имеет вид:

$$J = md^2 \left[\left(\frac{\omega_0^V}{\omega_0} \right)^2 - 1 \right]. \quad (8)$$

Отметим, что значение частоты свободных колебаний маятниковой пластины в воздухе ω_0^V находится экспериментально из аналогичной временной диаграммы колебаний пластины в воздухе.

Исследования проводились для практически интересного опытного образца датчика размером 120х64х64 мм (масса 1 кг) с цилиндрической камерой диаметром 30 мм, которая заполнялась различными жидкостями: трансформаторным маслом, моторным маслом и касторовым маслом (при температуре 25 °С). Маятниковая пластина имела геометрические размеры 40х23х1 мм, масса груза составляла $m=14$ г, смещение центра масс составляет $d=8$ мм. Присоединенные моменты инерции жидкости для указанной маятниковой пластины были определены экспериментально и составили соответственно $5,25 \cdot 10^{-7}$ кг·м², $8,05 \cdot 10^{-7}$ кг·м² и $8,8 \cdot 10^{-7}$ кг·м² для трансформаторного, моторного и касторового масел. Экспериментальные значения относительного коэффициента демпфирования ξ для указанных масел соответственно равны: 0,063, 0,291, 0,543.

Теоретические и экспериментальные зависимости коэффициента динамичности и фазового запаздывания датчика для описанных выше вариантов заполнения датчика (высота выставки датчика относительно колеблющейся площадки составляла $L=12,5$ см), представлены на рисунке 2.

Анализ приведенных на рисунке 2 теоретических и экспериментальных зависимостей позволяет сделать вывод о достаточной точности нахождения значений присоединенного

момента инерции и значений коэффициента демпфирования маятниковой пластины для жидкостей с различной вязкостью. Максимальное отклонение теоретических и экспериментальных значений не превышает 5 % от соответствующих значений, как по амплитуде, так и по фазе.

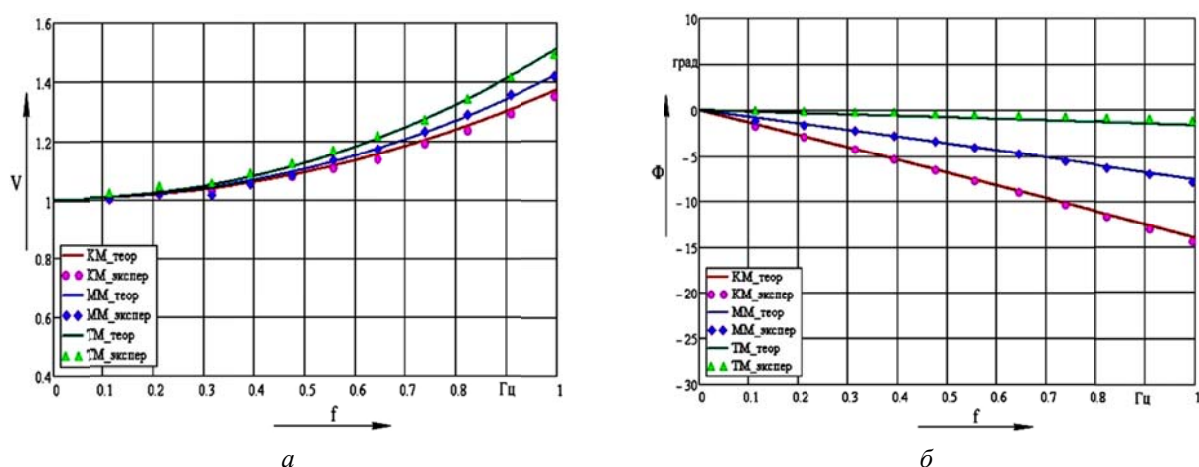


Рисунок 2 – Теоретические и экспериментальные АЧХ (а) и ФЧХ (б) датчика для различных жидкостей в акустической камере:

ТМ – трансформаторное масло; ММ – моторное масло (SAE 20W–50); КМ – касторовое масло

Заключение

Рассмотренная методика позволяет экспериментально определить значения присоединенного момента инерции жидкости и коэффициента демпфирования маятниковой пластины, полностью погруженной в жидкость, на основе анализа собственных колебаний маятниковой пластины в ней. Сопоставление экспериментальных АЧХ и ФЧХ датчика и теоретических зависимостей, полученных с применением указанной методики, показывает, что, представленная методика позволяет получить достаточно адекватные значения присоединенного момента инерции и коэффициента демпфирования маятниковой пластины. Приведенная методика может быть применена для исследования влияния геометрии маятникового чувствительного элемента, а также вязкости и плотности вязкости на динамические характеристики датчиков уровня железнодорожного пути с маятниковым элементом, полностью погруженным в жидкость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распопов, В.Я. Датчики уровня систем управления железнодорожных машин. – Тула: ТулГУ, 2000.
2. Незнанов, А.И. Гидроакустические средства измерения негоризонтальности железнодорожного пути / В.Н. Есипов, А.И. Незнанов, А.А. Рыбин // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2010. – №6. – С. 60–66.
3. Незнанов, А.И. Статические характеристики гидроакустических маятниковых датчиков контроля уровня железнодорожного пути с амплитудным методом съема информации / А.И. Незнанов, В.Н. Есипов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2013. – №2(298). – С. 118–123.
4. Незнанов, А.И. Динамические характеристики гидроакустического датчика неровности железнодорожного пути с маятниковым механическим чувствительным элементом / А.И. Незнанов, В.Н. Есипов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2015. – №3(311). – С. 112–116.
5. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1970.
6. Короткин, А.И. Присоединенные массы судна: Справочник. – Л.: Судостроение, 1986.

Незнанов Александр Иванович

ФГБОУ ВО Орловский государственный университет
имени И.С. Тургенева

Старший преподаватель кафедры «Приборостроение,
метрология и сертификация»

302020, Орел, Наугорское шоссе, 29

Тел. 8(960)656-62-62

E-mail: orelkir18@gmail.com

Есипов Виталий Николаевич

К.т.н., доцент

Тел. 8(960)656-62-62

A.I. NEZNANOV, V.N. ESIPOV

METHOD OF DETERMINING THE PARAMETERS OF MOVEMENT PENDULUM ELEMENT OF THE SENSOR OF THE RAILWAY-LEVEL SENSOR DEFINED BY THE INFLUENCE OF THE LIQUID

Abstract. *Mathematical models allowing to determine the attached moment of inertia of a fluid moving with a pendulum and the coefficient of damping of the pendulum of a hydroacoustic level gauge of the railroad track in which the pendulum plate is completely immersed in a homogeneous viscous fluid is derived from the results of measurements of the parameters of free oscillations of the pendulum plate in the liquid; the results of experimental researches are presented.*

Keywords: *sensor, pendulum, fluid, ultrasound, metrological performance, mathematical model.*

BIBLIOGRAPHY

1. Raspopov, V.Ya. Datchiki urovnja sistem upravleniya zheleznodorojnyh mashin. – Tula: TulGU, 2000.
2. Neznanov, A.I. Gidroakusticheskie sredstva izmereniya negorizontálnosti zheleznodorojnogo puti / V.N. Yesipov, A.I. Neznanov, A.A. Rybin // Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2010. – №6. – S. 60–66.
3. Neznanov, A.I. Sticheskie harakteristiki gidroakusticheskikh majatnikovyx datchikov kontrolya urovnja zheleznodorojnogo puti s amplitudnym metodom sjoma informacii / A.I. Neznanov, V.N. Yesipov // Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2013. – №2(298). – S. 118–123.
4. Neznanov, A.I. Dinamicheskie harakteristiki gidroakusticheskogo datchika nerovnosti zheleznodorojnogo puti s majatnikovym mehanicheskim chuvstvitelnym elementom / A.I. Neznanov, V.N. Yesipov // Fundamentalnye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii. – 2015. – №3(311). – S. 112–116.
5. Loytsyanskiy, L.G. Mehanica zhidkosti i gaza. – M.: Nauka, 1970.
6. Korotkin, A.I. Prisoedinennyye massy sudna: Spravochnik. – L.: Sudostroeniye, 1986

Neznanov Alexander Ivanovich

I.S. Turgenev Orel State University

Senior teacher, Department of “Instruments, metrology
and certification”

302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29

Ph. 8(960)656-62-62

E-mail: orelkir18@gmail.com

Esipov Vitaliy Nikolaevich

Cand. Tech Sci., Ass. Professor

Ph. 8(960)656-62-62

УДК: 620.179.1:658.58

А.В. СЕЛИХОВ, В.В. МИШИН, К.В. ПОДМАСТЕРЬЕВ, С.И. ТИХОВ

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТРИБОУЗЛА

Аннотация: данная статья посвящена описанию принципов работы информационной системы по распознаванию технического состояния трибоузлов на основе электрорезистивного метода трибодиагностики. Включает в себя описание основных положений метода и конструктивных особенностей системы.

Ключевые слова: электрогенератор, автомобиль, электрорезистивный, подшипник.

Введение

Современное машиностроение широко использует трибоузлы, представленные подшипниковыми соединениями различных типов. Для обеспечения надежности механизмов необходимо проводить диагностирование с целью выявления наличия дефектов с целью определения технического состояния объекта. Выявление причин, вызвавших эти дефекты позволит снизить вероятность их появления в будущем.

Наибольшее распространение, среди методов трибодиагностики, получили методы вибродиагностики [1]. Однако данный метод обладает рядом недостатков, среди которых малое быстродействие и малая информативность. Более перспективным является электрорезистивный метод трибодиагностики [2 – 4]. Данный метод позволяет выявить большое количество дефектов трибоузла. Недостатком метода является избыточность информационного сигнала, что создает трудности по разделению диагностической информации от того или иного дефекта [5]. Внедрение интеллектуальных систем на основе алгоритмического обучения сигналов позволит повысить эффективность электрорезистивного метода трибодиагностики.

Задачей проведенной работы является разработка математической модели системы распознавания технического состояния на основе алгоритмического обучения посредством оценки характеристик смазочного слоя электрическим методом.

Физический принцип метода диагностирования

Основной составляющей электрического сопротивления трибоузла является смазочный слой. В случае наличия дефектов происходит изменение его толщины, что влияет на изменение электрического сопротивления. Для однорядного подшипника качения справедливы следующие соотношения [5]:

$$\begin{cases} R_T = R_{CT} = \rho \cdot \sqrt{\pi} / (2 \cdot \sqrt{z \cdot A_r}); 0 < \lambda < 1 - \text{граничная смазка;} \\ R_T = \frac{\rho_{CM}}{\rho} \cdot \frac{h_0}{r_k} \cdot \frac{A_r}{A_c - A_r} \cdot R_{CT}; 1 \leq \lambda < 3 - \text{полужидкостная смазка;} \\ R_T = \rho_{CM} \cdot h / S_h; 3 \leq \lambda - \text{гидростатическая смазка.} \end{cases} \quad (1)$$

где R_{CT} – сопротивление стягивания;

ρ – удельное электрическое сопротивление металла;

z – число вероятных пятен контакта;

A_r – фактическая площадь контакта;

ρ_{CM} – удельное электрическое сопротивление смазочной плёнки;

h_0 – толщина смазочной плёнки;

r_k – радиус пятна контакта;

A_c – контурная площадь контакта;

λ – параметр смазочной пленки.

В основе суждения техническом состоянии лежит анализ режима трения, который определяется на основании параметра смазочной пленки [5]:

$$\lambda = \frac{h_0}{\sqrt{Ra_1^2 + Ra_2^2}}; \begin{cases} 0 < \lambda < 1 - \text{границная смазка;} \\ 1 \leq \lambda < 3 - \text{полужидкостная смазка;} \\ 3 \leq \lambda - \text{гидростатическая смазка.} \end{cases} \quad (2)$$

где h_0 – толщина смазочного слоя;

Ra_1, Ra_2 – среднее арифметическое значение шероховатости контактирующих поверхностей.

Сигнал электрического сопротивления является периодическим вследствие повторяющихся механических процессов: вращение коле подшипника, тел качения, сепаратора. На рисунке 1 представлено распределение нагрузки по телам качения для подшипника 1000900.

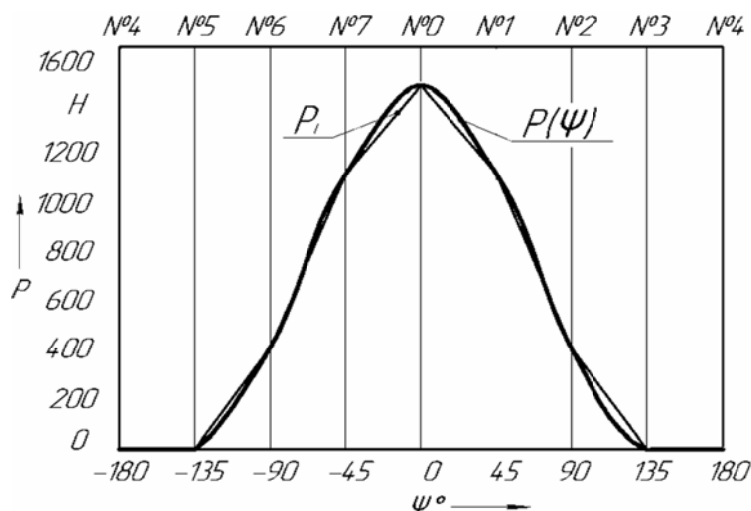


Рисунок 1 – Распределение нагрузки по телам качения

Максимальное давление в контакте [5]:

$$p_0 = \frac{1,5}{\pi \cdot n_a \cdot n_b} \cdot \sqrt[3]{\left[E \cdot \sum \rho / 3 \cdot (1 - \eta^2) \right]^2 \cdot F_r}, \quad (3)$$

где n_a, n_b – табличные коэффициенты, зависящие от кривизн соприкасающихся тел;

$\sum \rho = 2 \cdot (R_1 + R_2)$ – сумма главных кривизн соприкасающихся тел в точке касания;

F_r – нормальная нагрузка;

E – модуль упругости;

η – коэффициент Пуассона.

Толщина смазочной пленки [5]:

$$h_0 = \left(1,82 - 0,68 \cdot \frac{R_{2m}}{R_{1m}} \right) \cdot (\mu_0 \cdot n_V \cdot V)^{0,75} \cdot \left(\frac{E \cdot R_{2m}}{p_0} \right)^{0,25}, \quad (4)$$

где R_{1m}, R_{2m} – коэффициенты, определяемые кривизной контактирующих поверхностей;

μ_0, n_V – соответственно, динамическая вязкость и пьезокоэффициент вязкости смазочного материала;

V – скорость относительного перемещения контактирующих поверхностей;

p_0 – максимальное давление в контакте.

Случайная составляющая обусловлена наличием шероховатости контактирующих поверхностей и различных дефектов. Так же на сигнал электрического сопротивления

влияют помехи, вызванные внешним электромагнитным полем и протеканием термо- и трибозлектрических процессов в зоне трения.

Сущность метода диагностирования

Анализируя преимущества и недостатки систем алгоритмического обучения для построения диагностической модели в качестве эвристического алгоритма был выбран алгоритм на основе деревьев решений [6]. Данный алгоритм основан на поиске конъюнктивных закономерностей. Диагностическая модель строится с помощью алгоритма обучения RDF с использованием экспериментальной выборки данных.

В качестве входных данных должны служить сигналы, полученные с подшипника, у которого присутствует определенный вид дефекта [7, 8]:

- проблема монтажа подшипников (перекос, неправильный натяг);
- проблема смазки (загрязнение, недостаточное количество смазочного материала, работа в режиме гидростатической, граничной, гидростатической смазки);
- проблема износа (износ тел качения и контактирующих поверхностей);
- критические дефекты (раковины, сколы).

На основе полученных сигналов формируется вектор признаков, соответствующий дефекту, с его помощью корректируются параметры диагностической модели по критерию минимума ошибки. Значение среднеквадратической ошибки для j итерации вычисляется:

$$Q_j = \frac{1}{c} \cdot \sum_{i=1}^c \sqrt{\left(mp_j(X_j^i) - Y_i \right)^2}, \quad (3)$$

где mp – диагностическая модель;
 X – обучающая подвыборка;
 Y – подвыборка диагностической модели.
 Среднее арифметическое значений ошибки:

$$Q = \frac{1}{L} \cdot \sum_{i=1}^L Q_i, \quad (4)$$

где Q – среднеквадратическая ошибка диагностической модели.
 Доверительный интервал полученной ошибки будет определяться в диапазоне $[Q_{\min}, Q_{\max}]$. В случае неудовлетворительной точности проводится корректировка параметров модели.

Структура программного обеспечения будет иметь вид, представленный на рисунке 2.

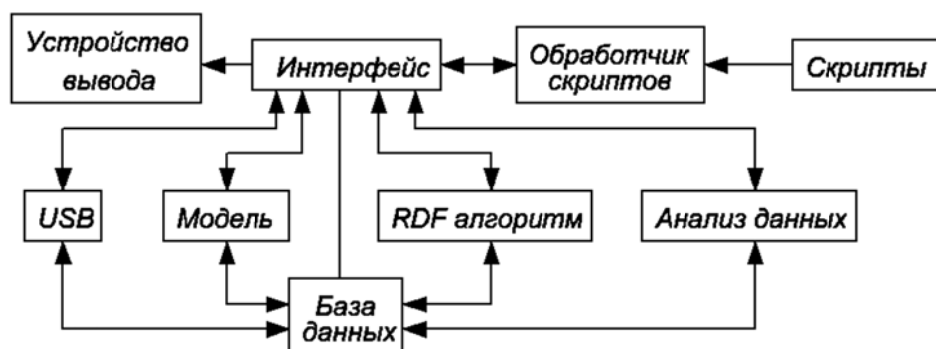


Рисунок 2 – Структура программы

Модуль интерфейса является связующим звеном, объединяющим и контролирующим остальные модули. Через USB интерфейс происходит получение данных с измерительного оборудования, которые хранятся в базе данных и используются для обучения диагностической модели через RDF алгоритм. Модуль анализа данных выполняет оценку достоверности полученного результата и расчет вспомогательных данных. Скрипты нужны для внесения изменения в ход работы программы через обработчики скриптов.

Экспериментальные исследования

Для проверки степени соответствия результатов математического моделирования экспериментальным данным были проведены экспериментальные исследования.

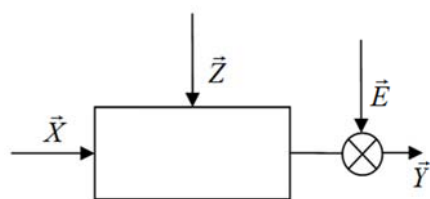


Рисунок 5 – Схема модели при построении экспериментальной факторной модели

Подшипники подвергаются воздействию с целью формирования одного из диагностируемых дефектов, регистрируется диагностический сигнал, который используется для алгоритмического обучения и определяется к какому виду дефектов относится полученный сигнал. В случае неудовлетворительного результата корректируется диагностическая модель, поэтому модель можно рассматривать как экспериментальную многофакторную.

Рассматриваемый подшипник качения представляет собой черный ящик с набором переменных (рисунок 3).

$\vec{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ – набор входных переменных, контролируемые и управляемые, в условиях эксперимента к ним относятся: частота вращения вала, типоразмер подшипника качения, радиальная нагрузка, тип смазочного материала, объем смазочного материала, дефекты (проблема монтажа подшипников, критические дефекты) [9].

$\vec{Z} = (z_1, z_2, \dots, z_m)$ – набор контролируемых, но не управляемых переменных. Режим трения является производной величиной множества факторов, в частности от шероховатости поверхностей, и может быть определен по результатам измерений. Износ тел качения так же определяется по результатам эксперимента. Нарастание температуры в зоне трения приводит к изменению физико–химических свойств смазочного материала.

$\vec{E} = (e_1, e_2, \dots, e_l)$ – набор переменных, являющихся неконтролируемыми и неуправляемыми: внешние и внутренние помехи, трибо– и термо–ЭДС, эрозия вследствие элеткрических процессов, кавитационная эрозия, мостиковый и дуговой перенос материала, микроконтакты, диффузия, рекристаллизация, микросварка, и т.д [10].

$\vec{Y}$ – вектор зависимых переменных.

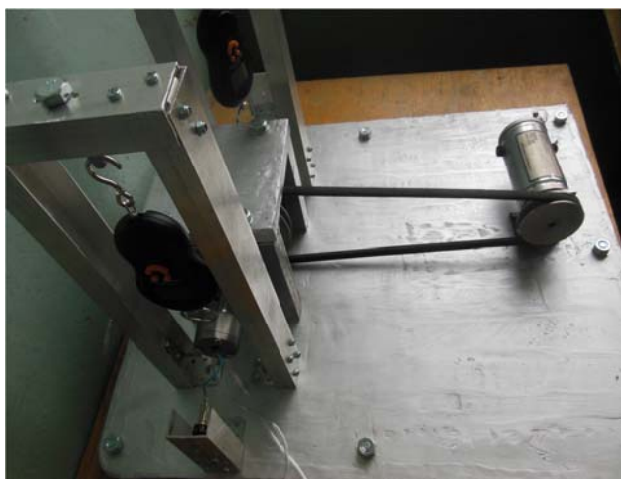


Рисунок 4 – Внешний вид установки

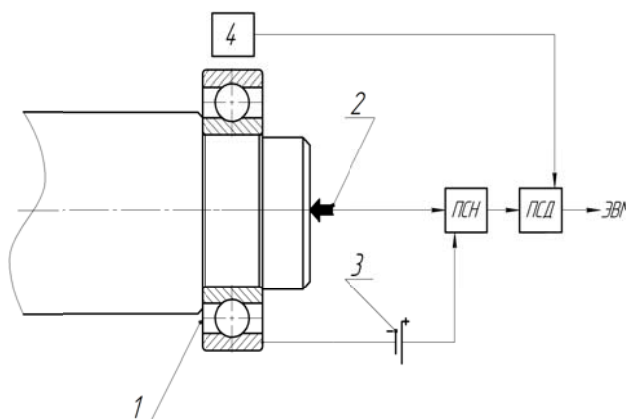


Рисунок 5 – Структурная схема

1 – подшипник, 2 – токосъемник, 3 – источник питания, 4 – датчик вибрации, ПСН – преобразователь сопротивление–напряжение, ПСД – плата сбора данных

Для уточнения базовых положений модели был проведен эксперимент, учитывающий наиболее важные переменные $\vec{X}$: влияние частоты вращения вала, радиальной нагрузки и объема смазочного материала. Экспериментальная установка показана на рисунке 4, 5.

Проведение полнофакторного эксперимента было не целесообразно по причинам значительных затрат ресурсов и времени. Алгоритм проведения эксперимента представлен на рисунке 6. На рисунках 7–9 представлен пример полученной поверхности отклика выходной переменной, в качестве которой выступает электрическое сопротивление подшипника качения.



Рисунок 6 – Алгоритм проведения эксперимента

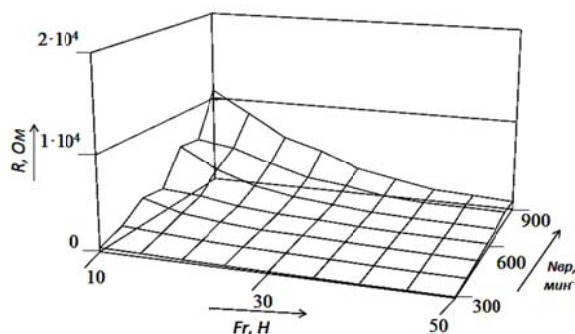


Рисунок 7 – QR при объеме смазки 0 мл

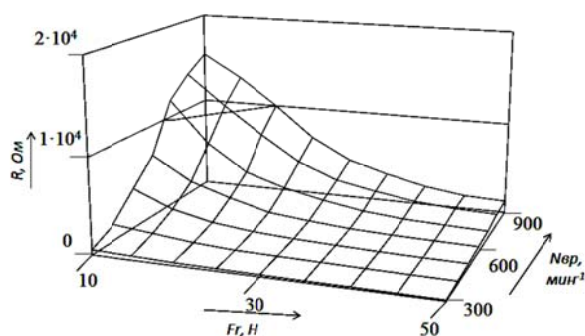


Рисунок 8 – QR при объеме смазки 0,1 мл

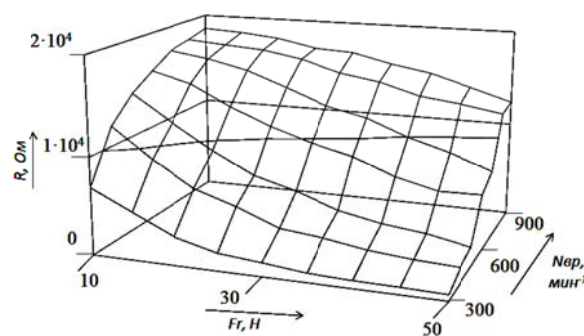


Рисунок 9 – QR при объеме смазки 0,2 мл

При совместном анализе сигналов электрического сопротивления полученных в результате экспериментального исследования и математического моделирования установлено, что коэффициент детерминации между ними составляет от 0,89 до 0,95.

Заключение

Разработана математическая модель электрического сопротивления подшипника качения, учитывающая набор входных параметров, влияющих на сигнал. В основе модели лежат теории электрического контакта, гидродинамики, упругости. Предложена структурная схема, реализующая алгоритмическую систему распознавания технического состояния. Экспериментальные исследования показали достоверность полученных результатов математического моделирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Подмастерьев, К.В. Прогнозирование перспектив развития методов мониторинга узлов трения машин по результатам патентных исследований / 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. Приборная база для комплексного диагностирования подшипников / В.В. Мишин, К.В. Подмастерьев, В.В. Марков В.В // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – № 4 (288) – 2011 – С 111–120.

3. Селихов, А. В. Устройство диагностирования дефектного подшипника в двухопорном узле трения / А. В. Селихов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2015. – №5–2 (313). – С. 285–291.
4. Подмастерьев, К.В. Диагностический комплекс для трибологических исследований электрофлуктуационными методами / К.В. Подмастерьев, Е.В. Пахолкин, В.В. Мишин, В.В. Марков // Контроль. Диагностика. – 2000. № 12. С 19–21.
5. Подмастерьев, К.В. Электропараметрические методы комплексного диагностирования опор качения / К.В. Подмастерьев. – М.: Машиностроение–1, 2001. – 376 с.
6. Чернышов, В.Н. Моделирование активного сопротивления подшипникового узла / В.Н. Чернышов, В.В. Мишин, А.В. Пальчевский // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии — Орёл: ФГБОУ ВПО «Госунiversитет — УНПК». — 2011. — № 2/2 С. 18–24.
7. Майоров, М.В. К вопросу о возможности технического диагностирования подшипников качения с применением нейросетевых систем выявления дефектов / М.В. Майоров, В.В. Мишин // Известия ОрелГТУ. – 2009. – №2–4/274(560). – С. 28–31
8. Майоров, М.В. Диагностирование ступичных подшипников автомобиля / М.В. Майоров, В.В. Мишин, В.Н. Чернышов // «Мир транспорта и технологических машин» — Орёл: ФГБОУ ВПО «Госунiversитет — УНПК». — 2013. — № 2(41) — С. 9–16.
9. Мишин, В.В. Подход к комплексному диагностированию подшипникового узла с учетом качества его сборки / В.В. Мишин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. – №6. – С. 132–139.
10. Мишин, В.В. Метод и средства диагностирования электрогенератора автомобиля по параметрам электрического сопротивления смазочного слоя / В.В. Мишин, Молодцов Е.Н. // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – №2. – С. 159–166.

Селихов Алексей Владимирович

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»
к.т.н., старший преподаватель кафедры
«Приборостроение, метрология и сертификация»
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

Подмастерьев Константин Валентинович

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»
Доктор технических наук, профессор, зав. каф.
«Приборостроение, метрология и сертификация»
Тел.: (4862)41–98–03
E-mail: asms-orel@mail.ru

Тихов Сергей Игоревич

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»
Студент кафедры «Приборостроение, метрология и
сертификация»
Тел. (4862) 41–98–76
E-mail: Tikhov.sereoga2010@yandex.ru

A.V. SELIKHOV, V.V. MISHIN, K.V. PODMASTERYEV, S.I. TIKHOV

**DEVELOPMENT OF THE MATHEMATICAL MODEL
OF THE RECOGNITION SYSTEM OF THE TECHNICAL CONDITION
OF THE TRIBO JOINT**

Abstract: *This article is devoted to the description of the principles of the information system for the recognition of the technical state of tribo joints on the basis of the electroresistive method of tribodiagnostics. Includes a description of the main provisions of the method and design features of the system.*

Keywords: *electric generator, automobile, electroresistive, bearing.*

BIBLIOGRAPHY

1. Podmasteryev, K.V. Prediction of the prospects for the development of methods for monitoring friction units of machines based on the results of patent studies / K.V. Podmasteryev, V.V. Markov // In the collection: Perspectives of innovative development of the coal regions of Russia. Proceedings IV International Scientific and Practical Conference. Editorial Board: Pudov E.Yu. (responsible editor), Klaus O.A. (responsible editor), Bershpolets S.I., Konoplya A.A. 2014. P. 329–331.
2. Mishin V. V., Podmasteryev K. V., Markov V. V. Instrument base for complex diagnostics of bearings / V.V. Mishin., K.V Podmasteryev, V.V. Markov // Fundamental and applied problems of engineering and technology. – №4 (288)– 2011 – P. 111–120

3. Selikhov, A.V. The device for diagnosing a defective bearing in a two-bearing friction unit / A.V. Selikhov // *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*. – 2015. – No. 5–2 (313). – P. 285–291.
4. Podmasteryev, K.V. Diagnostic system for tribological research electrofluctuation methods / K.V. Podmasteryev, E.V. Pakholkin, V.V. Mishin, V.V. Markov // *Control. Diagnostics*. – 2000. No. 12. P. 19–21
5. Podmasteryev, K.V. Electroparametric methods for complex diagnosis of rolling bearings / K.V. The Apprentices. – Moscow: Mashinostroenie–1, 2001. – 376 p.
6. Chernyshov, V.N. Modeling of the active resistance of the bearing assembly / V.N. Chernyshov, V.V. Mishin, A.V. Palchevsky // *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology* – Orel: State University – UNPK. – 2011. – No. 2/2 C. 18–24.
7. Mayorov, M.V. On the possibility of technical diagnosis of rolling bearings with the use of neural network defect detection systems / M.V. Mayorov, V.V. Mishin // *Izvestia Orel State Technical University*. – 2009. – No. 2–4 / 274 (560). – P. 28–31
8. Mayorov, M.V. Diagnosis of wheel bearings of a car / M.V. Mayorov, V.V. Mishin, V.N. Chernyshov // «The World of Transport and Technological Machines» – Orel: FGBOU VPO «Gosuni–version – UNPK». – 2013. – No. 2 (41) – pp. 9–16.
9. Mishin, V.V. Approach to the complex diagnosis of the bearing unit, taking into account the quality of its assembly / V.V. Mishin // *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*. – 2010. – №6. – P. 132–139.
10. Mishin, V.V. The method and means of diagnosing the car electric generator according to the parameters of the electrical resistance of the lubricating layer / V.V. Mishin, Molodtsov E.N. // *Fundamental and applied problems of technology and technology*. – 2011. – №2. – pp. 159–166.

Selikhov Aleksey Vladimirovich

FGBOU VO «Turgenev OSU» Cand.tech.sci., senior lecturer of IMM&S dep.
Tel. (4862) 41–98–76
E–mail: thelonglonebox@yandex.ru

Mishin Vladislav Vladimirovich

FGBOU VO «Turgenev OSU» 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, Head.
Department of «Testing, Metrology and Certification»
Ph.: (4862)41–98–03
E–mail: asms-orel@mail.ru

Tihov Sergey Igorevich

Student of IMM&S dep.
Tel. (4862) 41–98–76
E–mail: Tikhov.sereoga201

КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА, ИСПЫТАНИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ

УДК 621.822.6–97: 621.317.757.08

Н.В. ДАВЫДОВА, Ю.Н. ИВАНОВ, С.Н. ЛАЗАРЕВ

МЕТОД ЭКСПРЕСС–АНАЛИЗА КАЧЕСТВА СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ АВТОМОБИЛЕЙ ГАРАЖА ОСОБОГО НАЗНАЧЕНИЯ

***Аннотация.** В статье рассмотрена специфика эксплуатации и технического обслуживания автотранспорта гаража особого назначения, сформированы группы факторов, влияющих на качество используемых в двигателях автомобилей смазочных материалов. Рассмотрена возможность применения двухчастотного резистивного метода для экспресс–анализа качества смазочного материала и даны рекомендации по выбору рабочих средств измерений, позволяющих существенно повысить точность определения диагностических параметров.*

Ключевые слова: качество, смазочное масло, метод контроля, гараж особого назначения, современные измерители напряжения.

Введение

В составе Федеральной службы охраны Российской Федерации существует уникальное структурное подразделение – гараж особого назначения (ГОН), представляющий собой автопарк, в арсенале которого имеются автомобили лучших мировых автопроизводителей, отвечающие современным требованиям безопасности.

Кремлёвский ГОН – это сложная и специфичная структура транспортного обслуживания высших должностных лиц Российской Федерации и иностранных государств, являющихся объектами государственной охраны в соответствии с Федеральным законом Российской Федерации от 27 мая 1996 года № 57–ФЗ «О государственной охране». Сотрудники ГОН обеспечивают безопасный и беспрепятственный проезд (передвижение) по участкам автомобильных дорог (трассам проезда) объектов государственной охраны. Во время поездок за границу руководители страны также пользуются машинами из ГОН [1].

В ГОН сосредоточены дорогостоящие автомобили ведущих мировых автопроизводителей, обладающие гарантированным уровнем безопасности, надёжности и комфорта: «Мерседес–Бенц», «ЗИЛ», «Фольксваген», «Вольво», «Ауди». Каждый автомобиль закрепляется за конкретным объектом государственной охраны. С целью защиты объектов охраны от внешних физических воздействий осуществляется бронирование корпуса, стекол, колес и других устройств. Водители данных автомобилей проходят специальную подготовку. [2].

Первое и главное требование к автотехнике ГОН – это высокая степень активной и пассивной безопасности объектов охраны, поскольку их жизни слишком важны для государства.

Поэтому, в основном, автотранспортные средства ГОН представляют собой отдельные несерийные экземпляры с заранее улучшенными характеристиками в части удобства и комфортабельности салона, скоростных и мощностных возможностей двигателя, а главное безопасности передвижения. Так автомобили, предназначенные для работы вооружённых сотрудников личной охраны, могут иметь удлинённый кузов для увеличения внутреннего пространства, откидывающуюся для стрельбы заднюю дверь, а также форсированные двигатели с повышенной мощностью.

Основная часть.

В связи с тем что, автотранспорт ГОН должен соответствовать высоким требованиям по надёжности, необходимо осуществлять постоянный контроль его технического состояния и проводить высококачественное техническое обслуживание. Механики ГОН ежедневно и ежечасно обеспечивают бесперебойную работу сложной автомобильной техники. Кроме ежедневного осмотра автомобиля два раза в месяц подвергаются капитальной проверке, при необходимости выполняется текущий ремонт. В ГОН организовано постоянное надлежащее

содержание автомашин, и, в конечном счете, бесперебойное обслуживание спецпассажиров [3].

Необходимо отметить, что замена любого конструктивного элемента автомобиля в ГОН фиксируется в специальном журнале. Обслуживание автомобилей осуществляется, как и в авиации, по особому регламенту, то есть если есть предписание заменить какой-либо элемент конструкции или расходный материал (в том числе моторное масло) при определенном пробеге, то производят замену, независимо от его изношенности. И такой регламентный подход зачастую вполне обоснован, поскольку позволяет предотвратить большинство аварийных ситуаций, но относительно контроля качества смазочного материала не всегда является достаточным.

Обусловлено это тем, что в настоящее время качество нефтепродуктов в большинстве регионов России отличается от стандартного, в основном, из-за нарушения условий транспортирования и хранения, а в ряде случаев – умышленной фальсификации [4–5].

Это при том, что существует государственный контроль за соблюдением требований к показателям качества нефтепродуктов, который осуществляет Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт) согласно техническому регламенту «О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и топочному мазуту» [6]. Постановлением Правительства РФ [7] установлен особый подход к оценке соответствия в форме разрешения на применение смазочных материалов, поставляемых для нужд организаций области обороны и безопасности. В рамках данного подхода для оценки соответствия топлив, масел, смазок, специальных жидкостей, консервационных материалов и присадок, освоенных (и не освоенных) в серийном производстве на базе отечественных и (или) зарубежных технологий, для принятия решений о возможности их применения федеральный орган исполнительной власти, уполномоченный в области обороны, определяет головную научно-исследовательскую испытательную организацию, выполняющую функции по исследованию в области химмотологии, научному обеспечению и межведомственной методической координации работ по созданию и проведению исследований указанных видов продукции, а также по осуществлению экспертизы документов изготовителя и результатов испытаний. При этом оценке соответствия подлежат количественные и качественные характеристики свойств топлив, масел, смазок, специальных жидкостей, консервационных материалов и присадок, состав, технология производства и другие обязательные требования [7].

Однако этих мер оказывается недостаточно, поскольку контроль соответствия нефтепродуктов указанным в [6, 7] требованиям осуществляется преимущественно при разработке и производстве нефтепродуктов и практически не осуществляется при непосредственном их применении, полагая, что производитель должен гарантировать заданное качество нефтепродукта.

В действительности, даже без случаев умышленной фальсификации, есть много обстоятельств, ведущих к снижению качества товарных нефтепродуктов на пути от производителя до потребителя и непосредственно у потребителя.

Так, среди разных причин снижения качества смазочного материала в двигателях специальных автомобилей можно условно выделить три группы предрасполагающих факторов.

Во-первых, это климатические факторы, обусловленные перепадами температур свойственных российской действительности. Влияние этих факторов неизбежно, в связи с необходимостью эксплуатации транспортных средств при любых климатических условиях. В результате климатические перепады температуры могут привести к образованию во внутренних камерах деталей двигателя конденсата и обводнению смазочного материала с потерей его смазочных свойств. А частые холодные пуски двигателя автомобиля в зимнее время года способствуют не только преждевременному износу смазочного материала из-за возникающих моментов сухого трения, но и могут привести к заклиниванию деталей двигателя.

Во-вторых, это факторы, связанные с особенностями и режимами эксплуатации автотранспорта ГОН. Службы безопасности многих государств для снижения риска нападения во время следования правительственного автотранспорта практикуют

значительное увеличение скорости движения, в том числе и на торжественных церемониях [3], так как считается, что при скорости выше 90 км/ч вероятность попадания снайпера минимальна. При высоких скоростях осуществляются постоянные тренировки водителей, для обеспечения их готовности выполнять сложные манёвры. Эксплуатация в городских условиях также происходит при различных скоростных режимах, сменяемых частым простаиванием в пробках, а это приводит к тому, что пробег автомобилей очень сильно отстаёт от моточасов их работы. В совокупности все эти факторы ведут к преждевременному старению смазочного материала, которое в действительности мало зависит от реального пробега автомобиля.

В-третьих, это факторы, обусловленные конструктивными особенностями двигателей автомобилей. Для обеспечения высоких скоростей передвижения и манёвренности автомобиля ГОН оснащаются высокомоощными форсированными двигателями. Известно, что современные форсированные двигатели эффективнее атмосферных двигателей, так как способны работать в более жестких условиях. И как отмечено авторами работы [8] в автомобилях с форсированными двигателями из-за особого режима езды моторное масло (в том числе и новейшее SM по классификации API) просто не выдерживает и начинает разлагаться. И происходит это значительно раньше регламентированного срока замены смазочного масла. И хотя производители таких двигателей рекомендуют для каждой модели форсированного двигателя использовать исключительно определённую марку масла, кардинально ситуацию это не меняет. И острее всего проблема быстрой выработки ресурса смазочного масла в форсированных двигателях встала именно в России [8]. Связано это как с низким качеством реализуемого смазочного материала, упомянутыми ранее климатическими перепадами температур, так и с перегреванием двигателей, обусловленным пробуксовками и особым режимом езды, что свойственно и для автомобилей ГОН.

Ещё одной причиной безвременной потери качества горюче-смазочных материалов является их хранение в емкостях ранее бывших в употреблении с другими по физико-химическому составу веществами. Это нередко бывает тогда, когда на заправочных станциях или в общих гаражах в одни и те же резервуары могут заливаться бензины разных марок, дизельное топливо и смазочное масло. Всё это приводит в результате к физико-химическим реакциям в местах соприкосновения несовместимых горюче-смазочных материалов. В результате полученные при таких смешениях продукты химических реакций приводят к механическому загрязнению смазочных масел и как следствие потере её свойств.

Специалисты сервисных станций констатируют рост числа случаев выхода из строя двигателей новых автомобилей в период гарантийного срока именно из-за преждевременного износа смазочного масла, а не поломок механизма [8].

Таким образом, для автомобилей из ГОН, недостаточно регламентного подхода в вопросе поддержания нужного качества смазочного масла. Во избежание неожиданного заклинивания двигателей из-за плохой смазки или её временного отсутствия по причине механических примесей в масле целесообразно иметь возможность контролировать качество смазочных масел по требованию и «на месте» (on site).

Для этого необходимо оборудовать диагностические лаборатории, оснащать их соответствующим оборудованием, позволяющим быстро, на месте и по мере необходимости осуществлять контроль качества смазочного масла.

В этой связи вопрос разработки методов, а на их основе соответствующих устройств и приборов экспресс-диагностики качества смазочных материалов, а также их внедрение в стационарные лаборатории, в том числе в ГОН, является актуальной задачей.

В настоящее время для оценки качества смазочных масел все чаще начинают использовать их электрические параметры, а именно диэлектрическую проницаемость ϵ и тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ [8–9], а также электрические величины функционально с ними связанные, несмотря на то, что среди стандартных показателей качества они не значатся.

Тенденция перехода к оценке качества смазочных масел по их электрическим параметрам объясняется простотой электрических методов измерения этих параметров, большим опытом, накопленным в области электрических измерений, высокими точностью измерений и быстродействием, возможностью непосредственного введения результатов измерения в информационно измерительные системы, позволяющие одновременно

оценивать целый ряд электрических параметров и зависимостью последних от влияющих факторов.

Экспрессность диэлектрических измерений и относительная дешевизна оборудования по сравнению с хроматографическим и спектроскопическим оборудованием, которое обычно применяется для оценки показателей качества нефтепродуктов, делают метод диэлькометрии привлекательным для оперативной диагностики бензинов, смазочных масел и других нефтепродуктов [11–14].

В настоящее время в зависимости от диапазона частот, в котором проводят диэлектрические измерения, могут быть применены различные методы: вольтметра–амперметра, резистивный, мостовые, резонансные и волноводные.

Наиболее простым методом измерения электрических параметров различных по проводимости жидкостей, в том числе и смазочных масел является метод вольтметра–амперметра. Первоначально он использовался для определения тока утечки в масле на постоянном токе. В последующем он применялся для измерения модуля удельного сопротивления масел на переменном токе [14]. Схема реализации метода вольтметра – амперметра приведена на рисунке 1.

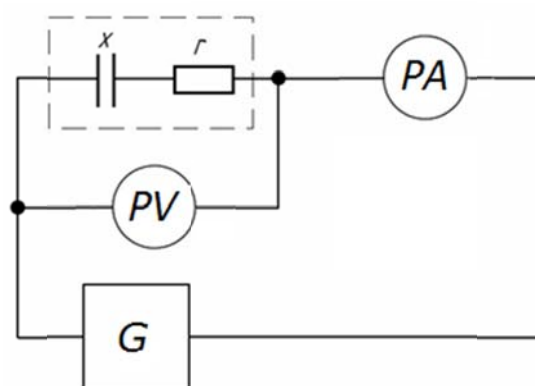


Рисунок 1 – Схема измерения модуля комплексного сопротивления емкостной ячейки со смазочным материалом методом вольтметра – амперметра

На рисунке 1 емкостная ячейка, в которую помещается для исследования диэлектрический материал (в нашем случае смазочное масло) представлена в виде эквивалентной схемы последовательно включенных сопротивления потерь r , являющегося активной составляющей сопротивления ячейки с диэлектрическим материалом, и реактивной составляющей сопротивления ячейки x .

В качестве источника питания используется генератор синусоидальных колебаний G . Напряжение на измерительной ячейке определяется по показаниям вольтметра PV , а ток, протекающий в измерительной цепи, по показаниям амперметра PA .

При этом значение модуля сопротивления Z измерительной ячейки определяется по значениям приложенного к нему напряжения U и тока I , протекающего через него.

Применение этого метода имеет некоторые ограничения. При измерении материалов с малыми реактивными составляющими сопротивления модуль сопротивления приравнивают активной составляющей сопротивления. Подобным способом в некоторых случаях контролируют сопротивления жидких электролитов. Если реактивная составляющая сопротивления много больше активной, то пренебрегают последней и считают сопротивление чисто реактивным. Так поступают, например, при измерении реактивного сопротивления тонких жидких плёнок на повышенных частотах [14].

Для того чтобы разделить значения реактивной X и активной r составляющих сопротивления измерительной ячейки, в схему вольтметра– амперметра вводят ваттметр, как показано на рисунке 2.

При этом значение параметров комплексного сопротивления емкостной ячейки определяют по показаниям приборов, на основании, например, следующих выражений:

$$Z = U / I, \quad (1)$$

$$r = \frac{P}{I^2}, \quad (2)$$

где P – мощность цепи, определяемая по показаниям ваттметра PW ;

$$x = \sqrt{Z^2 - r^2} = \frac{1}{2\pi f C}, \quad (3)$$

где C – ёмкость измерительной ячейки с смазочным материалом,
 f – частота на которой проводят измерения.

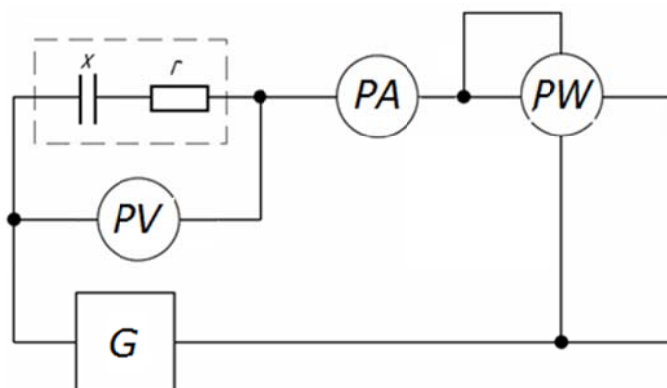


Рисунок 2 – Схема раздельного определения параметров емкостной ячейки со смазочным материалом методом вольтметра – амперметра – ваттметра

Применение метода вольтметра–амперметра, а также его модификации в сочетании с ваттметром ограничено промышленными частотами, для которых налажен массовый выпуск этих приборов.

Простота метода вольтметра–амперметра заставила искать пути его усовершенствования с целью использования в более широком частотном диапазоне для определения электрических параметров жидких диэлектриков (в частности смазочных масел).

В результате для измерения электрических параметров смазочных масел предлагается двухчастотный метод измерения, схема реализации которого представлена на рисунке 3.

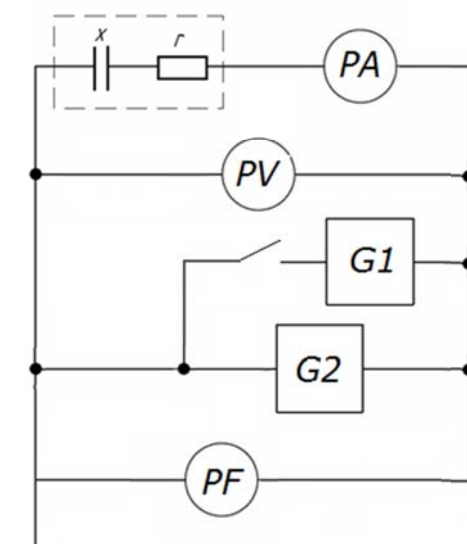


Рисунок 3 – Двухчастотный метод измерения электрических параметров емкостной ячейки со смазочным материалом

На рисунке 3 в качестве источника питания используется генераторы синусоидальных колебаний $G1$ и $G2$, настроенные на частоты f_1 и f_2 . Частота напряжения генераторов измеряется частотомером PF .

Напряжение в измерительной цепи определяется по показаниям вольтметра PV, а ток по показаниям амперметра PA.

В этом случае измерения проводятся методом вольтметра– амперметра на двух частотах. По значениям токов и напряжений, измеренных на частотах f_1 и f_2 , в соответствии с выражением (1) определяют значения модулей комплексного сопротивления измерительной ячейки на этих частотах:

$$\begin{cases} Z_1^2 = r^2 + \left(\frac{1}{2\pi f_1 C} \right)^2, \\ Z_2^2 = r^2 + \left(\frac{1}{2\pi f_2 C} \right)^2. \end{cases} \quad (4)$$

Решив данную систему уравнений, можно определить эквивалентную ёмкость C и активное сопротивление r измерительной ячейки, заполненной смазочным материалом:

$$C = \frac{1}{2\pi f_1 f_2} \sqrt{\frac{f_2^2 - f_1^2}{Z_1^2 - Z_2^2}}, \quad (5)$$

$$r = \sqrt{\frac{f_2^2 Z_2^2 - f_1^2 Z_1^2}{f_2^2 - f_1^2}}. \quad (6)$$

По значениям полученных параметров C и r , а также с учётом рабочих параметров самой измерительной ячейки, в которую для исследования помещается материал, можно определить значения диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $\tan \delta$ смазочного масла.

Таблица 1 – Современные средства измерений переменного напряжения

Наименование прибора	Диапазон измеряемых напряжений	Диапазон рабочих частот	Погрешность, %
Высокочастотный вольтметр переменного тока АКИП 2402	50 мкВ...300 В	5 Гц...5 МГц	$\pm (1,5...3)$
Высокочастотный милливольтметр переменного тока АКИП-2403	1 мВ...10 В	0,9 кГц...1,2 ГГц	± 2
Высокочастотный вольтметр переменного тока Boonton 9241, 9242	200 мкВ...10 В	10 Гц...1,2 ГГц	$\pm (1...3)$
Вольтметры цифровые универсальные GDM-78341, GDM-78342	(0...1000) В	(0...100) кГц	$\pm 0,02$
Вольтметр универсальный В7-79	1 мВ...750 В	10 Гц...10 МГц	$\pm (0,09...1,5)$
Вольтметр переменного тока ВК3-78А	100 мкВ...1000 В	10 Гц...2 ГГц	$\pm 0,5$

Заключение.

Основное преимущество предложенного метода определения диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $\tan \delta$ жидкого диэлектрика, в качестве которого мы рассматриваем смазочное масло, перед традиционно используемыми для этих целей мостовыми и резонансными методами заключается в том, что электрические параметры жидкого диэлектрика определяются косвенно по измеренным значениям напряжений на участках измерительной цепи. Таким образом, точность и рабочий диапазон

измерения, предлагаемого метода, в большей степени будет обусловлен возможностями современных средств измерений напряжения. В свою очередь возможности средств измерения такого типа возросли на столько (таблица 1), что значения напряжения можно определить с точностью до (0,02...3) % в зависимости от частоты рабочего диапазона, который в свою очередь может быть расширен до 2 ГГц.

Соответственно примерно с такой же точностью могут быть определены электрические параметры смазочного материала, что делает предложенный метод более предпочтительным по сравнению с мостовыми и резонансными методами, точность которых сильно зависит от частоты на которой проводят измерения и не превышает 5 %.

Таким образом, данный метод может быть использован при разработке устройств экспресс-диагностики качества смазочных материалов «на месте» (on site) и несомненно будет полезен для стационарных лабораторий гаража особого назначения. Кроме того, такой метод можно применить при разработке датчика контроля качества смазочного материала в процессе эксплуатации для транспортных средств, в том числе стоящих на вооружении в организациях сферы обороны и безопасности государства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энциклопедия Федеральной службы охраны Российской Федерации. Т.1. История органов государственной охраны и специальной связи / Под общ.ред. Е.А. Мурова. – 2-е изд., испр. И доп. – М.: Кучково поле, 2012. – 480 с., ил.
2. История органов государственной охраны и подразделений специальной связи / Под ред. В.Д. Тарасова. – Голицыно: ГПИ ФСБ России, 2010. – 330 с.
3. Исторический вестник. Гараж особого назначения. Том пятнадцатый. / Под общей редакцией генерал-лейтенанта В.А. Макарова: МОСКВА, сентябрь 2016 – С.7–83.
4. Шувалов, Г.В. Опыт создания и перспективы использования мобильных лабораторий для контроля показателей нефтепродуктов / Г.В. Шувалов, В.Г. Селятницкий, В.М. Байкалов, И.В. Клековкин // Законодательная и прикладная метрология. – 2014. – №5. С.12–16.
5. Технический регламент «О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и топочному мазуту» (Утвержден постановлением Правительства Российской Федерации от 27 февраля 2008 г. №118)
6. Постановление Правительства РФ от 11.10.12 №1036 (ред. от 13.08.2016) «Об особенностях оценки соответствия оборонной продукции (работ, услуг) поставляемой по государственному оборонному заказу, процессов проектирования (включая изыскания), производство, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации, хранения, перевозки, реализации, утилизации и захоронения указанной продукции»
7. Решение проблем форсированных двигателей [Электронный ресурс] / Автодела (22.01.2015г.). – URL: <http://www.autodela.ru/main/top...dvigatel> (21.04.2017г.)
8. Новые лабораторные методы оценки качества масел и присадок / А. Я. Левин, Г. Л. Трофимова [и др.] // Химия и технология топлив и масел. – 2006. – № 2. – С. 50–51.
9. Хула, В. Д. Безразборный экспресс-мониторинг ресурса трибосопряжений / В. Д. Хула, Ф. И. Кукоз // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2007. – Т. 73, № 9. – С. 76–78.
10. Возможность применения кондуктометрического метода для контроля степени загрязнения автомобильных масел / В. Г. Заренбин [и др.] // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Дніпропетровськ: ПДАБА, 2008. – № 1–2. – С. 26–30.
11. Кортянович, К. В. Диэлектрическая проницаемость как показатель, характеризующий адгезионные свойства битумов [Электронный ресурс] / К. В. Кортянович, Н. Г. Евдокимова, Б. С. Жирнов // Нефтегазовое дело. – 2006. – Вып. 2. – Режим доступа: http://www.ogbus.ru/authors/Kortyanovich/Kortyanovich_1.pdf.
12. Подкин, Ю. Г. Метод диэлькометрического контроля неравновесных дисперсных систем. 1. Формирование измерительной информации при протекании процессов растворения / Ю. Г. Подкин // Контроль. Диагностика. – 2003. – № 1. – С. 32–43.
13. Подкин, Ю. Г. Метод диэлькометрического контроля неравновесных дисперсных систем. 1. Формирование измерительной информации при протекании процессов структурообразования / Ю. Г. Подкин // Контроль. Диагностика. – 2004. – № 3. – С. 26–37.
14. Радиоизмерения / С. Ф. Корндорф [и др.]. – М.: Госэнергоздат, 1953. – 464 с.

Давыдова Надежда Владимировна
Академия ФСО России
Кандидат технических наук,
научный сотрудник,
302034, г.Орел,
ул. Приборостроительная, 35
Тел. (4862)54–97–85
E-mail:
metrolog@academ.msk.rsnnet.ru

Иванов Юрий Николаевич
Академия ФСО России
Кандидат технических наук,
научный сотрудник,
302034, г.Орел,
ул. Приборостроительная, 35
Тел. (4862)54–97–85
E-mail:
metrolog@academ.msk.rsnnet.ru

Лазарев Сергей Николаевич
Академия ФСО России
Кандидат технических наук,
научный сотрудник,
302034, г.Орел,
ул. Приборостроительная, 35
Тел. (4862)54–97–85
E-mail:
metrolog@academ.msk.rsnnet.ru

N.V DAVYDOVA, Yu.N. IVANOV, S.N. LAZAREV

METHOD OF EXPRESS ANALYSIS OF THE QUALITY OF THE LUBRICANT FOR VEHICLES OF GARAGE OF SPECIAL FUNCTION

Abstract. *In the article the specifics of operation and maintenance of motor vehicles for a special purpose garage are considered, groups of factors influencing the quality of lubricants used in the engines of cars are formed. The possibility of application of the resistive method at two frequencies of the express-analysis of the quality of the lubricant is considered and recommendations are given on the choice of working measuring instruments that allow to significantly increase the accuracy of determining the diagnostic parameters.*

Keywords: *The quality of the lubricating oil, the control method, the garage special purpose current voltage meter.*

BIBLIOGRAPHY

1. Encyclopedia of Federal Security Service of the Russian Federation. T. 1. History of the organs of State security and special occasion / Pod.obch. red. E.A. Murova. –2–e izhd., ispr.i dop. –M.: Kuchkovo pole, 2012. –480 s., il.
2. History of the organs of State security and special communication units / Pod.obch. red. V.D. Tarasova.–Golitsyno: GPI FSB of Russia, 2010.–330 s.
3. Historical bulletin. Special purpose garage. That the fifteenth. / Under general supervision of Lieutenant-General V.A. Makarova: Moscow, September, 2016– s. 7–83.
4. Shuvalov, G.V Experience of creation and prospects of use of mobile laboratories to monitor indicators of oil products / G.V Shuvalov, V.M. Seljatnickij, V.M Baikalov, I.V Klekovkin // Legislative and applied metrology.–2014.–№ 5. s. 12–16.
5. Technical Regulation «Concerning the requirements for road and aviation gasoline, diesel, and ship fuel, jet fuel and fuel oil» (Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation of February 27.02, 2008 № 118)
6. Resolution of the Government of the Russian Federation from 11.10.12 № 1036 (red.13.08.2016) «On the specifics of conformity assessment of Defense products (works, services) delivered by the State Defence order, design processes (including research), manufacture, construction, installation, commissioning, operation, storage, transportation, sale, use and disposal of these products»
7. Problem solving uprated engines [Electronic resource] // Auto mechanics (22.01.2015). URL: <http://www.autodela.ru/main/top...dvigatel> (21.04.2017,)
8. New laboratory methods for assessing the quality of oils and additives / A. J. Levin, G. L. Trofimov [i dr.] // Chemistry and technology of fuels and oils. –2006. –№ 2. –s. 50–51.
9. Hula, V. D. Bezrazbornyj express-resource monitoring tribological joints / V. D. Hula, F. Kukoz // Factory laboratory. Diagnostics of materials. –2007. –Vol. 73, № 9. –s. 76–78.
10. The ability to apply the method and uncertainty for pollution control of motor oils / V.G. Zarenbin [i dr.] // Pridniprovskaï akademïi derzhavnoï Вісник будівництва Та архitekturi. –Dnipropetrovsk: PDABA, 2008. –№. 1–2. –s. 26–30.
11. Kortjanovich, K. V. Permittivity as an indicator, which characterizes the adhesion properties of bitumen [Electronic resource] / K.V. Kortjanovich, N. G. Evdokimov, B.S. Zhirnov // Oil and gas business. –2006. –ISS. 2.– Access mode: http://www.ogbus.ru/authors/Kortyanovich/Kortyanovich_1.pdf.
12. Podkin, Y G. Dijelkometricheskogo control method of non-equilibrium of dispersed systems. 1. formation of the measuring information in the course of dissolution processes / Y. G. Podkin // Controls. Diagnostics. – 2003. –№ 1. –s. 32–43.
13. Podkin, Y.G. Method dielcometric control nonequilibrium disperse systems. 1. Formation of the measurement information in the processes stukturoobrazovaniya / G. Podkin // Control. Diagnostics. – 2004. – № 3. – s. 26–37.
- 14 Radiomeasurements / S.F. Korndorf [i dr.].– M.: Gosenergozdat, 1953. – 464 s.

Davydova Nadezhda Vladimirovna
Academy FSO of Russia
Ph.D, researcher assistant,
302034, Orel, Priborostroitel'naya, 35
Ph. (4862)54–97–85
E-mail:
metrolog@academ.msk.rsnet.ru

Ivanov Yriy Nicolaevich
Academy FSO of Russia
Ph.D, researcher assistant,
302034, Orel, Priborostroitel'naya, 35
Ph. (4862)54–97–85
E-mail: metrolog@academ.msk.rsnet.ru

Lazarev Sergei Nicolaevich
Academy FSO of Russia
Ph.D, researcher assistant,
302034, Orel,
Priborostroitel'naya, 35
Ph. (4862)54–97–85
E-mail:
metrolog@academ.msk.rsnet.ru

УДК 620.165.29

Е.Н. ГРЯДУНОВА, А.В. ГОРИН, М.А. ТОКМАКОВА

КОНТРОЛЬ ГЕРМЕТИЧНОСТИ АНЕРОИДНЫХ КОРОБОК ФОТОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Аннотация. В статье представлен анализ методов контроля герметичности анероидной коробки. Описан фотометрический способ обнаружения течи с помощью вспомогательной химической реакции. Представлена схема установки для определения утечек. Даны расчетные зависимости, описывающие метод контроля герметичности анероидных коробок.

Ключевые слова: анероидная коробка, герметичность, фотометрический метод, утечка.

Введение

Одним из научных направлений, которым занимался профессор Корндорф С.Ф., является разработка новых методов и средств контроля герметичности [1, 2]. До сегодняшнего дня это проблема не теряет своей актуальности. В состав аналоговых приборов, производящих контроль высоты, входит анероидная коробка. Как показывают среднестатистические данные, около 10 % брака при производстве приборов происходит из-за не герметичности анероидных коробок. Так как выше упомянутые приборы обеспечивают безопасное выполнение полетов летательных аппаратов и парашютных прыжков, то контроль качества герметизации анероидной коробки является обязательной и ответственной частью производства.

Основная часть

Анероидная коробка, представленная на рисунке 1, представляет собой герметично закрытую манометрическую коробку, из внутренней полости которой выкачан воздух до остаточного давления 20 – 40 Па.



Рисунок 1 – Анероидная коробка

Рассчитаем массу газа, оставшегося в коробке:

$$m = \frac{P_{вн} \cdot \pi d^2 \cdot h M}{4RT}, \quad (1)$$

где: $P_{вн}$ – давление внутри резервуара, Па;

h – высота коробки, м;

d – диаметр коробки, м;

M – молекулярная масса газа, кг/моль;

R – универсальная газовая постоянная, ($R = 8,3$ Дж/моль·К);

T – температура газа, К.

С учетом геометрических размеров коробки минимальная масса газа в ней:

$$m = \frac{26 \cdot \pi (5 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 29 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 8,3 \cdot 293} = 30,4 \cdot 10^{-10} \text{ кг.}$$

Утечка при молекулярном режиме рассчитывается по формуле Кнутсена:

$$Q_M = \frac{\pi d_T^3 \cdot (P_{вн} - P_{вых})}{3L}, \quad (2)$$

где: L – длина канала дефекта, которая принимается равной $3l$, за счет непрямолинейности канала дефекта, м;

l – толщина стенки резервуара, м;
 d_T – диаметр течи, м;
 $P_{вн}$ – давление внутри резервуара, Па;
 $P_{вн}$ – давление снаружи, Па.

При нормальном атмосферном давлении 100 кПа и толщине стенки резервуара 1 мм утечка составит 10^{-9} м³Па/с. Давление внутри коробки будет изменяться со скоростью $1,2 \cdot 10^{-2}$ Па/ч. Через трое суток давление внутри коробки изменится на 0,9 Па, что невозможно зафиксировать механическими манометрами, так их чувствительности не достаточна. Датчик ионизационного манометра измеряющий давление до 0,1 Па, должен находится непосредственно внутри коробки, что практически не осуществимо. Малые геометрические размеры течи, порядка от 0,1 до 10 мкм исключают возможность их визуального наблюдения или обнаружения другими методами дефектоскопии [3, 4].

Один из самых распространенным методов контроля герметичности с помощью пробного газа – гелия. Пороговая чувствительность гелиевых течеискателей составляет $1,3 \cdot 10^{-10}$ м³Па/с, то есть это минимальный поток пробного вещества, который течеискатель может зарегистрировать. Контроль способом опрессовки замкнутых оболочек заключается в том, что изделие помещаются в специальную камеру, в которой создается давление гелия. При наличии негерметичности в коробке гелий проникает в замкнутый объем изделия. Далее проводится контроль изделия накоплением гелия в вакуумной камере, в которую помещается изделие, выдерживают и измеряют концентрацию гелия в камере. Длительность опрессовки изделия гелием должна быть при давлении $1 \cdot 10^6$ и не менее 2 часов, затем изделие необходимо выдержать в камере накопления в течении 2 часов. При массовом производстве анероидных коробок такой способ контроля экономически невыгоден.

Предложен метод контроля герметичности анероидных коробок с помощью пробного газа – предельного углеводорода. В воздухе рабочей зоны, содержится до 1% предельных углеводородов. Количества молекул пробного вещества, содержащего в коробке, определим по формуле:

$$N = \frac{0,01 \, m \cdot N_A}{M}, \quad (3)$$

где: N_A – постоянная Авогадро, $6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹.

Таким образом в коробке содержится порядка 10^{14} молекул предельного углеводорода. Анализ методов контроля утечки углеводородов показал отсутствие высокочувствительных детекторов углеводородов. Поэтому предложено осуществлять контроль утечки углеводорода с помощью вспомогательной химической реакции. При выборе реакций было учтено три фактора:

- 1) продукт реакции должен с достаточной чувствительностью регистрироваться методом, не требующим применение сложного и дорогостоящего оборудования;
- 2) реакция должна легко инициироваться и иметь максимальный выход по отношению к регистрируемому веществу;
- 3) зависимость между количеством регистрируемого вещества и утечкой углеводорода должна быть постоянна в широком диапазоне.

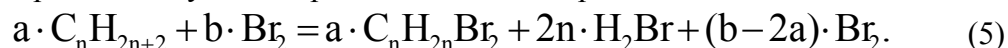
В качестве такого вещества был выбран раствор галогена, концентрация которого регистрируется фотометрическим методом. Количества галогенов с достаточной точностью регистрируется фотометрическим методом. Реакция брома с углеводородами инициируется светом: энергия диссоциации брома [8, 9] равна 190 кДж/моль. Константа скорости химической реакции определяется по формуле:

$$k_c = \frac{KT}{h} \xi \cdot \exp\left(-\frac{G}{RT}\right), \quad (4)$$

где ξ – трансмиссионный коэффициент;
 K – постоянная Больцмана, Дж/К;
 G – свободная энергия активации, Дж.

Константа скорости химической реакции брома с предельными углеводородами при температуре 25⁰ С равна: для этана – $2,1 \cdot 10^{-11}$ моль/м³с; для бутана – $2,7 \cdot 10^{-11}$ моль/м³с, пропана – $3,2 \cdot 10^{-11}$ моль/м³с.

Бронирования предельных углеводородов описывается реакцией:



При вступлении в реакцию (а) молей предельного углеводорода количество свободного брома в растворе уменьшится в два раза больше на (2а) молей. Таким образом, по изменению количества ΔN_6 (моль) брома в растворе определяется количество N_y предельного углеводорода, вступившего с ним в реакцию. Спектрофотометрический метод анализа основан на свойстве вещества взаимодействовать с электромагнитным излучением, уменьшая его интенсивность. Согласно первому закону фотохимии (Гротгуса и Дреппера), фотохимическое превращение может происходить только под действием электромагнитного излучения, поглощаемого веществом. Для диссоциаций молекулы брома, необходимо облучить его световым потоком с длиной волны 628 ± 1 нм, так как энергия кванта именно данного участка спектра соответствует энергии, необходимой для диссоциации молекул брома. Для качественного определения количества брома в разреженной среде применим закон **Бугера–Ланберга–Бера**, согласно которому: количество световой энергии, поглощенной средой, пропорционально концентрации вещества и длине пути света в поглощающем веществе.

$$J = J_0 \cdot 10^{\varepsilon c z}, \quad (6)$$

где J_0 – интенсивность падающего света, Вт/м²;
 J – интенсивность прошедшего света, Вт/м²;
 z – расстояние через которое проходит свет, м;
 c – концентрация вещества, моль/м³;
 ε – молярный коэффициент экстинкции, м²/моль.

Коэффициент молярной экстинкции не зависит от величины поглощающего слоя, концентрации вещества и интенсивности падающего излучения. Коэффициент экстинкции является характеристикой вещества.

Для определения количества поглощающегося вещества пользуются оптической плотностью среды:

$$D = \varepsilon \cdot c \cdot z. \quad (7)$$

В настоящее время величину изменения оптической плотности равную 0,001 признают предельно допустимой для измерения современными спектрофотометрическими приборами. Изменение оптической плотности среды, при наличии течи в aneroidной коробке:

$$\Delta D = \varepsilon \cdot \frac{m \cdot z}{M(V_K - V_A)}, \quad (8)$$

где M – молярная масса галогена, кг/моль;
 V_K – объем камеры накопления, м³;
 V_A – объем камеры накопления, м³;
 z – расстояние через которое проходит свет, м.

Экспериментальные исследования показали, что коэффициент экстинкции брома, на длине волны 620 ± 20 нм и составляет 26 м²/моль. При использовании камеры накопления объемом 10^{-5} м², длине поглощающего слоя 0,1 м, изменение оптической плотности составит:

$$\Delta D = 26 \cdot \frac{30,4 \cdot 10^{-10} \cdot 0,1}{20 \cdot 10^{-3} \cdot (12 \cdot 10^{-6} - 9,5 \cdot 10^{-6})} = 0,16.$$

Утечка из контролируемого изделия рассчитывается по формуле:

$$Q_y = \frac{\Delta D \cdot (V_K - V_A) \cdot RT}{\varepsilon k_z t_n z}, \quad (9)$$

где t_n – время выдержки изделия в камере накопления, с;
 k_z – коэффициент потерь.

Схема установки для определения утечек в aneroidной коробке представлена на рисунке 2.

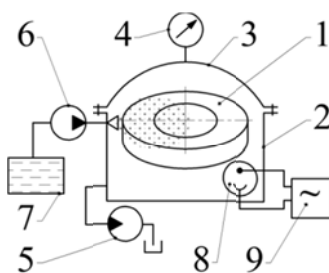


Рисунок 2 – Схема установки для определения утечек

Контролируемое изделие 1 помещают в камеру, образованную корпусом 2 и крышкой 3. После уплотнения крышки камеры и установки манометра 4 проводится откачка полости камеры до остаточного давления 0,1–1 Па вакуумным насосом 5. Затем через клапан и диффузор насосом 6 в камеру накопления вводят пары индикаторного вещества 7 и фиксируют его количество фотометрическим прибором 8. Затем изделие выдерживают в камере в течение заданного времени. При наличии в коробке утечки в камеру попадают молекулы углеводорода, которые вступают в реакцию с индикаторным веществом. Результаты контроля фиксируются электронными прибором 9.

Закключение

Представленные выше материалы позволяют сделать следующие выводы:

- рациональным методом контроля герметичности anerоидных коробок является фотометрический способ обнаружения течи с помощью вспомогательной химической реакции;
- в качестве индикаторного вещества наиболее эффективней использовать пары галогена;
- полученные результаты рекомендуется использовать при проведении неразрушающих методов контроля герметичности anerоидных коробок.

Представленный материал выполнен в рамках проекта №9.2952.2017/4.6. государственного задания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грядунова, Е.Н. Фотометрический метод и средство контроля герметичности изделий с парожидкостным заполнением углеводородами / диссертация кандидата технических наук – Орел, 1998. – 152 с.
2. Грядунова, Е.Н. Контроль герметичности изделий, заполненных предельными углеводородами: монография / Е.Н. Грядунова, С.Ф. Корндорф, А.В. Горин, – Орел: Госуниверситет – УНПК, 2015. – 88 с.
3. Горин, А.В. Проверка изделий, заполненных предельными углеводородами, на герметичность: монография / А.В. Горин, Е.Н. Грядунова, М.А. Горина – Орел: ООО ПФ «Картуш», 2016. – 98 с.
4. Петин, С. В., Сидоренко В. Г. Обзор методов дефектоскопии при обследовании трубопроводов // Молодой ученый. – 2016. – №2. – С. 194–199. – URL <https://moluch.ru/archive/106/25262/>.
5. Неразрушающий контроль и диагностика/ Справочник. Под редакцией В.В. Ключева // 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Машиностроение, 2003. – 656 с.
6. Системы неразрушающего контроля. Виды (методы) и технология неразрушающего контроля. Справочное пособие / М.: ГУП «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора в России», 2003. – 392 с.
7. Новый справочник химика и технолога. Химическое равновесие, свойства растворов. Серия книг для специалистов: АНО НПО «Профессионал», 2004. – 998 с.
8. Вигасин, А.А. Константа скорости диссоциации двухатомных молекул и квазидвухатомных диаметров / А. А. Вагасин, В.Н. Макаров // Вестник Московского университета, Серия 2 химия: институт – Москва: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2000. – С. 96–101.
9. Вахрушев, А. В. Моделирование процессов взаимодействия наночастиц с микротрещиной / А.В. Вахрушев, В.В. Андреев. // Журнал «Химическая физика и мезоскопия». Издательство: Институт механики Уральского отделения РАН, Ижевск, С. 307–312.
10. Нестеров, С.Б. Методы расчета вакуумных систем / Нестеров С.Б., Васильев Ю.К., Андросов А.В. – М.: издательство МЭИ, 2004. – 220 с.
11. Вакуумное оборудование /Каталог Капустина У.Н. Казань: Издательский центр» Арт-кофе», 2002. – 96 с.

Грядунова Елена Николаевна
Орловский Государственный
университет
имени И.С. Тургенева, г. Орел
кандидат технических наук, доцент
кафедра мехатроники, механики и
робототехники,
302020 г. Орел, Наугорское шоссе,
29
Тел.(4862) 41–98–85
E-mail: gryadunova65@mail.ru

Горин Андрей Владимирович
Орловский Государственный
университет
имени И.С. Тургенева, г. Орел
кандидат технических наук, доцент
кафедра мехатроники, механики и
робототехники,
302020 г. Орел, Наугорское шоссе,
29
Тел: 891–260–02–67
E-mail: gorin57@mail.ru

Токмакова Мария Андреевна
Орловский Государственный
университет
имени И.С. Тургенева, г. Орел
студент
302020 г. Орел, Наугорское
шоссе, 29
Тел.(4862) 41–98–85

T.N. GRIADYNOVA, A.V. GORIN, M.A. TOKMAKOVA

TIGHTNESS CONTROL ANEROID BOXES BY PHOTOMETRIC METHOD

Abstract. *The article presents the analysis of methods of tightness control of aneroid box. The photometric method of leak detection using an auxiliary chemical reaction is described. The scheme of installation for leak detection is presented. The calculated dependences describing the method of tightness control of aneroid boxes are given.*

Keywords: *aneroid box, tightness, photometric method, leakage.*

BIBLIOGRAPHY

1. Gladunova, E. N. Photometric method and means of tightness control of products with a vapor–liquid filled with hydrocarbons / thesis of candidate of technical Sciences Orel, 1998. – 152 p.
2. Gladunova, E. N. Control of tightness of products filled with saturated hydrocarbons: monograph / E. N. Gryadunov, S. F. Korndorf, A. V. Gorin, eagle, state University – unpk, 2015. – 88 p.
3. Gorin, A.V. Checking items filled with saturated hydrocarbons, to leak: monograph / A. V. Gorin, E. N. Gryadunova, M. A. Gorin – eagle: OOO PF «Cartouche», 2016. – 98 p.
4. Petinov, S. V., Sidorenko V. G. review of methods of flaw detection at inspection of pipelines. Young scientist. – 2016. – №2. – Pp. 194–199. – URL <https://moluch.ru/archive/106/25262/>.
5. Non-destructive testing and diagnostics / Handbook. Edited by V. V. Klyuev / / 2nd ed., prefab. I DOP. Moscow: Mashinostroenie, 2003. – 656 p.
6. Non-destructive testing systems. Types (methods) and technology of non-destructive testing. Reference book / M.: GUP «Scientific and technical center for industrial safety Gosgortekhnadzor Russia», 2003. – 392 p.
7. New Handbook of chemist and technologist. Chemical equilibrium, a property of the solutions. Series of books for specialists: ANO NGO «Professional», 2004. – 998 p.
8. The dissociation rate of diatomic molecules and quasi–diatomic diameters Constant, V. N. Makarov / / Bulletin of Moscow University, Series 2 chemistry: Institute–Moscow: Moscow state University. M. V. Lomonosov, 2000. – P. 96–101.
9. Vakhrushev, A. V. Modeling of processes of interaction of nanoparticles with a hairline fracture / A. V. Vakhrushev, V. V. Andreev. // Journal «Chemical physics and mesoscopy». Publisher: Institute of mechanics of the Ural branch of RAS, Izhevsk, P. 307–312.
10. Nesterov, S. B. methods of calculation of vacuum systems / Nesterov, S. B., Vasiliev, K., Androsov, A. V. – M.: publishing house MEI, 2004. – 220 p.
11. Vacuum equipment / katolog Kapustina U. N. Kazan: publishing center» Art–coffee», 2002. – 96 p.

Griadyanova Elena Nikolaevna
«Orel State University named after I.S.
Turgenev», Orel
Ph.D., associate professor of the
department «Mechatronics, mechanics
and robotics»
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
Ph.: (4862) 41–98–85
E-mail: gryadunova65@mail.ru

Gorin Andrei Vladimirovich
«Orel State University named after I.S.
Turgenev», Orel
Ph.D., associate professor of the
department «Mechatronics, mechanics
and robotics»
302020, Orel, Naugorskoe Shosse, 29
Ph.: 8910–260–02–67
E-mail: gorin57@mail.ru

Tokmakova Maria Andreevna
«Orel State University named after
I.S. Turgenev», Orel
Student
302020, Orel, Naugorskoe
Shosse, 29
Ph.: (4862) 41–98–85

УДК 620.179.1.082.7

В.В. МАРКОВ, Н.В. УГЛОВА, В.Н. СКОВПЕНЬ

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ КОНТАКТНЫХ ПАР ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЕДИНИТЕЛЕЙ

Аннотация. Детали контактных пар прямоугольных электрических соединителей, по сравнению с другими типами электрических соединителей (скользящими контактами электрических машин и разрывными контактами релейных устройств), имеют некоторые особенности трения и изнашивания. Данные особенности обязательно следует учитывать при проведении контроля механических характеристик (силы сочленения и расчленения) деталей контактных пар прямоугольных электрических соединителей.

Ключевые слова: трение; изнашивание; прямоугольный электрический соединитель; скользящий электрический контакт; разрывной электрический контакт; сила сочленения; сила расчленения.

Влияние механических характеристик на качество соединителей

В соответствии с современной технической терминологией, «электрический соединитель» – это электромеханическое устройство, обеспечивающее электрическое и механическое соединение двух блоков электроаппаратуры. Как правило, один из блоков является базовым, второй блок – заменяемым [1].

В настоящее время известны два способа классификации электрических соединителей: по конструктивным признакам и по эксплуатационным параметрам.

По конструктивным признакам все виды электрических соединителей могут быть разделены на два класса – неподвижные и подвижные. Неподвижные соединители можно разделить на неразборные, разборные и разъёмные. В подвижных соединителях детали контактной пары могут перемещаться относительно друг друга. Перемещение может быть постоянным, как в скользящих контактах, или импульсным, как в разрывных контактных парах релейных устройств.

Разъёмные электрические соединители предназначены для многократного замыкания и размыкания в процессе работы электроустановки. Материалами для деталей контактных пар разъёмных соединителей могут служить: серебро и его сплавы, золото и его сплавы, а также многослойные покрытия.

Классификация по эксплуатационным параметрам позволяет разделить соединители на три группы [2]: соединители для электроэнергетики; соединители для промышленной и бытовой электротехники; соединители для радиоэлектроники. Качество соединителей определяется совокупностью электрических, механических параметров и показателей надёжности.

Электрические параметры соединителя определяют степень его соответствия своему функциональному назначению – обеспечение заданного сопротивления и ёмкости на участке электрической цепи, обеспечение необходимого сопротивления изоляции, исключение риска возникновения коротких замыканий в разъёме.

Показатели надёжности определяют способность соединителя выполнять свои функции в течение срока службы. При нормировании электрических параметров ГОСТ 23784–98 требует неизменности переходного сопротивления контакта и сопротивления изолятора в пределах времени, равному сроку сохраняемости соединителя, причём как при его работе, так и после хранения.

Механические характеристики разъёмных электрических соединителей не относятся ни к показателям их назначения, ни к показателям надёжности. Но при этом они являются важнейшими показателями качества электрического соединителя, так как от их значений зависят и электрические параметры и надёжность. К механическим характеристикам разъёмов относятся:

- 1) сила коммутации (сочленения и расчленения) штыря и гнезда контактной пары;

2) унификация габаритных и присоединительных размеров соединителя с размерами изделий радиоэлектронной аппаратуры;

3) максимально возможное количество электрических цепей, одновременно коммутируемых одним электрическим соединителем.

Среди перечисленных механических характеристик особое значение для соединителя имеет сила сочленения и расчленения (сила коммутации) штыря и гнезда контактной пары.

Действующая методика контроля силы коммутации соединителя

Сила коммутации деталей контактной пары электрического соединителя определяет сразу три важнейших показателя:

- 1) переходное сопротивление контакта в контактной паре;
- 2) электрическую ёмкость контактной пары;
- 3) надёжность соединения, под которой в данном случае понимается устойчивость системы «штырь–гнездо» к случайному разъединению при вибрации, ударах, резких изменениях температуры окружающей среды и других воздействиях.

Контроль силы сочленения и расчленения штыря и гнезда контактной пары производится по действующей методике, сущность которой передана рисунком 1. Контрольный штырь–калибр соединяется с грузом и сочленяется с гнездом. Если сила тяжести груза меньше силы трения в контактной паре, то штырь–калибр удерживается в гнезде контактной пары. Если сила тяжести превышает силу трения, контрольный штырь–калибр выпадает.

Значение силы трения в контактной паре разъёма определяет стабильность электрических параметров контакта, так как сила трения служит для предотвращения непроизвольного перемещения рабочих поверхностей деталей контактной пары относительно друг друга, приводящего к изменению значения переходного сопротивления контакта, разрыву электрического сопротивления в разъёме и повышению интенсивности электрического изнашивания поверхностей из-за возникновения электрических искр и дуг. При этом значение силы трения в контактной паре разъёма даже не нормируется нормативными документами – для них задаётся только сила сочленения или расчленения, хотя стандартная схема измерения этой силы составлена так, что при её реализации оценивается именно сила трения.

Сила сочленения и расчленения определяется и нормируется, исходя из значения массы удерживаемого и выпадающего грузов. Например, для одной контактной пары разъёма типа СНП–260 допустимое значение силы сочленения 20 граммов (0,2 Н), а допустимое значение силы расчленения – 60 граммов (0,6 Н).

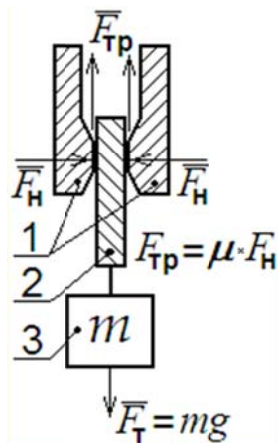


Рисунок 1 – Схема измерения силы сочленения и расчленения штыря и гнезда контактной пары:

- 1 – гнездо контактной пары;
- 2 – контрольный штырь–калибр;
- 3 – груз массой m

Основными достоинствами данной методики являются: простота реализации, наглядность и понятность результатов контроля, стабильность значения силы сочленения и расчленения (так как она задаётся массой груза).

Анализ проблем контроля силы коммутации соединителей

Основной проблемой контроля механических характеристик соединителей являются недостатки действующей методики: сложность автоматизации процесса контроля, разрушение покрытия поверхностей при проведении контроля, неадекватность методики реальным условиям эксплуатации соединителя.

Проблема автоматизации процесса контроля силы сочленения–расчленения является наиболее актуальной. Действующая методика предусматривает ручной контроль каждой контактной пары. Современный разъём имеет 10...200 контактных пар, поэтому трудоёмкость такого контроля очень велика. Для решения данной задачи может

быть использована поточная электромеханическая линия контроля, а также такие методы неразрушающего контроля, как электрорезистивный, электростатический и электромагнитный.

Вторая проблема – разрушение покрытия поверхностей при проведении контроля. Контрольный штырь–калибр изготавливается из высокоуглеродистой стали и имеет полированную поверхность высокой прочности. На поверхностях деталей контактной пары разъёма нанесено мягкое серебряное покрытие, нанесённое гальваническим способом.

Так как твёрдость поверхности гнезда (серебро) меньше твёрдости поверхности контрольного штыря–калибра (закалённая и полированная сталь), даже однократное измерение силы сочленения–расчленения приводит к повреждению серебряного покрытия поверхности детали соединителя. На рисунке 2 показаны фотографии поверхности штыря контактной пары до (рисунок 2, а) и после (рисунок 2, б) одного замыкания. На фотографии рисунка 2, б отчётливо виден след износа поверхности штыря контактной пары после *одного* замыкания.

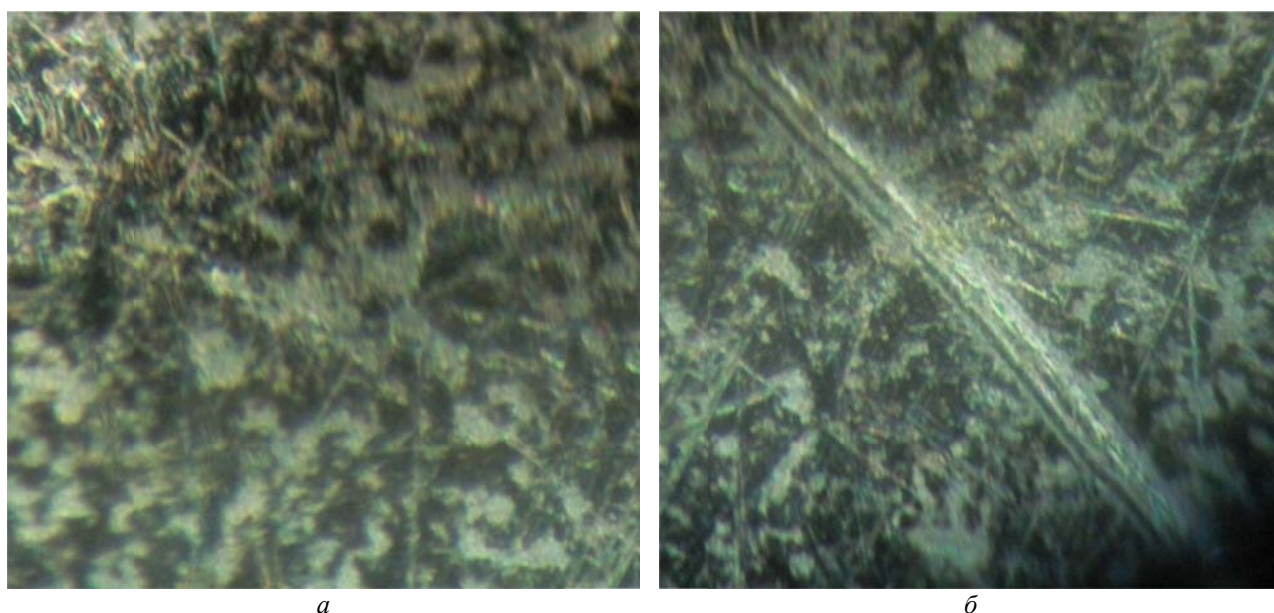


Рисунок 2 – Увеличенное изображение посеребрённой поверхности штыря контактной пары до (а) и после (б) одного замыкания (микроскоп AKSTOCKOP2 MAT)

Это явление подтверждают результаты многократных измерений параметров шероховатости поверхностей деталей различной твёрдости. Целью измерений стала опытная проверка закономерности изменения шероховатости поверхностей при контактировании деталей одинаковой и разной твёрдости.

На рисунках 3 и 4 показаны результаты многократных измерений параметров шероховатости поверхностей, изготовленных из стальных деталей, медных деталей, и деталей с серебряным покрытием поверхностей. При этом на рисунке 3 показаны результаты измерения параметра шероховатости R_{max} (наибольшая высота неровностей профиля в пределах базовой длины), а на рисунке 4 – результаты измерения параметра шероховатости S_m (средний шаг неровностей профиля в пределах базовой длины).

Для измерения параметров шероховатости использован профилограф–профилометр «АБРИС–ПМ7.2», который установлен в Центре коллективного пользования измерительным и испытательным оборудованием ОГУ имени И.С. Тургенева. Профилометр предназначен для измерения шероховатости и записи профиля поверхностей изделий, сечение которых в плоскости измерения представляет прямую линию, в лабораторных и цеховых условиях машиностроительных и приборостроительных предприятий, а также в полевых условиях, и для измерения шероховатости шаров. Измерение параметров шероховатости поверхности производится по системе средней линии в соответствии с номенклатурой и диапазонами значений, предусмотренными ГОСТ 2789–73 [3,4]. Датчик профилометра показан на рисунке 5.

Действие профилометра основано на ощупывании неровностей измеряемой поверхности алмазной иглой и преобразовании колебаний щупа датчика в пропорциональные им колебания электрического напряжения. Колебания напряжения обрабатываются в отсчетном устройстве или персональном компьютере по специальной программе, и результат обработки выводится в цифровом виде на индикатор отсчетного устройства или в цифровом и графическом виде на экран монитора компьютера (рисунок 6).

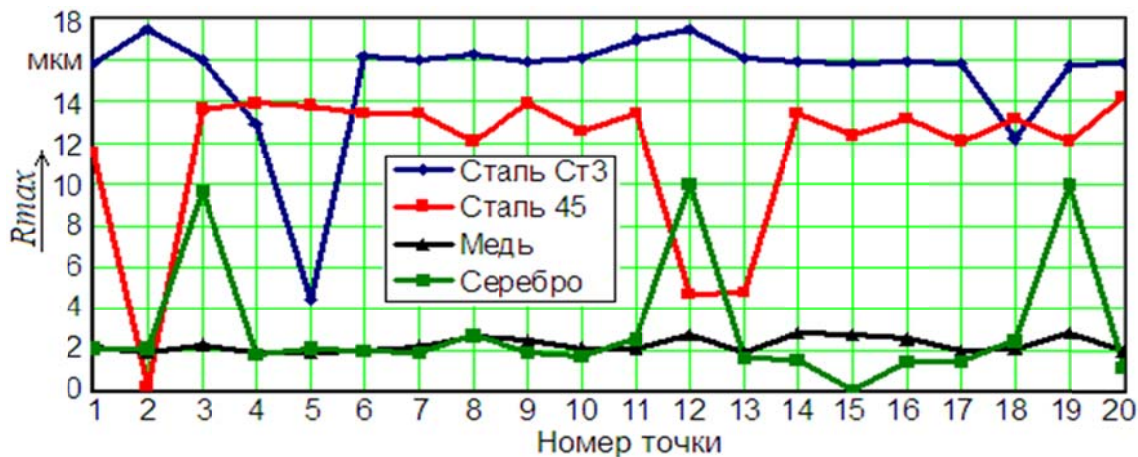


Рисунок 3 – Результаты многократных измерений параметра шероховатости R_{max}

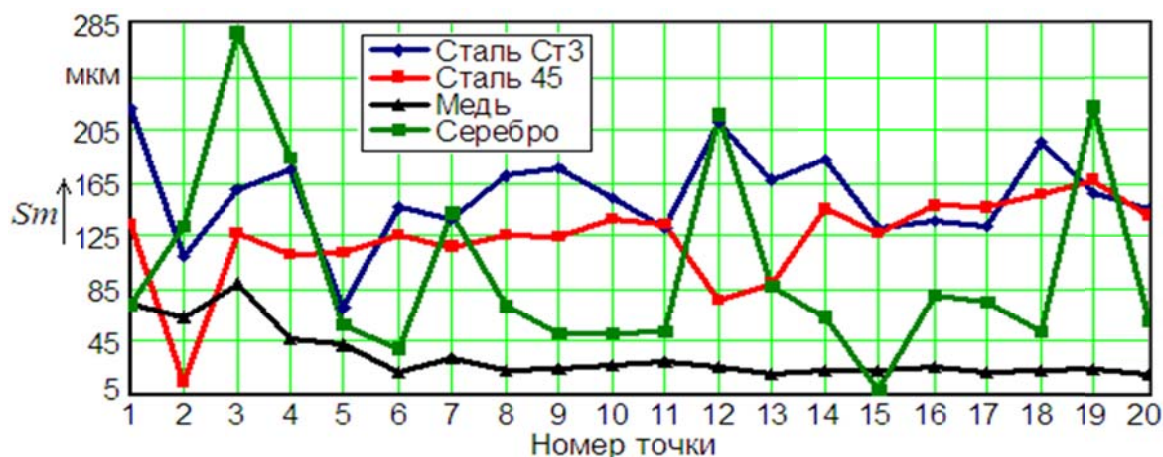


Рисунок 4 – Результаты многократных измерений параметра шероховатости S_m



Рисунок 5 – Датчик профилографа-профилометра «АБРИС-ПМ7.2»

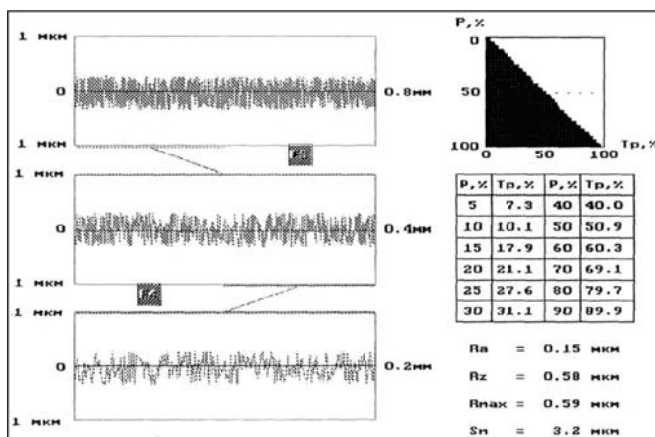


Рисунок 6 – Вид экрана монитора компьютера с результатом измерения шероховатости

Анализ профилограмм показывает, что при контакте деталей одинаковой твёрдости их шероховатость практически не изменяется (сталь 3 и сталь 45), а при контакте твёрдой поверхности с мягкой происходит срез неровностей (серебро). Наиболее отчётливо особые свойства контактирования посеребренных деталей видны на рисунке 3: «всплески» значений параметра шероховатости R_{max} соответствуют срезанию участка серебряного покрытия (рисунок 3, б) и его попаданию под измерительный наконечник профилометра–профилографа. При этом интересно, однако, что в контакте «медь–сталь» среза неровностей не происходит.

Результаты измерения параметров шероховатости подтверждают, что характер изменения профиля поверхности детали с серебряным покрытием в процессе её контактирования с другой поверхностью существенно отличается не только от характера изменения профиля поверхностей деталей из сталей различного качества (качественная горячекатаная сталь 45 и низкоуглеродистая сталь обыкновенного качества Ст 3), для которых контакт, как правило, считается *упругим*, но и от характера изменения профиля поверхности медной детали, для которой контакт обычно признаётся *пластическим* [5].

Контрольный штырь–калибр изготавливается из высокоуглеродистой стали и подвергается полированию. После этого он замыкается с гнездом контактной пары для контроля силы сочленения–расчленения. Значит, трение происходит в паре «закалённая сталь – серебро». В реальных условиях эксплуатации соединителя трение происходит в паре «серебро–серебро». Поэтому проблема адекватности результатов контроля силы сочленения и расчленения реальным условиям эксплуатации соединителей также остаётся актуальной.

Выводы

Таким образом, действующая методика контроля механических характеристик электрических соединителей нуждается в модернизации, которую необходимо проводить в двух направлениях: использование неразрушающих методов контроля, адекватных реальным условиям эксплуатации соединителей, и разработка системы автоматического контроля силы сочленения–расчленения контактной пары.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сафонов, А.Л. Прямоугольные электрические соединители / А.Л. Сафонов, Л.И. Сафонов. – СПб.: ООО «Издательство Файнстрит», 2011. – 328 с.
2. Корндорф, С.Ф. Разрушение разъёмных контактов в процессе их замыкания / С.Ф. Корндорф, Г.И. Уткин, В.В. Марков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. – № 1. – С. 78–81.
3. Ерёмин, А.А. Пути развития производства прямоугольных низкочастотных соединителей в России [Электронный ресурс] / А.А. Ерёмин, А.В. Киселёв, А.Н. Шадрин // Современная электроника. – 2013. – № 6. – С. 12–16. – Режим доступа: <https://www.soel.ru/upload/clouds/1/iblock/516/51674945dcc91a5ea/20130612.pdf>.
4. Уткин, Г.И. Особенности процесса трения рабочих поверхностей деталей контактной пары разъёмного электрического соединителя / Г.И. Уткин, В.В. Марков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – № 2–5. – С. 95–100.
5. Уткин, Г.И. Показатели назначения электрических соединителей, характеризующие техническое состояние контактов / Г.И. Уткин, В.В. Чкан, В.В. Марков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2009. – № 6. – С. 114–119.

Марков Владимир Владимирович
ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева», г. Орёл
К.т.н., доцент кафедры
приборостроения, метрологии и
сертификации
Тел. (4862)41–98–76;
E-mail: pms35vm@yandex.ru

Углова Нина Владимировна
ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева», г. Орёл
К.т.н., доцент кафедры
приборостроения, метрологии и
сертификации
Тел. (4862)41–98–76;
E-mail: pms35vm@yandex.ru

Сковпень Владимир Николаевич
ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева», г. Орёл
К.т.н., доцент кафедры
приборостроения, метрологии и
сертификации
Тел. (4862)41–98–76;
E-mail: pms35vm@yandex.ru

V.V. MARKOV, N.V. UGLOVA, V.N. SKOVPEN

ACTUAL PROBLEMS CONTROL THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF PARTS CONTACT PAIRS ELECTRICAL CONNECTORS

Abstract. *The details of the contact pairs of rectangular electrical connectors, as compared with other types of electrical connectors (sliding contacts of electrical machines and discontinuous contacts of relay devices), have some peculiarities of friction and wear. These features must be taken into account when carrying out the control of mechanical characteristics (joint forces and dismemberment) of parts of contact pairs of rectangular electrical connectors.*

Keywords: *friction; wear; rectangular electrical connector; sliding electrical contact; breaking electrical contact; joint strength; dismemberment force.*

BIBLIOGRAPHY

1. Safonov, A. L. Rectangular electrical connectors / A. L. Safonov, L. I. Safonov. – SPb.: ООО «Izdatelstvo faynstrit», 2011. – 328 p.
2. Korndorf, S. F. The destruction of the separable contacts to their circuit / S. F. Korndorf, A. I. Utkin, V. V. Markov // Fundamental and applied problems of techniques and technology. – 2010. – Vol. 1. – P. 78–81.
3. Eremin, A. A. development of production of rectangular low-frequency connectors, in Russia [Electronic resource] / A. A. Eremin, A. V. Kiselev, A. N. Shadrin // Modern electronics. – 2013. – Vol. 6. – P. 12–16. – Mode of access: <https://www.soel.ru/upload/clouds/1/iblock/516/51674945dcc91a5ea9548862f2c46b66/20130612.pdf>.
4. Utkin, G. I. The Peculiarities of the process of friction surfaces contact pair rethink the electrical connector / G. I. Utkin, V. V. Markov // Fundamental and applied problems of techniques and technology. – 2012. – Vol. 2–5. – P. 95–100.
5. Utkin, G. I. Parameters of use electrical connectors that characterize the technical condition of the contacts / G. I. Utkin, V. V. Ckan, V. V. Markov // Fundamental and applied problems of techniques and technology. – 2009. – Vol. 6. – P. 114–119.

Markov Vladimir Vladimirovich

Oryol State University names of I.S. Tyrgenev, Oryol, Russia
Associate professor of department Device-building, Mertology and Certification, candidate of technical science,
Phone (4862)41–98–76; E– mail: pms35vm@yandex.ru

Uglova Nina Vladimirovna

Oryol State University names of I.S. Tyrgenev, Oryol, Russia
Associate professor of department Device-building, Mertology and Certification, candidate of technical science,
Phone (4862)41–98–76; E– mail: pms35vm@yandex.ru

Vladimir Nikolaevich Skovpen

Oryol State University names of I.S. Tyrgenev, Oryol, Russia
Associate professor of department Device-building, Mertology and Certification, candidate of technical science,
Phone (4862)41–98–76; E– mail: pms35vm@yandex.ru

УДК 620.1.05:620.179

М.П. ЖИЛЬЦОВ, А.В. ЖИДКОВ, О.А. ВОРОНИНА

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ШАР–ПЛОСКОСТЬ, РАЗДЕЛЕННЫХ СЛОЕМ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА

Аннотация. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований контактного взаимодействия тел с поверхностями шар–плоскость, разделенных слоем смазочного материала, электропараметрическим методом. Предложена модель данного взаимодействия. Приведены результаты аналитического моделирования и экспериментальных исследований. Масштабирование предложенной модели с учетом особенностей моделируемых объектов, позволит глубже представить процессы взаимодействия тел в таких узлах как подшипники качения.

Ключевые слова: контактное взаимодействие, смазочный материал, электропараметрические методы, электрическое сопротивление, импульсный сигнал, подшипник качения.

Введение

При технической эксплуатации механизмов в узлах машин происходят контактные взаимодействия поверхностей деталей. Особую роль в механизмах машин выполняют подшипники качения. Обобщенно подшипник качения можно представить, как контактную пару поверхностей, разделенных слоем смазочного материала. Зачастую смазочный материал выступает в роли агента, передающего динамические нагрузки между поверхностями контактной пары. Параметры динамических нагрузок зависят от режимов технической эксплуатации, однако, всегда происходит износ деталей и узлов [1]. Прогнозирование изнашивания и исследования контактных взаимодействий поверхностей деталей находятся в плоскости методов диагностирования состояния деталей машин и механизмов.

Постановка задачи

Подшипники качения, являясь сборочной единицей, при монтаже в узел часто деформируются и меняют свое реальное техническое состояние. Прогнозирование остаточного ресурса подшипников, независимо от используемых методов, осложнено их конструктивным устройством [5].

Ряд работ в области исследования диагностирования узлов и механизмов используют электропараметрические (например, электрорезистивные) методы. Данные методы имеют ряд преимуществ, однако не лишены недостатков [2, 3, 4]. Одним из недостатков электрорезистивного метода является рассмотрение смазочного материала как объекта с постоянным значением удельного электрического сопротивления.

Учитывая конструктивные особенности подшипников, все более актуальна задача исследования единичного контактного взаимодействия. Стоит отметить, что слой смазочного материала находится, как правило, в зазоре контактной пары и в совокупности с ней представляет объект исследования.

Цель исследования

Целью данной работы является исследование контактного взаимодействия элементов подшипника с помощью электропараметрического метода, определение динамики изменения электрического сопротивления при контактировании, учитывая свойства смазочного материала.

Исследование

Для исследования контактного взаимодействия поверхностей деталей подшипников, с учетом упрощения до единичного контактного взаимодействия, предложена модель, представленная на рисунке 1.

Слой смазочного материала (СМ) 2 подвергается воздействию силы F_g со стороны шара 1. Шар взаимодействует с пластиной 3 через слой СМ.

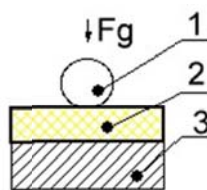


Рисунок 1 – Геометрическое описание исследуемого взаимодействия:

1 – шар; 2 – слой смазочного материала; 3 – пластина

Гидродинамическое давление, оказываемое СМ, вызывает упругую деформацию поверхности пластины [6, 7]. Толщина слоя СМ, уменьшается вплоть до возникновения контакта металлических поверхностей, с образованием площади фактического контакта.

При контакте поверхностей возникает деформация. Упругая составляющая деформации приводит к отскоку шара от пластины.

Рассмотрим ограничения данной модели. Поверхности пластины и шара принимаются без отклонений формы и учета микрогеометрии. Упругость материала и масса пластины много больше материала шара. Взаимодействие поверхностей происходит без проскальзывания. На шар действует внешняя сила F_g направленная перпендикулярно поверхности пластины. Гидродинамическое взаимодействие не приводит к возникновению эффекта кавитации.

При взаимодействии поверхностей площадь контакта определяется как [8]

$$A_r = \frac{N}{q_m}, \quad (1)$$

где N – нормальная нагрузка, пропорциональна указанной ранее силе F_g ;

q_m – давление текучести материала.

Выражение (1) является базовым, не учитывает параметры поверхностей (отклонения формы и шероховатости, изнашивание и др.).

Приложение электрического напряжения U_{in} , создает путь протекания тока, таким образом модель единичного контакта представляется в виде электрической модели рисунок 2.

Имеются определенные состояния модели, которые формируются положениями ключей $S1$ и $S2$. Слой СМ моделируется как электрическая емкость C .

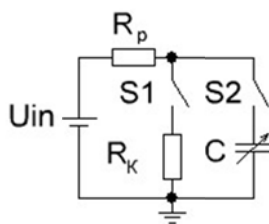


Рисунок 2 – Электрическая модель исследуемого взаимодействия:

U – источник напряжения; R_p – паразитные сопротивления; $S1$ – ключ 1; $S2$ – ключ 2; R_k – сопротивление контакта между поверхностями; C – переменная ёмкость, образующаяся между поверхностями, разделенными пленкой СМ

Ключ $S2$ замыкает цепь в результате первого этапа контакта поверхность шара–слой смазочной пленки–поверхность пластины. Вторым этапом контакта является непосредственный контакт металлических поверхностей, замыкание ключа $S1$.

Сопротивление контакта металлических поверхностей, упрощенно можно представить:

$$R_k = \frac{\rho}{2a}, \quad (2)$$

где ρ – удельное сопротивление металлов пластины и шара.

Выражение (2) не учитывает влияние сопротивление пленок, оксидных слоев и др.

Обобщенно предложенную модель контактного взаимодействия описывают выражения:

$$U_1 = U_{in} \times \frac{R_k}{R_p + R_k} \quad (3)$$

$$U_2 = U_{in} \times (1 - e^{\frac{-t}{k \times (A_r/N) \times R_k}}) \quad (4)$$

Коэффициент k представляет собой физическую характеристику СМ.

Аналитическое решение приводится далее совместно с результатами экспериментальных исследований. При этом напряжение в цепи согласно (4) и при пренебрежении тока утечки, носит характер переходного процесса. Предложенная электрическая модель не учитывает эффекты трибо- и термоЭДС, возникающих в зоне реального контакта.

С учетом поставленных целей и предложенной модели объекта исследования был разработан стенд с учетом информации источников [9, 10, 11]. На рисунке 3, 4 и 5 приведены, соответственно, структурная, функциональная и эквивалентная электрическая схемы стенда.



Рисунок 3 – Структурная схема стенда для проведения исследований

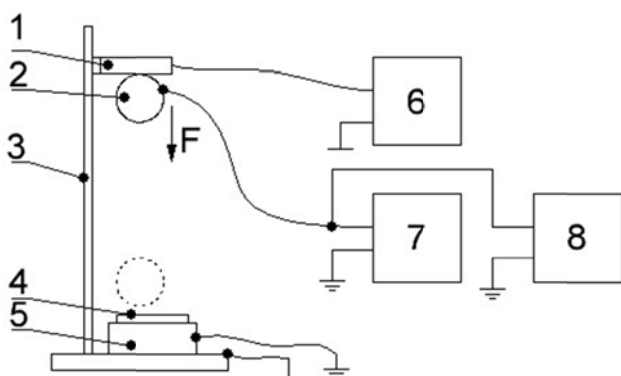


Рисунок 4 – Функциональная схема стенда для проведения исследований:

1 – электромагнит; 2 – шар; 3 – штатив;
4 – слой СМ; 5 – пластина; 6 – блок управления электромагнитом;
7 – блок электроники;
8 – цифровой осциллограф

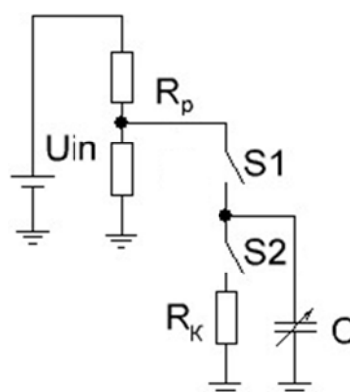


Рисунок 5 – Эквивалентная электрическая схема стенда и объекта исследования

В соответствии с обозначениями на рисунке 4 сформирован ход экспериментальных исследований. Шар 2, удерживается на поверхности электромагнита 1, управляемого блоком 6. В начальное положение (t_1) шар не касается пластины. Во второй момент (t_2) времени блок 6 выключает электромагнит. Шар, имеющий контакт с электрической цепью, падает на пластину, соединенную с блоком электроники 7. Производится включение записи сигнала цифровым осциллографом 8. В третий момент (t_3) времени шар отскакивает от пластины – электрическая цепь разрывается, запись сигнала прекращается. Электрическая цепь источник напряжения шар – смазочный материал – пластина представляет собой электрическое сопротивление, создающее падение напряжения, регистрируемое цифровым осциллографом.

Результаты приведены на графике рисунок 6 и рисунок 7. Усреднённая эпюра «Э» построена по результатам десяти экспериментов. Эпюра «А» выполнена аналитическим методом используя выражения (3) и (4). На рисунке 7 увеличена область графика, где

скорость спада импульсного сигнала имеет различия между полученными расчетными значениями и результатами эксперимента.

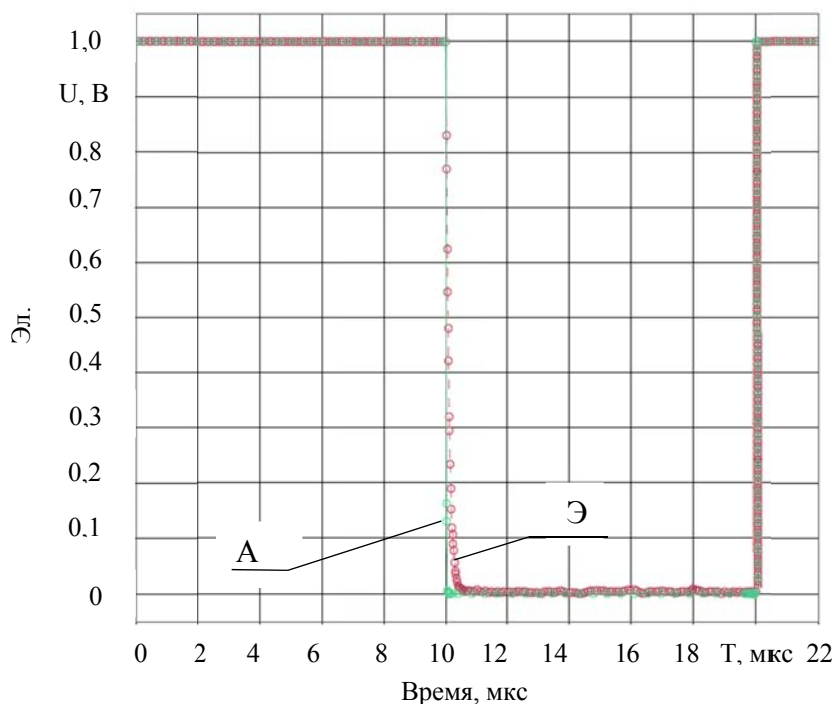


Рисунок 6 – Эпюры электрического напряжения из контактного взаимодействия

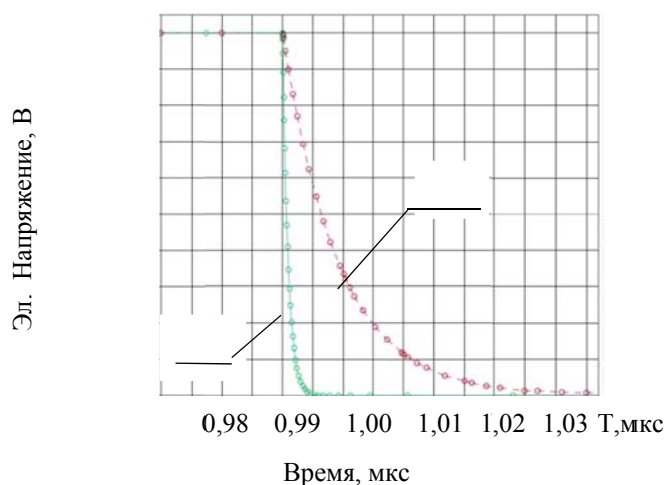


Рисунок 7 – Увеличенная область эпюры напряжения

С помощью разработанной программы, структурная схема которой представлена на рисунке 8, проведена обработка импульсных сигналов, полученных в ходе исследования.

Выделен информативный параметр сигнала, полученный от объекта исследования [12]. На рисунке 9 приведен типовой импульсный сигнала, показаны информативные параметры, по которым производилось исследование сигналов полученных в ходе экспериментальной и теоретической части работы.

Крутизна фронта S рассчитывается следующим образом:

$$S = \frac{1}{2} \left(\frac{T_r}{T_a} + \frac{T_f}{T_a} \right), \quad (5)$$

где T_r – время нарастания сигнала;
 T_f – время спада сигнала;
 T_a – длительность сигнала между T_r и T_f .

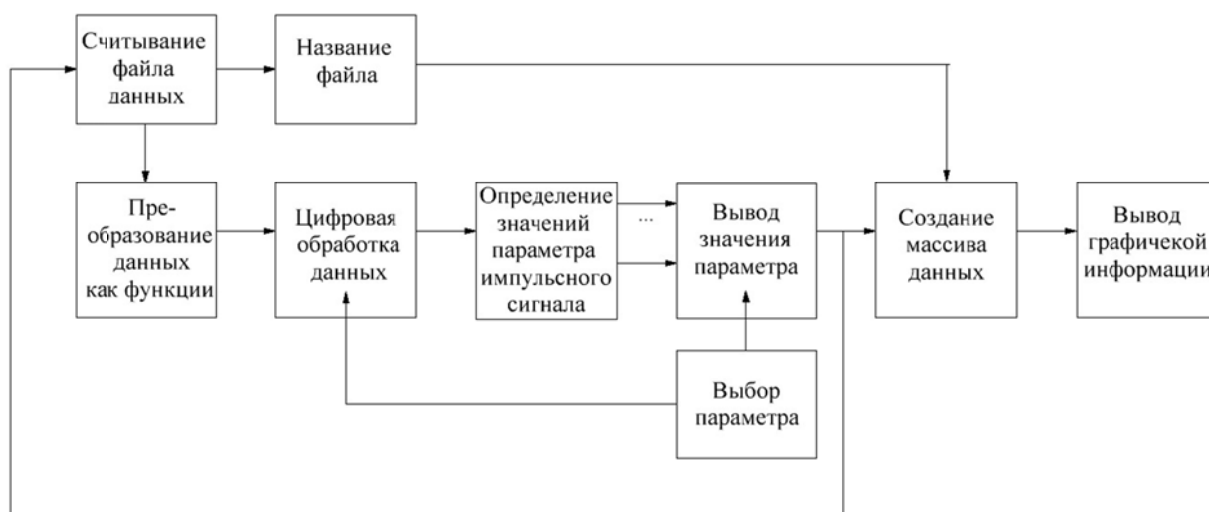


Рисунок 8 – Структурная схема программы обработки данных полученных в ходе экспериментальных исследований

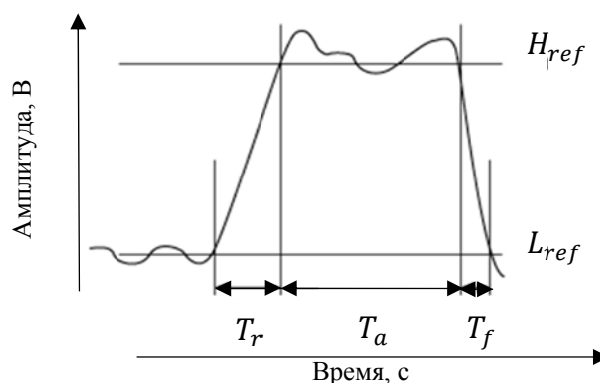


Рисунок 9 – Информативные параметры импульсного сигнала:
 L_{ref} – нижний уровень сигнала; H_{ref} – верхний уровень сигнала

Графики на рисунке 10 а) и б) отображают распределение крутизны фронта сигнала по номеру эксперимента, сопоставлены результаты экспериментальных, условно обозначение Э1, Э2 и теоретических исследований А1, А2.

Значения крутизны фронта сигнала для пластины без слоя СМ рисунок 10 б) на порядок ниже чем пластины покрытой слоем СМ рисунок 10 а).

Заключение

Проведено исследование контактного взаимодействия с помощью электропараметрического метода. Выявлен информативный параметр, эквивалентный крутизне фронта импульса электрического сопротивления объекта исследования, который отражает динамику изменения электрического сопротивления в зоне контактного взаимодействия с учетом смазочного материала.

Предложен метод расчета информативного параметра. Полученные значения крутизны фронта электрического напряжения четко указывает на наличие, либо отсутствие пленки смазочного материала между взаимодействующими поверхностями. Различие между результатами теоретической и экспериментальной части исследования вызваны упрощениями теоретической модели. Однако, данные различия несут незначительный характер и подтверждают возможность использование предложенной модели для исследования контактного взаимодействия, с учетом смазочного материала.

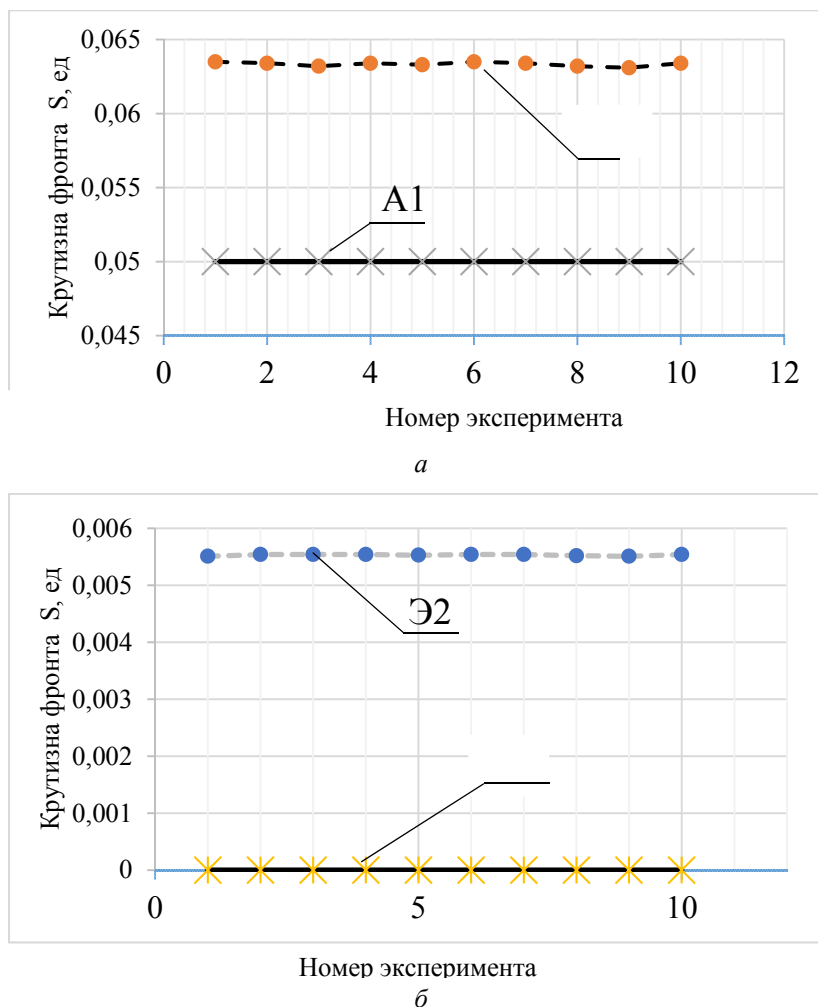


Рисунок 10 – Распределение значений крутизны фронта сигнала из зоны контактного взаимодействия:
а) – пластина без СМ, б) – покрытая слоем СМ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Износостойкость деталей машин и механизмов учеб. пособие. / Бишутин С. – Брянск: БГТУ, 2010. – 112 с.
2. Подмастерьев, К.В. Электрорезистивный метод комплексного диагностирования опор качения // Контроль. Диагностика. – 2004. № 9. С. 22–26.
3. Подмастерьев, К.В. Диагностический комплекс для трибологических исследований электрофлуктуационными методами // Контроль. Диагностика. – 2000. № 12. С. 19–21.
4. Холодилов, О.В. Диагностика состояния подшипников качения: комплексный подход // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов. – 2014. № 5. С. 275–276.
5. Повреждение подшипников и их причины. / Сост. SKF. – СПб: SKF AB, 2002.
6. Fluid Film Lubrication. / A. Z. Szeri, 2011. – 547 с.
7. Advanced Transport Phenomena: Fluid Mechanics and Convective Transport Processes. / L.G. Leal, 2007.
8. Трение и смазка твердых тел. / Боуден Ф.П. Т. Д. – Москва, 1968. – 543 с.
9. Жильцов, М.П. Экспериментальные исследования ударного трибозаимодействия по электрическим параметрам // Гидродинамическая теория смазки – XXI. Сборник тезисов международного научного симпозиума – Орел: ОГУ И.С. Тургенева, 2016 – С. 52.
10. Жильцов, М.П. Стенд для проведения исследования ударных трибозаимодействий // Международная научная конференция перспективных разработок молодых ученых «Наука молодых – будущее России». – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2016. – С. 215–219.
11. Мишин, В.В. Приборная база для комплексного диагностирования подшипников // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – № 4 (288) – 2011 – С. 111–120.
12. Грязнов, М.И. Измерение параметров импульсов. – М.: Радио и связь, 1991. – 216 с.

Жильцов Михаил Петрович
ОГУ им. И.С.Тургенева,
г. Орёл
Аспирант кафедры ЭРиСС
Тел.: +79536291236
E-mail: mik2015zh@yandex.ru

Жидков Алексей Владимирович
ОГУ имени И.С. Тургенева,
г. Орёл
Аспирант кафедры ЭРиСС
Тел.: +79536222332
E-mail: alexeyzhidkov54@yandex.ru

Воронина Оксана Александровна
ОГУ им. И.С.Тургенева, г. Орёл
Кандидат технических наук, доцент,
доцент. каф. ЭРиСС
Тел.: +8-9065701666
E-mail: voronina_o_a@mail.ru

M.P. ZHILTSOV, A.V. ZHIDKOV, O.A. VORONINA

RESEARCH OF CONTACT INTERACTION THE SURFACES A SPHERE-FLAT SURFACES SEPARATED BY LAYER OF LUBRICANT

Abstract. *The results of theoretical and experimental studies of the contact interaction of bodies with the sphere-plane surfaces separated by a layer of a lubricating material are presented by an electroparametric method. A model of this interaction is proposed. The results of the analytical model and experimental studies are presented. Scaling of the proposed model, taking into account the features, will provide a deeper representation of the processes of interaction of bodies in such nodes as rolling bearings.*

Keywords: *contact interaction, lubricant, electroparametric methods, electrical resistance, pulse signal, rolling bearing.*

BIBLIOGRAPHY

1. Wear resistance of details of cars and mechanisms of studies. grant. / Bishutin S. – Bryansk: BGTU, 2010. – 112 p.
2. K.V. Podmasteryev Electroresistive method of complex diagnosing of support of a rolling//Monitoring. Diagnostics. – 2004. No. 9. P. 22–26.
3. K. V. Podmasteryev, Pakholkin E. V., Mishin V. V., Markov V. V. Diagnostic system for tribological research electrofluctuation methods//Control. Diagnostics. – 2000. No. 12. P. 19–21
4. O.V. Holodilov, S.V. Korotkevich, V.V. Kravchenko Diagnostics of a condition of rolling bearings: comprehensive approach//the Modern methods and devices of quality control and diagnostics of a condition of objects. – 2014. No. 5. P. 275–276.
5. Damage of bearings and their reason. / Auth. SKF. – SPb: SKF AB, 2002.
6. Fluid Film Lubrication. / A. Z. Szeri, 2011. – 547 p.
7. Advanced Transport Phenomena: Fluid Mechanics and Convective Transport Processes. / L.G. Leal, 2007.
8. Sliding friction and lubricant of solid bodies. / Bowden F.P. T.D. – Moscow, 1968. – 543 p.
9. Zhiltsov M. P., Zhidkov A.V., Vyyun S.S., Mishin V.V. The pilot studies of a shock tribo-interaction in electric parameters//9. The hydraulic theory of lubricant – XXI. The collection of theses of the international scientific symposium – Oryol: I.S. Turgeneva Regional Public Institution, 2016 – P 52
10. Zhiltsov M. P. The stand for carrying out a research of shock tribo-interaction//the International scientific conference A Promising developments of young scientists «Science of young people - the future of Russia». – Kursk: South Zap. state. un-t, 2016. – P 215–219.
11. Mishin V. V., Podmasteryev K. V., Markov V. V. Instrument base for complex diagnostics of bearings // Fundamental and applied problems of engineering and technology: Orel state University. I. S. Turgenev (eagle) ISSN: 2073-7408 – №4 (288)– 2011 – P. 111–120
12. Measurement of parameters of impulses. / Gryaznov M. – Moscow, 1991. – 216 p.

Zhiltsov Mihail Petrovich
Orel State University named
after I.S. Turgenev, Orel
Postgraduate at the Department
of electronics, radio engineering
and communication systems
Ph.: +79536291236
E-mail: mik2015zh@yandex.ru

Zhidkov Alexey Vladimirovich
Orel State University named after I.S.
Turgenev, Orel; Postgraduate at the
Department of electronics, radio
engineering and communication systems
Ph.: +79536222332
E-mail: alexeyzhidkov54@yandex.ru

Voronina Oksana Aleksandrovna
Orel State University named after I.S.
Turgenev, Orel
PhD, docent, Department of electronics,
radio engineering and communication
systems
Ph.: +8-9065701666
E-mail: voronina_o_a@mail.ru

МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ТУННЕЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА ЧЕРЕЗ СМАЗОЧНУЮ ПЛЕНКУ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ ОПОР КАЧЕНИЯ С ЖИДКОСТНОЙ И ПОЛУЖИДКОСТНОЙ СМАЗКОЙ

Аннотация: Представлена модель формирования дрейфового тока в технологических смазочных пленках высокочастотных трибосопряжений с жидкостной и полужидкостной смазкой, как следствия реализации туннельного эффекта. Показано, что туннельный ток существенным образом зависит от всплесков температуры в нагруженных зонах. При этом он оказывает влияние на результаты оценивания технического состояния опор качения. Модель может быть использована в целях технического диагностирования, а также снижения скорости изнашивания опор качения.

Ключевые слова: опоры качения, смазочные пленки, туннельный эффект, жидкостное трение, граничное трение, изнашивание, техническое диагностирование, технический контроль, контролируемая величина, фактор влияния.

Введение

К элементам высокочастотных трибосопряжений, разделяемых технологической плёнкой диэлектрика, относят, в частности, детали опор качения со слоем смазочного материала между ними [1]. При высоких частотах вращения опоры, таких как $(10 \dots 150) \times 10^3 \text{ мин}^{-1}$ и предельном отклонении h_m от соосности деталей всего в 1 мкм в опоре реализуется значительная динамическая нагрузка, характеризуемая кратностью отношения амплитуды w_m центробежного ускорения и стандартного значения ускорения g свободного падения:

$$K = \frac{h_m \omega}{g}, \quad (1)$$

где ω – циклическая частота вращения опоры.

В первом приближении отклонение от соосности, а следовательно, и толщину плёнки следует считать изменяющимися по гармоническому закону:

$$h = h_m \sin(\omega t). \quad (2)$$

Отклонению (2) соответствует ускорение

$$w = \frac{d^2 h}{dt^2} = -h_m \omega^2 \sin(\omega t) \quad (3)$$

где амплитуда ускорения составляет:

$$w_m = h_m \omega^2. \quad (4)$$

При повышенной частоте ω именно квадратичная зависимость w_m от этой частоты обуславливает рост кратности K (1) ускорения, а с ней – и рост динамической нагрузки на опору.

Повышенная динамическая нагрузка может вызывать разрушение опоры. Поэтому высокочастотные опоры, как правило, изготавливают с гарантированным натягом [2].

В результате конструктивного выбора зазора технологическая смазочная пленка уменьшается по толщине до субмикроразмеров. Ее образованию способствует вязкий гидродинамический эффект [3], сопровождаемый деформацией колец и тел качения вида (2), необходимый для затекания смазочного материала в зоны трения.

Техническое диагностирование (рисунок 1) [4] опор качения разнообразными электрическими методами [1] опирается на обусловленность [6] технического состояния опоры состоянием смазочной пленки 1, образующейся между кольцами 2 – 3 и телами качения 4 при вращении опоры на валу 5. Так, толщина смазочной пленки 1 определяет ее сопротивление, активное или емкостное, по значениям которого, измеренных при использовании токосъемного устройства 7, источника электричества 6, преобразователя электрического сигнала 8 и отсчетного устройства 9, осуществляют техническое диагностирование опор, работающих в режиме жидкостного либо граничного трения [7].

Процедура диагностирования, таким образом, сопряжена с протеканием через опору качения электрического тока. Электрический ток формируется под воздействием приложенного к опоре внешнего напряжения, либо в результате возникновения в ее зонах трения термо–эдс, либо трибо–эдс. Известно, что пленки смазочного материала могут также

обладать свойствами полупроводников. К таким свойствам относятся, например, односторонняя проводимость, а также наличие контактной разности потенциалов в зонах трения. Эта разность потенциалов также влияет на протекающий через опору качения ток. Электрический ток, таким образом, может быть током проводимости в случае, если смазочная пленка считается проводником электричества и ее сопротивление моделируется активным электрическим сопротивлением, либо током смещения, если смазочная пленка считается диэлектриком, а ее сопротивление моделируется электрической емкостью.

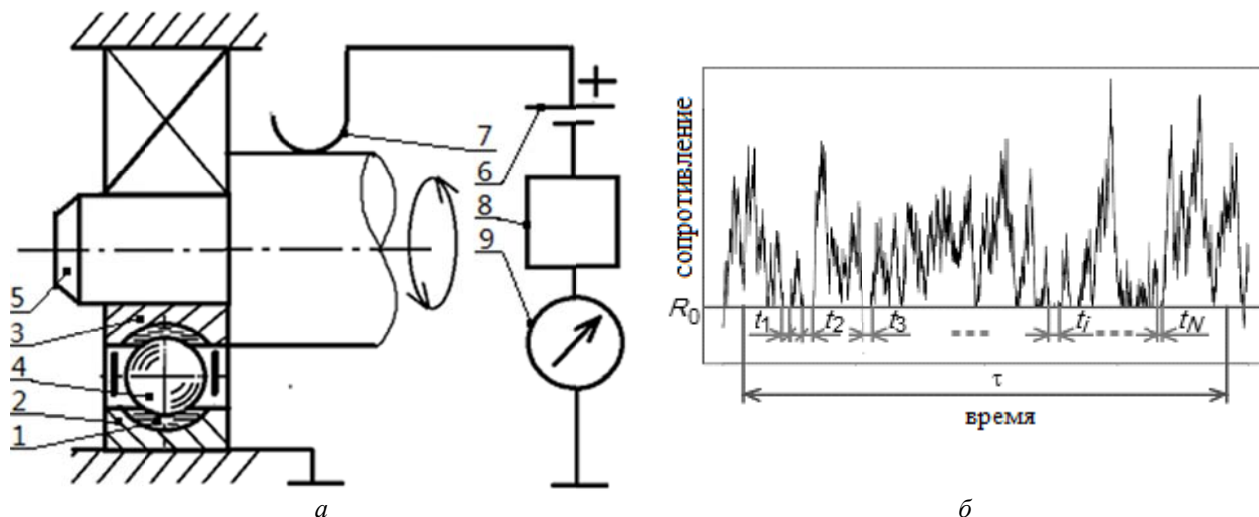


Рисунок 1 – Структурная схема средства диагностирования подшипниковых опор качения с жидкостной либо полужидкостной смазкой электрическим методом (а) и типичная временная диаграмма флуктуаций электрического сопротивления опор (б)

Если учитывать полупроводниковые смазочных пленок, то помимо тока проводимости и тока смещения в зонах трения возможно возникновение еще одной составляющей электрического тока. Это – туннельная составляющая, наиболее характерная для зон контакта полупроводниковых структур. Можно предположить, что наличие туннельной составляющей тока оказывает влияние на процедуру технического диагностирования опор качения. Проанализируем туннельный эффект, как возможный фактор влияния на подобную процедуру.

Анализ влияния туннельного тока на процедуру технического диагностирования опор качения с жидкостной и полужидкостной смазкой

Таким образом, природа изнашивания трущихся поверхностей опор качения обусловлена, в значительной степени, видом трения. Вид трения обуславливает характер изнашивания трущихся поверхностей опоры. При жидкостном трении преобладающим его видом может явиться усталостное изнашивание, связанное с переменным характером нагружения поверхностей, возникающим в связи с переменностью силовых факторов, действующих на опору, а также вращением самой опоры. В этом случае о снижении долговечности опоры можно судить по снижению усредненного значения толщины смазочной пленки опоры либо роста коэффициента модуляции флуктуаций этой толщины, о чем судят по увеличению электрической проводимости опоры, активной, либо емкостной [8], либо росту коэффициента модуляции флуктуаций проводимости. При этом преобразователь 8 электрического сигнала согласно схеме, изображенной на рисунке 1 (а) предназначен для измерения каких-либо из перечисленных параметров проводимости [9 – 10].

Туннельный эффект [11] относят к явлениям, близким к электрическому пробое токопроводящего вещества, т.е. сопровождается ростом электрической проводимости, не связанным напрямую с уменьшением толщины смазочной пленки, либо с ее флуктуациями, а также с техническим состоянием опоры качения. Несложно заметить, что в условиях наличия туннельной составляющей тока через опору измерение усредненных значений ее электрического сопротивления в целях контроля и диагностики может сопровождаться снижением достоверности оценки технического состояния опоры.

При измерении флуктуаций сопротивления туннельный эффект будет понижать как усредненное значение сопротивления, так и амплитуду его флуктуаций. Нелинейный

характер влияния туннельного тока на электрическое сопротивление [12] может вызывать как рост измеряемого коэффициента модуляции флуктуаций сопротивления, так и его снижение, что также может вызывать снижение достоверности оценки технического состояния опоры.

Разрушение смазочной пленки изменяет вид трения. Оно перестает быть жидкостным и становится близким к граничному. Нарушение сплошности смазочной пленки приводит к появлению прямого электрического контакта [13] между деталями 2; 3 и 4 подшипников (см. рисунок 1 (а)). В этом случае преобразователь сигнала 8 должен измерять величину нормированного интегрального времени t_{ni} такого электрического контактирования. Результаты этого измерения лежат в основе контроля и диагностирования подшипников, работающих в режиме полужидкостной смазки.

Величина нормированного интегрированного времени t_{ni} равна сумме моментов времени t_i электрического контактирования деталей подшипника, деленной на общее время τ измерений моментов t_i :

$$t_{ni} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{\tau}. \quad (5)$$

Рисунок 1 (б) содержит типичную временную диаграмму колебаний сопротивления опоры качения. При этом временем электрического контактирования следует считать интервалы времени t_i , в ходе которых электрическое сопротивление опоры оказывается меньшим некоторого экспериментально установленного порогового значения R_0 электрического сопротивления шарикоподшипника в соответствии с этим рисунком.

Нулевому значению времени t_{ni} соответствует жидкостное трения. Единичное значение времени t_{ni} реализуется, как правило, в условиях сухого трения. Значения этого времени из интервала $0 < t_{ni} < 1$ соответствуют трению, близкому к граничному.

Разрушение смазочной пленки при полужидкостной смазке может быть, в частности, обусловлено дефектами поверхности колец и тел качения опоры, связанными с их абразивным изнашиванием. При этом о снижении долговечности можно судить по росту нормируемого интегрального времени электрического контактирования деталей опор [14].

В целях анализа туннельного эффекта, как влияющего фактора, проанализируем процедуру измерения времени t_{ni} (5). На рисунке 2 изображена функциональная электрическая схема устройства [15] для измерения этого времени.

Устройство функционирует следующим образом [16, 17, 18]. От источника GB постоянного напряжения через опору качения BB пропускают электрический ток. Этот ток изменяется с течением времени, отслеживая функцию колебаний сопротивления смазочной пленки подшипника BB согласно рисунку 1 (б). Резистор $R1$ служит для ограничения тока через подшипник BB . Опора BB в то же время служит преобразователем электрического тока в электрическое напряжение. Регулируемый резистор $R3$ имитирует сопротивление опоры BB в условиях перехода смазки ее зон трения к полужидкостному виду. На этом резисторе формируется пороговое значение электрического напряжения, которое служит для сравнения с напряжением, падающим на самой вращающейся опоре BB . Резистор $R2$ служит для ограничения тока через резистор $R3$. Резисторы $R1$; $R2$; $R3$, а также подшипник BB формируют, таким образом, мостовую схему. Измерительная диагональ моста соединена входами устройства сравнения DA .

У компаратора DA имеются два состояния на его выходе. Их значения можно считать значениями логического нуля и логической единицы. Если напряжение на подшипнике BB меньше того напряжения, которое падает на резистор $R3$, то сопротивление опоры качения мало, что соответствует электрическому контакту его деталей. При этом устройство сравнения DA устанавливается в состояние логической единицы. Если напряжение на подшипнике BB больше, чем напряжение, которое падает на резисторе $R3$, то сопротивление опоры BB значительно и соответствует электрическому разделению ее деталей посредством смазочной пленки. В это время компаратор DA устанавливается в состояние логического нуля. Благодаря таким особенностям на выходе устройства сравнения DA формируется последовательность импульсов с амплитудой, равной логической единице и продолжительностями t_1 ; ...; t_i ; ...; t_N , которые равны длительностям отрезков времени разрушения смазочной пленки. Продолжительности времени t_1 ; ...; t_i ; ...; t_N , соответствуют, таким образом, отрезкам оси абсцисс, изображенным на рисунке 1 (б).

Генератор $GI1$ импульсов формирует строб-импульс единичной амплитуды, длительность времени τ которого равна времени однократного измерения нормированного интегрального времени $t_{ni}(5)$ электрического контактирования деталей опор качения.

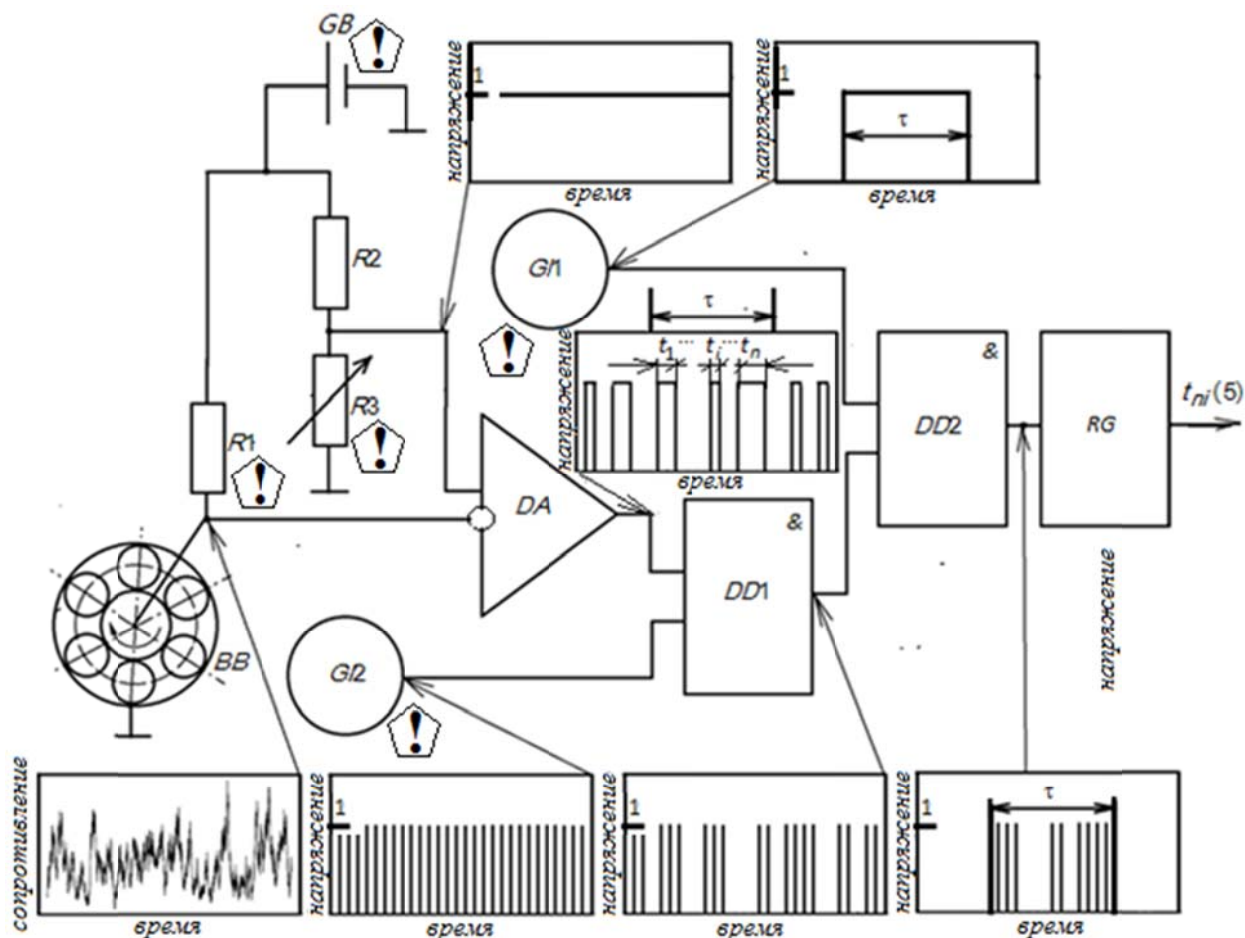


Рисунок 2 – Функциональная электрическая схема устройства для измерения нормированного интегрированного времени $t_{ni}(5)$ электрического контактирования деталей опор качения

Генератор импульсов $GI2$ формирует импульсы заполнения единичной амплитуды с периодом, существенно меньшим в сравнении с импульсом длительностью времени τ однократного измерения, формируемым генератором $GI1$.

Импульсы, сформированные компаратором DA , а также импульсы заполнения, сформированные генератором $GI2$, поступают на ячейку логического умножения $DD1$. Благодаря этому на выходе ячейки $DD1$ формируются последовательности импульсов с амплитудами, равной логической единице и продолжительностями времени $t_1; \dots; t_i; \dots; t_N$, равными длительностям отрезков времени разрушения смазочной пленки, причем эти импульсы заполнены импульсами от генератора $GI2$.

Импульсы от ячейки логического умножения $DD1$, а также строб-импульсы с длительностью τ , сформированные генератором $GI1$, поступают на входы ячейки логического умножения $DD2$. Благодаря этому на выходе ячейки $DD2$ формируется последовательность импульсов с амплитудой, равной логической единице, и продолжительностями $t_1; \dots; t_i; \dots; t_N$, равный длительностям времени разрушений смазочной пленки, причем эти импульсы заполнены импульсами от генератора $GI2$. Полная продолжительность такой последовательности не превышает продолжительность времени единичного измерения времени $t_{ni}(5)$.

Заметим, что если смазочная пленка непрерывно находится в стадии разрушения, то за время τ однократного измерения ячейка логического умножения $DD2$ пропустит некоторое число $N\tau$ импульсов заполнения от генератора $GI2$.

Устройство RG представляет собой счетчик числа импульсов заполнения, которые пропущены ячейкой логического умножения $DD2$. Устройство RG также делит отсчитанное

им число импульсов заполнения на максимально возможное их число N_t . Результат деления оказывается равным продолжительности нормированного интегрального времени t_{ni} (5) электрического контактирования деталей опоры, которое измеряется устройством, представленным на рисунке 2.

На этом рисунке специальным символом, пятиугольником с помещенным внутри него восклицательным знаком, отмечены элементы схемы, на функционирование которых может оказывать негативное воздействие туннельный ток, как фактор влияния.

К таким элементам относится напряжение источника GB , прикладываемого к опоре BB , а также сопротивление $R1$, ограничивающее ток через нее. Неправильный выбор этих напряжения и тока может привести к тому, что колебания тока через опору BB будут обусловлены формирующимся этими элементами туннельным эффектом, но не оцениваемыми колебаниями толщины смазочной пленки.

Неправильный выбор сопротивления $R3$, как сопротивления сравнения, имитирующего сопротивление перехода вида смазки от жидкостной к полужидкостной, может привести к тому, что прибор окажется настроенным не на минимальное сопротивление ненарушенной пленки смазочного материала, а на некоторую амплитуду импульсов туннельного тока, которые не связаны напрямую с параметрами состояния смазочной пленки.

Неверный выбор импульсов длительности строб-импульса от генератора $GI1$, как и длительности импульсов заполнения от генератора $GI2$ может привести к тому, что на показания прибора будет оказывать влияние распределение импульсов туннельного тока по длительностям и амплитудам.

При этом влияние туннельного тока на результат измерения нормируемого интегрального времени t_{ni} (5) контактирования деталей подшипника может усиливаться с ростом частоты ω вращения опоры, о чем свидетельствует ряд косвенных экспериментальных данных.

Фактически кратность K (1) ускорения оказывается намного большей значений из указанного выше диапазона, поскольку частотный спектр смещения h носит характер ударного, т.е. содержит частоты, которые многократно превышают частоту ω вращения кольца, принимаемую в модели ускорения (3) в качестве основной спектральной частоты. В плане повышения значений K следует упомянуть и такой процесс, как биение, который возникает при взаимодействии нескольких дефектов, образующихся на различных поверхностях опоры.

Таким образом, при работе высокоскоростных опор качения наличие даже относительно незначительного электрического контактирования их деталей может свидетельствовать о возникновении динамической нагрузки, существенно превосходящей расчетную квазистатическую.

Однако с ростом частоты вращения опоры происходит также увеличение градиента скорости относительного движения слоев смазочного материала вдоль толщи технологической пленки, что соответствует росту силы вязкого сопротивления смазочного материала движению тела качения, а следовательно, росту подъемной силы пленки, препятствующей ее разрушению при относительном движении тела качения и кольца и под влиянием механической силы, которая приложена к опоре извне, а также вследствие развития дефектов на поверхностях колец и тел вращения опоры.

Поэтому можно предположить, что высокоскоростные опоры качения работают в условиях реализации пренебрежимо малого времени t_{ni} (5) в сравнении с аналогичным временем для низкоскоростных опор.

Однако непосредственные эксперименты по измерению этого времени для подшипников качения электрошпинделей, которые используются в целях суперфинишной обработки поверхностей, с указанным выше частотным диапазоном эксплуатации, применением вязкого пластичного смазочного материала и при статической нагрузке, не превышающей 10 Н , выявили достаточно высокие значения этого времени, достигающие $0,0001...0,001$. Для сравнения, подобные же значения нормируемого интегрального времени наблюдались, в частности, у подшипниковых опор качения компрессоров воздушных и газовых, смазанных сравнительно маловязким маслом промышленным, с внутренним кольцом, приводимым во вращение синхронным электродвигателем с частотой 50 Гц , и неподвижным наружным кольцом, нагруженным радиальной силой, превышавшей 1 кН . При

этом ни у тех, ни у других опор качения в ходе их дальнейшей эксплуатации не наблюдалось каких-либо признаков приближения аварийной ситуации, таких как перегрев, появление посторонних звуков, рост вибрации, а самое главное – наблюдаемого дальнейшего роста нормируемого интегрального времени t_{ni} (5) электрического контактирования их деталей.

Кроме того, установлено, что снижение значений величины t_{ni} (5) для приработанных электрошпинделей в ходе возрастания частоты их работы наблюдается лишь до значений частот порядка $(1,5...20) \times 10^3 \text{ мин}^{-1}$, после чего рост частоты вращения до $(24...48) \times 10^3 \text{ мин}^{-1}$ вновь сопровождается ростом значений t_{ni} (5).

Подобные эксперименты позволяют предположить, что повышение проводимости технологической пленки высокоскоростных опор качения, ассоциируемое с разрушением смазочной пленки и электрическим контактированием их деталей, может быть обусловлено электрофизическими явлениями, которые протекают в смазочной пленке, не потерявшей своей сплошности.

В качестве одного из таких явлений может служить туннельный эффект. Рассмотрим модель туннелирования электрического заряда через технологическую смазочную пленку.

Модель одномерного туннелирования через технологическую пленку

Известно, что поведение квантовой частицы массой m с полной сохраняющейся энергией E_e вблизи одномерного потенциального барьера $U(x)$ эффективной шириной из диапазона координат от x_1 до x_2 , в пределах которой $E_e < U(x)$, и которой следует моделировать толщину смазочной пленки, описывается коэффициентом прозрачности барьера [19]:

$$D = \exp \left(-\frac{2}{\hbar} \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{2m[U(x)] - E_e} dx \right), \quad (6)$$

где $\hbar$ – нормированная на 2π постоянная Планка.

Поскольку смазочная пленка, как правило, представляет собой диэлектрик, то в результате поляризации этого диэлектрика образуется потенциальный барьер, который, вследствие малости толщины пленки в сравнении с радиусами кривизны тел качения, как и в случае с обычным конденсатором, можно моделировать по длине x квазиоднородным векторным полем электрической напряженности E . Величина E выступает в роли противогradientа потенциала $\phi(x)$:

$$E = -\text{grad } \phi(x), \quad (7)$$

что соответствует линейному возрастанию потенциала по ширине h барьера:

$$\phi(h) = |E|h + \phi_0, \quad (8)$$

где ϕ_0 представляет собой потенциал, сформированный при вращении опоры на одном из краев смазочной пленки, т.е. на поверхности кольца или тела качения подшипника качения. Величина ϕ может формироваться как термоэлектрическими и трибоэлектрическими явлениями в зонах трения опоры, так и напряжением, которое приложено к опоре от электрического измерительного прибора.

Потенциал $\phi(x)$ выступает в роли высоты $U(x)$ барьера, нормируемой на элементарный заряд q_e , а следовательно, высота $U(x)$ также может считаться линейно возрастающей по длине x барьера:

$$U(h) = q_e |E|h + q_e \phi_0, \quad (9)$$

где постоянная интегрирования может быть обращена в нуль соответствующим выбором начала отсчета потенциальной энергии $U(x)$, а также, сохраняющейся полной энергии E_e электрона.

Подстановка (9) в (6) с последующим интегрированием дает коэффициент прохождения через барьер вида:

$$D = \exp \left\{ -\frac{4\sqrt{2}}{3} \frac{\sqrt{m}}{q_e |E| \hbar} \left[\sqrt{(q_e |E|x_2 - E_e)^3} - \sqrt{(q_e |E|x_1 - E_e)^3} \right] \right\}. \quad (10)$$

В простейшем случае (10), если сохраняющуюся собственную энергию электрона E_e считать малой в сравнении с высотой барьера $q_e |E|x$ в пределах практически всей ширины x барьера, т.е. по всей толщине h технологической пленки от $x_1=0$ до $x_2=h_m$, выражение (10) упрощается к виду:

$$D = \exp \left\{ -\frac{2}{\hbar} \int_0^{h_m} \sqrt{2m(q_e |E|x_2)} dh \right\} = \exp \left(-\frac{4\sqrt{2}}{3} \frac{\sqrt{m}}{\hbar} \sqrt{U_m} h_m \right), \quad (11)$$

где U_m – максимальная высота потенциального барьера $U(x)$ (7), реализующаяся при $x=h_m$.

Вводя в (11) обозначение

$$\lambda = \frac{4\sqrt{2}}{3} \frac{\sqrt{m}}{h} \sqrt{q_e |E|}, \quad (12)$$

получаем экспоненциальную зависимость для D вида:

$$D = \exp\left(-\lambda h_m^{3/2}\right). \quad (13)$$

Следует оговорить, что в рассматриваемом приближении электрическое сопротивление металлических элементов опоры, в частности, тел качения и колец, считается пренебрежимо малым в сравнении с сопротивлением технологической пленки, а поэтому под величиной h_m понимается суммарная максимальная толщина пленок, образующаяся на поверхностях каждого из колец, которой моделируется длина произвольной токовой трубки, соединяющей оба кольца. Кроме того, в силу малости толщины технологической пленки в сравнении с радиусом тела качения, токовые трубки считаются радиальными. Трубка рассеяния, проходящими через воздух, рассматриваемая модель также пренебрегает.

Пусть за единичное время на сечении $ds = dydz$ произвольной элементарной токовой трубки, начинающейся на одном из колец в окрестностях точки с координатами $(y; z)$, которые отсчитываются по поверхности кольца, вблизи потенциального барьера D_m оказываются dN носителей заряда q_e . Тогда через сечение ds трубки, т.е., через элемент технологической пленки в нагруженной зоне, поддерживается электрический ток с плотностью:

$$J = D \frac{d(Nq_e)}{ds} = \exp\left(-\lambda h_m^{3/2}\right) \frac{d(Nq_e)}{ds}. \quad (14)$$

Через все нагруженные зоны опоры качения, т.е. через всю совокупную поверхность s смазочной пленки, разделяющей кольца с телами качения, с течением времени протекает ток:

$$i(t) = \int_s J(y; z; t) ds = q_e \int_s \exp\left[-\lambda h_m^{3/2}(y; z; t)\right] dN(y; z; t), \quad (15)$$

где $h_m(y; z; t)$ и $dN(y; z; t)$ – соответственно толщина смазочной пленки и число носителей заряда в точке поверхности кольца с координатами $(y; z)$ в момент времени t .

Следует заметить, что суммарное, с единицы площади поверхности s , число N носителей заряда, приближающееся к потенциальному барьеру, в отношении порядка оценивается числом Авогадро. Как показало численное моделирование (15), измеряя с помощью прибора среднеинтегральное за некоторое время τ значение I_0 тока $i(t)$ (15) в условиях относительно небольшой высоты U_m потенциального барьера в несколько электрон–Вольт, можно даже при малых D обнаруживать довольно значительные всплески туннельного тока, которые могут быть зафиксированы микро– и наноамперметрами с пределом основной относительной погрешности в несколько процентов. Подобное же явление наблюдается, например, при исследовании холодной электронной эмиссии [20] с потенциальным барьером U_m в несколько электрон–вольт [21].

Опираясь на полученные результаты, перейдем далее к вопросу о том, каким образом формируется нормируемое интегральное время электрического контактирования элементов трибоузла, которое вызвано кратковременными существенными превышениями мгновенных значений тока $i(t)$ его среднеинтегрального значения в условиях реализации смазки жидкостного вида.

Термозависимость интегрального времени электрического контактирования элементов трибоузла в модели с одномерным туннелированием

Следует подчеркнуть, что величина

$$J_0 = \frac{d(Nq_e)}{ds}, \quad (16)$$

входящая в качестве множителя в величину J (14), существенным образом зависит от температуры T .

Согласно закону Ричардсона–Дэшмена температурная зависимость этой величины выражается следующей формулой:

$$J_0 = A_{ex} T^2 \exp\left(-\frac{A_{ex}}{kT}\right), \quad (17)$$

где A – постоянный коэффициент;

k – постоянная Больцмана;

$A_{вых}$ – работа выхода электрона из материала опоры.

Поэтому трехкратному, например, превышению температуры в области какой-либо из зон контакта тела качения с кольцами над среднеинтегральным значением температуры по всей нагруженной зоне опоры (что может быть вызвано, например, попаданием дефекта в нагруженную зону при вращении опоры) будет соответствовать почти двухсоткратный рост величины J_0 над собственным среднеинтегральным значением. Фактический же рост температуры в зонах трения при этом может быть таковым, что отдельные микронеровности окажутся подвергнутыми локальному оплавлению или даже испарению. При этом ток $i(t)$ (15) может получить скачкообразное приращение своих мгновенных значений, достаточное для срабатывания измерителя нормируемого интегрального времени t_{ni} (5) электрического контактирования деталей опоры.

Представленные рассуждения позволяют рассматриваемые показания прибора как суммарное время температурных всплесков с превышением температурой некоторого порогового значения. Данная особенность разработанной модели в рамках оговоренных допущений может служить основой для контроля температуры в нагруженных зонах узлов трения, работающих с жидкостной смазкой.

Перестраивая значение порога срабатывания средства измерения интегрального времени электрического контактирования, и полагая все флуктуационные процессы, описывающие работу опоры, квазистационарными, можно получить также функцию распределения оценок температуры по шкале порядка в качестве дополнительного источника информации для оценки долговечности опоры.

Выше было показано, что с ростом частоты вращения опоры должен наблюдаться рост сил вязкого сопротивления движению тела качения со стороны смазочной пленки, сопровождающий снижение интегрального времени электрического контактирования. Однако дальнейшее повышение частоты вращения должно приводить к росту тепловыделения, а следовательно к появлению температурных всплесков в нагруженных зонах при попадании в них дефекта рабочей поверхности опоры. При этом показания средства измерения нормируемого интегрального времени электрического контактирования с ростом частоты вращения опоры вновь начинают повышаться, что и было зафиксировано в экспериментах с электрошпинделями.

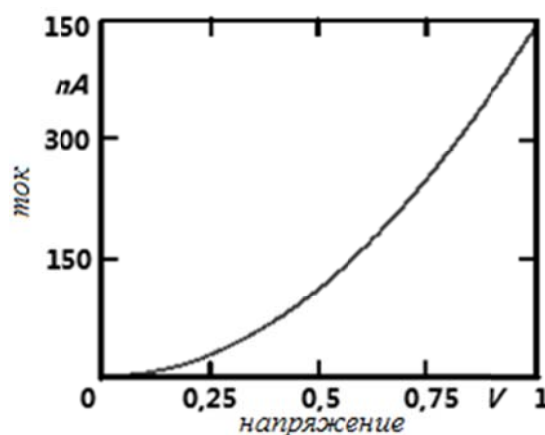


Рисунок 3 – Нелинейный характер типичной вольт-амперной характеристики шарикоподшипников 6013-2RS, эксплуатируемых с частотой 9000 мин^{-1} и смазанных жидким смазочным материалом Shell Turbo T-68

В пользу этого же вывода косвенным образом свидетельствует, в частности, нелинейный характер типичной вольт-амперной характеристики (рисунок 3) высокоскоростных подшипников качения 6013-2RS, эксплуатируемых с частотой 9000 мин^{-1} и смазанных жидким смазочным материалом Shell Turbo T-68. Непропорционально высокое возрастание триботока с ростом внешнего напряжения при этом полагается обусловленным температурным влиянием (15 – 17).

Следует заметить, что в зонах трения действуют генераторы заряда, обусловленные термоэлектрическими и трибоэлектрическими процессами. Поэтому описанные туннельные явления реализуются в трибоузлах также и естественным путем, без приложения внешнего напряжения от средства измерения нормируемого интегрального времени. Электрические

эквивалентные схемы подобных генераторов содержат источники напряжения, достигающего единиц и даже десятков вольт. Заряды, разделенные такими источниками и туннелировавшие через технологическую пленку, вовлекаются в дрейфовый ток, что ускоряет все виды коррозии.

Тепловыделение такого тока при кратковременных вспышках температуры в зонах трения приводит к истечению и испарению микрообъемов материала элементов трибоузла. Высокочастотное вращение опоры при каждом обороте возвращает зоны трения в нагруженную зону, что вызывает систематическое, т.е. усталостное изнашивание трущихся поверхностей. Взаимодействуя между собой, дефекты складываются в дислокации кристаллической решетки материала трибоузла. Дислокации формируют поверхностные усталостные микротрещины, в пределах которых со временем происходит выкрашивание материала. Выкрашивание ускоряет абразивное и тепловое изнашивание, что окончательно приводит к выходу опоры из строя.

Несложно заметить, что с целью уменьшения скорости изнашивания следует на самой ранней его стадии обеспечить управление протеканием туннельного тока, направляя его в обход зон трения [22]. В простейшем случае следует электрически соединять с корпусом трибоагрегата его высокоскоростные вращающиеся элементы посредством коллекторных узлов, содержащих, например, медно–графитовые щетки. При этом генераторы термоэлектричества и трибоэлектричества разряжают разделяемые ими заряды через ненагруженные зоны трения щеток, минуя нагруженные зоны ответственных элементов трибосопряжения, что замедляет темпы образования дефектов.

Выводы

Техническое диагностирование высокоскоростных подшипниковых опор качения электрическими методами может сопровождаться влиянием на результат оценки их технического состояния туннельной составляющей электрического тока через смазочную пленку, как в условиях реализации смазки жидкостного вида, так и при полужидкостной смазке.

Эксплуатация высокоскоростных подшипников с достаточно вязким смазочным материалом может происходить без разрушений высокоомной смазочной пленки. При этом приложение к опоре электрического напряжения сопровождается протеканием через опору тока, обусловленного туннельным эффектом носителей заряда через пленку и формированием ненулевых значений нормируемого интегрального времени электрического контактирования деталей опоры при сохранении жидкостного вида смазки.

Попадание дефекта в нагруженную зону при вращении опоры может вызвать кратковременную вспышку температуры. Высокая термочувствительность туннельного тока вызывает срабатывание средства измерения нормируемого интегрального времени электрического контактирования деталей опоры, настроенного на превышение контролируемым током через опору установленного порогового значения. При этом показания прибора оказываются интегральным временем превышения мгновенной температурой одной из нагруженных зон опоры некоторого порогового ее значения.

Разработанная модель может служить теоретическим обоснованием управления туннельными токами в высокочастотных трибосопряжениях с целью уменьшения скорости формирования дефектов в зонах трения, а также в целях оценки технического состояния зон трения высокоскоростных опор качения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по триботехнике: в 3 т. / Под общ. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе Т. 1: Теоретические основы / [Э. Д. Браун и др. (СНГ), Х. Кшеминьский–Фреда и др. (Польша)].–М.: Машиностроение, 1989.–400 с.
2. Справочник по триботехнике: в 3 т. / Под общ. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе Т. 2: Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения / [Э. Д. Браун и др. (СНГ), Х. Кшеминьский–Фреда и др. (Польша)].–М.: Машиностроение, 1990.–416 с.
3. А.с. СССР 769357, МКИЗ G 01 В 7/14. Способ контроля толщины диэлектрической смазки в подшипнике / Е.М.Санько, В.А.Широва.–Опубл. 07.10.80.–Бюл. № 37.
4. Подмастерьев, К.В. Установка для диагностики подшипников качения: Информ. листок № 44–07 / Центр научно–технической информации.–Орел, 1985.–4 с.
5. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 Т. / Под общ. Ред. В.В.Клюева.–Т. 5: В 2 кн.: Кн. 2: К.В.Подмастерьев, Ф.Р.Соснин, С.Ф.Корндорф, Т.И.Ногачёва, Е.В.Пахолкин, Л.А.Бондарева, В.Ф.Мужицкий. Электрический контроль.–2-е изд., испр.–М.: Машиностроение, 2006.–688 с.: ил и цветная вкладка 24 с.
6. Бударин, В.А. Метод расчета движения жидкости. – Одесса: Астропринт, 2006. 138 с.

7. Воронцов, Л.Н. Приборы автоматического контроля размеров в машиностроении: [Учеб. пособие для вузов].—М.: Машиностроение, 1988.— 279, [1] с.
8. Non-destructive testing and diagnostics: Edited by V.V.Klyuev and G.V.Zusman.—Russian Society for Nondestructive Testing and Technical Diagnostics: Moscow, Russia; Metrix Instruments Co, Houston, USA, 2004.—656 p.
9. А.с. СССР 1513384, МКИ³ G 01 M 13/04. Способ оценки состояния смазочной пленки подшипников качения / С.Ф.Корндорф, Т.И.Ногачева, В.Я.Варгашкин.—Опубл. 7.10.87.—Бюл. № 37.
10. А.с. СССР 1691701, МКИ³ G 01 M 13/04. Устройство для контроля подшипников качения / С.Ф.Корндорф, В.Я.Варгашкин.—Опубл. 16.11.91.—Бюл. № 42.
11. Яворский, Б. М. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов.—М.: Оникс, 2007.—С. 774.
12. Griffiths, David J. Introduction to Quantum Mechanics (2nd ed.). — Pearson Education International, 2005. — 484 p.
13. Блинов, А.Ф. Оценка возможности определения работоспособности подшипников качения // Стандартизация и измерительная техника: Труды / Красноярск: Красноярский политехнический институт, 1978.—Вып. 4.—С. 85 – 90.
14. Электрические методы трибодиагностики: учеб. пособие для вузов / К.В.Подмастерьев, Е.В.Пахолкин.—Орел: изд-во ОрлГТУ, 2010.—114 с.
15. Подмастерьев, К.В. Электрические методы комплексного диагностирования опор качения.—М.: Машиностроение – 1, 2001.—376 с.: ил.
16. Воронцов, Л. Н. Теория и проектирование контрольных автоматов: Учебное пособие для вузов.—М., 1980.—560 с., ил.
17. А.с. СССР 1707497, МКИ³ G 01 M 13/04. Способ контроля качества рабочих поверхностей подшипников качения / С.Ф.Корндорф, К.В.Подмастерьев, М.Г.Захаров, В.Я.Варгашкин.—Опубл. 23.01.90.—Бюл. № 3.
18. А.с. СССР 4769357, МКИ³ G 01 M 13/04. Устройство для контроля подшипниковых узлов / С.Ф.Корндорф, К.В.Подмастерьев, В.Я.Варгашкин.—Опубл. 27.03.93.—Бюл. № 9.
19. Razavy, Mohsen. Quantum Theory of Tunneling. — World Scientific, 2003. —Р. 4, 462.
20. Шешин, Е. П. Структура поверхности и автоэмиссионные свойства углеродных материалов.—М.: Издательство МФТИ, 2001. — 288с.
21. Шредник, В. Н. Автоэлектронная эмиссия // Физическая энциклопедия. — М.: Советская энциклопедия, 1988. —Т. 1.— С. 21.
22. Справочник по триботехнике: в 3 т. / Под общ. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе Т. 3: Триботехника антифрикционных, фрикционных и сцепных устройств. Методы и средства триботехнических испытаний / [Э. Д. Браун и др. (СНГ), Х. Кшеминьский—Фреда и др. (Польша)]. — 1992. — 730 с., [3] л. ил.

Варгашкин Владимир Яковлевич

ФГБОУ ВПО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроника, вычислительная техника и системы связи» института приборостроения, автоматизации и информационных технологий

302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95

Тел. +7-(920)-088-81-27

E-mail: finstp@bk.ru

V.Ya. VARGASHKIN

THE MECHANISM OF FORMATION OF THE TUNNEL COMPONENT OF ELECTRIC CURRENT THROUGH THE LUBRICANT FILM AT DIAGNOSING OF BALL-BEARING WITH LIQUID AND SEMI-LIQUID LUBRICANT

Abstract: *The model of formation of drift current in technological lubricant films of high-frequency ball-bearings with liquid and semi-liquid lubricant as consequences of realization of tunneling effect is presented. It is shown that tunnel current significantly depends on flashes of temperature in the forced zones of ball-bearing. At the same time he exerts impact on results of control of technical condition of ball-bearings. The model can be used for technical diagnosing of ball-bearings and also for reduction in the rate of their wear in the conditions of their operation.*

Keyword: *ball-bearing, lubricant films, tunnel effect, liquid friction, boundary friction, wear, technical diagnosing, technical control, controlled size, influence factor.*

BIBLIOGRAPHY

1. Spravotshnik po tribotekhnike: V 3 t. / Pod obstsh. red. M. Khebdy, A.V.Tshitshnadze T. 1: Teoretitsheskiye osnovy / [E. D.Braun i dr. (SNG), Kh. Ksheminskiy – Freda i dr. (Polsha)].—М.: Mashinostroyeniye, 1989.—С. 400.

2. Spravotshnik po tribotechnike: V 3 t. / Pod obstsh. red. M. Khebды, A.V.Tshitshnadze T. 2: Smazotshnye maaterialy, tekhnika smazki, opory katcheniya i skolzheniya, / [E. D.Braun i dr. (SNG), Kh. Ksheminskiy – Freda i dr. (Polsha)].–M.: Mashinostroyeniye, 1990.–S 416.
3. A.s. SSSR 769357, MKI³ G 01 B 7/14. Sposob kontrolya tolshtshiny dielektritshkoq smazki v podshipnike / E.M.Sanko, V.A.Shirova.–Opubl. 07.10.80.–Bul. № 37.
4. Podmasterev K.V. Ustanovka dlya diagnostiki podshipnikov katsheniya: Inform. Listok № 44–07 / Tsentr nautshno – tekhnitsheskoy informatsii.–Oryol, 1985.– S 4.
5. Nerazrushayustshiy kontrol: Spravotshnik: V 8 T. / Pod. Obshtsh. red. V.V.Klyuyeva.–T. 5: V 2 kn.: Kn. 2: K.V.Podmasteryev, F.R.Sosnin, S.F.Korndorf, T.I.Nogatshyeva, E.V.Pakholkin, L.A.Bondareva, V.F.Muzhitskiy. Elektritsheskiy kontrol.–2–ye izd., ispr.–M.: Mashinostroyeniye, 2006.–S. 688: il. I tsvetnaya vkladka S 24.
6. Budarin V.A. Method rastshyota dvizheniy zhidkosti. – Odessa: Astroprint, 2006. S. 138.
7. Vorontsov L.N., Korndorf S.F.. Pribory avtomatitsheskogo kontrolya v mashinostroyenii: [Utsheb. Possobiye dlya vtuzov].–M.: Mashinostroyeniye, 1988.–S 279, [1].
8. Non-destructive testing and diagnostics: Edited by V.V.Klyuev and G.V.Zusman.–Russian Society for Nondestructive Testing and Technical Diagnostics: Moscow, Russia; Metrix Instruments Co, Houston, USA, 2004.–656 p.
9. A.s. SSSR 1513384, MKI³ G 01 M 13/04. Spssob otsenki sostoyaniya smazotshnoy plyonki podshipnikov katsheniya / S.F.Korndorf, T.I.Nogatshyeva, Vladimir Ya.Vargashkin.–Opubl. 7.10.87.–Bul. № 37.
10. A.s. SSSR 1691701, MKI³ G 01 M 13/04. Ustroystvo dlya kontrolya podshipnikov katsheniya / S.F.Korndorf, Vladimir Ya.Vargashkin.–Opubl. 16.11.91.–Bul. № 42.
11. Yavorskiy B.M., Detlaf A.A., Lebedev A.K. Spravotshnik po fizike dlya inzhenerov I studenov vuzov.–M.: Oniks, 2007. –S. 774.
12. Griffiths, David J. Introduction to Quantum Mechanics (2nd ed.). — Pearson Education International, 2005. – 484 p.
13. Blinov A.F., Korndorf S.F., Shirova V.A. Otsenka vozmozhnosti opreredeleniya rabotospossonosti podshipnikov katsheniya // Standartizatsiya u izmeritelnaya tekhnika: Trudy / Krasnoyarsk: Krasnoyarskiy politekhnitsheskiy institut, 1978.–Vyp. 4.–S. 85 – 90.
14. Elektritsheskiye metogy tribodiagnostiki: Utshebnoye possobiye dla vuzov / K.V.Podmasteryev, E.V.Pakholkin.–Oryol: izdatelstvo OryolGTU, 2010.–S 114.
15. Podmasteryev K.V. Elektritsheskiye metody kompleksnogo diagnostirovaniya podshipnikov katsheniya.–M.: Mashinostroyeniye – 1, 2001.–S 376: il.
16. Vorontsov L.N., S.F.Korndorf, Yruten V.A., Fedotov A.V. Teoriya I proyektirovaniye kontrolnykh avtomatov: Utshebnoye possobiye dla vuzov.–M.: 1980.–S 560, il.
17. A.c. CCCP 1707497, MKI³ G 01 M 13/04. Spssob kontrolya katshestva rabotshikh poverkhnostey podehipnikov katsheniya / S.F.Korndorf, K.V.Podmasteryev, M.G.Zakharov, Vladimir Ya.Vargashkin.–Opubl. 23.01.90.– Bul. № 3.
18. A.s. SSSR 4769357, MKI³ G 01 M 13/04. Ustroystvo dlya kontrolya podshipnikovykh uzlov / S.F.Korndorf, K.V.Podmasteryev, Vladimir Ya.Vargashkin.–Opubl. 27.03.93.–Bul. № 9.
19. Razavy, Mohsen. Quantum Theory of Tunneling. — World Scientific, 2003. –P. 4, 462.
20. E. P. Sheshin. Struktura poverkhnosti I avtoemissionnyye svoystva uglerodistykh materialov.–M.: Izdatelstvo MFTI, 2001. –S 288.
21. Shrednik V.N. Avtoelektronnaya emissiya // Fizitsheskaya entsiklopediya.–M.: Sovetskaya entsiklopediya, 1988. –T. 1. –S. 21.
22. Spravotshnik po tribotekhnike: V 3 t. / Pod obstsh. red. M. Khebды, A.V.Tshitshnadze T. 3: Tribotekhnika antifriktsionnykh. Friktsionnykh I stsepykh ustreoystv. Metody I sredstva tribotekhnitsheskikh ispytaniy / [E. D.Braun i dr. (SNG), Kh. Ksheminskiy – Freda i dr. (Polsha)].–M.: Mashinostroyeniye, 1992. – S. 730, [3] l. il.

Vargashkin Vladimir Yakovlevitsh

Oryol State University named after I.S. Tourgueniev

PhD, Docent, Associate Professor associate professor of chair «Electronics, Radio technics and Communication systems» of Institute of Devices Making, Automatics and Information Technologies

95, str. Komsomolskaya, Oryol, 302026, Russia

Ph.: +7–(920)–088–81–27

E–mail: finstp@bk.ru

К ВОПРОСУ О ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕМ ЕДИНОЙ СИСТЕМЫ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ

Аннотация. *Использование современных геоинформационных технологий при разработке схем газоснабжения и газификации регионов дает возможность формирования базы для создания единой геоинформационной системы по объектам газораспределения России, что позволит значительно увеличить эффективность принятия решений по развитию сетевого газоснабжения и газификации регионов страны.*

Ключевые слова: *генсхема, газораспределение, газоснабжение, газификация, регион.*

Введение

Рост благосостояния и улучшение качества жизни граждан — первоочередные задачи для любого социальноориентированного государства. Газификация регионов страны является одним из наиболее масштабных и социально значимых направлений работы по их решению. Российская Федерация занимает одно из первых мест в мире по запасам и уровню добычи природного газа. Однако в России фактически отсутствует единая федеральная программа по газификации регионов.

Для решения задачи формирования такой программы, эффективного функционирования и развития как отдельно взятых региональных газотранспортных систем, так и газораспределительного комплекса страны в целом необходимо решить проблемы, связанные с неавтоматизированной подготовкой и обработкой данных, необходимых для определения потребности в сетевом природном газе различных категорий потребителей, процедурами их сбора, обработки и хранения, направленными на формирование генеральных схем газоснабжения и газификации регионов. Это позволит оптимизировать технические решения и выполнять корректировку предложений по развитию сетевого газоснабжения и газификации в субъектах РФ с учетом интересов потребителей смежных регионов, в том числе с использованием региональной ресурсной базы углеводородов. Кроме того, решение указанных проблем даст возможность сформировать базу для создания единой геоинформационной системы по объектам газораспределения России, в то время как существующие программные средства для определения потребности в природном газе, позволяют только выполнить расчеты для отдельных категорий потребителей.

Проектирование и строительство новых, реконструкцию и развитие действующих газораспределительных систем осуществляют в соответствии со схемами газоснабжения [1]. Генеральная схема газоснабжения и газификации (генеральная схема) — постоянно действующий и регулярно обновляемый информационно-аналитический документ, обосновывающий и определяющий основные направления перспективного развития и эксплуатации системы магистрального транспорта, распределения и использования газа в регионе или субъекте Российской Федерации [2]. Генеральные схемы должны корректироваться каждые 5 лет.

Цель данной работы заключается в разработке моделей описания, представления, хранения, получения и обработки исходных данных при формировании генеральных схем газоснабжения и газификации регионов. Этап моделирования является основой для последующей реализации автоматизированной системы, от полноты описания модели предметной области в значительной степени зависит адекватность принимаемых управленческих решений.

Основная часть

Разработка и реконструкция систем распределения газа предусматривает определение основных технических решений связанных с подачей сетевого газа потребителям и включает следующие этапы:

– определение потенциальных объектов системы распределения газа, сбор исходных данных о потребителях газа,

- определение расчетных нагрузок для проектируемых систем распределения газа,
- трассировка схем подачи газа потребителям и формирование генеральных схем.

Модель взаимодействия объектов информационной системы формирования генеральных схем во времени и обмена сообщениями между ними в виде UML–диаграммы последовательности показана на рисунке 1.

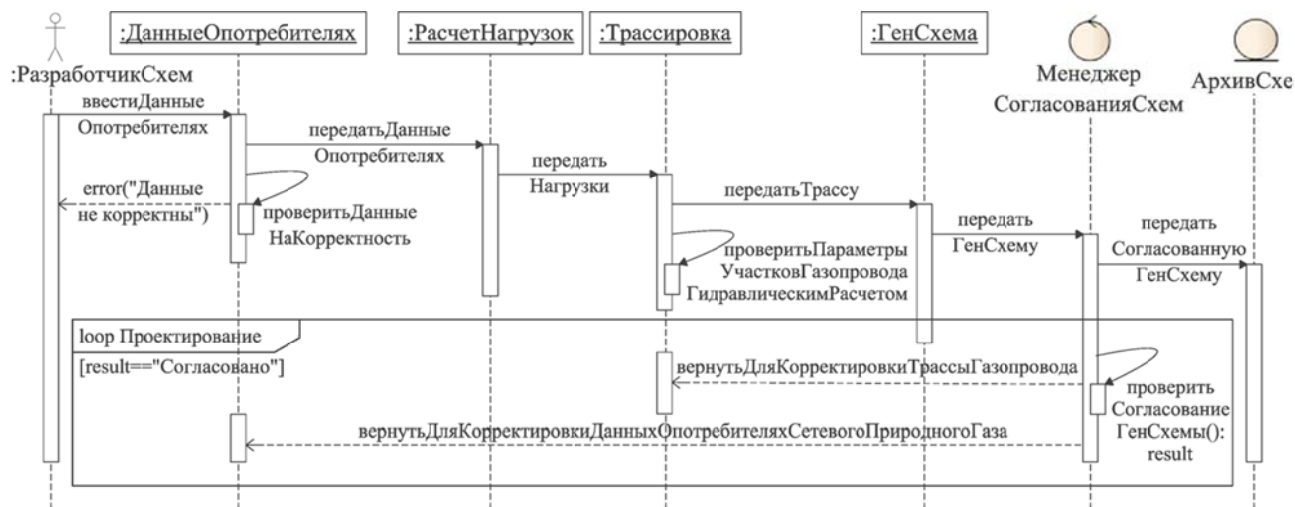


Рисунок 1 – Диаграмма последовательности выполнения работ при формировании генеральных схем

Расчет потребности в газе для каждого населенного пункта в районе (области, регионе) при разработке генеральных схем газоснабжения и газификации регионов может осуществляться по базовым показателям, из представленных на рисунке 2, в зависимости от категории потребителей с учетом специфики потребления газа и возможных трудностей при сборе исходных данных по каждой категории потребителей.



Рисунок 2 – Расчет расхода сетевого природного газа в населенном пункте

Газораспределительные сети являются типичным примером пространственных транспортных сетей [3], для анализа которых широко используется технология объектно-ориентированного построения информационных моделей реальных объектов. Объектно-ориентированное проектирование использует объектную декомпозицию, структура территориально-распределенной системы описывается в терминах объектов и связей между

ними. В процессе объектно–ориентированной декомпозиции система разделяется на объекты и их иерархические совокупности.

Газораспределительную сеть можно представить в виде иерархии объектов и классов. При этом информацию об объектах можно разделить на две части: пространственную (графическую) и непространственную или атрибутивную (семантическую). Между графическим (геометрическим) описанием объектов и атрибутами устанавливается связь.

В соответствии с концепцией объектно–ориентированного подхода сложные системы рассматриваются как иерархические, состоящие из взаимозависимых подсистем, которые в свою очередь также могут быть разделены на подсистемы. Данные об объектах газораспределительной сети, как показано на рисунке 3, можно представить в виде следующих составляющих: графического отображения, семантического описания и системы отношений (уровня в иерархической системе классификации объектов). Соответственно, при проектировании структуры классов газораспределительной системы как территориально–распределенного объекта целесообразно использовать абстрактный базовый класс системы, включающий три основных подкласса – класс графического отображения, класс семантического описания и класс отношений.

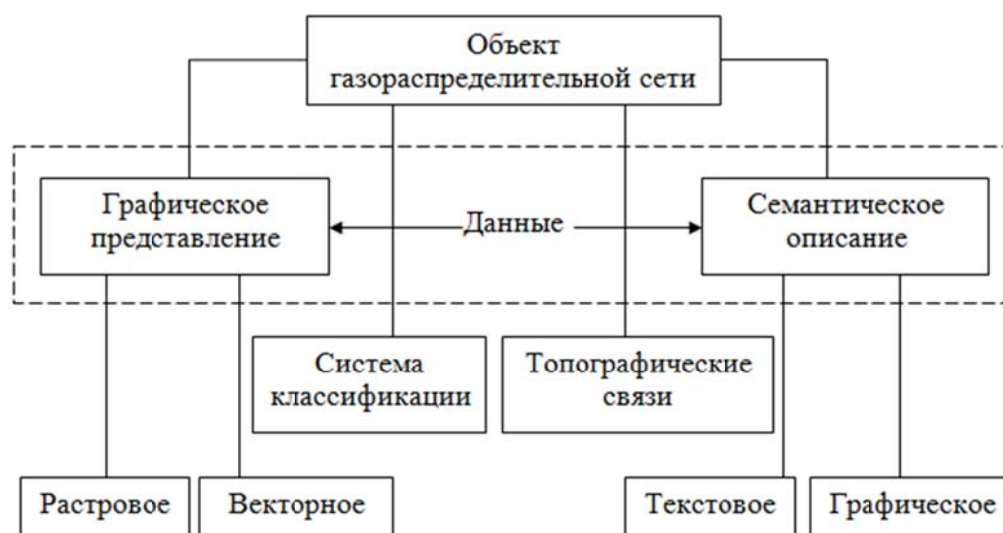


Рисунок 3 – Классификация видов и методов представления данных об объектах газораспределительной сети

Возможность структуризации моделируемых объектов на графические примитивы является основой для графического представления информации за счет использования специальных библиотек, например, библиотек условных знаков и библиотек графических элементов [4].

Технология разработки генеральных схем газоснабжения и газификации регионов, представленная на рисунке 4, определяет структуру и состав модулей информационной системы формирования генеральных схем.

Модульная организация информационной системы, разработанной в соответствии с принципами объектно–ориентированного программирования, представленная на рисунке 5, дает возможность ее модернизации и совершенствования.

Заключение

Полученные теоретические положения могут служить основой реализации автоматизированной системы расчета нагрузок для различных категорий потребителей при формировании генеральных схем газоснабжения и газификации регионов. Автоматизация обработки огромных потоков данных по потенциальным и существующим потребителям сетевого газа дает возможность формирования базы для создания единой геоинформационной системы по объектам газораспределения России.

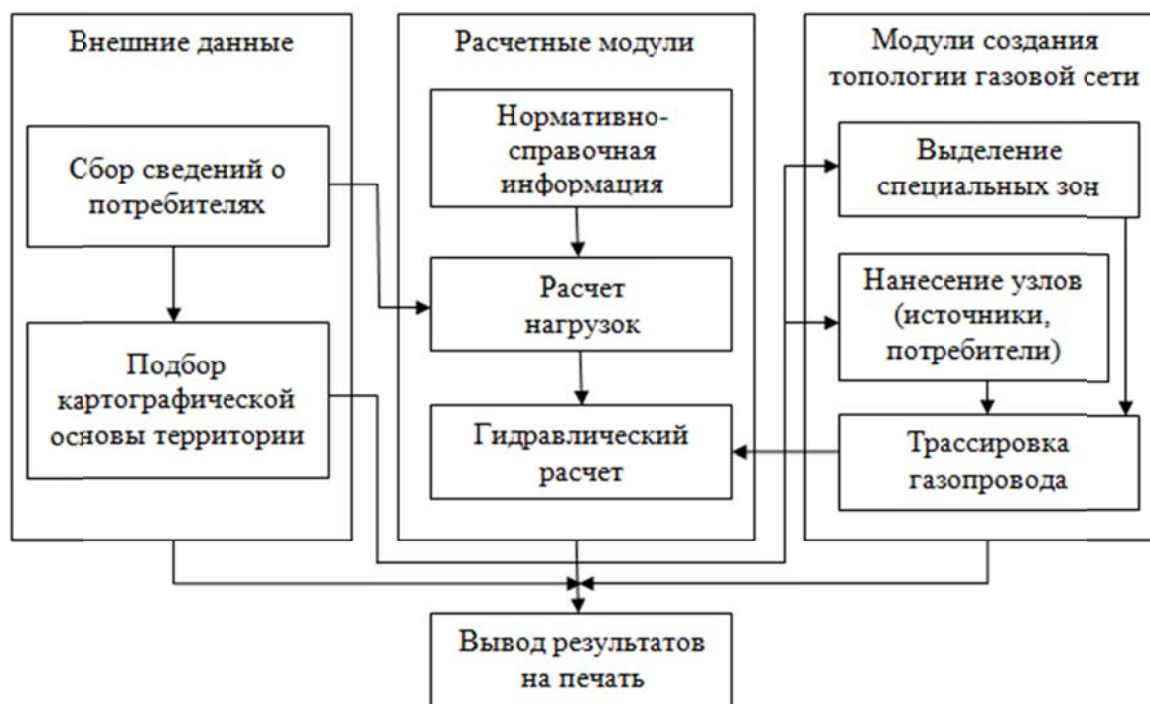


Рисунок 4 – Технология разработки генеральных схем газоснабжения и газификации регионов в информационной системе

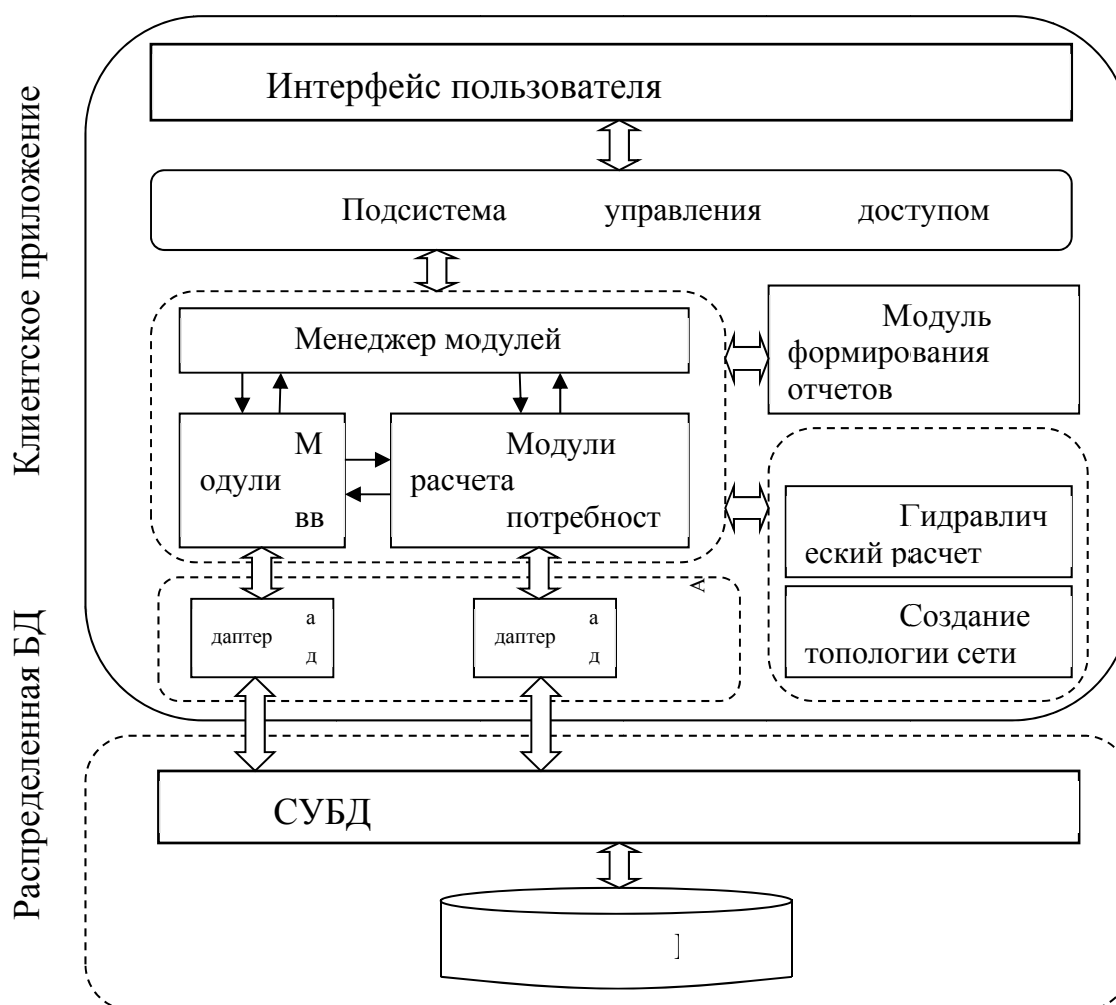


Рисунок 5 – Укрупненная схема взаимодействия модулей информационной системы

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 62.13330.2011. Газораспределительные системы.
2. СТО Газпром 2–2.3–670–2012. Правила разработки, утверждения генеральных схем, проектной документации на строительство систем газораспределения.
3. Королев, Ю.К. ГИС и инженерные коммуникации: общие положения. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rtv.kiev.ua/ecommm/GIS/FM/fm.htm>, свободный. – Загл. с экрана.
4. ГОСТ Р 51606–2000. Карты цифровые топографические. Система классификации и кодирования цифровой картографической информации.

Семина Елена Викторовна

ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», г. Орел

кандидат технических наук, преподаватель кафедры «Вычислительная техника и информационные технологии» ФСПО

302030, г. Орел, ул. Московская, 34

Тел. 8–953–474–64–76

E-mail: E.V.Semina@mail.ru

E.V. SEMINA

TO THE ISSUE OF IMPROVING THE EFFICIENCY OF MANAGEMENT OF THE NATIONAL GAS SUPPLY SYSTEM FUNCTIONING

Abstract. *The use of modern digital technologies in developing of schemes of gas supply and distribution in regions provides an opportunity for building a base for creating unified Geographic Information System by object of gas distribution facilities of Russia, which will significantly increase the effectiveness in decision-making in development of gas supply and gasification in the regions.*

Keywords: *general scheme, gas distribution, gas supply, gasification, regions.*

BIBLIOGRAPHY

1. SR 62.13330.2011 (SP – Set of Rules). Gas distribution systems.
2. The Gasprom standard 2–2.3–670–2012. The rules for the development, approved by the General schemes, construction documents for the construction of gas distribution systems.
3. Korolev, U.K. GIS and engineering communication: general provisions. [Electronic resource]. – Access mode: <http://rtv.kiev.ua/ecommm/GIS/FM/fm.htm>, free access.
4. GOST R 51606–2000 (GOST R – State Standard, Russian National Standard). Digital topographic maps. Classifying and encoding system for digital cartographic information. General requirements.

Semina Elena Victorovna

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel

PhD in Engineering, Lecturer of Department of Computer Science and Information Technology

302030, Orel, Moskovskaya St., 34

Ph.: 8–953–474–64–76

E-mail: E.V.Semina@mail.ru

Уважаемые авторы!
Просим Вас ознакомиться с основными требованиями
к оформлению научных статей

- Объем материала, предлагаемого к публикации, измеряется страницами текста на листах формата А4 и содержит от 4 до 10 страниц; все страницы рукописи должны иметь сплошную нумерацию.

- Статья предоставляется в 1 экземпляре на бумажном носителе и в электронном виде (по электронной почте или на любом электронном носителе).

- Водном сборнике может быть опубликована только **одна** статья **одного** автора, включая соавторство.

- Параметры набора. Поля: зеркальные, верхнее, левое, правое – 2 см, нижнее – 1,6 см, переплет – 0. Отступы до колонтитулов: верхнего – 1,25 см, нижнего – 0,85 см. Текст набирается в одну колонку, шрифт – Times New Roman, 12 пт. Отступ первой строки абзаца – 1,25 см. Выравнивание – по ширине. Междустрочный интервал – единичный. Включить автоматический перенос. Все кавычки должны быть угловыми (« »). Все символы «тире» должны быть среднего размера («–», а не «-»). Начертание цифр (арабских, римских) во всех элементах статьи – прямое (не курсив).

- Структура статьи:

УДК;

Список авторов на русском языке – **12 пт, ВСЕ ПРОПИСНЫЕ** в формате И.О. ФАМИЛИЯ **по центру без абзацного отступа**;

Название (не более 15 слов) на русском языке – **14 пт, полужирным, ВСЕ ПРОПИСНЫЕ по центру без абзацного отступа**;

Аннотация (не менее 200–250 слов) на русском языке – **10 пт, курсив**;

Ключевые слова на русском языке (не менее 3 слов или словосочетаний) – **10 пт, курсив**;

Текст статьи;

Список литературы (в порядке цитирования, ГОСТ 7.1–2003) на русском языке, заглавие списка литературы – **12 пт, полужирным, ВСЕ ПРОПИСНЫЕ по центру без абзацного отступа**, литература оформляется **10 пт**.

Сведения об авторах на русском языке – **10 пт**. Приводятся в такой последовательности:

Фамилия, имя, отчество;

учреждение или организация;

ученая степень, ученое звание, должность;

адрес;

телефон;

электронная почта.

- Название статьи, фамилии и инициалы авторов, аннотация, ключевые слова, список литературы (транслитерация) и сведения об авторах **обязательно дублируются на английском языке ЗА СТАТЬЕЙ**.

- Формулы набираются в редакторе формул Microsoft Equation. Размер символов: обычные – **12 пт**, крупный индекс – **9 пт**, мелкий индекс – **7 пт**. Нумерация формул – по правому краю в круглых скобках «()». Описание начинается со слова «где» без двоеточия, без абзацного отступа; пояснение каждого символа дается **с новой строки** в той последовательности, в которой символы приведены в формуле. Единицы измерения даются в соответствии с Международной системой единиц СИ.

- Рисунки – черно-белые. Если рисунок создан средствами MS Office, необходимо преобразовать его в картинку. Для растровых рисунков разрешение не менее 300 dpi. Подрисуточные надписи выполнять шрифтом **Times New Roman, 10 пт, полужирным, курсивным**, в конце точка не ставится.

- Рисунки с подрисуточной подписью, формулы, выравниваются **по центру без абзацного отступа**.

С полной версией требований к оформлению научных статей Вы можете ознакомиться на сайте <http://oreluniver.ru/public/file/science/journal/fipptt/>

Плата за опубликование статей не взимается.

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

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

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: tlostu@mail.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 25.10.2018 г.

Дата выхода в свет

Формат 60х88 1/8. Усл. печ. л. 11.

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