

*Редакционный совет*

**Голенков В.А.** д-р техн. наук, проф., председатель  
**Радченко С.Ю.** д-р техн. наук, проф., зам. председателя  
**Борзенков М.И.** канд. техн. наук, доц.  
**Астафичев П.А.** д-р юрид. наук, проф.  
**Иванова Т.Н.** д-р техн. наук, проф.  
**Киричек А.В.** д-р техн. наук, проф.  
**Колчунов В.И.** д-р техн. наук, проф.  
**Константинов И.С.** д-р техн. наук, проф.  
**Новиков А.Н.** д-р техн. наук, проф.  
**Попова Л.В.** д-р экон. наук, проф.  
**Степанов Ю.С.** д-р техн. наук, проф.

*Редколлегия*

*Главный редактор*  
**Степанов Ю.С.** д-р техн. наук, проф., заслуженный деятель науки Российской Федерации

*Заместители главного редактора*

**Гордон В.А.** д-р техн. наук, проф.  
**Киричек А.В.** д-р техн. наук, проф.  
**Подмастерьев К.В.** д-р техн. наук, проф.

*Члены редколлегии*

**Бабичев А.П.** д-р техн. наук, проф.  
**Вдовин С.И.** д-р техн. наук, проф.  
**Дмитриев А.М.** д-р техн. наук, проф., член-кор. РАН  
**Емельянов С.Г.** д-р техн. наук, проф.  
**Зубарев Ю.М.** д-р техн. наук, проф.  
**Зубчанинов В.Г.** д-р физ.-мат. наук, проф.  
**Иванов Б.Р.** д-р техн. наук, проф.  
**Колесников К.С.** д-р техн. наук, проф., академик РАН  
**Копылов Ю.Р.** д-р техн. наук, проф.  
**Корндорф С.Ф.** д-р техн. наук, проф.  
**Малинин В.Г.** д-р физ.-мат. наук, проф.  
**Мулюкин О.П.** д-р техн. наук, проф.  
**Осадчий В.Я.** д-р техн. наук, проф.  
**Панин В.Е.** д-р техн. наук, проф., академик РАН  
**Распопов В.Я.** д-р техн. наук, проф.  
**Смоленцев В.П.** д-р техн. наук, проф.

*Ответственный за выпуск*

**Григорьева О.Ю.**

*Адрес редакции*

302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
(4862) 41-98-48, 55-55-24, 41-98-03,  
43-48-90

www.ostu.ru

E-mail: met\_lit@ostu.ru

*Зарег. в Федеральной службе*

по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций. Свидетельство: ПИ № ФС77-35719 от 24 марта 2009 года

*Подписной индекс* **29504**

по объединенному каталогу «Пресса России»

© ОрелГТУ, 2010

## Содержание

Кафедра «Приборостроение, метрология и сертификация» сорок пять лет на поприще подготовки научных и инженерных кадров..... 3

### Испытания, контроль, диагностика и управление качеством

*Корндорф С.Ф., Жернова Л.А.* Исследование возможностей неинвазивных методов диагностики биоткани для контроля косметических процедур..... 7  
*Сычев С.Н., Подмастерьев К.В., С.Г. Пузырев* Экспериментальные исследования по определению адгезии компонентов моторных масел методом жидкостной хроматографии. Часть 2. Тестирование хроматографических колонок, заполненных опилками металлов..... 12  
*Шкатов П.Н.* Вихревой контроль металла высоконагруженных элементов роторов паровых турбин ТЭС..... 15  
*Анодина-Андреевская Е.М., Марусина М.Я., Марусин М.П.* Применение методов вейвлетного анализа сигналов в задачах технической диагностики ..... 21  
*Мишин В.В., Селихов А.В., Майоров М.В., Камыхин А.А., Шаталов К.В., Некрасов В.И.* Экспериментальное исследование электрического сопротивления (проводимости) подшипника качения как диагностического параметра..... 25  
*Пахолкин Е.В., Кобзев И.О.* Расчетно-экспериментальный метод оценки максимальной температуры в шарикоподшипнике. Часть 2. Применение диагностических параметров электрической группы..... 34  
*Бондарева Л.А., Войтевич В.Н.* Измерение биопотенциала растений: современное состояние и перспективы исследований..... 41  
*Гуженкова Ю.Г., Туликин Д.А.* Контроль влияния трения скольжения на износ зубчатых передач..... 44

### Приборостроение и биотехнические системы

*Распопов В.Я.* Состояние отечественной авиационной промышленности и авиационного приборостроения (обзор по материалам и экспонатам МАКС-2009)..... 48  
*Солдаткин В.М.* Модели количественной оценки уровня опасности отказов интегрированного комплекса бортового оборудования..... 53  
*Есипов В.Н., Незнанов А.И., Рыбин А.А.* Гидроакустические средства измерения негоризонтальности железнодорожного пути..... 60  
*Уткин Г.И., Чкан В.В., Марков В.В.* Процесс электрической эрозии разъемных контактов..... 67  
*Лукин М.В., Тюлякова Ю.Р., Казаков В.Ю.* Метод и средство измерения объемного расхода газа в процессах с малым газовыделением..... 72  
*Моисеев П.П.* Устройство функционального контроля узла сканирования с датчиком углового положения на элементе холла..... 81  
*Давыдова Н.В.* Анализ параметров емкостной измерительной ячейки, заполненной смазочным материалом..... 84  
*Милушин Н.Н.* Принцип построения фазогенераторного датчика контроля высокоскоростных электропроводящих объектов..... 89  
*Дунаев А.В., Егорова А.И., Жеребцов Е.А., Макаров Д.С.* Исследование возможностей тепловидения и методов неинвазивной медицинской спектроскопии в функциональной диагностике..... 95  
*Коржук Н.Л., Лисняк М.В., Поляков В.В.* Биотехническая системы диагностики и лечения нарушений биологических функций..... 101

### Конструирование, расчеты, материалы

*Шалобаев Е.В.* Модернизированные редукторы отечественного производства ..... 105  
*Шшикарев М.П.* Оптимизация эксплуатационных показателей адаптивной фрикционной муфты с бифункциональным управляющим устройством..... 112

### Машиностроительные технологии и инструменты

*Соловьев Д.Л., Киричек А.В., Силантьев С.А., Васильев А.В.* Поверхностное пластическое деформирование длинномерных отверстий ..... 115  
*Исаев А.Н., Земляной С.А., Федин Э.И.* Деформации и качество поверхности отверстий сварных труб, обработанных дорнованием..... 118

### Моделирование технологических процессов

*Серков Е.А., Васильев Е.Ю.* Разработка приложения для расчета сил и моментов резания..... 122

### Естественные науки

*Гулиев С.М.* Поперечный сдвиг кусочно-однородной упругой среды с трещинами..... 128  
*Бобров А.В.* Взаимодействие спиновых полей материальных объектов – фактор, контролирующий возникновение многоклеточных живых организмов..... 133  
*Савин Л.А., Майоров С.В., Журавлев В.И., Стручков А.А.* Конечно-элементная реализация расчета напряженно-деформированного состояния многослойных конструкций..... 136

## Editorial council

**Golenkov V.A.** *Doc. Sc. Tech., Prof., president*

**Radchenko S.Y.** *Doc. Sc. Tech., Prof., vice-president*

**Borzenkov M.I.** *Candidat Sc. Tech., Assistant Prof.*

**Astafichev P.A.** *Doc. Sc. Law., Prof.*

**Ivanova T.I.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*

**Kirichek A.V.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*

**Kolchunov V.I.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*

**Popova L.V.** *Doc. Sc. Ec., Prof.*

**Stepanov Y.S.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*

**Konstantinov I.S.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*

## Editorial Committee

### Editor-in-chief

**Stepanov Y.S.** *Doc. Sc. Tech., Prof., honored worker of science of Russian Federation*

### Editor-in-chief Assistants

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

**Kirichek A.V.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*

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

### Member of editorial board

**Babichev A.P.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*

**Vdovin S.I.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*

**Dmitriev A.M.** *Doc. Sc. Tech., Prof., Corresponding Member of RAS*

**Emelyanov S.G.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*

**Zubarev Y.M.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*

**Subchaninov V.G.** *Doc. Sc. Ph. - Math., Prof.*

**Ivanov B.R.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*

**Kolesnikov K.S.** *Doc. Sc. Tech., Prof., Academician of RAS*

**Korndorf S.F.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*

**Malinin V.G.** *Doc. Sc. Ph. - Math., Prof.*

**Mulyukin O.P.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*

**Osadchy V.Ya.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*

**Panin V.E.** *Doc. Sc. Tech., Prof., Academician of RAS*

**Raspopov V.Ya.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*

**Smolenzev V.P.** *Doc. Sc. Tech., Prof.*

### Responsible for edition

**Grigorieva O.Yu.**

### Address

302020 Orel,  
Naugorskoye Chaussee, 29  
(4862) 43-48-90, 41-98-48, 55-55-24,  
41-98-21

www.ostu.ru

E-mail: met\_lit@ostu.ru

Journal is registered in Federal Department for Mass Communication. The certificate of registration ПИ № ФС77-35719 from 24.03.2009

Index on the catalogue of the «**Pressa Rossi**» 29504

© OSTU, 2010

## Contents

Chair «Instrument making, metrology and certification» forty five years in a field of preparation of scientific and engineering shots..... 3

### Tests, control, diagnostics and quality control

*Korndorf S.F., Jernova L.A.* Research of possibilities the noninvasive methods of diagnostic the biological tissue for the control cosmetic procedures ..... 7  
*Sichev S.N., Podmasteryev K.V., Puzirev S.G.* Experimental researches on the definition of adhesion the components of motor oils the method of liquid chromatography. Part 2. Testing chromatography units, which is fill the sawdust of metals..... 12  
*Skatov P.N.* Eddy current control of metal высоконагруженных of elements of rotors of steam turbines tes.... 15  
*Anodina-Andrievskaya E.M., Marusina M.J., Marusin M.P.* Application of methods wavelet analysis of signals in technical diagnostics problems..... 21  
*Mishin V.V., Selihov A.V., Mayorov M.V., Katyhin A.A., Shatalov K.V., Nekrasov V.I.* Experimental research of electric resistance (conductivity) of bearing as diagnostic parameter..... 25  
*Pakholkin E.V., Kobzev I.O.* Rated-experimental method of the estimation of the maximum temperature in the ball-bearing. A part 2. Application of diagnostic parameters of electrical group..... 34  
*Bondareva L.A., Voitevich V.N.* Measuring the biological potential of plants: the contemporary condition and perspectives of researches ..... 41  
*Guzhenkova J., Tupikin D.* Control of influence of the sliding friction on eterioration of tooth gearings..... 44

### Instrument making and biotechnological system

*Raspopov V. YA.* State of the native aircraft and aircraft instruments making industries. (review on materials and exhibits of maks-2009)..... 48  
*Soldatkin V.V.* Models for quantitative estimation of the failure danger of the integrated airborne equipment complex..... 53  
*Esipov V.N., Neznanov A.I., Rybin A.A.* The hydroacoustic instruments for the disparity in levels of rails measurement..... 60  
*Utkin G.I., Chkan V.V., Markov V.V.* Process of electrical erosion the commutation contacts..... 67  
*Lunin M.V., Tulakova U.R., Kazakov V.U.* Method and means of measuring the volume expenditure of gas in the processes with small gas-extracting..... 72  
*Moiseev P.P.* Means for the functional control the unit of scanning with sensor of corner co-ordinates on the Holly's elements..... 81  
*Davidova N.V.* Analysis of parameters of capacity measuring cell, filled lubricating material..... 84  
*Milushin N.N.* Principle of construction the phase-generation sensor of control the high-speed electro conduction objects..... 89  
*Dunaev A.V., Egorova A.I., Zherebtsov E.A., Makarov D.S.* Research possibilities thermovisions and methods of noninvasive medical spectrophotometry in functional diagnostics..... 95  
*Korjhuk N.L., Polyakov V.V., Lisnyak M.V.* Biotechnical system of the diagnostics and treatments of the breaches binocular function..... 101

### Construction, calculation, material

*Shalobaev E.V.* Improved redactors of the native production..... 105  
*Shishkarev M.P.* Optimization of operation indexes of the adaptive frictional clutch with the bifunctional actuation device..... 112

### Machine building technology and toolware

*Solov'ev D.L., Kirichek A.V., Silant'ev S.A., Vasil'ev A.V.* Superficial plastic deformation lengthy apertures..... 115  
*Isayev A.N., Zemlyanoy S.A., Fedin E.I.* Strains and quality of the surface of holes the welded pipes treated of dornovanic..... 118

### Process modeling

*Serkov E.A., Vasiliev E.U.* Elaboration the packet of applied program for the calculation the forces and moments of cutting..... 122

### Natural science

*Guliev S.M.* Diametrical displacement of piece-homogeneous elastic environment with cracks..... 128  
*Bobrov A.V.* Factor controlling many-celled organisms is a spin-fields interactions of material objects..... 133  
*Savin L.A., Mayorov S.V., Juravlev V.I., Struchkov A.A.* Certainly-element realization of calculation of the is intense-deformed condition of multilayered designs..... 136

## КАФЕДРА «ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И СЕРТИФИКАЦИЯ» СОРОК ПЯТЬ ЛЕТ НА ПОПРИЩЕ ПОДГОТОВКИ НАУЧНЫХ И ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ

Кафедре «Приборостроение, метрология и сертификация» (ПМиС) Орловского государственного технического университета в 2010-м году исполнилось 45 лет. В течение почти полувека кафедра занимает лидирующие позиции в области подготовки учёных и инженеров в сфере общего и биомедицинского приборостроения, технической диагностики, контроля и испытаний, метрологического обеспечения, сертификации и управления качеством.

История кафедры ПМиС началась задолго до её официального открытия. В середине 1950-х годов Совет Министров СССР издал Постановление «О строительстве ряда крупных приборостроительных заводов». Это дальновидное решение правительства превратило город Орёл из небольшого «губернского», купеческого и разрушенного Великой Отечественной войной города в один из Всесоюзных центров приборостроительной промышленности. Орловский часовой завод «Янтарь», Орловский завод приборов, Орловский завод электронных приборов, производственное объединение «Научприбор» – вот далеко не полный перечень заводов, построенных в Орле к 1960-м годам.

Орловским заводам требовались инженеры – конструкторы, технологи, метрологи, испытатели. Поэтому в 1954-м году Всесоюзный заочный машиностроительный институт (ВЗМИ, а ныне – Московский государственный университет приборостроения и информатики – МГУПИ) открыл в г. Орле консультационный пункт, который в 1960 году был преобразован в общетехнический факультет.

В 1960 году состоялся первый набор студентов по специальности 0531 «Приборы точной механики» на вечернее отделение, а в 1962 году – на дневное отделение. Для подготовки инженеров-прибористов в октябре 1964 года, когда общетехнический факультет был преобразован в Орловский филиал ВЗМИ, началось формирование методического объединения «Приборы точной механики» – в феврале 1965 года на должность заведующего был приглашён главный конструктор Орловского часового завода «Янтарь» И.К. Ефремов.

Первый выпуск шестнадцати инженеров-механиков по специальности 0531 «Приборы точной механики» на вечернем отделении состоялся в 1966 году. Большинство выпускников к моменту вручения дипломов уже сложились как опытные специалисты, занимающие ответственные руководящие должности на предприятиях. В 1967 году состоялся первый выпуск инженеров на дневном отделении. Эти первые два выпуска были итогом большой и кропотливой организационной, методической и научной работы тогда ещё очень небольшого коллектива штатных преподавателей. А в июле 2010 года сделан 44-й выпуск прибористов!

За 45 лет работы заведующими, преподавателями и сотрудниками кафедры было много сделано для того, чтобы из методического объединения выросла одна из самых многочисленных и мощных кафедр вуза. В соответствии с направлениями развитием приборостроения изменялись решаемые кафедрой задачи, появлялись новые направления деятельности, изменялось название кафедры: «Приборы точной механики»; «Приборостроение»; «Приборостроение, метрология и сертификация».

Основатель кафедры к.т.н., доцент, ветеран Великой Отечественной войны И.К. Ефремов собрал богатейшую материально-техническую базу, обширное учебно-методическое и нормативно-техническое обеспечение, сплотил дружный коллектив преподавателей высшей квалификации, а самое главное – заложил добрые традиции, которые позволили и до сих пор позволяют кафедре оставаться одной из лучших выпускающих кафедр нашего университета.

Д.т.н. профессор С.Ф. Корндорф (заведующий кафедрой с 1979 г.) обогатил традиции кафедры «Приборостроение» лучшими чертами коренной российской интеллигенции, идущими ещё от учёных Императорского технического училища (в настоящее время – МГТУ имени Н.Э. Баумана). Под руководством этого выдающегося ученого и человека удалось за-

ложить необходимую методическую основу для подготовки весьма дефицитных на производстве специалистов нового типа – инженеров-электромехаников – квалифицированных специалистов, сочетающих глубокие знания в области точной механики со знаниями электроники и вычислительной техники. Под руководством С.Ф. Корндорфа на кафедре сформировалась и окрепла научная школа по направлению разработки электрофлюктуационных методов и средств технической диагностики, контроля и прогнозирования состояния веществ, материалов и изделий, технических и биологических систем. С 1986 года и по настоящее время научная школа С.Ф. Корндорфа практически ежегодно выпускает научно-педагогические кадры высшей квалификации – кандидатов и докторов технических наук.

Под руководством д.т.н. профессора К.В. Подмастерьева (заведующий кафедрой с 1992 г. по настоящее время) кафедра превратилась в один из наиболее квалифицированных и многопрофильных центров подготовки научных и инженерных кадров в области приборостроения, метрологии, биомедицинской инженерии, и управления качеством. Научный вклад кафедры ПМиС в развитие электрических методов неразрушающего контроля и диагностики признается не только в России, но и за рубежом. С 2005 года справочники и монографии, подготовленные учеными кафедры, выдерживают уже третье издание в России, изданы в США, ежегодно печатаются десятки научных статей и патентов, выполняются фундаментальные и прикладные исследования по различным научным программам и грантам.

Добрые традиции первых российских университетов бережно передаются от одного поколения преподавателей другому и обогащаются новыми инициативами. И сегодня на кафедре ПМиС работают её первые выпускники, всю свою трудовую жизнь подчинившие беззаветной службе родному городу и вузу, профессионализм, честность, высокие душевные качества и оптимизм которых до сих пор остаются образцом для нынешних студентов, аспирантов и теперь уже их выпускников – молодых преподавателей кафедры. Л.Д. Козлова, З.П. Лисовская, К.В. Подмастерьев, Т.П. Киселёва – эти имена известны всему университету. Ветераны кафедры ПМиС – это душа коллектива, его честь и совесть.

К 2010-му году на кафедре сложилась многоуровневая система подготовки специалистов. Выпускаются инженеры по специальностям «Приборостроение», «Инженерное дело в медико-биологической практике», «Управление качеством», бакалавры и магистры по направлениям «Приборостроение», «Биомедицинская инженерия», «Метрология, стандартизация и сертификация». Самое серьёзное внимание уделяется подготовке научно-педагогических кадров высшей квалификации – по трем специальностям послевузовского образования в аспирантуре обучается свыше 15 аспирантов и несколько докторантов.

Кафедра сегодня – это многопрофильное учебно-научное подразделение университета, профессорско-преподавательский состав которого сгруппирован в четыре методических объединения в соответствии с реализуемыми образовательными программами.

Методическое объединение «Приборостроение» возглавляется заведующим кафедрой, К.В. Подмастерьевым. Усилиями преподавателей выпускники-прибористы в нашем университете возведены на высокий уровень компетентности в сфере приборостроения, технологии и организации производства контрольно-измерительных приборов. Быть студентом-прибористом непросто, но очень почётно; немногие абитуриенты рискуют поступить на эту сложную специальность, но те из них, которым вручают дипломы о высшем образовании, готовы занимать ответственные должности на различных предприятиях страны, заниматься научными исследованиями, «стоять у штурвала» крупных организаций. «Какие могут быть у нас трудности, если мы закончили специальность «Приборостроение», – отшучиваются выпускники, когда приходят на кафедру и радуют преподавателей своими достижениями. Уровень подготовки специалистов в области приборостроения в ОрелГТУ признается одним из самых высоких в России, о чем свидетельствуют ежегодные призовые места в профессиональных олимпиадах и конкурсах выпускных квалификационных работ по приборостроению.

В 2000-м году на кафедре было сформировано методическое объединение «Биомедицинская инженерия». Оно объединяет преподавателей и ученых, ведущих подготовку бака-

лавров и магистров по направлению «Биомедицинская инженерия» и дипломированных специалистов по специальности «Инженерное дело в медико-биологической практике». Это, относительно «молодое» методическое объединение стремительно развивается. Активная научная работа в указанном направлении приносит свои результаты – к 2010-му году уже четыре выпускника по специальности «Инженерное дело в медико-биологической практике» – Е.В. Кузнецова, О.С. Петрова, М.В. Лунин и М.В. Яковенко – успешно защитили кандидатские диссертации и трудятся преподавателями кафедры. В 2009-м и 2010-м годах к.т.н., доцентом А.В. Дунаевым со студентами ЕА Жеребцовым и А.И. Егоровой стали победителями регионального этапа Всероссийского конкурса молодежных инновационных проектов «Зворыкинский проект» в номинации «Лучшая инновационная идея» (почетная грамота губернатора Орловской области). Развиваемый на кафедре ПМиС проект «Разработка метода и средства контроля реакции системы микроциркуляции крови для низкоинтенсивной лазерной терапии» отмечен дипломом участника в окружном молодежном инновационном конвенте Зворыкинского проекта Центрального федерального округа в 2009 году (Особая экономическая зона технико-внедренческого типа «Дубна», г. Дубна). В марте 2010 года студенты А.В. Козюра и Е.А. Жеребцов вошли в число 25 финалистов Международного конкурса «Европейские надежды инноваций», проходящего в рамках выставки инновационных проектов «Инновакт-2010» (Франция, г. Реймс), в которой приняли участие.

Высокий уровень подготовки специалистов по указанному направлению подтверждается призовыми местами на Всероссийских профессиональных олимпиадах и конкурсах. Так, например, по данным 2009-2010 годов студент Е.А. Жеребцов стал победителем Всероссийской студенческой олимпиады по направлению «Биотехнические системы и технологии», а студент А.В. Козюра – победителем Всероссийского конкурса выпускных квалификационных работ по указанному направлению.

Методическое объединение «Управление качеством» возглавляет к.т.н., доцент, заместитель директора Орловского представительства Академии стандартизации, метрологии и сертификации при Федеральном агентстве по техническому регулированию и метрологии Т.П. Киселёва. Методическое объединение включает в себя профессора Л.Д. Козлову, доцентов З.П. Лисовскую, В.В. Маркова, Н.В. Углову. Отличительными особенностями специальности «Управление качеством» являются уникальная квалификация «инженер-менеджер» и сугубо практическая направленность обучения. Свыше 90 % дипломных работ по данной специальности выполняются по реальным темам промышленных предприятий, внедряются в производство, многие студенты ещё на третьем-пятом курсах приглашаются руководителями заводов на работу по специальности, и совмещают учёбу с трудовой деятельностью. Студенты активно занимаются научной работой в области разработки теории оценивания качества производственных процессов. В рамках этого направления студенческая работа на тему «Методы оценивания результативности и эффективности процессов и систем менеджмента качества», выполненная в 2009-м году студентами А.А. Андриановым, Г.И. Уткиным и В.В. Чканом, признана лучшей на конкурсе «Интеллект и наука – 2009».

Методическое объединение «Метрология, стандартизация и сертификация» возглавляет ветеран кафедры к.т.н., доцент З.П. Лисовская. Совместно с к.т.н. доцентом Н.В. Угловой, руководителем метрологической службы ОрелГТУ Ж.А. Секаевой и к.т.н., доцентом, главным метрологом ЗАО «Протон-Импульс» В.Н. Сковпенем осуществляется формирование концепции метрологической подготовки специалистов всех специальностей университета, курирование в данной области методической работы его филиалов, реализация образовательной программы по направлению «Метрология, стандартизация и сертификация».

Ведущие преподаватели кафедры поводят активную научно-общественную и просветительскую работу в регионе. С 2004 года на базе кафедры в рамках дополнительного профессионального образования проводится повышение квалификации специалистов в области метрологии, стандартизации и управления качеством, с 2008 г. – в области медицинской техники, а с 2010 г – по программам практического внедрения методов менеджмента качества и моделей делового совершенства в производственные процессы

Уникальный статус университета – учебно-научно-производственный комплекс – самым непосредственным образом отражается на деятельности кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация». В настоящее время состав кафедры входят научные и производственные подразделения, позволяющие не только повысить качество знаний выпускников, но и значительно сократить сроки внедрения научных результатов в производство. На кафедре уже второе десятилетие действует Орловский региональный центр коллективного пользования контрольно-измерительным и испытательным оборудованием, научно-исследовательская лаборатория биофизических исследований, с 1999 года функционирует студенческое конструкторское бюро, а в 2009-м году открыты два научно-образовательных центра (НОЦ). Первый из них, НОЦ «Диатрансприбор», открыт совместно с Институтом транспорта и объединяет учёных, инженеров и студентов, занимающихся проблемами мониторинга, неразрушающего контроля и технической диагностики средств транспорта и механизмов машин, технических и мехатронных систем.

Ввиду необходимости дальнейшей консолидации усилий по развитию направления «Биомедицинская инженерия» в регионе на базе кафедры создан научно-образовательный центр «Биомедицинская инженерия» (НОЦ БМИ). Его целью является развитие научного направления по созданию методов и средств контроля для биомедицинской инженерии, коммерциализации наукоёмкой продукции, укрепления материально-технической базы подготовки специалистов всех уровней, расширения международного сотрудничества в образовательной, научной и инновационной деятельности в области биомедицинской инженерии. Одной из приоритетных задач НОЦ БМИ является вовлечение студентов и аспирантов кафедры к научно-исследовательской и инновационной деятельности. За столь малый срок своего существования НОЦ БМИ начал сотрудничество с различными научными, лечебными и учебными организациями России. Сегодня ведутся совместные работы в области научных исследований и образовательных программ в рамках договоров о научно-техническом сотрудничестве с Московским областным научно-исследовательским клиническим институтом им. М.Ф. Владимирского, Медицинским институтом Орловского государственного университета, ОГУП «Медтехника», Калужским медико-техническим лазерным центром Лазерной академии наук Российской Федерации и рядом других предприятий и организаций страны.

Свой юбилей кафедра ПМиС встречает в нелёгкое для отечественного приборостроения время. Однако нужно надеяться, что приборостроение – одна из ведущих отраслей экономики государства – неизбежно займёт те позиции в экономике, которое оно должно занимать в сильной, богатой ресурсами и традициями Российской державе.

Настоящий номер журнала включает, в основном, статьи ведущих ученых, докторантов и аспирантов кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация», а также работы наших коллег из ведущих вузов, с которыми в научном и учебно-методическом планах кафедра тесно сотрудничает.

*Редакционный совет научных периодических изданий ОрелГТУ, редколлегия журнала «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии» сердечно и искренно поздравляют коллектив кафедры с ее юбилеем и желают дальнейших успехов на поприще подготовки научных и инженерных кадров.*

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

УДК 681.2.082.615.849

С.Ф. КОРНДОРФ, Л.А. ЖЕРНОВА

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ НЕИНВАЗИВНЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ БИОТКАНИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КОСМЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕДУР**

*При проведении косметических процедур важно знать об их эффективности и безопасности, а так же о процессах, происходящих в биотканях. Наиболее перспективными считаются неинвазивные методы, позволяющие исследовать воздействие косметических средств на параметры кожи.*

**Ключевые слова:** *кожа, фотометрия, диагностика, косметическая процедура, неинвазивный метод*

*In carrying out cosmetic procedures is important to know about their efficacy and safety, as well as on the processes occurring in biological tissues. Therefore the noninvasive methods, allowing to investigate influence of cosmetic means for skin parameters are considered as the most perspective.*

**Key words:** *skin, phometry, diagnostics, cosmetic procedure, a noninvasive method*

Современный этап развития производства в косметологии характеризуется изменением структуры производства и потребления современных косметических средств, ассортимент которых постоянно совершенствуется и обновляется благодаря разработке и промышленному освоению новых видов сырья и технологий. Расширение и обновление существующего ассортимента, с одной стороны, позволяет удовлетворять растущие потребности населения в современных высоко эффективных косметических средствах полифункционального типа действия, с другой стороны, повышает вероятность возникновения нежелательных побочных эффектов [1].

Эффект действия большинства косметических средств направлен на улучшение состояния кожи и ее параметров. Кожа, как известно, это наружный покров тела человека, который выполняет разнообразные функции, защищая организм от разрушительных факторов окружающей среды, участвуя в обмене веществ и выделении продуктов метаболизма, в терморегуляторных процессах и перераспределительных реакциях кровеносной системы [2].

Самым грубым слоем, подвергающимся косметическому воздействию, является эпидермис, который состоит из пяти слоев клеток, отличающихся количеством рядов и формой клеток, а также их цитологической характеристикой: рогового, блестящего, зернистого, шиповатого (шиповидного), базального (зародышевого). Эпидермис лишен кровеносных сосудов, и его питание происходит тканевой жидкостью, которая пропитывает межклеточные промежутки. Следующим слоем биоткани является дерма, которая пронизана сетью кровеносных сосудов. Микроциркуляция крови существенно влияет на поглощение оптического излучения кожей.

Установлено, что физиологическое состояние кожи очень информативно с точки зрения общего состояния организма. Раздражение биологически активных точек и зон, находящихся в кожном покрове, приводит к изменениям в различных внутренних органах, что открывает возможность использования функционального состояния кожи в диагностических, дозиметрических и лечебных целях, а также эффективнее и целенаправленнее использовать различные средства лечения, что может положительно повлиять на лечение многих заболеваний [2].

Самым широко распространенным методом анализа состояния кожи при использовании косметических средств является визуальный. Существует несколько видов систем тес-

тирования, позволяющих быстро и комфортно проводить оценку внешнего вида кожи. Анализ строится на двух основных параметрах: топография поверхности и цвет кожи. Но на результат влияет небольшая разрешающая способность зрения и субъективность оценки.

Биоинженерные методы, приведенные в таблице 1, позволяют проводить более эффективные исследования кожи *in vivo*:

Таблица 1 – Биоинженерные методы диагностики кожи *in vivo* при проведении косметических процедур

Наименование метода	Измеряемый параметр	Принцип измерения	Применение в косметологии
1	2	3	4
Корнеометрия	Увлажнение (гидратация) рогового слоя	Измерение уровня гидратации кожи основано на широко известном методе измерения диэлектрической постоянной рогового слоя.	Диагностика сухости кожи, контроль эффективности косметических процедур
Себуметрия	Количество кожного сала	Метод измерения количества кожного сала на поверхности кожи, волос и волосистой области головы основано на хорошо известном фотометрическом анализе: кожное сало адсорбируется на специальной ленте которая меняет свою прозрачность	Диагностика сухости кожи, контроль эффективности косметических процедур
Теваметрия	Трансэпидермальная потеря воды (ТЭПВ, TEWL)	ТЭПВ вычисляется по закону диффузии Фика по градиенту плотности водяных паров	Диагностика сухости кожи, контроль эффективности и безопасности косметических процедур
Мексаметрия	Количественное определение меланина и эритемы	Методом биофотометрии оценивается цвет кожи на основании двух главных хромофоров: меланина (пигментация) и гемоглобина (покраснение)	Контроль безопасности косметических процедур, контроль эффективности отбеливающих процедур,
pH-метрия	Кислотно-щелочной баланс поверхности кожи	Используется жидкий стеклянный электрод (Hg/Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> или Ag/AgCl), контактирующий с поверхностью кожи, по величине химической реакции оценивается pH.	Диагностика сухости кожи, контроль эффективности косметических процедур
Кутометрия	Упругость и эластичность кожи	Кожа всасывается в полость датчика, в котором создается отрицательное давление до 500 мбар. После сброса давления кожа возвращается в исходное состояние (релаксирует). Высота бугорка кожи при всасывании и при релаксации определяется бесконтактной оптической системой.	Определение биологического возраста кожи, оценка эффективности anti-age терапии
Термометрия	Температура кожи	При помощи инфракрасного сенсора улавливается температура кожи	Контроль безопасности косметологических процедур

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4
Фрикциометрия	Адгезивные свойства, шелушение, рельеф	Метод фрикциометрии основан на измерении сопротивления вращающегося-муся тефлоновому диску. Чем больше трения возникает между кожей и стандартной поверхностью кожи – тем медленнее вращается диск. Соответственно сила трения зависит от ряда факторов: рельеф кожи, ее шелушение и общей адгезивной способности кернеоцитов.	Оценка грубости или шероховатости кожи, эффективности косметических процедур
Ревискометрия	Акустические свойства	Измерение скорости распространения акустической волны после воздействия на нее коротким импульсом :	Определение биологического возраста кожи, оценка эффективности anti-age терапии

Наиболее перспективными на наш взгляд, с точки зрения применения в косметологии, являются исследования оптических параметров кожи и фотобиологических процессов. В основе их лежат фотофизические и фотохимические реакции, возникающие в организме при воздействии света. Фотофизические реакции обусловлены преимущественно нагреванием объекта до различной степени (в пределах 0,1 – 0,5 °С) и распространением тепла в биотканях. Разница температуры более выражена на биологических мембранах, что ведет к оттоку ионов Na<sup>+</sup> и K<sup>+</sup>, раскрытию белковых каналов и увеличению транспорта молекул и ионов. Поглощенная часть световой энергии может быть преобразована в молекулах биологического вещества в энергию колебательных процессов, электронного возбуждения или диссоциации молекул, переводя те или иные биологические соединения в активное состояние или инактивируя их. Другая часть поглощенной энергии идет на возбуждение флуоресценции и фосфоресценции в тканях [3].

Величина поглощенной биотканями энергии ( $\Phi_{ногл}$ ) приближенно исчисляется как разность между падающей ( $\Phi_{над}$ ) и отраженной ( $\Phi_{отр}$ ) частями энергии светового потока [3]:

$$\Phi_{ногл} = \Phi_{над} - \Phi_{отр} = \Phi_{над} \cdot [1 - \rho(\lambda)], \quad (1)$$

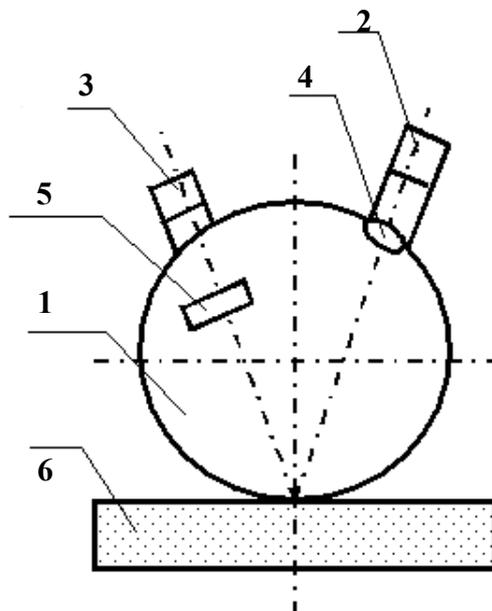
где  $\lambda$  – длина волны;

$\rho(\lambda)$  – спектральный коэффициент отражения.

Спектральные коэффициенты отражения  $\rho(\lambda)$ , пропускания  $\tau(\lambda)$  и поглощения  $\alpha(\lambda)$  качественно и количественно характеризуют в целом оптические свойства биоткани при ее толщине и других характеризующих ее параметрах на момент измерения (степень пигментации, характеристика кровоснабжения и т.д.). Например, по данным [4] установлено, что максимум пропускания кожей излучения оптического диапазона находится в области 1,1 мкм, а отражение излучения от поверхности непораженной кожи носит диффузный характер и составляет от 35 до 40 %.

В работе [5] сообщается, что в зависимости от участка тела, направлений линий натяжения кожи, ее состояния, коэффициенты отражения некоторых участков тела отличаются от усредненных значений на 6 – 7 %.

Наиболее просто и информативно позволяет провести анализ оптических параметров биоткани метод биофотометрии, основанный на регистрации отраженного излучения поверхностью кожи. Обобщенная схема биофотометра приведена на рисунке 1.

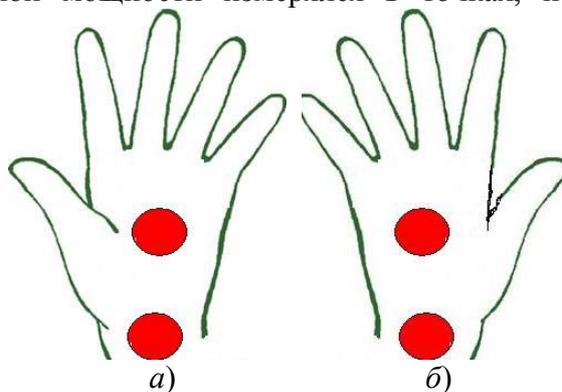


**Рисунок 1 – Обобщенная схема биофотометра:**  
 1 – интегрирующая сфера; 2 – светодиод; 3 – фотодиод; 4 – фокусирующая линза;  
 5 – светофильтр; 6 – биоткань

Методика измерения коэффициента отражения от объекта заключается в следующем. Выходное отверстие интегрирующей сферы прикладывается к биоткани, при этом часть падающего потока излучения поглощается, а часть отражается, диффузно рассеивается и, попадая в полость сферы, интегрируется в ней. Светочувствительная площадка фотозлемента, расположенная на внутренней поверхности сферы, равномерно освещается, при этом на выходных клеммах фотодиода появляется электрический сигнал, пропорциональный отраженной от объекта части падающего излучения.

Для изучения изменения оптических характеристик кожи при использовании косметического увлажняющего крема проведен ряд тестовых экспериментов на аппарате МИЛ-терапии с биофотометром «МИЛТА-Ф-8-01».

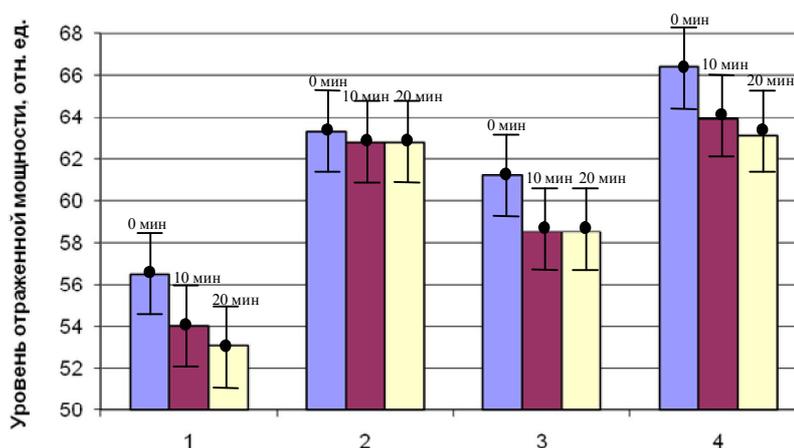
Уровень отраженной мощности измерялся в точках, показанных на рисунке 2.



**Рисунок 2 – Точки измерения уровня отраженной мощности кожи тыльной (а) и ладонной (б) стороны кисти**

Перед началом исследований в аппарате задавались следующие настройки: уровень заданной мощности ИК-светодиодов - 100 мВт, уровень мощности лазерного излучения - 0 мВт, время проведения исследования - 5 мин. Таким образом, АЛТ «МИЛТА-Ф» во время проведения экспериментов работал в режиме биофотометра.

Исследуемые поверхности кожи обрабатывались 70 % раствором этилового спирта, за 10 мин до начала измерения, после которых на исследуемые области был нанесен увлажняющий крем «Бархатные ручки». Через 10 и 20 мин были сделаны повторные замеры мощности. Наиболее типичный вид зависимости уровня отражения кожи рук представлены на рисунке 3.



**Рисунок 3 – Диаграмма средних значений уровня отраженной мощности различных участков левой руки во времени: 1- ладонь, 2- тыльная сторона ладони, 3 – запястье, 4 – тыльная сторона запястья**

Анализ проведенных оценочных экспериментов позволяет предположить возможность регистрации методами биофотометрии зависимости изменений оптических свойств биоткани при применении различных косметических средств. Очевидна тенденция уменьшения уровня отраженной мощности кожи после косметических процедур, что возможно вследствие стимуляции микроциркуляции крови, и увеличение поглощающей способности биоткани. Таким образом, создание методов и устройств неинвазивного контроля косметических процедур для повышения их эффективности и безопасности является актуальной задачей, решение которой можно осуществить методами биофотометрии.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рогаткин, Д.А. Об особенности в определении оптических свойств мутных биологических тканей и сред в расчетных задачах медицинской неинвазивной спектрофотометрии [Текст] / Д.А. Рогаткин // Медицинская техника. – 2007. – № 27. – С. 10-16.
2. Кожа человека / Под ред. Кошевенко Ю.Н. – М.: Медицина, 2006. – 360 с.
3. Киселев, Г.Л. Моделирование распространения света в биологических тканях [Текст]// Биомедицинская радиоэлектроника. – 2001. – №1. – С. 10-17.
4. Полонский, А.К. Измерение оптических параметров тканей животных и человека при лазерном воздействии [Текст] / А.К. Полонский, А.А. Древаль, Ю.В. Голубенко, А.Р. Евстигнеев// Биологические науки. – 1984. – № 10. – С. 108-111.
5. Александров, М.Т. Применение лазерной биофотометрии в стоматологии [Текст] – В кн.: «Полупроводниковые лазеры в биомедицине и народном хозяйстве». – Калуга: Стандарт СССР, 1987, В.1. – С. 53-58.

#### **Корндорф Сергей Фердинандович**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
 Доктор технических наук, профессор кафедры "Приборостроение, метрология и сертификация".  
 Телефон: (4862)41-98-76  
 E-mail: [pms@ostu.ru](mailto:pms@ostu.ru)

#### **Жернова Любовь Александровна**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
 Магистрант кафедры "Приборостроение, метрология и сертификация".  
 E-mail: [ala\\_id@mail.ru](mailto:ala_id@mail.ru)

УДК 543.06

С.Н.СЫЧЕВ, К.В.ПОДМАСТЕРЬЕВ, С.Г.ПУЗЫРЕВ

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ АДГЕЗИИ КОМПОНЕНТОВ МОТОРНЫХ МАСЕЛ МЕТОДОМ ЖИДКОСТНОЙ ХРОМАТОГРАФИИ. ЧАСТЬ 2. ТЕСТИРОВАНИЕ ХРОМАТОГРАФИЧЕСКИХ КОЛОНОК, ЗАПОЛНЕННЫХ ОПИЛКАМИ МЕТАЛЛОВ

*Рассмотрен способ тестирования хроматографических колонок, заполненных опилками металлов. Показано, что универсальным веществом для проверки колонок является нафталин.*

**Ключевые слова:** нафталин, тестирование хроматографических колонок

*In the present paper we consider the method of testing of chromatographic columns packed with sawdust metals. It is shown that the universal substance for testing columns is benzene. testing of chromatographic columns.*

**Key words:** naphthalene, chromatographic column testing

### ВВЕДЕНИЕ

Тестирование хроматографических колонок, заполненных металлическими опилками, никогда и никем не проводилось, поэтому параметры таких колонок и способы их тестирования были нам неизвестны. В процессе предварительного исследования нам нужно было получить информацию о том, какие вещества можно использовать в качестве тестовых (хотя бы на первых этапах исследований) а также оценить эффективность и селективность колонок в используемых хроматографических системах. Вся эта информация необходима для оценки возможности получения времен удерживания (адгезии) компонентов моторных масел на поверхностях металлов.

### ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ГИПОТЕЗА О СОСТАВЕ ХРОМАТОГРАФИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Состав элюента в процессе определения адгезии компонентов минеральных моторных масел должен имитировать состав моторного масла. Таким образом, основным компонентом элюента должен быть достаточно длинный нормальный жидкий при нормальных условиях предельный углеводород. Так как наиболее распространенным и информативным детектором в жидкостной хроматографии (ЖХ) является сканирующий УФ-ВИД-детектор [1], желательно, чтобы используемый алкан по квалификации был не ниже «хч» (в УФ- области чистые алканы не поглощают излучение на длинах волн, больших 190 нм). Такими свойствами обладает декан  $n\text{-C}_{10}\text{H}_{14}$  квалификации «хч», который мы использовали в качестве базового элюента. Так как характер поверхности металлических опилок был нам неизвестен (для получения опилок использовался чугун и алюминий), тестирование колонок разумнее всего было бы проводить растворами бензола, нафталина или антрацена в декане. При сравнении времен удерживания бензола, нафталина или антрацена можно было бы оценить селективность колонок по парам «бензол-нафталин», «бензол-антрацен», «нафталин-антрацен».

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БЕНЗОЛА, НАФТАЛИНА И АНТРАЦЕНА В КАЧЕСТВЕ ТЕСТОВЫХ ВЕЩЕСТВ

Хроматограммы и времена удерживания бензола, нафталина и антрацена приведены на рисунках 1, 2 и в таблице 1. Анализируя данные таблицы 1 и рисунка 2, а также принимая во внимание меньшую, чем в 100 раз нагрузку колонки по нафталину (по сравнению с бензолом) и удовлетворительную симметрию пика нафталина (1.17 [2]), по стандартному методу [2] можно рассчитать эффективность хроматографической колонки. Исходя из рисунка 2, эффективность хроматографической колонки равна 254 теоретическим тарелкам.

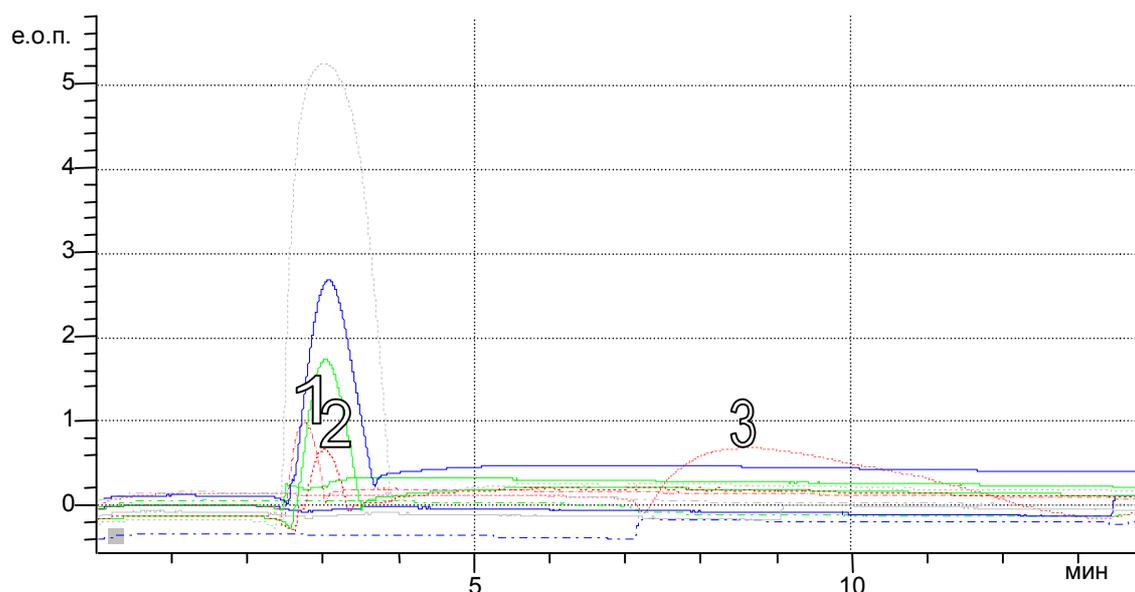


Рисунок 1 - Хроматограмма смеси 1 – бензола, 2 – нафталина, 3 – антрацена. Колонка 80x2 заполнена опилками чугуна (50 мкм), элюент – декан. Многоволновой режим детекции.

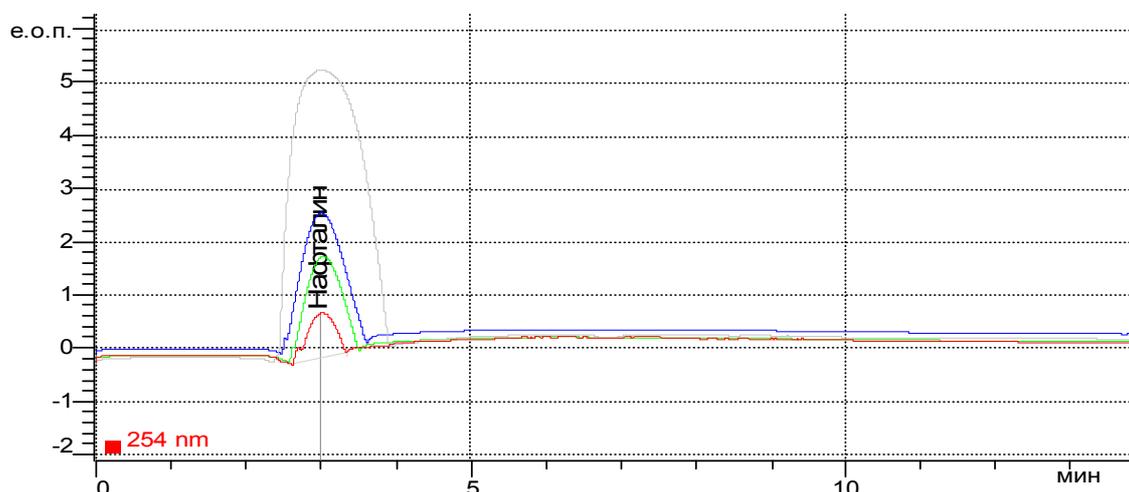


Рисунок 2 - Хроматограмма нафталина. Колонка 80x2 заполнена опилками чугуна (50 мкм), элюент – декан. Многоволновой режим детекции.

Таблица 1 - Хроматографические параметры бензола, нафталина и антрацена

Материал	Вещество	Элюент	Время удерживания, мин.
Металл гильзы цилиндра (чугун)	Бензол	Декан	2,06
	Нафталин	Декан	2,19
	Антрацен	Декан	4,37
Металл поршня	Бензол	Декан	1,17
	Нафталин	Декан	1,17
	Антрацен	Декан	1,17

Экспериментальная эффективность хроматографической колонки в теоретических тарелках определяется по формуле:

$$N = 5,545(t_R/W_h)^2, \quad (1)$$

где  $t_R$  – время удерживания пика;

$W_h$  – ширина пика на его полувысоте.

Исходя из формулы (1) получим:  $N = 5.545(2.991/0.426)^2 = 273$  т.т.

Теоретически удовлетворительная эффективность колонок может быть рассчитана по формуле:

$$N = L/3 \cdot d, \quad (2)$$

где  $N$  – эффективность колонки в теоретических тарелках;

$L$  – длина колонки в мм;

$d$  – диаметр частиц сорбента в мм.

Исходя из формулы (2), удовлетворительная теоретическая эффективность используемой колонки равна  $80/3 \cdot 0,05 = 533$  т.т. Таким образом, теоретическая эффективность для специальных сорбентов всего в два раза больше практической (263 т.т.) эффективности хроматографических колонок, заполненных металлическими опилками.

Эффективность хроматографической колонки, заполненной алюминиевыми опилками с диаметром частиц около 70 мкм, составляет 156 т.т. при теоретическом значении эффективности 381 т.т. Реальная эффективность меньше теоретической примерно в два раза, что говорит о воспроизводимости предложенной технологии набивки колонок. Эффективность такой колонки определялась по пику бензойной кислоты (рисунок 3).

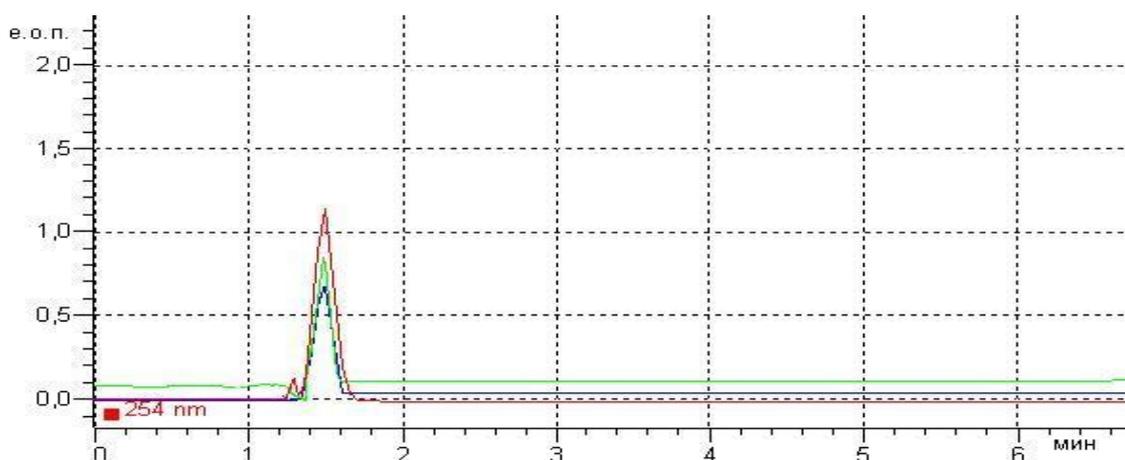


Рисунок 3 - Хроматограмма бензойной кислоты. Колонка 80x2 заполнена опилками алюминия (70 мкм), элюент – декан. Длина волны 254 нм.

## ВЫВОДЫ

1. Хроматографическая система, состоящая из хроматографических колонок, заполненных металлическими опилками, элюента декана и раствора тестового вещества нафталина или бензойной кислоты вполне пригодна для тестирования таких колонок.

2. Несмотря на простоту способа набивки колонок опилками, применение водно-глицериновых суспензий металлических опилок при фракционировании опилок и заполнении колонок обеспечивает необходимое качество и воспроизводимость набивки колонок.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сычев, С.Н. Методы совершенствования хроматографических систем и механизмы удерживания в ВЭЖХ [Текст] / С.Н. Сычев. – Орел: ОрелГТУ, 2000. – 212 с.
2. Сычев, С.Н. Технология изготовления эффективных хроматографических колонок с внутренним диаметром 2 мм для высокоэффективной жидкостной хроматографии [Текст] / С.Н. Сычев, В.А. Гаврилина, С.А. Юрова, И.К. Сатцаева, А.Н. Бутырин // Аналитика и контроль. – 2003. – Т.1– № 3 – С. 276-283.

### Сычев Сергей Николаевич

Орловский государственный технический университет  
Доктор технических наук, профессор кафедры «Химия»  
Тел. 8(4862) 419892  
E-mail: chemistry@ostu.ru

### Подмастерьев Константин Валентинович

Орловский государственный технический университет  
Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой  
«Приборостроение, метрология и сертификация»  
Тел. (84862) 419803  
E-mail: asms-orel@mail.ru

### Пузырев Станислав Григорьевич

Орловский государственный технический университет  
Аспирант

П.Н. ШКАТОВ

## ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ МЕТАЛЛА ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РОТОРОВ ПАРОВЫХ ТУРБИН ТЭС

*Описаны средства ручного и механизированного вихретокового контроля высоконагруженных элементов роторов паровых турбин. Приборы разработаны с учетом специфики контроля энергооборудования, находящегося в процессе длительной эксплуатации и широко используются во многих энергосистемах России для оценки технического состояния роторов.*

**Ключевые слова:** вихретоковый неразрушающий контроль, паровая турбина, высоконагруженные элементы.

*Means manual and mechanized eddy current control of highly loaded the elements of rotors of steam turbines are described. Devices are developed taking into account specificity control the power equipment which is in process of long operation and widely used in many power supply systems of Russia for an estimation of a technical condition of rotors.*

**Keywords:** eddy current non-destructive testing, the steam turbine, power elements.

Наиболее дорогостоящие и технически сложные в изготовлении и эксплуатации элементы энергооборудования – паровые турбины. Именно ресурсу их работы уделяется основное внимание при рассмотрении вопросов технического перевооружения энергетической отрасли. Ресурс паровых турбин тепловых электростанций (ТЭС) в значительной степени определяется наиболее ответственными элементами – роторами высокого и среднего давления. Опыт эксплуатации энергооборудования ТЭС показал, что наиболее уязвимые элементы роторов – кромки лопаток, донная часть тепловых канавок и галтельных переходов, поверхность осевого канала.

В МГУПИ, по заданию Всероссийского теплотехнического института (ВТИ), был разработан и внедрен комплекс вихретоковых приборов и систем для оценки технического состояния высоконагруженных элементов роторов в процессе эксплуатации. Он состоит из вихретокового дефектоскопа «ЗОНД ВД-96» со специализированными вихретоковыми преобразователями, вихретокового структуроскопа «ЗОНД ВС-04», роботизированного устройства «ЗОНД-КРОТ».

Дефектоскоп «ЗОНД ВД-96» имеет следующие достоинства, важные для оценки технического состояния энергетического оборудования, находящегося в длительной эксплуатации:

- возможность контроля сварных швов и шероховатых поверхностей, в том числе под слоем различных загрязнений, масел, окалина, ржавчины и т. д. без предварительной подготовки;
- возможность дефектоскопии кромок отверстий и пластин с подавлением влияния краевого эффекта;
- возможность выявления дефектов под слоем различных покрытий толщиной до 10 мм;
- повышенная износостойкость рабочей поверхности первичных вихретоковых преобразователей благодаря применению защитных пластин из нержавеющей стали или керамики.

Внешний вид дефектоскопа и некоторых применяемых совместно с ним вихретоковых преобразователей представлен на рисунке 1. Дефектоскоп выполнен многофункциональным, имеет сетку частот от 1 до 256 КГц, звуковую, световую и стрелочную индикацию, возможность подключения внешнего индикатора (осциллографа, ПК) для отображения информации в виде комплексной плоскости.

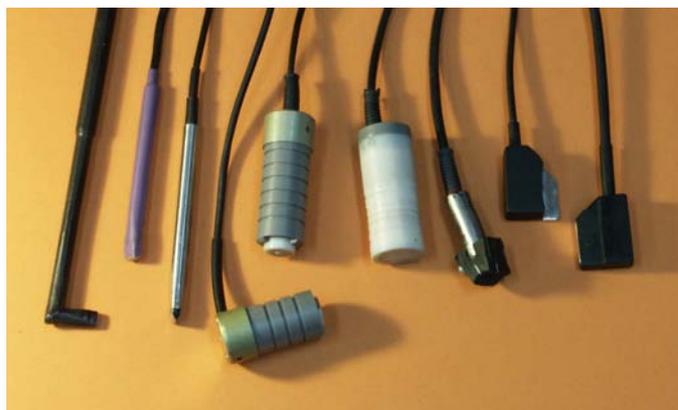


Рисунок 1- Вихретоковый дефектоскоп «ЗОНД ВД-96» с комплектом вихретоковых преобразователей

Для дефектоскопии лопаток паровых турбин дефектоскоп «ЗОНД ВД-96» используется совместно с вихретоковыми преобразователями УВТП 10×30, УВТП 7×20 и КВТП 2×4.

В лопатках наиболее вероятно появление дефектов на их кромках, а также вокруг отверстий под демпферную проволоку. Вихретоковые преобразователи УВТП 10×30, УВТП 7×20 и КВТП 2×4, отличающиеся размерами рабочего торца (10×30 мм, 7×20 мм и 2×4 мм, соответственно) не имеют краевого эффекта, что определяет эффективность их применения.

По результатам исследований и опытной эксплуатации был выпущен руководящий документ [1] по контролю лопаток паровых турбин вихретоковым дефектоскопом «ЗОНД ВД-96».

Вихретоковый контроль тепловых канавок и галтельных переходов роторов проводится с целью обнаружения трещиноподобных продольных дефектов в зоне их наиболее вероятного появления. К ним относятся дно тепловой канавки и участок в окрестности нижней точки галтели (рисунок 2). Тепловая канавка имеет ширину 3 мм и глубину 8 мм. В процессе эксплуатации ее поверхность покрывается слоем окалины, удалить который достаточно сложно.

Была поставлена задача разработки специализированного ВТП, обеспечивающего надежное выявление трещин глубиной от 1 мм в донной части тепловой канавки без удаления из нее слоя окалины. Для решения данной задачи был разработан специализированный преобразователь ВТПУ3×8, показанный на рисунке 3 и выпущена методика вихретокового контроля тепловых канавок и галтельных переходов на его основе. ВТПУ3×8 – абсолютный трансформаторный преобразователь, сигнал которого пропорционален глубине трещины. При перемещении ВТПУ3×8 по канавке неизбежны его смещения от стенки к стенке, что приводит к заметному изменению выходного сигнала. Для подавления влияния смещений применяется амплитудно-фазовый метод отстройки, реализуемый дефектоскопом «ЗОНД ВД-96». Наибольшее отношение сигнал/помеха достигается на частоте 32 КГц.

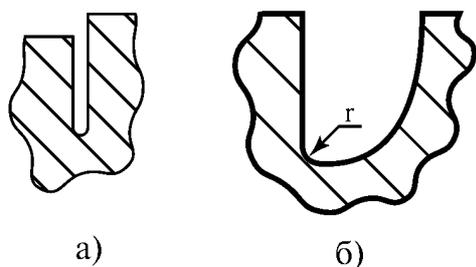


Рисунок 2- Поперечные сечения тепловой канавки (а) и галтельного перехода (б) ротора.

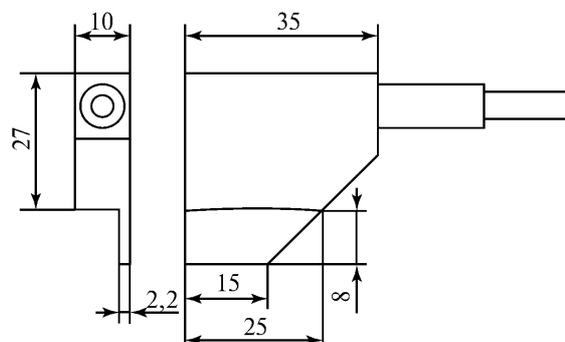
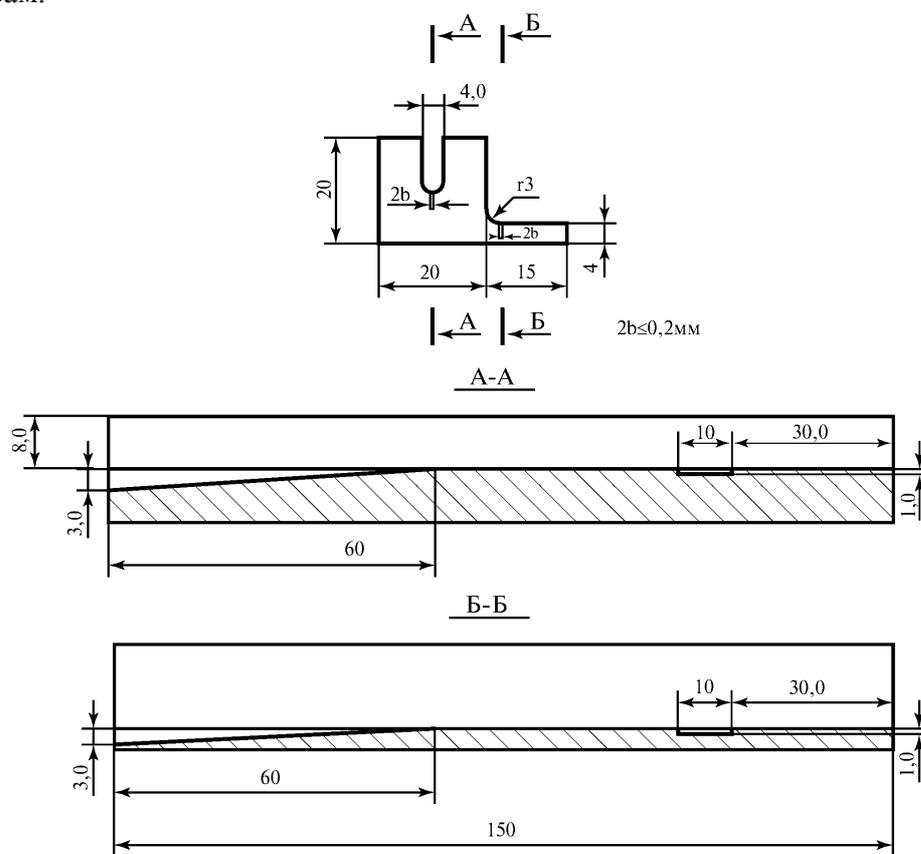


Рисунок 3- Вихретоковый преобразователь ВТПУ3×8

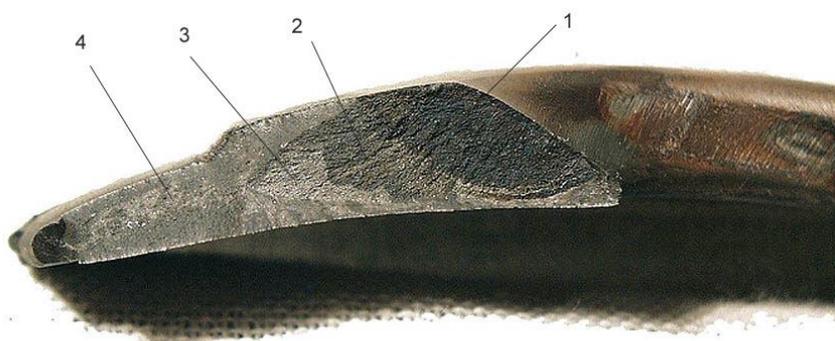
Для настройки дефектоскопа перед контролем разработан стандартный образец ОСП–U3x8–20x20x150–P–СтНМ (рисунок 4), выполняемый из того же материала, что и ротор с контролируемыми тепловыми канавками или из материала идентичного ему по электромагнитным свойствам.



**Рисунок 4 - Стандартный образец ОСП–U3x8–20x20x150–P–СтНМ**

Методика вихретокового контроля тепловых канавок и галтельных переходов роторов паровых турбин ТЭС вихретоковым дефектоскопом "ЗОНД ВД-96" определена выпущенным руководящим документом [2].

В 2000 г. на Сургутской ГРЭС-2 имели место два случая повреждения проточной части ЦНД турбины К-800-240-5 ЛМЗ ст. № 2 из-за поломки лопаток последних ступеней профиля 1400 из стали ЭИ961-Ш после 15 и 45 тыс. ч эксплуатации. Было установлено, что разрушения лопаток связаны с наличием зон подкаленного металла с повышенной твердостью в районе припайки стеллитовых пластин и доходящих в отдельных случаях до демпферного отверстия. На рисунке 5 показан излом разрушенной лопатки 60-й ступени.



**Рисунок 5 - Излом разрушенной лопатки 60 ступени:**  
1 – очаг разрушения; 2, 3 – развитие трещины; 4 – зона долома

В связи с этим возникла необходимость в разработке метода выявления зон структурной неоднородности на лопатках в районе припайки стеллитовых пластин, способных вызывать разрушение лопаток.

Ранее был известен только один способ выявления подкаленных зон: с помощью химического травления. Этот метод требует больших затрат. Кроме того, было установлено, что травлением не всегда удается выявить зону подкалки на стали ЭИ961-Ш. Для массового контроля этот метод не пригоден.

В МГУПИ был разработан метод определения подкаленных зон с помощью вихретокового дефектоскопа «ЗОНД ВД-96» со специализированным вихретоковым преобразователем ВТП А4-М.

Критерием отбраковки новых лопаток была выбрана твердость выше 315 НВ, определенная пересчетом показаний вихретокового прибора «ЗОНД ВД-96». Для эксплуатирующихся лопаток в виде временной меры допускалась твердость до 340 НВ при условии ежегодного дефектоскопического контроля лопаток с твердостью выше 315 НВ, так как образование трещин в лопатках с такой твердостью при повреждениях в 2000 г. в эксплуатации не наблюдалось.

При проведении контроля рабочих лопаток 45 ступени турбины ст. № 2 Сургутской ГРЭС в 2001 г. после 53000 ч эксплуатации были обнаружены трещины на 22 лопатках с твердостью (в зоне припайки стеллитовых пластин) 315 – 340 НВ и на 6 лопатках с твердостью менее 315 НВ и на 4 лопатках с твердостью выше 340 НВ.

На рис. 6 представлена зависимость твердости искусственных образцов и натуральных лопаток от значений вихретокового сигнала. Отмечается повышенный разброс экспериментальных значений, полученных на натуральных лопатках. Этот разброс в значительной степени связан с несовпадением зон измерения твердости и ВТ сигнала. Экспериментальные данные образцов удовлетворительно аппроксимируются уравнением прямой линии, имеющей вид (1). Коэффициент корреляции этой зависимости близок к 1.

$$HV = 280 + 45,5 \cdot VT, \quad (1)$$

где НВ – значение твердости, НВ;

VT – значения вихретокового сигнала.

Для более надежного выявления некондиционных лопаток потребовалась разработка специализированного прибора – структуроскопа «ЗОНД ВС-04», усовершенствование методики контроля [3] и уточнение норм отбраковки. Внешний вид разработанного структуроскопа представлен на рисунке. 7.

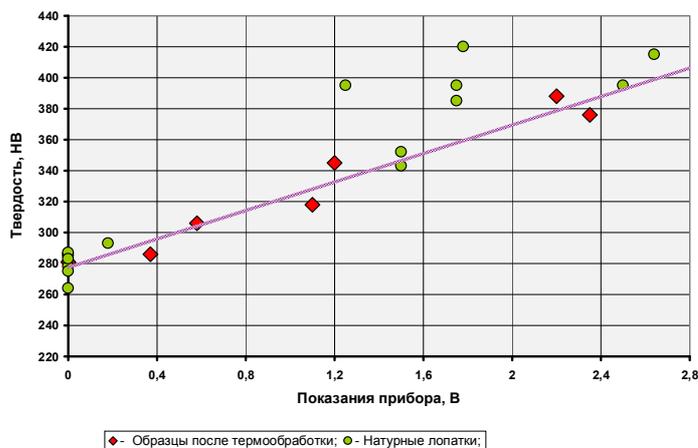


Рисунок 6 - Зависимость вихретокового сигнала от твердости подкаленного участка



Рисунок 7- Внешний вид структуроскопа «ЗОНД ВС-04»

Структуроскоп имеет ряд сервисных функций, позволяющих сохранять результаты измерений по каждой лопатке турбины и формировать протокол в удобной для анализа форме. Структуроскоп имеет функцию обучения по образцам и может быть использован для решения и других задач структуроскопии.

Роторы паровых турбин в России и странах ближнего зарубежья изготавливают из сталей перлитного класса марок 34ХМ1А, 25Х1М1Ф(Р2), Р2МА, 20Х3МВФ (ЭИ-415) методомковки. Цельнокованные роторы представляют собой массивную поковку, как правило, одной плавки. Режим термической обработки ротора: двойная нормализация и отпуск. Вследствие больших габаритов поковки скорость охлаждения ее периферии и центра заметно различаются. Это приводит к формированию структурной неоднородности по сечению поковки, заключающейся, главным образом, в различном содержании структурно-свободного феррита, повышенное содержание которого оказывает отрицательное воздействие на эксплуатационные свойства стали. Наиболее опасные дефекты – трещины могут возникнуть в изделии при недостаточной температурековки или при неправильном режиме термической обработки. Многие дефекты, например, неметаллические включения и трещины, располагаются параллельно волокну. Для устранения дефектов, образующихся в центре поковки (ковочного креста), в роторах, как правило, высверливают центральную часть, образуя осевой канал ротора.

В роторах и корпусах турбин напряжения у поверхности концентраторов напряжений могут достигать половины значения предела текучести. Рабочая температура различных зон ротора резко изменяется по длине: температура металла в районе первой ступени составляет 510-540 °С, в районе последней ступени 340-360 °С, а температура металла концевых частей ротора не превышает 60 °С.

Наиболее опасно присутствие дефектов в центральной зоне поковки, ориентированных в радиально-осевой плоскости ротора, вблизи осевого канала в районе первых наиболее высокотемпературных ступеней. Наиболее неблагоприятными режимами эксплуатации турбин являются пуски из холодного состояния, когда центральная часть ротора (особенно для РСД) недостаточно прогрета и материал обладает повышенной склонностью к хрупкому разрушению, а уровень напряжений высок из-за температурных перепадов.

Зарождение трещины по механизму ползучести наиболее вероятно в подповерхностном слое вблизи осевого канала или на ободке дисков вблизи концентраторов напряжений. В осевом канале трещина будет располагаться в радиально-осевой плоскости ротора.

Основные задачи контроля цельнокованных роторов: своевременное выявление дефектов на поверхности осевого канала и выявление трещин, развивающихся со стороны проточной части. Для вихретоковой дефектоскопии ротора со стороны осевого канала разработан и используется на практике роботизированный комплекс «ЗОНД – КРОТ» (рисунок 8), позволяющий проводить вихретоковый и оптико-телевизионный контроль.

Он содержит следующие основные элементы: блок первичных преобразователей (БПП) 1, привод вращения 2, три распорных рычага 3, привод перемещения 4, три тяги 5 с встроенными редукторами, электронный блок 6 управления шаговыми двигателями приводов, разъемы 7 и 8 для подключения соединительного кабеля №1, токосъемник 9 для электрической связи между кабелем № 1 и БПП 1. Блок первичного преобразователя 1 содержит следующие основные элементы: вихретоковый преобразователь 10 типа ВТП 5х10 (рисунок 9), камеру телевизионную 11, два элемента освещения 12, технологические отверстия 13 для смазки пар трения токосъемника, опорные ролики 14 и 15.

Основных технические характеристики комплекса «ЗОНД-КРОТ»:

- не требует зачистки поверхности;
- диаметр канала, мм 80...120;
- производительность контроля:
- скорость продольного движения, см/мин 1...100,
- скорость вращения блока датчиков, об/с 0,3...3;
- размер видеокадра, точек 640х480;

– размер выявляемых трещин, мм:  $>2 \times 0,5 \times 0,01$ ;

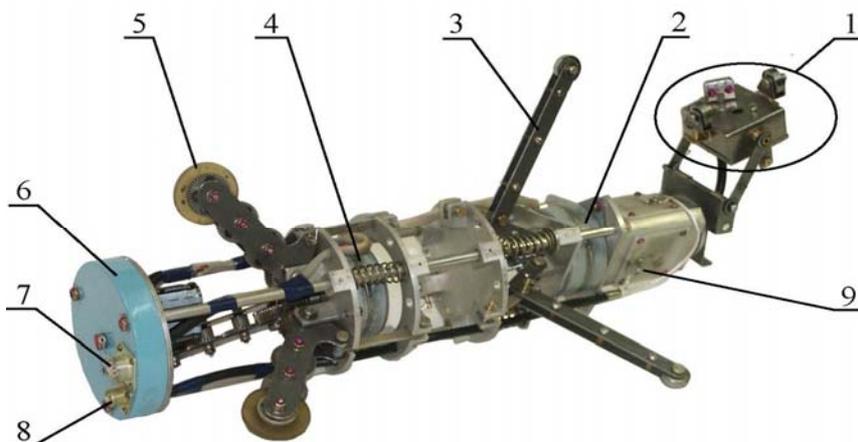


Рисунок 8 - Транспортно-сканирующий механизм комплекса «ЗОНД-КРОТ»

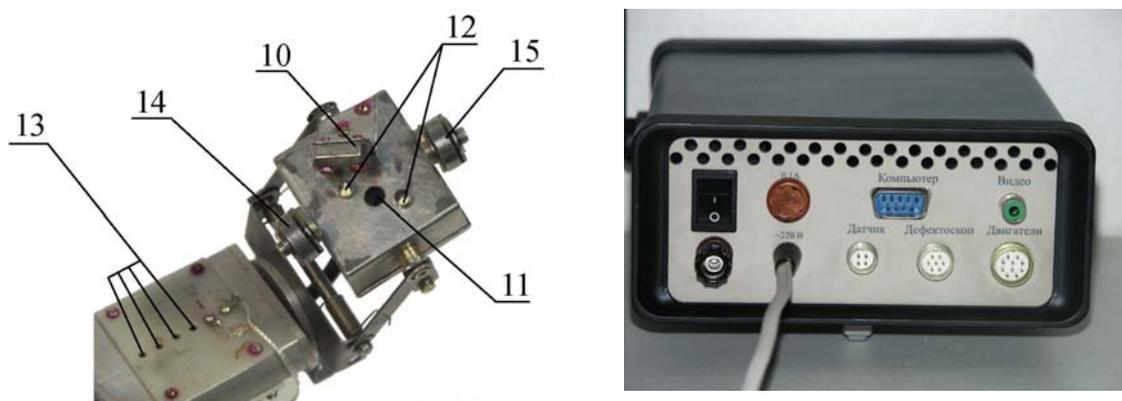


Рисунок 9 - Блок первичного преобразователя и блок управления системы «ЗОНД-КРОТ»

Система работает в двух режимах: автоматическом и ручном. Результаты контроля роторов турбин сведены в базу данных. Она содержит информацию по более, чем 300-м роторам высокого и среднего давления отечественных турбоагрегатов мощностью от 25 до 800 МВт.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методика вихретокового контроля лопаток паровых турбин тепловых электрических станций дефектоскопом «ЗОНД ВД-96» Отраслевой руководящий документ РД 34.17-98.
2. Методические указания по контролю тепловых канавок и галтельных переходов роторов паровых турбин ТЭС вихретоковым дефектоскопом «ЗОНД ВД-96» РД 153-34.1-17.454-98.
3. Методические указания по выявлению структурных неоднородности в металле лопаток последних ступеней ЧНД паровых турбин из стали ЭИ961-Ш в зоне припайки стеллитовых пластин» РД 153-34.1-17.466, 2002 г

### Шкатов П.Н.

ГОУ ВПО МГУПИ 107996, Москва, ул. Стомынка, д. 20  
 доктор технических наук, профессор,  
 Тел. +7 903 6820269  
 E-mail: Petr\_shkatov@mail.ru

Е.М. АНОДИНА-АНДРИЕВСКАЯ, М.Я. МАРУСИНА, М.П. МАРУСИН

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ВЕЙВЛЕТНОГО АНАЛИЗА СИГНАЛОВ В ЗАДАЧАХ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

*Проведен сравнительный анализ методов вейвлетного преобразования сигналов при решении задач технической диагностики. Показано, что использование вейвлетного преобразования для обработки сигналов вибрации позволяет решить задачу шумоподавления при выявлении гармонических составляющих сигнала, используемых в качестве диагностических признаков при техническом контроле приборов и механизмов. Наилучшая степень очистки сигнала была получена с использованием фрактального вейвлета Добеши.*

**Ключевые слова:** входной контроль, вибродиагностика, вейвлетный анализ.

*Comparative method of wavelet transformation signals at solving of technical diagnostics problems was carried out. It is shown that using of wavelet transformations for processing of vibration signals allows to solve the problem of noise reduction at revealing of harmonious components of the signal used as diagnostic signs at technical control of devices and mechanisms. The best degree of signal clearing was received with using fractal wavelet of Dobeshi.*

**Keywords:** input diagnostic control, vibradiagnostic, wavelet analysis.

В процессе технического контроля приборов и механизмов широко применяются методы вибродиагностики, для которых характерно использование в качестве диагностических признаков объекта параметров осевой, радиальной и угловой вибрации [1]. При этом важной задачей является очистка гармонического синусоидального сигнала от шума. Для этой цели используется одна из самых перспективных технологий анализа данных – вейвлет-анализ. Вейвлет-преобразование дает наиболее наглядную и информативную картину обработки сигналов, позволяя очистить исходные данные от шумов и случайных искажений [2-6]. С помощью вейвлетного анализа сигнал представляется совокупностью волновых пакетов – вейвлетов, образованных на основе некоторой исходной (базовой, образующей и т. д.) функции. Число используемых при разложении сигнала вейвлетов задает уровень декомпозиции сигнала. При этом за нулевой уровень декомпозиции принимается сам сигнал, а уровни декомпозиции образуют ниспадающее вейвлет-дерево того или иного вида. Точность представления сигнала по мере перехода на более низкие уровни декомпозиции снижается, но зато появляется возможность вейвлет – фильтрации сигналов.

Прямое вейвлет-преобразование означает разложение произвольного входного сигнала на принципиально новый базис в виде совокупности волновых пакетов – вейвлетов, которые характеризуются четырьмя принципиально важными свойствами:

- имеют вид коротких, локализованных во времени (или в пространстве) волновых пакетов с нулевым значением интеграла;
- обладают возможностью сдвига по времени;
- существует возможность масштабирования (сжатия/растяжения);
- имеют ограниченный (или локальный) частотный спектр.

Этот базис может быть ортогональным, что заметно облегчает анализ, дает возможность реконструкции сигналов и позволяет реализовать алгоритмы быстрых вейвлет-преобразований. Однако некоторые вейвлеты не обладают свойствами ортогональности.

Одна из основополагающих идей вейвлет-представления сигналов заключается в разложении сигнала на аппроксимирующую и уточненную составляющие с последующим их дроблением с целью изменения уровня декомпозиции сигнала. Это возможно как во временной, так и в частотной областях представления сигналов вейвлетами.

Основные особенности вейвлет-преобразования заключаются в следующем:

- вейвлет – преобразование открывает принципиально новые возможности в обработке сигналов;

- большинство вейвлетов представлено вещественными функциями;
- для ряда типов вейвлетов имеются быстрые алгоритмы вейвлет-преобразования;
- большинство вейвлетов описываются итерационными выражениями.

В работе рассмотрена модель сигнала:

$$s(n) = f(n) + \sigma \cdot e(n),$$

где  $f(n)$  – полезный сигнал;

$\sigma$  – уровень шума;

$e(n)$  – гауссовский белый шум, т.е. стационарная случайная последовательность с нулевым математическим ожиданием, абсолютно некоррелированная и с дисперсией, равной единице.

Цель состоит в том, чтобы подавить шумовую часть сигнала и выделить гармонический сигнал  $f(n)$ .

При вейвлет-анализе сигнал раскладывается на аппроксимирующие коэффициенты, представляющие сглаженный сигнал, и детализирующие коэффициенты, описывающие колебания. Следовательно, шумовая компонента больше отражается в детализирующих коэффициентах. Поэтому при удалении шума обрабатывают детализирующие коэффициенты. Второе предположение заключается в том, что шумовая компонента представляет собой сигнал, меньший по модулю, чем основной. Поэтому простейший способ удаления шума состоит в обнулении значений коэффициентов меньших некоторого порогового значения. Эта процедура называется пороговой обработкой коэффициентов.

При жесткой пороговой обработке неизменными сохраняются все коэффициенты, большие или равные абсолютной величине порога  $\tau$ , а меньшие коэффициенты обращаются в нуль. При мягкой пороговой обработке наряду с обращением в нуль коэффициентов, по модулю меньших, чем  $\tau$ , происходит уменьшение на величину  $\tau$  остальных коэффициентов.

При решении задачи шумоподавления необходимо оценить спектральный состав шумовой компоненты, выбрать тип пороговой обработки (трешолдинга) и критерий расчета самого порога.

От выбора порогового уровня фона (оценки дисперсии шума) зависит качество шумоподавления сигнала, оцениваемое в виде отношения сигнал/шум. Задание малых значений порога сохраняет фон в коэффициентах детализации и поэтому приводит лишь к незначительному увеличению отношения сигнал/шум. При больших значениях порога можно потерять коэффициенты, несущие существенную информацию. Поиск оптимального значения  $\tau_0$  означает нахождение такого порога, который при наименьшем смещении восстановления сигнала обеспечивает наибольшее значение отношения сигнал/шум.

Процедура шумоподавления включает в себя следующие этапы:

- декомпозиция (выбор вейвлета и уровня разложения  $N$ , вычисление вейвлет-разложения исходного сигнала до уровня  $N$ );
- пороговая обработка детализирующих коэффициентов (выбор порога для каждого уровня от 1 до  $N$  и применение мягкой обработки детализирующих коэффициентов);
- реконструкция (выполнение вейвлет-реконструкции, основанной на первоначальных аппроксимирующих коэффициентах, уровни которых изменяются от 1 до  $N$ ).

В ходе работы для вейвлетной очистки сигнала от шума была использована среда Matlab, среди ключевых достоинств которой можно назвать богатейшую библиотеку функций различного назначения, в том числе обеспечивающих графический вывод результатов.

Для вейвлетной очистки сигнала от шума был использован пакет Matlab Wavelet Toolbox. Wavelet Toolbox – это открытый пакет расширения Matlab, позволяющий синтезировать всевозможные алгоритмы обработки информации – данных, сигналов и изображений – с использованием вейвлет-функций. В своей работе пакет широко использует возможности

системы Matlab для решения задач анализа. Пакет Wavelet Toolbox оказывается превосходным средством для решения задач обработки одно- и двумерной информации [7].

Для решения задачи шумоподавления разработан алгоритм, включающий в себя следующие этапы:

- моделирование вибрации объекта согласно методике, представленной в [8-11];
- искажение сигналов белым гауссовским шумом с заданным отношением сигнал/шум;
- очистка сигналов от шума с помощью различных вейвлетов;
- выделение шумов на фоне очищенных сигналов;
- расчет отношений сигнал/шум;
- расчет коэффициентов корреляции между зашумленными и очищенными сигналами с целью выбора лучшего вейвлета;
- вывод результатов.

Выбор вейвлетов довольно обширен. В пакете Wavelet Toolbox представлено полтора десятка базовых типов вейвлетов. Удачный выбор типа вейвлета может существенно повысить эффективность решаемой задачи.

Для сравнения выбраны наиболее используемые семейства вейвлетов: вейвлеты Добеши, вейвлеты Хаара, симлеты, вейвлеты Мейера, биортогональные вейвлеты, обратные биортогональные вейвлеты. При очистке сигнала каждым вейвлетом использованы одинаковые параметры: порог – мягкий, эвристический вариант первого выбора; перемасштабирование порога с использованием оценки уровня шума на базе коэффициентов первого уровня; уровень вейвлет-разложения – пятый.

Оценка качества очистки сигналов произведена по значению отношения сигнал/шум, коэффициенту ковариации и коэффициенту корреляции между очищенным и исходным сигналом. Результаты расчетов представлены в таблице 1.

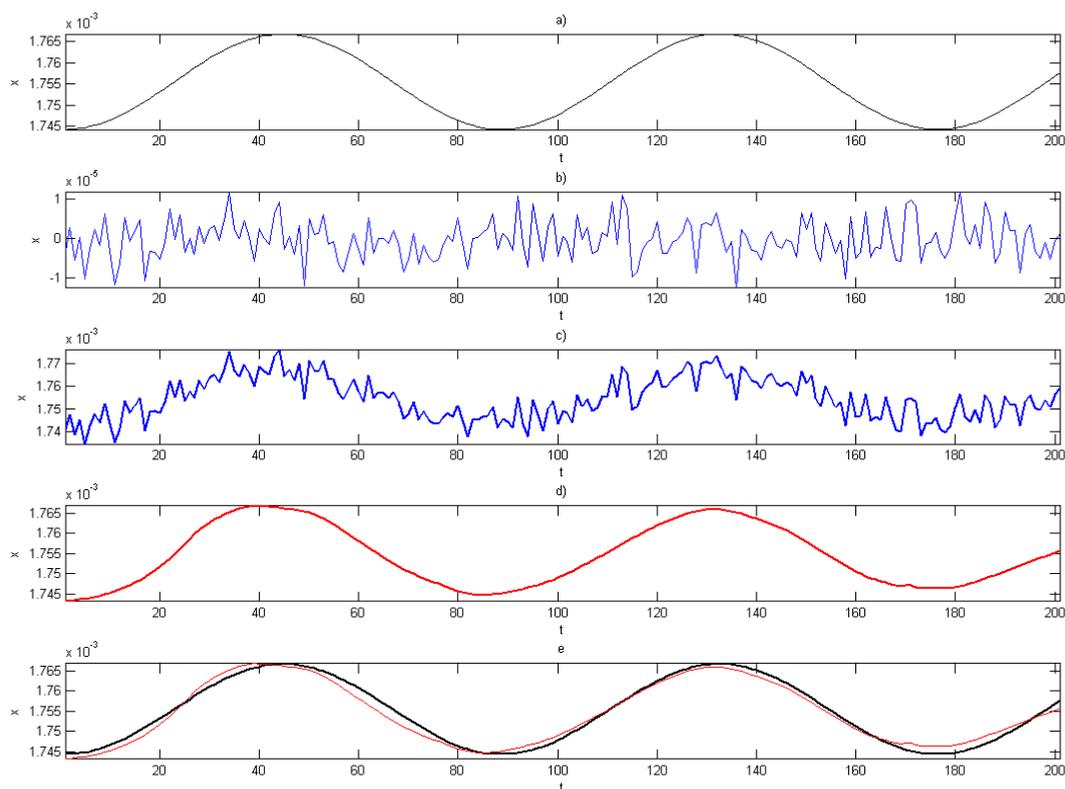
Таблица 1 - Результаты анализа вейвлетной очистки сигнала

Имя вейвлета	Отношение сигнал/шум	Коэффициент ковариации	Коэффициент корреляции
Добеши (db5)	19.70	1.19	0.99
Хаара (haar)	11.99	1.04	0.97
Симлеты (sym5)	15.28	1.14	0.98
Мейера (dmeu)	17.02	1.17	0.98
Биортогональные (bior5.5)	13.17	1.16	0.97
Обратные Биортогональные (rbio5.5)	16.36	1.15	0.98

В качестве примера на рисунке 1 представлены результаты обработки модели сигнала вибрации.

На основе анализа полученных данных можно сделать вывод, что наилучшая степень очистки сигнала была получена с использованием фрактального вейвлета Добеши. Если полученный сигнал все еще недостаточно очищен от помех, можно повторно применить к нему вейвлет-преобразование и получить более гладкую версию сигнала и локальные особенности сигнала уже на следующем уровне детализации.

Таким образом, использование вейвлетного преобразования для обработки сигналов вибрации позволяет усовершенствовать процесс выявления гармонических составляющих сигнала, используемых в качестве диагностических признаков объекта в процессе технического контроля приборов и механизмов.



**Рисунок 1 - Результаты обработки модели сигнала вибрации**  
 а) модель сигнала вибрации; б) модель шума; в) обрабатываемый зашумленный сигнала;  
 д) очищенный от шума сигнал; е) исходный и очищенный сигнал.

Исследования, описанные в данной статье, осуществлены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 08-08-00922а.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник конструктора точного приборостроения / Под ред. К.Н.Явленского, Б.П.Тимофеева, Е.Е.Чаадаевой. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. - 792с.
2. Блаттер К. Вейвлет-анализ. Основы теории [Текст] - М.: Техносфера, 2006. - 280 с.
3. Мусалимов, В.М. Динамика фрикционного взаимодействия [Текст]/ В.М. Мусалимов, В.А. Валетов. - СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006, 186с.
4. Мусалимов В.М. Параметры действия энергетического спектра вейвлет-преобразований [Текст] / В.М. Мусалимов, О.Е. Дик, А.Е. Тюрин // ИЗВ.ВУЗОВ. ПРИБОРОСТРОЕНИЕ. – 2009. - Т.52. - №5. - С.10-15.
5. Марусина, М.Я. Инвариантный анализ и синтез в моделях с симметриями [Текст] – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2004. – 144 с.
6. Марусина, М.Я. Шумоподавление в томографии с помощью вейвлет-фильтров [Текст] / М.Я. Марусина, А.О. Казначеева // Изв. Вузов. Приборостроение. – 2006. – Том 49. – №10. – С. 51 – 57.
7. Смоленцев, Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в Matlab. М.: ДМК Пресс, 2005, 301с
8. Анодина-Андриевская, Е.М. Разработка комплексных автоматизированных систем диагностического контроля шарикоподшипников [Текст]: СПГУАП. - С.-П., 2000,- 8с. Деп. в ВИНТИ N 261-В00, 04.02.00.
9. Явленский, К.Н. Автоматизированная система диагностирования шариковых подшипников [Текст] / К.Н. Явленский, Е.М. Анодина-Андриевская // Тезисы докл. Международной науч.-техн. конф. «Диагностика, информатика, метрология, экологическая безопасность - 98». С.-П., 1998. - С.34.
10. Анодина-Андриевская, Е.М. Структура и программная реализация обобщенной модели диагностирования шарикоподшипников [Текст]: ИЗВ.ВУЗОВ. ПРИБОРОСТРОЕНИЕ. - 2001. - Т.44. - №5
11. Анодина-Андриевская, Е.М. Обобщенная диагностическая модель шариковых подшипников [Текст]// Тезисы докл. Международной науч.-техн. конф. «Диагностика, информатика, метрология, экологическая безопасность - 98». С.-П., 1998. - С.35.

**Марусина Мария Яковлевна**

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики  
Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой измерительных технологий и компьютерной томографии  
Тел: (812)233-59-52  
Телефакс: (812)232-23-07  
E-mail: marusina\_m@mail.ru

**Анодина-Андриевская Елена Михайловна**

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики  
кандидат технических наук, доцент кафедры измерительных технологий и компьютерной томографии  
Тел: 89119584917  
E-mail: [anodina\\_elena@mail.ru](mailto:anodina_elena@mail.ru)

**Марусин Михаил Петрович**

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики  
Студент  
Тел: (812)233-59-52  
Телефакс: (812)232-23-07  
E-mail: mishasp06@rambler.ru

УДК 620.179.1.082.7:658.58

В.В. МИШИН, А.В. СЕЛИХОВ, М.В. МАЙОРОВ, А.А. КАТЫХИН,  
К.В. ШАТАЛОВ, В.И. НЕКРАСОВ

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ (ПРОВОДИМОСТИ) ПОДШИПНИКА КАЧЕНИЯ КАК ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА**

*В работе рассмотрен вопрос использования электрического сопротивления (проводимости) трибосопряжений подшипника качения как диагностического параметра, отражающего состояние рабочих поверхностей трибосопряжения и режимы работы подшипника.*

**Ключевые слова:** подшипник, сопротивление трибосопряжения, подшипниковый узел

*In the paper have presented problem of use of conductivity (electric resistance) bearing contact piece, as the diagnostic parameter reflecting a condition of work faces and modes of behavior of the bearing.*

**Keywords:** the bearing, resistance of contact, bearing unit and house

Электрический метод диагностирования подшипников качения и скольжения разрабатывается в настоящее время достаточно интенсивно разными научными группами в нашей стране и за рубежом [1]. Однако, несмотря на значительные достижения в развитии метода, пока он не находит широкого промышленного применения из-за отсутствия: достаточно подробных математических моделей; сформированной плеяды диагностических параметров для решения разных диагностических задач; требуемого экспериментального материала; сравнительных исследований, подтверждающих преимущества метода перед другими широко применяемыми; типовых алгоритмов обработки сигналов сопротивления и проводимости подшипника и наличия некоторых трудностей в получении таких сигналов.

Данная работа посвящена описанию экспериментальных исследований, посвященных получению и анализу электрического сигнала сопротивления с подшипника качения при разных условиях его работы.

Обобщенная структура математической модели сопротивления (проводимости) подшипника на примере сопротивления трибосопряжения представлена на рисунке 1.

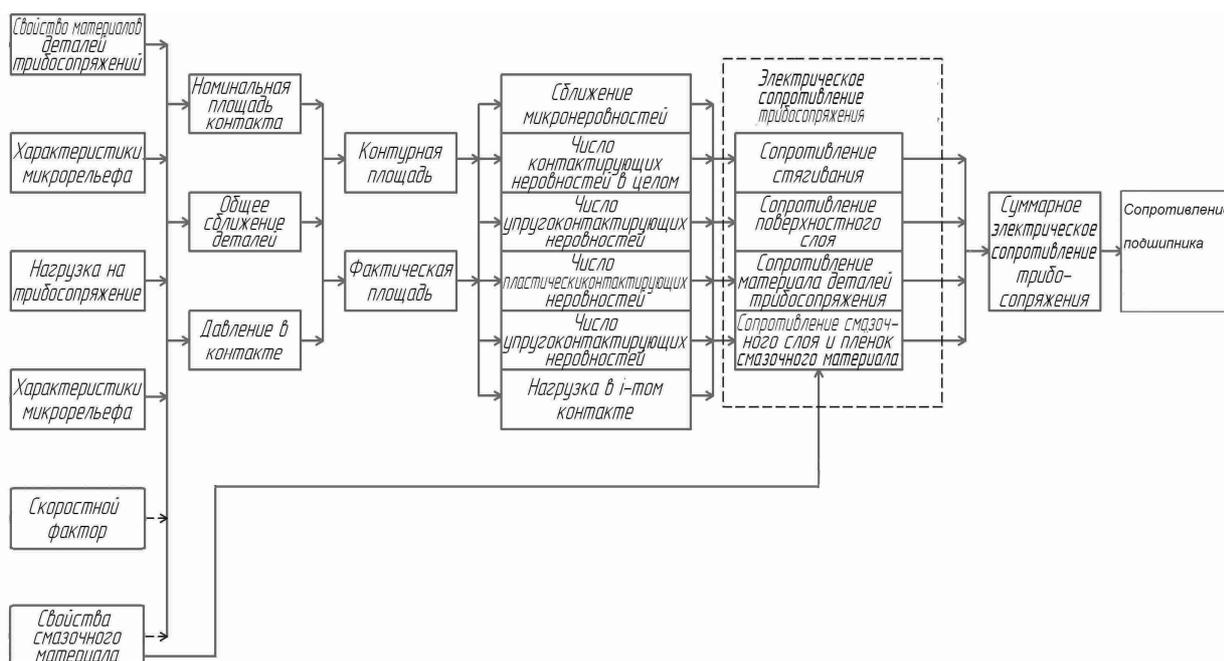


Рисунок 1 – Структура математической модели сопротивления подшипника

На основании математической модели проведено теоретическое исследование структуры сигнала сопротивления подшипника. Выявлено, что сигнал сопротивления может содержать одну или несколько детерминированных составляющих, определяемую макрогеометрией деталей подшипника, и случайную составляющую, определяемую микрогеометрией в зонах контакта деталей подшипника. Для экспериментального подтверждения данной гипотезы проведены исследования электрического сопротивления подшипника при различных условиях работы. При этом использовалось следующее оборудование: экспериментальный стенд на базе токарно-винторезного станка ТВ-6, представляющий собой электрически изолированный привод с возможностью токосъема (ртутный высокоскоростной токосъемник) с внутреннего и наружного колец подшипника, радиального нагружения подшипника, блока контроля частоты вращения вала и сепаратора исследуемого подшипника (оптическая система). Общий вид стенда представлен на рисунке 2.

На рисунке 3 представлена блок-схема измерительного модуля для оценки сопротивления (проводимости) подшипника и его вибрации. Принцип действия заключается в следующем: на испытуемый подшипник 1 через токосъемник 2 подается электрическое напряжение от источника 3. Ток через подшипник ограничивается дополнительным сопротивлением (условно не показано). На входной цепи преобразователя сопротивление-напряжение (ПСН) при работе подшипника образуется электрический сигнал, пропорциональный сопротивлению (проводимости) подшипника. Одновременно с сигналом сопротивления преобразователем 5 регистрируется вибросигнал с наружного кольца подшипника. Сбор данных осуществляется платой сбора данных ПСД, затем данные передаются в ЭВМ. Каждая запись реализации данных синхронизируется положением тела качения относительно линии действия радиальной нагрузки при помощи оптического канала 4.

Алгоритм обработки сигнала сопротивления (проводимости) заключался в статистической обработке, спектральном анализе, корреляционном анализе. Выполнялся взаимный корреляционный анализ сигналов сопротивления, проводимости и вибрации. Во временной области сигнал сопротивления описывался корреляционной функцией, автокорреляционной функцией.



Рисунок 2 – Общий вид стенда

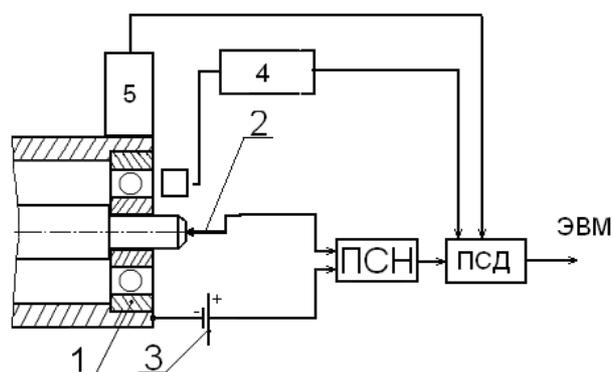


Рисунок 3 – Блок-схема измерительных каналов

Известно, что корреляционная функция детерминированного сигнала с конечной энергией представляет собой интеграл в бесконечных пределах от произведения двух копий сигнала, сдвинутых друг относительно друга на время  $\tau$  :

$$R_x(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot x(t - \tau) dt. \quad (1)$$

Эта функция показывает степень сходства между сигналом и его сдвинутой копией: чем больше значение корреляционной функции, тем корреляция выше.

В случае периодического сигнала (сигнала с бесконечной энергией) корреляционная функция определяется как интегральная функция с усреднением за период:

$$R_x(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cdot x(t - \tau) dt. \quad (2)$$

В подшипнике периодичность сигнала сопротивления обусловлена взаимными перемещениями деталей подшипника (вращение кольца, сепаратора, тел качения). Периоды вращения определяются из кинематических соотношений. Детерминированная составляющая сигнала сопротивления будет полигармонической, т.к. вклад в сигнал осуществляется от всех элементов подшипника, вращающихся с различными частотами. В связи с этим вычисление автокорреляционной функции (АКФ) и взаимной корреляционной функции (ВКФ) за один период достаточно затруднительно. Однако такая возможность не исключается.

Случайная составляющая сигнала сопротивления подшипника несет в себе информацию о микроконтактировании и случайных соударениях элементов подшипника. Также в измерительной цепи существуют значительные случайные возмущения (собственная ЭДС подшипника, помехи и т.д.). Случайные составляющие сигнала можно обрабатывать по методике обработки случайных сигналов. При этом одной из основных оценок, описывающих процесс, является функция распределения вероятности  $F(x)$  или  $F(x, t_1)$ . Она определяет вероятность того, что в момент времени  $t_1$  значение сопротивления, представленного как случайный процесс не превосходит значения  $x$  (выражаемого через сопротивление  $R$ ). Функция распределения оценивается как:

$$F(x, t_1) = P(X[t_1] \leq x), \quad (3)$$

где  $P$  – вероятность;

$X[t_1]$  – реализация сигнала.

Из выражения (3) видно, что  $F(x, t_1)$  является неубывающей функцией, лежащей в диапазоне  $0 \leq F(x, t_1) \leq 1$ . Согласно литературе [1] можно утверждать, что значение функции распределения в конкретном интервале сигнала, оцениваемое для единого значения  $x$  и  $R$  (Ом) будет характеризоваться диагностическим параметром НИВ (нормированное инте-

гральное время микроконтактирования деталей подшипника). Поэтому параметр НИВ или  $\bar{K}$  является частной оценкой случайного процесса изменения сопротивления подшипника.

Кроме указанных параметров во временной области сигнал сопротивления подшипника будет характеризоваться моментами закона распределения и их оценками:

- 1) Математическое ожидание (среднее значение) сигнала:

$$m_x(t) = M\{X(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} xP(x,t)dx. \quad (4)$$

В случае временной выборки сигнала сопротивления:

$$\bar{R} = \frac{1}{T} \int_0^T r(t)dt, \quad (5)$$

где  $r(t)$  – временной сигнал сопротивления.

- 2) Дисперсия сигнала сопротивления:

$$D(t) = M\{[X(t) - m_x(t)]^2\} = \int_{-\infty}^{\infty} X^2 \cdot P(x,t)dx - m_x^2(t). \quad (6)$$

Дисперсия характеризует среднюю мощность отклонений случайного сигнала сопротивления от его среднего значения. Она является численной характеристикой степени флуктуации сигнала сопротивления.

- 3) Среднее квадратическое отклонение (стандартное отклонение):

$$\sigma_x(t) = \sqrt{D(t)} = \sqrt{M\{X^2(t)\} - m_x^2(t)}. \quad (7)$$

Эта оценка служит для амплитудной характеристики разброса случайного сигнала сопротивления подшипника в моменты времени  $t$  относительно среднего значения.

Во временной области также следует рассматривать АКФ случайной составляющей. Она отличается от АКФ детерминированной составляющей только интегрированием сигнала не за период, а за время регистрации реализации. Так же оценивается и ВКФ:

$$R_x(\tau) = \frac{1}{T} \int_1^T R(t) \cdot V(t)dt, \quad (8)$$

где  $R(t)$  - сигнал сопротивления,  $V(t)$  - вибросигнал.

Указанный алгоритм обработки в полной мере можно применить и к сигналу вибрации подшипника. Для обеспечения единства масштабов при совместной обработке сигнал сопротивления и вибросигнал представлены в унифицированном виде на нормированных совместной дисперсией взаимных корреляционных функциях.

В частотной области обрабатываемые сигналы представлены в виде спектров и взаимных спектров. Для спектрального анализа детерминированной составляющей используется ряд Фурье:

$$S(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(k\omega_1 t) + b_k \sin(k\omega_1 t)), \quad (9)$$

где  $\omega_1 = 2\pi / T$  – круговая частота, соответствующая периоду повторения сигнала, равному  $T$ ;

$k\omega_1$  – гармоника с порядковым номером  $k$ ;

$a_k, b_k$  – коэффициенты;

$a_0$  - постоянная составляющая.

Также в алгоритмах обработки сигналов  $R(t)$  и  $V(t)$  в работе использовалась комплексная форма ряда:

$$S(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \dot{C}_k e^{-jk\omega_1 t}, \quad \text{где } C_k = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} S(t) \exp(-jk\omega_1 t) dt. \quad (10)$$

По данным выражениям строились амплитудные и фазовые спектры сигналов  $R(t)$  и  $V(t)$ .

В качестве оценки свойств сигналов в частотной области с учетом случайности процессов применялась оценка спектральной плотности:

$$S_x(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t) \exp(-j\omega t) dt. \quad (11)$$

где  $X(t)$  – исследуемый сигнал;

$\omega$  – частота.

Так как сигналы в данной работе являются дискретизированными, то используется дискретно-временная форма преобразования Фурье:

$$X[t] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi kn/N}, \quad (12)$$

где  $N$  – число отсчетов;

$k$  – номер частотной составляющей;

$n$  – номер текущего отсчета.

Спектральная плотность энергии такого сигнала определялась как:

$$S_s(f) = |X[f]|^2 = \left| T \sum_{n=-\infty}^{\infty} X[n] \exp(-j2\pi fnT) \right|^2, \quad (13)$$

где  $T$  – время.

Спектральная плотность мощности (СПМ) определяется как дискретно-временное преобразование Фурье автокорреляционной функции:

$$P_x(f) = T \sum_{n=-\infty}^{\infty} R_x(\tau) \exp(-j\omega T) d\tau. \quad (14)$$

Данная функция описывает распределение мощности сигнала, пропорционального  $R(t)$  или  $V(t)$  по частоте. Взаимная спектральная плотность сигналов  $R(t)$  и  $V(t)$  оценивается аналогично, но в качестве  $R_x(\tau)$  используется взаимная автокорреляционная функция.

На рисунке 4 в качестве примера представлена реализация сигнала сопротивления подшипника 113, смазка – масло МС-20 в объеме 2 мл, радиальная нагрузка 50 Н, длительность реализации 400 мс, частота дискретизации сигнала 2,5 кГц. Анализ данных показал наличие выраженной детерминированной составляющей (определяется кинематическими и геометрическими параметрами подшипника) и случайной составляющей, определяемой разрушением смазочной пленки подшипника. Данное положение подтверждается исследованием спектра сигнала (рисунок 5) и автокорреляционной функции (рисунок 6).

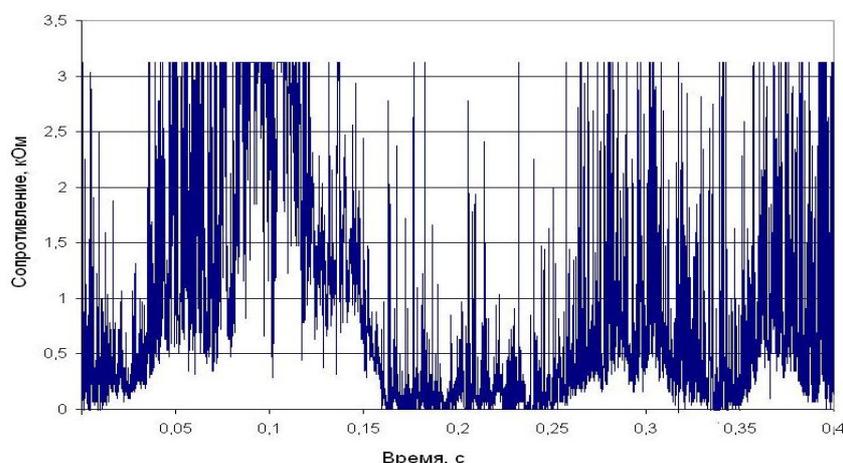


Рисунок 4 – Реализация сигнала сопротивления

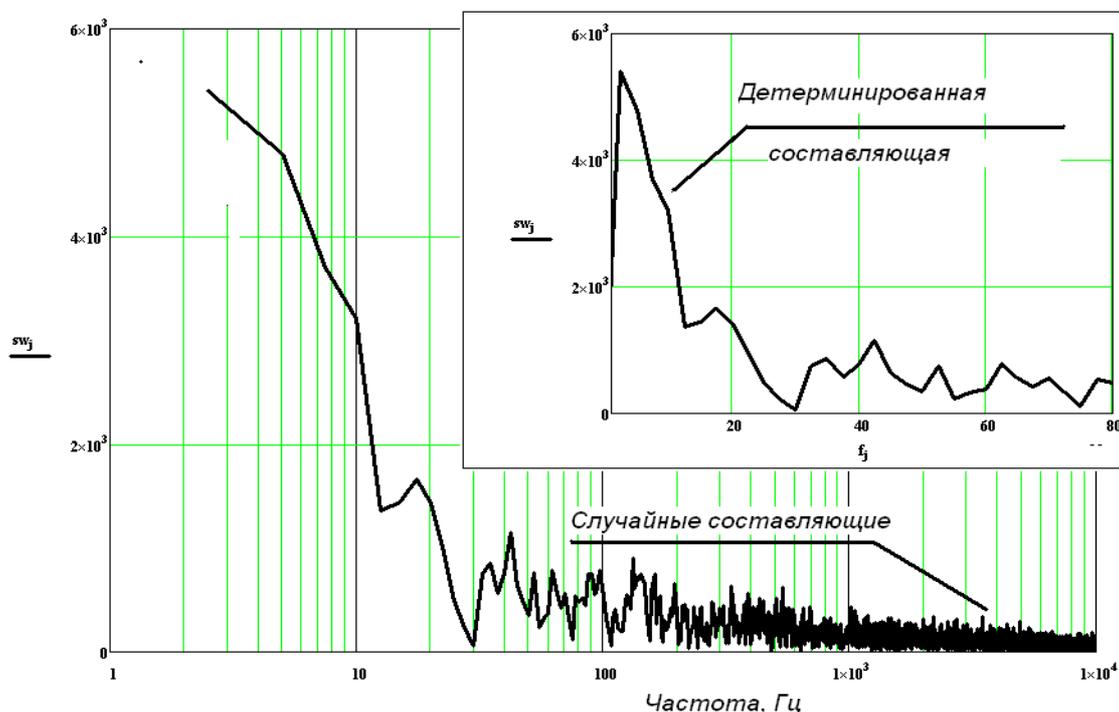


Рисунок 5 – Спектр сигнала сопротивления

Как видно, в низкочастотной области присутствует выраженная детерминированная составляющая, определяемая частотой прохождения тел качения через вектор радиальной нагрузки. В области до 300 Гц наблюдается наличие составляющих, определяемых отклонениями макрогеометрии колец и тел качения. В области высоких частот наблюдаются вызванные микроконтактированием составляющие.

На рисунке 6, в качестве примера, приведена интегральная функция распределения сопротивления подшипника 113 в области низких значений сопротивления (до 3 кОм) при указанных выше режимах работы подшипника, но при разной частоте дискретизации. Рисунок 6 а) получен при дискретизации сигнала сопротивления 2,5 кГц, а кривая на рисунке 6 б) – при частоте дискретизации 5 МГц. Таким образом, вторая кривая характеризует только процесс микроконтактирования, выраженный в быстрых (импульсных) изменениях сопротивления подшипника.

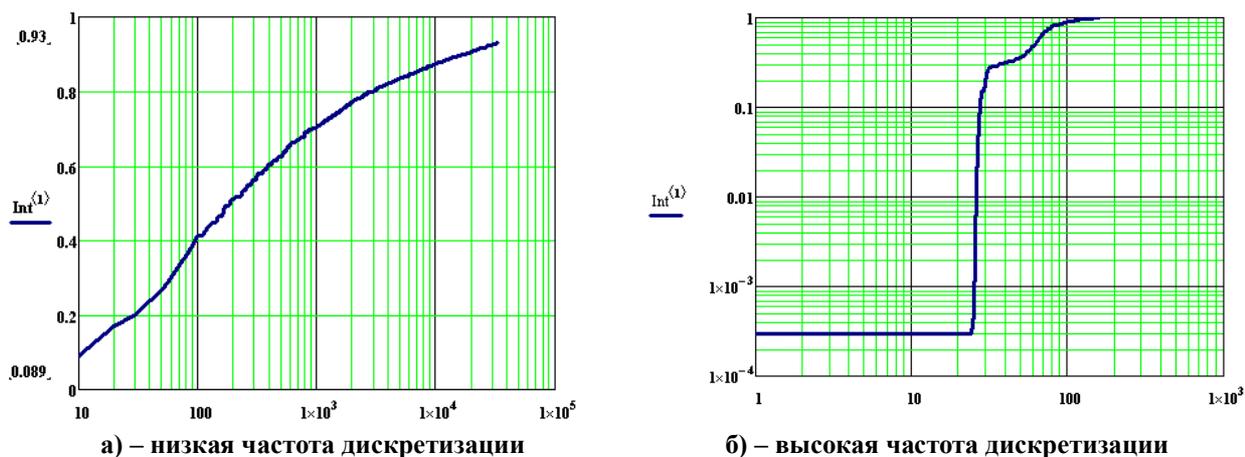


Рисунок 6 – Интегральная функция распределения сопротивления подшипника

В результате можно утверждать, что интегральная функция на рисунке 6 б) подтверждает гипотезу о распределении сопротивления при микроконтактировании в низких пределах (до сотен Ом).

На рисунке 7 представлены кривые сигналов сопротивления а) и вибрации б) при частоте дискретизации 10 кГц для подшипника 113, работающего в режиме недостатка смазочного материала. Частота вращения привода  $125 \text{ мин}^{-1}$ , радиальная нагрузка 50 Н.

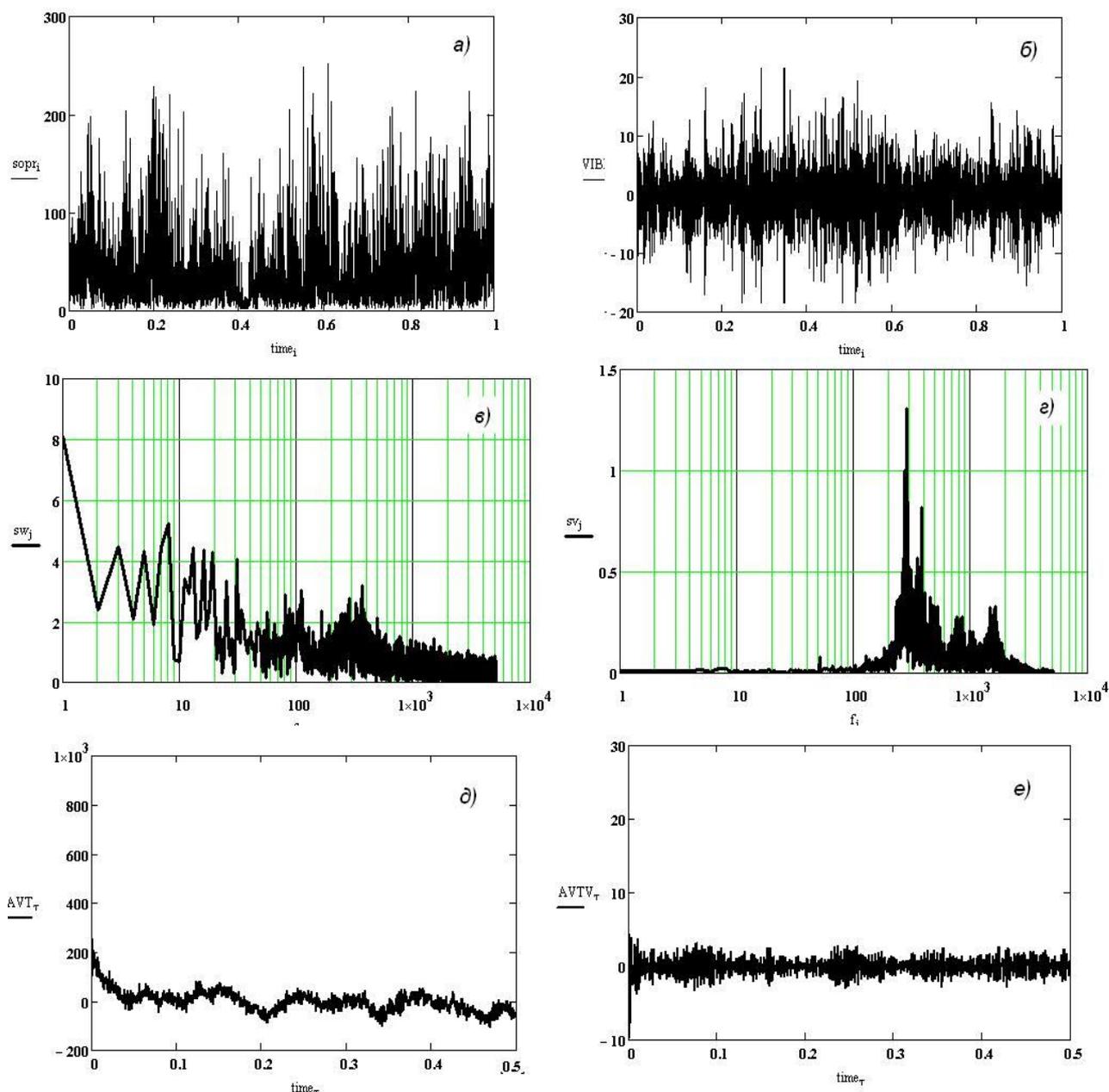


Рисунок 7 – Сигналы сопротивления и вибрации во временной и частотной областях

Анализ результатов показал, что сигнал сопротивления, спектр которого показан на рисунке 7 в) лучше описывает процессы, происходящие в подшипнике в низкочастотной области, чем сигнал виброускорения, спектр на рисунке 7 г). Это обусловлено особенностями оценки виброускорения в низкочастотной области. Тем не менее, большинство методик вибродиагностики подшипников предусматривают измерение именно виброускорения, что не всегда дает объективную информацию о деталях подшипника. Анализ автокорреляционных функций, соответственно, сигнала сопротивления (рисунок 7 д) и сигнала виброускорения (рисунок 7 е) показал, что в обоих случаях присутствует значительная детерминированная составляющая, характеризующая, предположительно, макрогеометрию беговых дорожек. При этом следует отметить, что диаграммы, представленные на рисунке 7, получены при относительно низкой частоте дискретизации, следовательно, сигнал сопротивления не может адекватно характеризовать процесс микроконтактирования. Так же отмечается, что сигнал

вибрации в области после 2,5 кГц практически пропадает, что связано с инерционностью преобразователя и наличием значительных масс в деталях подшипника (высокочастотные колебания не возможны в виду ограничения энергии и наличия инерции).

Для сравнительного анализа возможностей электрического сопротивления как диагностического параметра и вибрации, проведены исследования с высокой частотой дискретизации. Результаты представлены на рисунке 8.

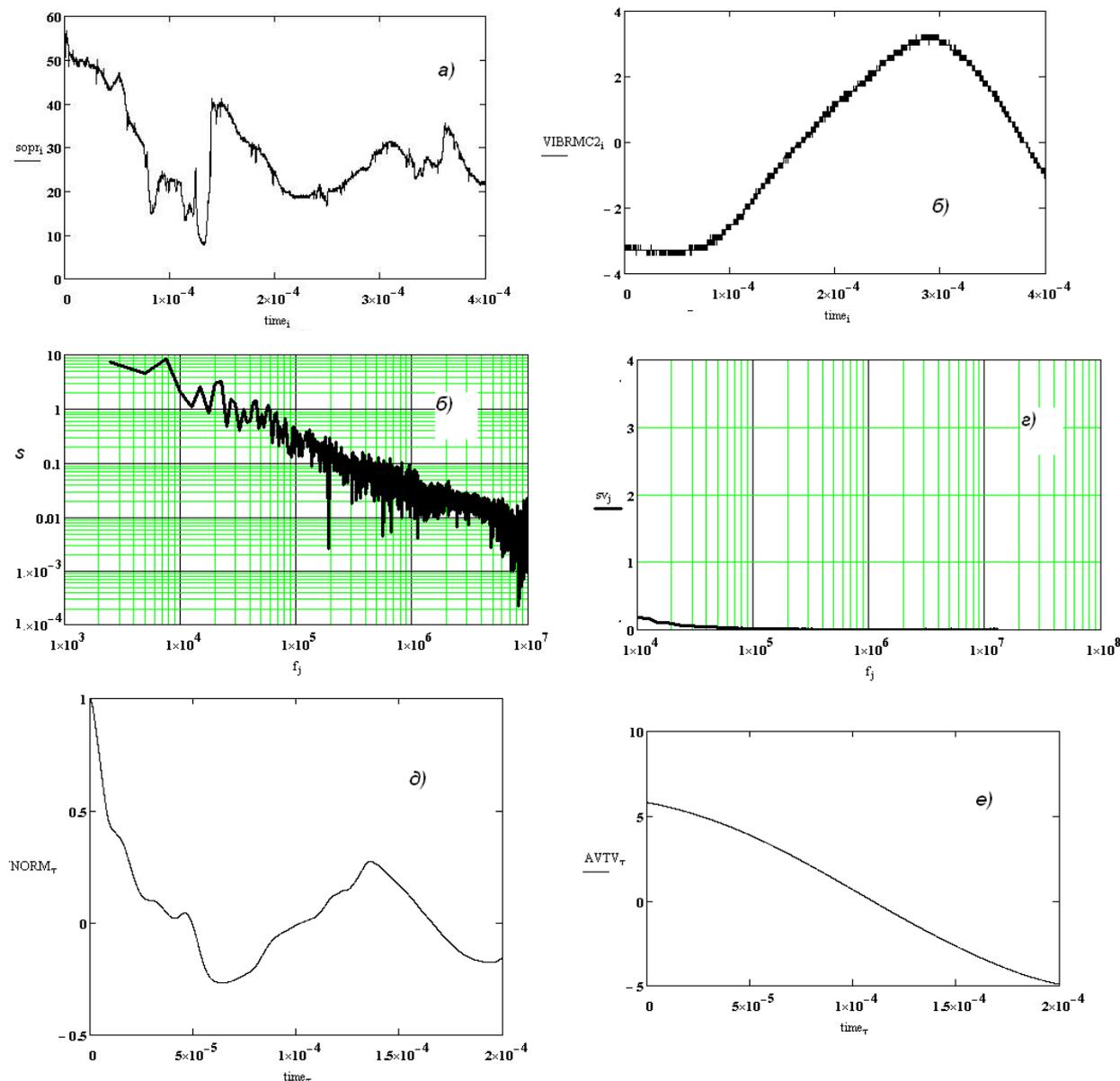
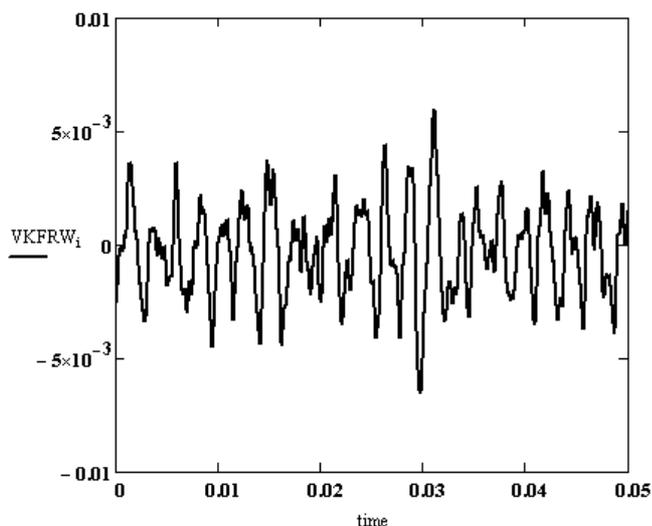


Рисунок 8 – Сигналы сопротивления и вибрации при большой частоте дискретизации

Как можно отметить, сигнал сопротивления (рисунок 8 а) более информативен на высоких частотах, чем сигнал вибрации (рисунок 8 б). Это подтверждается сравнением спектров этих сигналов (соответственно рисунок 8 в и рисунок 8 г). В области высоких частот сигнал вибрации практически не изменяется ввиду инерционности преобразователя и по другим, вышеуказанным причинам. В свою очередь, сигнал сопротивления претерпевает значительные изменения, что подтверждается как его спектром (рисунок 8 в), так и его автокорреляционной функцией (рисунок 8 д).

На рисунке 9, в качестве примера представлена нормированная совместной дисперсией взаимная корреляционная функция сигнала сопротивления и вибросигнала, полученная при частоте дискретизации 100 кГц. Как видно из диаграммы, взаимная корреляционная

функция показывает наличие детерминированных коррелированных составляющих в вибросигнале и сигнале электрического сопротивления подшипника, что говорит о единых источниках в формировании этих составляющих сигналов.



*Рисунок 9 – Нормированная взаимная корреляционная функция сигнала вибрации и сопротивления подшипника*

По результатам исследований можно утверждать, что диагностирование подшипника по его электрическому сопротивлению имеет значительные преимущества и в ряде случаев более объективно отражает его техническое состояние

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Подмастерьев, К.В. Электропараметрические методы комплексного диагностирования опор качения [Текст] / К.В. Подмастерьев – М.: Машиностроение-1. - 2001. – 376 с.

**Мишин Владислав Владимирович**

Орловский государственный технический университет,  
К.т.н., доцент кафедры «Приборостроение, метрология  
и сертификация»  
Тел. (4862)41-67-33  
E-mail: [vlad89290@gmail.com](mailto:vlad89290@gmail.com), [vm@rbcmail.ru](mailto:vm@rbcmail.ru)

**Селихов Алексей Владимирович**

Орловский государственный технический университет,  
Аспирант  
Тел. (4862) 41-98-76

**Майоров Максим Валерьевич**

Орловский государственный технический университет,  
г. Орел  
Аспирант  
Тел. (4862) 41-98-76  
E-mail: [stigmoto@gmail.com](mailto:stigmoto@gmail.com)

**Шаталов Кирилл Владимирович**

Орловский государственный технический университет,  
Студент  
Тел. (4862) 41-98-76

**Катыхин Александр Александрович**

Орловский государственный технический университет,  
Магистрант  
Тел. (4862) 41-98-76

**Некрасов Вадим Игоревич**

Орловский государственный технический университет,  
Студент  
Тел. (4862) 41-98-76

Е.В. ПАХОЛКИН, И.О. КОБЗЕВ

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ МАКСИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ШАРИКОПОДШИПНИКЕ. ЧАСТЬ 2. ПРИМЕНЕНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ГРУППЫ

В статье представлена вторая часть работы, посвященной расчетно-экспериментальному методу оценки температуры в зоне трения. Представлен способ, а также обоснование введения диагностических электрических параметров в разработанную модель. Получены зависимости приращений составляющих максимальной температуры, а также непосредственно самой максимальной температуры в подшипнике качения от введенных параметров.

**Ключевые слова:** подшипник, температура зоны трения, приращение температуры, электрические параметры.

In article the second part of the operation devoted to the rated-experimental valuation method of temperature in a zone of a friction is presented. The method, and also a substantiation of introduction of diagnostic electrical parameters is presented to the developed model. Dependences of increments making a maximum temperature are received, and also the most maximum temperature in the bearing of rolling from the gated in parameters.

**Keywords:** the bearing, temperature of a zone of a friction, a temperature increment, electrical parameters

### ВВЕДЕНИЕ

В первой части работы была представлена математическая модель максимальной температуры  $\mathcal{G}_{\max(i)}$  в подшипнике качения [1]. Модель включает в себя три составляющие приращения максимальной температуры: температура вспышки, средняя поверхностная и средняя объемная температура. Для каждой составляющей максимальной температуры был приведен анализ возможности определения входящих параметров модели. При этом сделаны выводы о возможности теоретической оценки большинства параметров и характеристик модели и указано на возможность введения в модель диагностических параметров, которые можно определить экспериментально.

$$\begin{aligned} \mathcal{G}_{\max(i)} = & \frac{\sqrt{2} + 1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\tau_N \cdot W_{\text{тр}} \cdot d_r \cdot a^{*0,5}_{(i)}}{A_r \cdot t_T \cdot [4 \cdot \lambda^*_{(i)} \cdot a^{*0,5}_{(i)} + \lambda^*_{(i)} \cdot (\pi \cdot d_r \cdot v_{\text{ск}})^{0,5}]} \\ & + \frac{\alpha_{\text{тр}} \cdot \Psi_{V(i)} \cdot W_{\text{тр}} \cdot b_{\phi(i)}}{\lambda_{(i)} \cdot A_a \cdot t_T} \cdot \left( 0,6 - 0,4 \cdot \sum_{n=1}^5 \frac{1}{n^2} \cdot \exp(-0,333 \cdot \pi^2 \cdot n^2 \cdot \tau) \right) \\ & + \frac{\alpha_{\text{тр}} \cdot W_{\text{тр}}}{\sigma' \cdot A_{\text{вент}} \cdot t_{\text{охл}}} \cdot \left( \frac{K_{(i)} \cdot t_{\text{охл}}}{e^{K_{(i)} \cdot t_{\text{охл}}} - 1} \right) + \mathcal{G}_0 \end{aligned} \quad (1)$$

где  $A_r$  – суммарная фактическая площадь контакта;

$t_T$  – время цикла трения;

$\tau_N$  – временной фактор мощности трения;

$W_{\text{тр}}$  – работа сил трения за один цикл;

$d_r$  – диаметр среднего пятна касания;

$a^*_{(i)}$ ,  $\lambda^*_{(i)}$  – коэффициенты температуропроводности и теплопроводности мате-

риала элемента узла трения при температуре  $\Delta \mathcal{G}^* + \Delta \mathcal{G}_v + \mathcal{G}_0$ ;

$v_{ск}$  – скорость относительного перемещения поверхностей при трении;

$\alpha_{тп}$  – коэффициент разделения тепловых потоков для  $i$ -го элемента пары трения;

$\Psi_{V(i)}$  – коэффициент, учитывающий понижение температуры за счет ее передачи в дополнительный теплопоглощающий объем;

$b_{эф(i)}$  – эффективная глубина передачи теплоты соответствующего элемента за время трения;

$\lambda_{(i)}$  – коэффициент теплопроводности материала пары трения;

$A_a$  – номинальная площадь контакта элементов трения;

$n$  – число членов ряда;

$\tau$  – относительное время трения (текущее время в одном цикле трения);

$K_{(i)}$  – коэффициент, характеризующий теплопоглощающую и теплоотдающую способность элемента трения;

$t_{охл}$  – интервал времени между циклами трения;

$\sigma'$  – коэффициент теплоотдачи;

$A_{вен(i)}$  – площадь открытой вентилируемой поверхности элементов пары трения;

$\vartheta_0$  – начальная температура пары трения;

$\Delta\vartheta^*$  – приращение средней поверхностной температуры;

$\Delta\vartheta_V$  – приращение средней объемной температуры.

### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Во второй части работы ставится задача введения в полученную математическую модель (1) параметров, характеризующих режим смазки в подшипнике качения и которые можно определить экспериментально.

### **ВВЕДЕНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В МАТЕМАТИЧЕСКУЮ МОДЕЛЬ**

Из всех трех составляющих приращения температуры наибольший вклад в максимальную температуру вносит ее приращение за счет температурных всплесков, реализующихся на вершинах микронеровностей [2]. Следовательно, наиболее целесообразным представляется выбор параметров, описывающих процессы контактирования микронеровностей. Причем, по причинам, изложенным в работе [3] предпочтение отдается параметрам, используемым при электропараметрических методах трибодиагностики.

Для доказательства сопровождения температурной вспышкой микроконтактирования тел качения с обоими кольцами имеет смысл отметить основные различия в физических процессах, происходящих на микроконтактах и в поверхностных слоях при трении без смазочного материала и со смазочным материалом. Согласно работе [4] в первом случае структурные и фазовые превращения определяются динамическим фактором – давлением, зависящим от фактической площади контакта и реализующим некоторое температурное поле, при участии скорости трения. Во втором случае доминирующим является кинематический фактор – скорость трения, в то время как давление, действующее в пределах номинальной площади, определяет лишь толщину смазочного слоя. Таким образом, при микропроскальзывании тела качения по поверхности неподвижного кольца в присутствии пластичного смазочного материала, а именно его жидкой фракции, реализуются в основном упругопластические металлические контакты (столкновения) вершин микронеровностей, нежели металлические контакты, образующиеся за счет сдавливания вершин микронеровностей, и не приводящие к значительным кратковременным скачкам температуры. Причем, по мере перехода от полужидко-

стной к граничной смазке при формировании металлических контактов роль давления будет увеличиваться, а роль скорости уменьшаться.

Также согласно [5] на вероятность микроконтактирования в подшипнике оказывают влияние только те участки рабочих поверхностей его деталей, которые за время оценки вероятности попадают в контактные зоны нагруженных тел качения с кольцами. Поскольку в данной работе рассматривается статическое нагружение и полужидкостный режим трения то справедливо предположить, что скользящие микроконтакты тела качения и дорожек качения будут иметь место лишь для максимально нагруженного тела качения.

Исходя из приведенных тезисов по выбору диагностических параметров, предлагается совместное использование нормированного интегрального времени электрического контактирования (НИВ) и средней частоты микроконтактирования (СЧМ).

Численно параметр НИВ, определяется выражением

$$\text{НИВ} = \frac{\sum_{i=1}^{n_T} (t_{ki} - t_{hi})}{T_{и}} \quad (2)$$

где  $n_T$  – число импульсов активной электрической проводимости  $g(t)$  объекта, превышающих по величине некоторое пороговое значение активной проводимости  $g(t)_{\text{пор}}$ , зафиксированных за время  $T_{и}$ ;

$t_{h(k)i}$  – время начала (конца)  $i$ -го импульса активной электрической проводимости;

$T_{и}$  – время измерения параметра.

Таким образом, параметр НИВ, являясь оценкой вероятности разрушения смазочного слоя, характеризует относительное время, в течение которого происходили контактирования в зоне трения.

Параметр СЧМ численно определяется следующим образом:

$$\text{СЧМ} = n_T / T_{и} \quad (3)$$

и характеризует число импульсов активной электрической проводимости за время измерения. Время одного импульса электрической проводимости принимается за время одновременного существования пятен контакта обоих колец с нагруженным телом качения. Схематично запись реализации активной электрической проводимости работающего подшипника качения во времени  $t$ , за время измерения  $T_{и}$  представлена на рисунке 1:

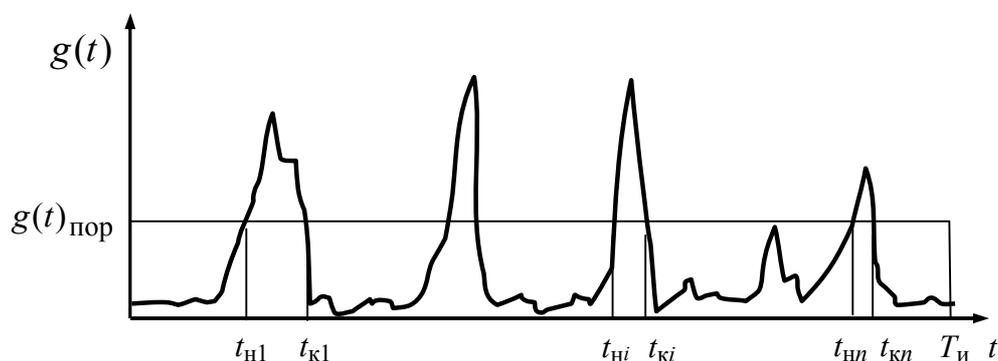


Рисунок 1 – Схематическая реализация активной электрической проводимости работающего подшипника от времени

Таким образом, зная долю времени трения за время измерения диагностических параметров, а также количество импульсов, реализовавшихся в течение времени трения, можно рассчитать среднее время единичного контактирования (данный параметр известен как средняя длительность микроконтактирования – СДМ). Это время, в свою очередь, является оцен-

кой времени трения микронеровностей поверхностей кольца и тела качения  $-t_T$ . Среднее за время измерения значение этого времени можно определить из выражения:

$$t_T = \frac{\text{НИВ}}{\text{СЧМ}} = \sum_{i=1}^{n_T} (t_{ki} - t_{hi}) / n_T. \quad (4)$$

Поскольку у неподвижного кольца в контакт вступают в основном одни и те же микронеровности поверхности, то время между окончанием одного импульса проводимости и до начала следующего импульса можно принять за время охлаждения этих микронеровностей. Средняя частота появления интервалов охлаждения за время измерения равна средней частоте импульсов проводимости, поскольку после каждого импульса следует интервал времени его отсутствия. Таким образом, зная суммарную долю времени охлаждения, а также среднюю за время измерения частоту появления интервалов охлаждения, можно определить среднее время охлаждения  $t_{охл}$ :

$$t_{охл} = \frac{1 - \text{НИВ}}{\text{СЧМ}} = \frac{T_{и} - \sum_{i=1}^{n_T} (t_{ki} - t_{hi})}{n_T}. \quad (5)$$

Определив подобным образом в модели (1) время трения и время охлаждения, можно получить зависимость максимальной температуры узла трения качения от экспериментально определяемых параметров НИВ и СЧМ:

$$\begin{aligned} g_{\max(i)} = & \frac{\sqrt{2} + 1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\tau_{N1} \cdot W_{\text{ТП}}(\text{НИВ}, \text{СЧМ}) \cdot d_r \cdot a_{(i)}^{0,5}}{A_r(\text{НИВ}, \text{СЧМ}) \cdot \frac{\text{НИВ}}{\text{СЧМ}} \cdot \left[ 4 \cdot \lambda'_{(i)} \cdot a_{(i)}^{0,5} + \lambda'_{(i)} \cdot (\pi \cdot d_r \cdot v_{\text{СК}}(\text{НИВ}, \text{СЧМ}))^{0,5} \right]} \\ & + \frac{\alpha_{\text{ТП}} \cdot \Psi_{V(i)} \cdot W_{\text{ТП}}(\text{НИВ}, \text{СЧМ}) \cdot b_{\text{эф}(i)}(\text{НИВ}, \text{СЧМ})}{\lambda_{(i)} \cdot A_a \cdot \frac{\text{НИВ}}{\text{СЧМ}}} \cdot \left( 0,6 - 0,4 \cdot \sum_{n=1}^5 \frac{1}{n^2} \cdot \exp(-0,333 \cdot \pi^2 \cdot n^2 \cdot \tau) \right) \\ & + \frac{\alpha_{\text{ТП}} \cdot W_{\text{ТП}}(\text{НИВ}, \text{СЧМ})}{\sigma' \cdot A_{\text{вен}} \cdot \frac{1 - \text{НИВ}}{\text{СЧМ}}} \cdot \left( \frac{K_{(i)} \cdot \frac{1 - \text{НИВ}}{\text{СЧМ}}}{e^{K_{(i)} \cdot \frac{1 - \text{НИВ}}{\text{СЧМ}} - 1}} \right) + g_0. \end{aligned} \quad (6)$$

Необходимо отметить, что в модели (1) изначально присутствует еще один параметр, который может рассматриваться в качестве параметра, определяемого не теоретически, а экспериментально. Это фактическая площадь контакта  $A_r$ . Однако, экспериментальное определение данного параметра на основе теории электрорезистивных методов трибодиагностики представляется на порядок более сложной задачей, в связи с чем будем рассматривать данный параметр как определяемый аналитически.

### **АПРОБАЦИЯ МОДЕЛИ**

При помощи составленной модели для радиального однорядного шарикоподшипника типа 7000101, заправленным пластичным смазочным материалом Литол-24 были оценены:

- приращение средней объемной температуры неподвижного кольца;
- приращение средней поверхностной температуры номинальной площади трения неподвижного кольца;
- приращение температуры вспышки, на вершинах микронеровностей поверхности неподвижного кольца, находящихся в пределах номинальной площади;
- максимальная температура, существующая на вершинах микронеровностей поверхности неподвижного кольца, находящихся в зоне номинальной площади контакта.

За неподвижное кольцо принималось наружное кольцо шарикоподшипника.

При этом условия работы подшипника были следующие:

- шарикоподшипник нагружен статически радиальной нагрузкой  $F = 5000 \text{ Н}$  ;
- частота вращения внутреннего кольца  $n = 20000 \text{ мин}^{-1}$ ;
- скорость воздушного потока, обдувающего узел трения равна нулю,
- начальная температура равна температуре окружающей среды ( $T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ );

Допущения, принимаемые при расчете:

- коэффициент трения микронеровностей при ювенильном контакте - 0,8;
- при расчете приращения температуры вспышки не учитывалось изменение теплофизических характеристик стали от приращения средней поверхностной температуры.

Значения трех приращений максимальной температуры, а также собственно максимальной температуры рассчитывались в диапазоне параметров:

- вероятность разрушения смазочного слоя (оцениваемая по НИВ) в диапазоне  $10^{-11} \dots 0,9$  (диапазон принят с запасом);

- СЧМ в диапазоне  $10^3 \dots 10^9 \text{ Гц}$  (данный диапазон соответствует времени существования температурных вспышек на фактических пятнах контакта [2]).

Графики зависимости приращения средней объемной, средней поверхностной температуры, температуры вспышки, а также максимальной температуры как суммы всех перечисленных и начальной температуры узла трения приведены на рисунках 2 и 3.

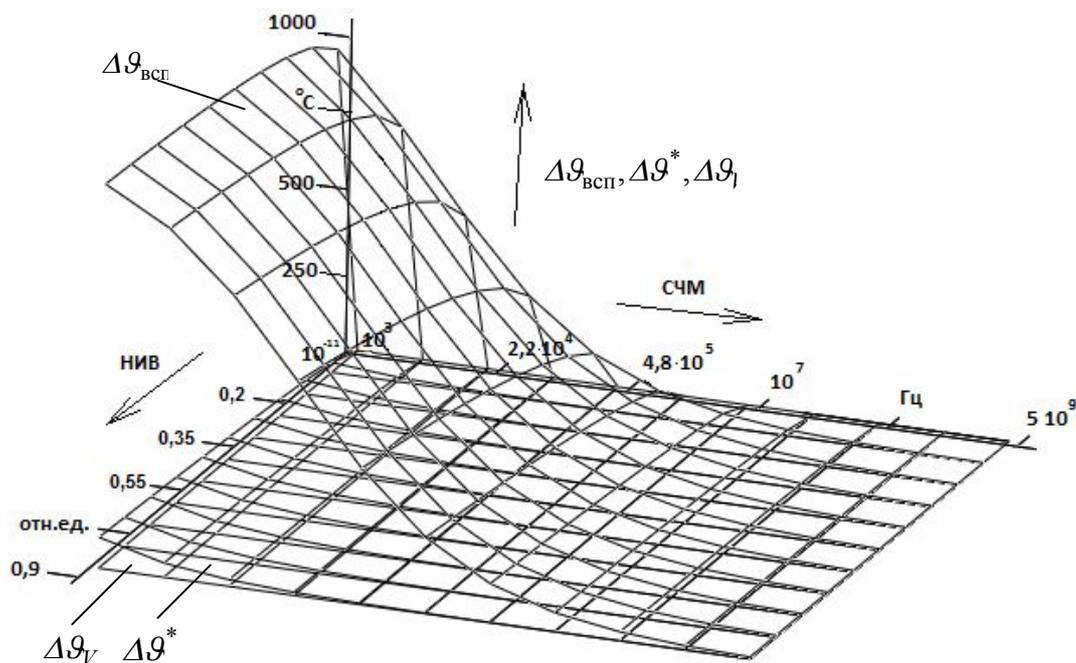


Рисунок 2 – Зависимости трех составляющих приращений максимальной температуры от параметров НИВ и СЧМ

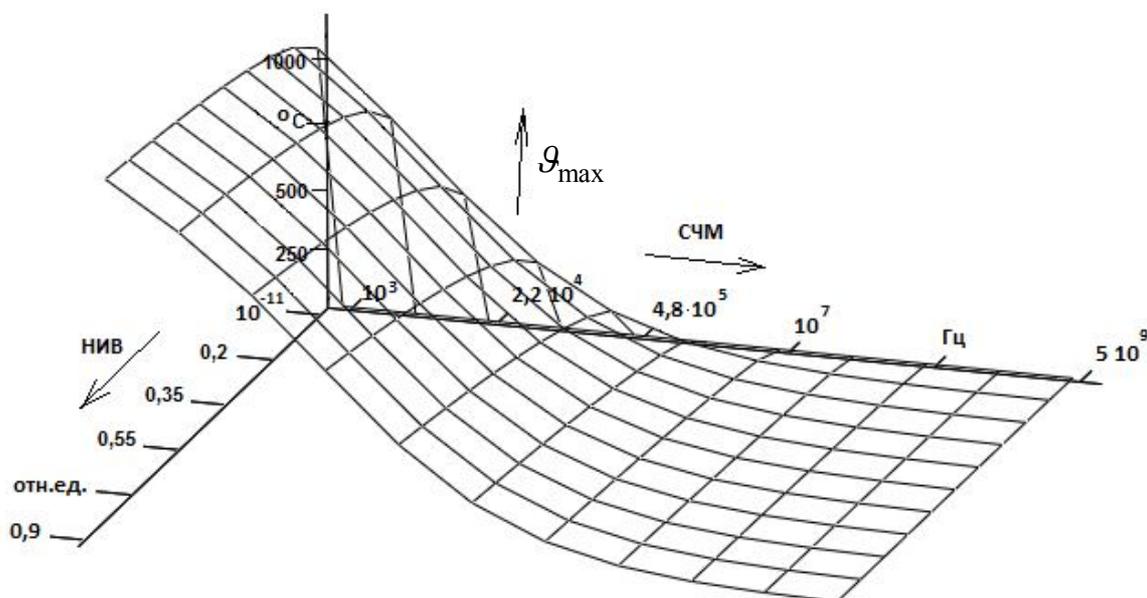


Рисунок 3 – Зависимость максимальной температуры от параметров НИВ и СЧМ

На рисунке 2 показано, что наибольшее значение имеет приращение температуры, вызванное температурными всплесками на фактических пятнах контакта, меньшее значение – приращение средней поверхностной температуры. Еще более низкое приращение наблюдается для средней объемной температуры. График максимальной температуры, существующей на фактических пятнах касания и представленный на рисунке 3 получен путем сложения вышеперечисленных составляющих температуры, а также начальной температуры узла трения. Из графиков видно, что с увеличением СЧМ приращения составляющих максимальной температуры уменьшаются, с увеличением НИВ – увеличиваются.

Зависимость приращения максимальной температуры, которое вызвано температурными всплесками от времени трения для высоты микронеровности в 1 мкм, и аналогичная зависимость, полученная в работе [4] представлены на рисунке 4.

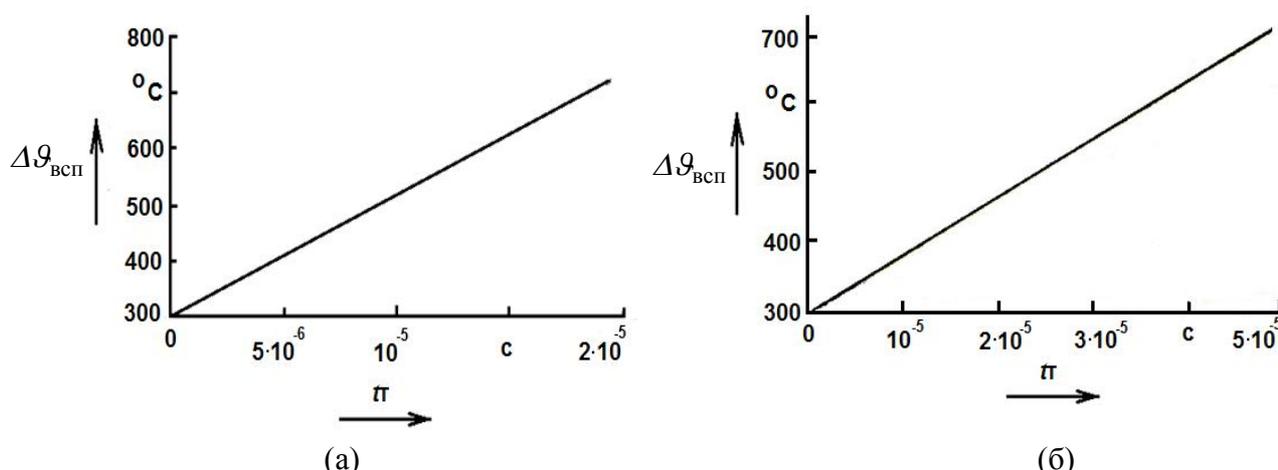


Рисунок 4 – Зависимости приращения максимальной температуры за счет температурных всплесков от времени трения

а – зависимость, полученная с помощью разработанной модели;  
 б – зависимость, полученная А.В. Чичинадзе с помощью той же модели, но для отличающихся условий работы трибосопряжения

## ВЫВОДЫ

Несмотря на то, что приведенные на рисунке 3 зависимости отличаются количественно, так как они были получены для различных условий (в работе [4] описаны не все параметры), видно, что обе зависимости носят линейный характер, и указывают на увеличение приращения температуры с увеличением времени трения. Это в свою очередь свидетельствует об адекватном описании приращения максимальной температуры за счет температурных всплесков в составе предложенной модели максимальной температуры.

Следует отметить, что с помощью предложенной модели можно лишь приближенно оценить максимальную температуру в шарикоподшипнике. Значительный вклад в формирование максимальной температуры вносят также тепловые потери от упругого гистерезиса, тепловыделения при трении тел качения о сепаратор и др., не учитываемые в данной модели. Однако, допускается, что влияние вышеперечисленных факторов на узел трения проявляется в равной степени у всех узлов трения в партии. Кроме того, по сравнению с тепловыделением, возникающим вследствие микропроскальзывания (особенно на вершинах микронеровностей), тепловыделение от перечисленных выше факторов можно считать незначительными.

Последние допущения позволяют использовать предложенный метод для сравнительной оценки максимальной температуры узлов трения одной серии на этапе доэксплуатационного контроля. С помощью данного метода может быть проведена выборка узлов трения, имеющих более низкую температуру при работе в заданных условиях эксплуатации, а следовательно, наиболее пригодных для этих условий по температурному критерию.

*Работа выполняется при поддержке РФФИ, грант 09-08-99076, а также при поддержке аналитической ведомственной целевой программы “Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2010 годы)”, код проекта 2.1.2/2075.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кобзев, И.О. Расчетно-экспериментальный метод оценки максимальной температуры в шарикоподшипнике. Часть 1. Математическая модель максимальной температуры [Текст] / И.О. Кобзев, Е.В. Пахолкин // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии* – 2010. - № 6 (статья принята в печать).
2. Чичинадзе, А.В. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) [Текст]: научное издание / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун [и др.]; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с. ил. - ISBN 5-217-03193-X (в пер.).
3. Кобзев, И.О. Анализ методов оценки температуры всплески в узлах трения [Текст] / И.О. Кобзев, Е.В. Пахолкин // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии* – 2010. – № 2/3– С. 9-16.
4. Маленко, П.И. Исследование влияния температур на дискретных множественных контактах на триботехнические свойства пар трения скольжения со смазочным материалом [Текст] / П.И. Маленко // *Вестник машиностроения*. – 2009. – №10. – С. 33 - 42.
5. Подмастерьев, К. В. Электропараметрические методы комплексного диагностирования опор качения [Текст] / К.В. Подмастерьев. - М.: Машиностроение - 1, 2001. - 376 с.: ил. – ISBN 5-94275-001-7.
6. Чичинадзе, А.В. К вопросу оценки температурных всплесков на фрикционном микроконтакте [Текст] / А.В. Чичинадзе, П.Н. Курочка, Н.В. Поляков, В.И. Ключников // *Трение и износ* – 1999. – Т.20 № 2 – С. 132-136.

### **Пахолкин Евгений Васильевич**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»  
Тел. 89208112686  
E-mail: eugene\_p@bk.ru

### **Кобзев Илья Олегович**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Аспирант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»  
Тел. 89208085387  
E-mail: [K87-107019@yandex.ru](mailto:K87-107019@yandex.ru)

Л.А. БОНДАРЕВА, В.Н. ВОЙТЕВИЧ

## ИЗМЕРЕНИЕ БИОПОТЕНЦИАЛА РАСТЕНИЙ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

*В статье проводится анализ актуальности и областей возможного использования измерения биоэлектрического потенциала растений, оценка современного состояния исследований биоэлектрического потенциала и выделяется круг решаемых задач с использованием результатов таких исследований.*

**Ключевые слова:** функциональное состояние, растение, биоэлектрический потенциал, мониторинг.

*The article analyzes the relevance and areas of possible use of measuring bioelectric potential of plants, assessment of the current state of research on bioelectric potential and stands range of tasks using the results of such research.*

**Keywords:** functional condition, plant, bioelectric potential, monitoring.

Биоэлектрические потенциалы (БЭП) наиболее емко характеризуют физиолого-биохимическую активность растений, интенсивность движения воды, минеральных элементов, отображают их общее состояние, так как данный показатель тесно связан с процессами обмена веществ. БЭП следует рассматривать как *интегральный показатель* всех физиологических, биохимических и биофизических процессов, протекающих в живых тканях. Поэтому они могут выступать объективным критерием жизнеспособности растений, причем более жизнеспособными следует считать растения, у которых разность потенциалов выше.[1]

Стоит отметить, что биофизические, и в частности электрофизиологические, методы позволяют быстро получать прижизненную интегральную информацию о структурных, физико-химических и функциональных особенностях биологических объектов и давно применяются в медицине в качестве средства функциональной диагностики.

В то же время характер и причинные механизмы связи электрофизиологических показателей с функциональным состоянием растений, особенно древесных, изучены еще недостаточно, что сдерживает применение этих методов в ботанике.

Наличие явных ритмических изменений позволяет говорить о присутствии различных информативных составляющих в фиксируемом сигнале, выявить которые можно попытаться, проведя спектральный анализ. В некоторых источниках присутствуют данные о наличии нескольких достаточно высокочастотных составляющих в сигнале БЭП, но исследования здесь практически не проводились, а зафиксированные результаты представляются пока очень сомнительными.

На данный момент можно считать в достаточной степени изученными процессы, протекающие в отдельной клетке, но относительно целого растения работ крайне мало, а степень описания (особенно математического) минимальна. До настоящего времени определение величин пороговых параметров воздействия производится, как правило, по конечным результатам жизнедеятельности (повышение или понижение урожайности, фиксирование биологической смерти и др.).

Однако, существуют естественные условия произрастания растений, включающие минимальные величины воздействия, приводящие к появлению реакций растений, и максимальные, превышение которых может приводить к торможению развития или к биологической смерти. В этом диапазоне параметров внешние воздействия используются природой зеленых растений в качестве основы процесса жизнедеятельности. Изменение БЭП под влиянием тех или иных факторов происходит намного быстрее, чем изменение внешних морфометрических признаков растений, поэтому по нему можно судить о состоянии растения и регулировать его. Наличие многопараметрической системы, т.е. явное влияние нескольких факторов внешней среды на состояние растения, делает необходимым изучение как влияния

каждого отдельного фактора при фиксации изменения остальных, так и влияния всех факторов в совокупности.

Причем степень влияния факторов требует дополнительного изучения, выявления действующих закономерностей и создания адекватных математических моделей, которые бы качественно и с большой степенью точности могли бы оценить степень воздействия различных факторов на произрастание растений.[2]

Одним из главных методов изучения динамики растительного покрова под воздействием естественных и антропогенных факторов является ботанический мониторинг, под которым понимается специальное длительное слежение за состоянием растительности на постоянных пробных площадях и ключевых участках. Ботанический мониторинг оперирует множеством параметров и показателей, одним из таких показателей и может служить биоэлектрический потенциал растений.

Безусловно, информация о состоянии окружающей природной среды, об изменениях этого состояния давно используется человеком для планирования своей деятельности. Уже более 100 лет наблюдения за изменением погоды, климатом, экологической ситуацией, целостностью растительного и животного мира ведутся регулярно в цивилизованном мире. Совершенствование методов мониторинга состояния окружающей среды в условиях постоянно возрастающего антропогенного воздействия на наземные и водные экосистемы остается и будет оставаться одной из актуальных и пока сложно-разрешимых задач при разработке оперативных методов оценки среды и осуществлении экологического мониторинга.

По мнению многих экологов, оценка качества среды должна иметь интегральный характер, так как выяснение степени загрязнения среды только с позиции действия предельно допустимых концентраций токсичных веществ не учитывает возможного эффекта от нескольких факторов в различных сочетаниях. Предпочтительной в этом отношении представляется биологическая оценка среды обитания, основанная на показателях "самочувствия" живого организма. В качестве таких организмов как раз и могут выступать различные растения, которые легкодоступны и окружают человеческую деятельность повсеместно, а в качестве интегрального показателя оценки их состояния – биоэлектрический потенциал.[3]

Кроме этого подобный подход позволит прогнозировать результаты различных воздействий на окружающую среду и оптимизировать параметры воздействия на живые организмы и растения с целью обеспечения наилучших условий их репродукции и жизнедеятельности. Биоэлектрические потенциалы можно использовать в качестве обратных связей системы воспроизводства растений, которая функционирует в определенных границах питательной среды, давления, энергии светового потока, температуры и состава газовой среды.

Конечно, создание микроклимата для растений, выращиваемых в искусственных условиях, проводится сейчас с использованием достаточно большого количества разнообразных параметров, позволяющих регулировать освещенность, полив, температуру в теплицах, а также осуществлять стимуляцию процесса роста, цветения и др. Однако все они к растению имеют косвенное отношение и задаются программно на основании рекомендаций, либо вручную. Поэтому разработчики, в частности, теплиц говорят о необходимости выделения информативного интегрального параметра, который бы легко снимаясь, не травмировал бы растение и давал информацию для регулирования состоянием растения.

Предпосылками проведения исследований в этом направлении служат потребности научных учреждений, занимающихся мониторингом, и предприятий АПК при производстве сельскохозяйственной продукции с обеспечением оптимальных условий жизнеобеспечения и получения урожаев селекционных сельскохозяйственных культур [2].

Работа в условиях селекционных центров требует широкой и гибкой стратегии организации селекционного процесса. Проведение отборов в искусственно создаваемых контролируемых условиях с использованием дополнительного критерия, в качестве которого выступает биоэлектрический потенциал растений, позволит значительно ускорить создание новых более адаптированных сортов и перейти на качественно новый уровень организации селек-

ционного процесса. Такая работа предполагает непосредственное участие технических работников в селекционном процессе, наряду со специалистами других профилей. Работы в этом направлении сейчас ведутся и являются не только актуальными, но и перспективными.

Таким образом, придание приоритетного значения биоэлектрическим потенциалам растений в качестве основного “диагностического” показателя позволяет использовать их для решения широкого круга задач:

– оценка функционального состояния растений, т.е. количественная оценка физиологических и биохимических процессов, протекающих в растении в процессе его роста при ботаническом мониторинге;

– оценка влияния на различные растения неблагоприятных факторов внешней среды, т.е. использование результатов измерения биопотенциала растений как комплексного показателя для экологического мониторинга;

– оценка состояния растения и его изменений из-за изменения факторов среды, в которой произрастает растение, т.е. температурных условий, условий полива, освещения, подкормки различными удобрениями и т.д.;

– проведение на основании результатов измерения электрического потенциала растений селекционного отбора растений по морозо-, влагоустойчивости и т.д.;

– использование результатов измерения электрического потенциала растений в тепличном хозяйстве для:

- коррекции условий произрастания растений;
- выбора оптимальных параметров условий произрастания;
- коррекции режимов работы оборудования на основании комплексной оценки состояния растений, условий в теплице и вне её и т.д.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коловский, Р.А. Биоэлектрические потенциалы древесных растений [Текст] – Новосибирск: Наука, 1980. –176 с.
2. Морозов, В.А. Комплекс для регистрации биопотенциалов растений [Текст]: дис. ... канд. техн. наук. Ижевск, 2005 – 165 с. РГБ ОД, 61:06-5/1019
3. Захаров, В. М. Биотест. Интегральная оценка здоровья экосистем и отдельных видов [Текст] / В. М. Захаров, Д. М. Кларк — М.: Моск. отд. Международного Фонда “Биотест”, 1993. – 68 с.
4. Опритов, В.А. Биоэлектrogenез у высших растений [Текст] / В.А. Опритов, С.С. Пятычин, В.Г. Ретивин – М.: Наука, 1991.

#### **Бондарева Людмила Александровна**

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Кандидат технических наук, доцент кафедры ”Приборостроение, метрология и сертификация”

Телефон: (4862)41-98-76

Факс: (4862)41-98-21

E-mail: [pms35@ostu.ru](mailto:pms35@ostu.ru)

#### **Войтевич Виталий Николаевич**

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Магистр направления "Биомедицинская инженерия"

E-mail: [truver@bk.ru](mailto:truver@bk.ru)

Ю.Г. ГУЖЕНКОВА, Д.А. ТУПИКИН

## КОНТРОЛЬ ВЛИЯНИЯ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ НА ИЗНОС ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

*При работе зубчатого зацепления с эвольвентным профилем, выполненным без погрешностей, происходит только качение поверхности одного зубчатого колеса по другому. Реально, из-за погрешностей изготовления колёс и их посадки на валы, кроме трения качения, возникает трение скольжения, приводящее к ускоренному износу. Поэтому возникает проблема контроля трения скольжения. В статье описан один из методов осуществления этого контроля.*

**Ключевые слова:** трение скольжения, шестерни, зуб, износ, заедание, контроль, отказ.

*By work the cogged getting with evolving profile, which is execute without mistakes, is occur the only rolling of surface one cogged wheel on the other. Is real, from mistakes making wheels and they landing on the shafts, except friction of rolling, is arise the friction of sliding, which is lead to accelerated wear. Therefore is arise the problem of control the friction of sliding. In this article is describing the one of methods of carrying this control.*

**Keywords:** a sliding friction, gear wheels, tooth, deterioration, jamming, control, refusal.

Повышение долговечности приводов машин является одним из важнейших (наряду с снижением себестоимости и повышением производительности) требований к проектированию машин, которое в значительной степени обеспечивается за счет увеличения ресурса основных деталей привода и, в первую очередь, за счет повышения износостойкости их контактных поверхностей. Обеспечение высокой износостойкости (особенно высших кинематических пар – например, зубчатых колес) необходимо не только, чтобы предотвратить поломки из-за уменьшения рабочего сечения деталей вследствие их износа, но и для уменьшения влияния износа на параметры качества машин – уровень шума, точность позиционирования систем и т.д.

Несущая способность и износостойкость зубчатых передач определяются уровнем конструктивных решений по обеспечению оптимальных условий работы передач, качеством их изготовления и степенью соответствия условий эксплуатации режимам, принятых при их проектировании.

Конструктивные решения по обеспечению необходимой несущей способности зубьев зубчатых передач обычно базируются на выполнении условий предотвращения двух основных видов повреждений: поломок зубьев (статических и усталостных) и контактного усталостного выкрашивания (питтинг) рабочих поверхностей. Методы расчета изгибной и контактной выносливости достаточно хорошо разработаны, прошли многолетнюю эксплуатационную проверку и являются основными методами расчета зубчатых передач на прочность, что нашло свое отражение в различных стандартах.

Износостойкость определяется, как свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения. Соответственно, изнашивание представляет собой процесс постепенного изменения размеров тела при трении, проявляющийся в отделении с поверхности трения материала и (или) его остаточной деформации.

В зубчатых передачах имеет место граничное трение качения с проскальзыванием. При этом основным видом изнашивания является абразивно-усталостное механическое изнашивание, а в случае наступления заедания – молекулярно-механическое.

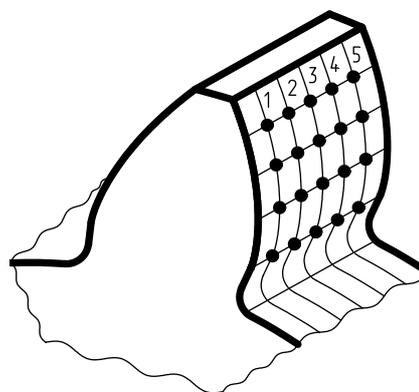
Абразивно-усталостное механическое изнашивание приводит к постепенному изменению формы и размеров трущихся тел. Несмотря на четкость таких распространенных понятий, как трение, изнашивание и износостойкость, определение численных значений этих величин для конкретных условий эксплуатации представляет значительные трудности. Это объясняется сложностью физических, химических и механических явлений, имеющих место

в зоне контакта тел, и огромным количеством взаимно влияющих факторов, определяющих конечный результат изнашивания.

Сложность и неоднозначность численной оценки процесса изнашивания подтверждается большим количеством публикаций, посвященных этой теме. Так, например, в работе [1] даже утверждается, что долговечность вновь проектируемой передачи, подверженной не усталостным разрушениям, можно оценить в какой-то степени только на основании опыта эксплуатации аналогичных передач, работающим в условиях, близких к тем, в которых будет работать проектируемая.

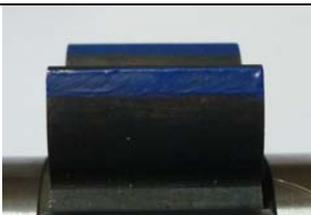
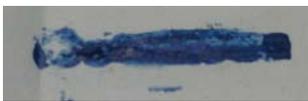
Особое место в проблеме износостойкости зубчатых передач принадлежит заеданию – то есть процессу возникновения и развития повреждений поверхности трения вследствие схватывания и переноса материала [2]. Для смазываемых поверхностей обязательным условием возникновения заедания является разрушение разделяющей их смазочной масляной пленки. Возникновению разрушения пленки способствует увеличение скорости скольжения и уменьшения скорости качения. С ростом скорости скольжения растет мощность трения и уменьшается толщина смазочного слоя.

Для выяснения распределения трения скольжения на поверхности зуба был проведен следующий эксперимент. На эвольвентную поверхность зуба зубчатого колеса наносилась полоска краски «берлинская лазурь» шириной 2 мм. После высыхания краски зубчатое колесо помещалось в корпус, где входило в зацепление с парным колесом. Зубчатые колеса проворачивали один оборот, после чего разбирали передачу. На исследуемой шестерни происходило смещение полоски краски (см. таблицу 1). Это смещение измерялось в пяти точках по ширине зуба (рис.1). Полоски краски наносились в пяти разных местах на поверхности зуба, начиная от вершины и заканчивая ножкой зуба.

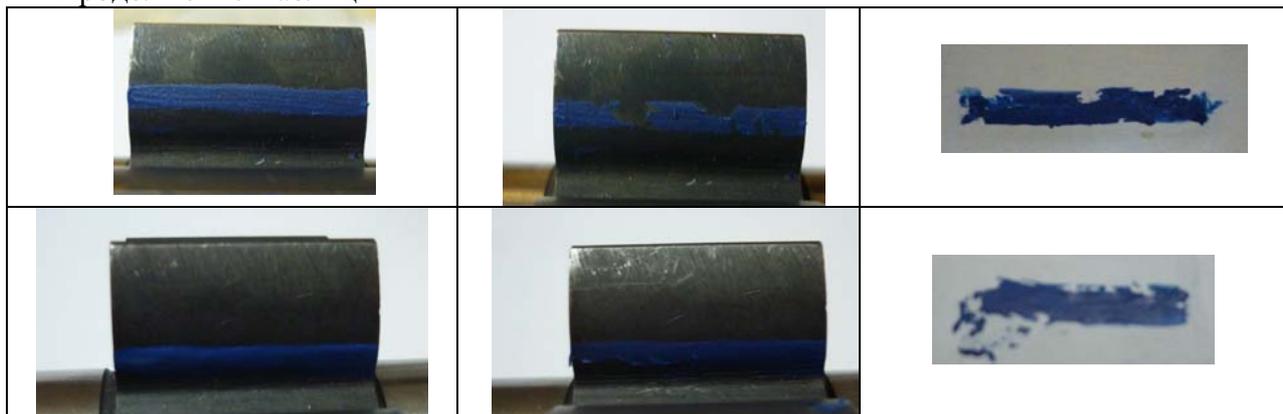


*Рисунок 1 – Точки на поверхности зуба, в которых снимались измерения*

Таблица 1 – Пример полученных результатов

Полоска краски до зацепления	Полоска после зацепления	Отпечаток полоски краски, перенесенный на бумагу
		
		
		

Продолжение таблицы 1



Полоски краски наносились на поверхности пяти разных шестерен, по 24 раза в каждом положении. Результату были обработаны и усреднены. Зависимость величины смещения краски от положения на поверхности зуба представлена на графике (рисунок 2).

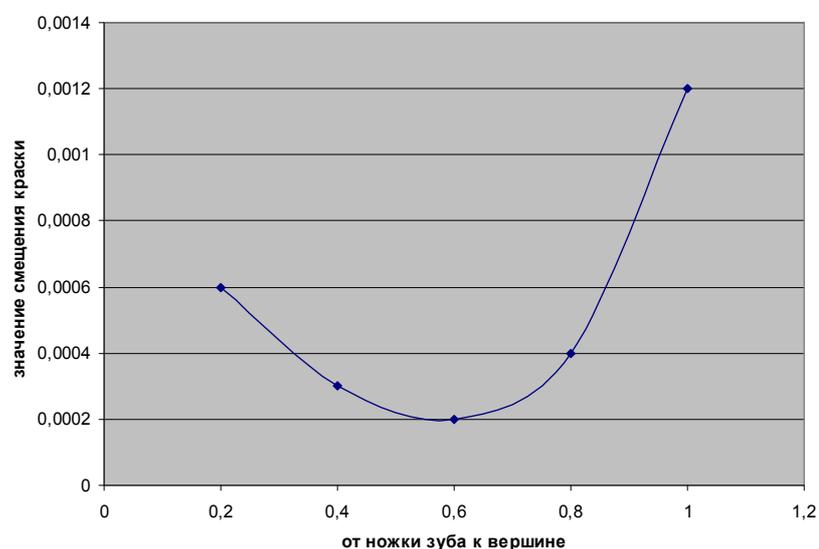
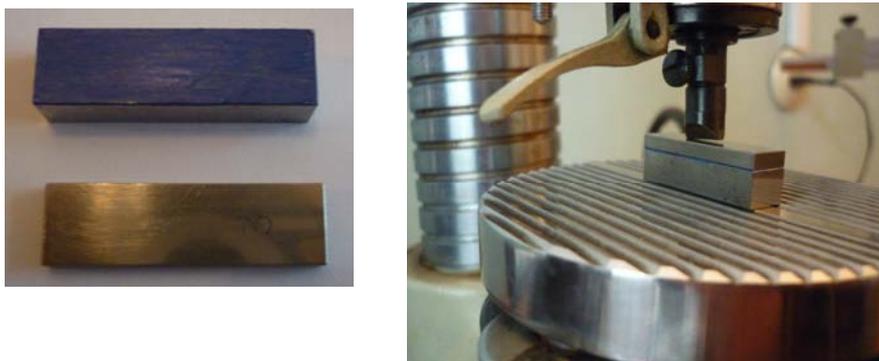


Рисунок 2 – График зависимости неравномерности величины смещения краски от положения на поверхности зуба.

На графике видно, что величина смещения полоски краски в зависимости от места ее нанесения не одинакова. Наибольшее смещение наблюдается у вершины зуба. Следовательно в момент вхождения зуба в зацепление наряду с трением качения присутствует трение скольжения. Далее, величина смещения краски имеет меньшие значения (преобладает трение качения), а у ножки зуба ее значение опять увеличивается – имеет место проскальзывание.

Толщину слоя наносимой краски определили следующим образом – взяли две пластинки из набора ПКМД притерли их друг к другу и выставили по ним шкалу оптиметра на ноль. После чего разъединили пластины и нанесли на них слой краски (рисунок 3). Совместили пластины и провели серию измерений. После чего удалили краску. Затем повторили все еще несколько раз. Обработав полученные результаты получили, что средняя толщина слоя краски составляет 20 мкм.

Из проведенного эксперимента видно, что вследствие трения скольжения часть краски на поверхности зуба смещалась. Зная толщину наносимого слоя краски можно утверждать, что в местах где краска не сместилась, между поверхностями зубьев есть зазор, превышающий 20 мкм., в тех же местах, где краска сместилась, зазор имеет меньшее значение. По ширине зуба значения величины смещения краски неодинаковы.



*Рисунок 3 - Определение толщины пленки*

Неравномерность смещения полоски краски по ширине зуба свидетельствует, что оценка долговечности зубчатой передачи по исходным параметрам эвольвентных профилей зубьев является приближенной и не отражает того факта, что из-за износа зубьев форма профиля становится отличной от эвольвентной, в результате чего изменяются нагрузочно-кинематические параметры контакта, которые, в свою очередь, изменяют интенсивность изнашивания и форму профилей зубьев.

Для прогнозирования отказов зубчатых передач, в частности заедания, и предотвращения их возникновения очень важен вопрос контроля влияния трения скольжения на износ зубчатых колес. Изучение этого вопроса позволит оценивать реальное состояние зубчатой пары, выявлять характер износа каждого зуба передачи, осуществлять своевременный ремонт, что в свою очередь позволит уменьшить расходы, связанные с внезапными отказами машин.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Дроздов, Н.Ю. Трение и износ в экстремальных условиях. Справочник. [Текст] / - М.: Машиностроение, 1957. - 180 с.
2. Кудрявцев, В.Н. Зубчатые передачи [Текст] / В.Н. Кудрявцев. - М.: Машиностроение, 1957. - 180 с.
3. Юдин, Е.М. Шестеренные насосы [Текст] / Е.М. Юдин. - М.: Машиностроение, 1964. - 235 с.
4. Крагельский, И.В. Узлы трения машин [Текст] / И.В. Крагельский, Н.М. Михин. - М.: Машиностроение, 1984. - 280 с.
5. Тайц, Б.А. Точность и контроль зубчатых колес [Текст] / Б.А. Тайц. - М.: Машиностроение, 1972. - 368 с.
6. Ряховский, О.А. Детали машин [Текст] / Б.А. Тайц. - М.: Дрофа, 2002. - 288 с.

#### **Гуженкова Юлия Гавриловна**

Орловский государственный технический университет, г. Орел  
Аспирантка  
Тел. (48677) 2-39-36  
E-mail: [strekoza-iula@yandex.ru](mailto:strekoza-iula@yandex.ru)

#### **Тупикин Дмитрий Александрович**

Ливенский филиал ГОУ ВПО ОрелГТУ, г. Ливны  
кандидат технических наук, доцент, заместитель директора по информационным технологиям.  
Тел. (48677) 3-31-97  
E-mail: [tupidim@mail.ru](mailto:tupidim@mail.ru)

# **ПРИБОРОСТРОЕНИЕ** **И БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

УДК 629.735

В.Я. РАСПОПОВ

## **СОСТОЯНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И АВИАПРИБОРОСТРОЕНИЯ (ОБЗОР ПО МАТЕРИАЛАМ И ЭКСПОНАТАМ МАКС-2009)**

*Приведен обзор состояния отечественной авиационной промышленности в областях гражданской и военной авиации, а также беспилотных летательных аппаратов. Дан обзор экспозиций авиаприборостроительных компаний.*

**Ключевые слова:** *авиационная промышленность, авиаприборостроение, состояние*

*Made overview of the native aircraft industry in the areas of civil and military aircraft, as well as pilotless vehicles making industry. Presented review of expositions of aircraft instruments making companies.*

**Key words:** *aircraft industry, aircraft instruments making, current state*

### **ВВЕДЕНИЕ**

18 августа 2009 г. открылся девятый Международный авиакосмический салон МАКС-2009.

Открытию авиасалона предшествовало трагическое событие – 16 августа в ходе тренировочного полёта столкнулись два самолёта пилотажной группы «Русские витязи». Погиб лидер группы гвардии полковник И.В. Ткаченко.

18 августа – первый день работы авиасалона, считается «президентским», но в этот раз с рабочим визитом прибыл Председатель Правительства РФ В.В. Путин. После осмотра стоянок самолётов и экспозиций В.В. Путин с 16 до 20 часов провёл совещание с руководством отрасли и компаний относительно принимаемых мер по выводу российского авиастроения из кризисного состояния.

19 августа были проведены все основные деловые контакты и пресс-конференции, посвящённые гражданской авиации. В частности, пресс-конференции провели компании «Airbus» и «Boeing», посвящённые рынку дальнемагистральных самолётов, на котором конкуренция этих компаний особенно острая. Что касается России, то она практически отказалась от конкуренции в этом секторе рынка.

### **УЧАСТНИКИ МАКС-2009**

На авиасалоне были представлены экспозиции объединённой авиастроительной корпорации (ОАК), предприятий, входящих в ОПК (Оборонпром, ОАО «Авиационная холдинговая компания «Сухой», РСК (МиГ)), экспозиция Объединённой двигателестроительной корпорации (ОДК). Впервые была представлена объединённая экспозиция ГК «Росттехнологии», включающая в себя стенды ведущих концернов и холдингов, входящих в её состав. Дебютантом салона стал концерн «Авиаприборостроение» (субхолдинг ГК «Российские технологии»). Под его эгидой представили стенды корпорация «Аэрокосмическое оборудование», компания «Авиаприбор-Холдинг», и другие предприятия авиаприборостроительного профиля.

Помимо российских фирм в МАКС-2009 приняли участие 228 зарубежных компаний, представленных девятью национальными павильонами: Франции (37 компаний), Германии (22 компании), Бельгии и Нидерландов (18 компаний), США (10 компаний), Чехии (13 компаний), Канады (8 компаний), Швейцарии (5 компаний), Украины (17 компаний), Республики Беларусь (5 компаний).

Российские участники представили 1449 экспонатов, включая 740 натуральных образцов.

### **ГРАЖДАНСКАЯ АВИАЦИЯ**

Российские разработчики сосредоточились на разработке ближне- и среднемагистральных самолётов. В 2010 г. ЗАО «Гражданские самолёты «Сухого» (ГСС) планирует произвести 18 самолётов Sukhoj Superjet 100 (SS-100) для компаний: финансово-лизинговой компании («ФЛК»), армянской «Армавиа» и итальянской «Italy».

По словам генерального директора АХК «Сухой» и РСК «МиГ» М.А. Погосяна, твёрдых заказов на SS-100 (рисунок 1) по состоянию на конец 2009 г. 150 самолетов. Планируемый темп выпуска к 2012 г. – 50 самолётов в год.

На конференции ОАО «Туполев» обсуждалась, в частности, судьба самолёта ТУ-334 (рисунок 2), который, так же как и SS-100, относится к ближнемагистральным самолётам, вмещающим около 100 кресел. Работа над ним началась ещё в начале 1990-х, но к 2009 году было выпущено лишь два ТУ-334.



*Рисунок 1 – SS-100*



*Рисунок 2 – ТУ-334*

Однако ни на один из них твёрдых заказов нет. Тем не менее, в ОАО «Туполев» считают, что для российского рынка более пригодным является ТУ-334, который может принимать большее количество региональных аэропортов. Кроме того, испытания проводились в температурном диапазоне от  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ . Немаловажным фактором является и то, что в SS-100 значительно количество комплектующих иностранного производства. Именно по этой причине Управление делами Президента сделало выбор (по данным газеты «Ведомости») в пользу самолёта АН-148: он на 70 % состоит из российских комплектующих, а в будущем эта доля может быть доведена до 90 %. ТУ-334 не может претендовать на место «борта №1», т.к. он не запущен в серийное производство.

На МАКС-2009 состоялось подписание нескольких важных контрактов. ГК «Росттехнологии» намерена купить 65 самолётов для новой авиакомпании «Росавиа», создающейся на базе разорившегося альянса Air Union и авиаперевозчика «Россия». Главными претендентами на контракт с «Росавиа» являются самолёты SS-100, ТУ-334, АН-148. Лизинговая компания «Илюшин Финанс» договорилась с «Владивосток Авиа» о поставке в лизинг 4-х АН-148 (рисунок 3).

Состоялся также контракт с «Атлант Союз» о поставке 30-ти региональных АН-148 и 15-ти среднемагистральных ТУ-204 SM.

### ВОЕННАЯ АВИАЦИЯ

В первый день работы салона в присутствии В.В.Путина был подписан контракт на поставку Министерству обороны (МО) 48-ми многоцелевых истребителей СУ-35С с 2010 до 2015 г.г. включительно, 12-ти СУ-27 СМ с 2009 по 2011 г.г., а также четырёх СУ-30М2 до конца 2011 года.

Генеральный директор ОАО «Туполев» И.С. Шевчук сообщил, что в 2009 г. заключен контракт с МО РФ на разработку и создание перспективного авиационного комплекса дальней авиации (ПАК ДА), который должен заменить стратегические бомбардировщики ТУ-95МС (рисунок 4) и ТУ-22М3. Данная работа находится на этапе НИОКР.



Рисунок 3 – АН-148



Рисунок 4 – ТУ-95

Главком ВВС РФ А.Н. Зелин сообщил, что построены 3 технических образца ПАК ФА (фронтовая авиация) – истребители 5-го поколения и собран один. Об успешном 47-минутном полёте истребителя 5-ого поколения сообщили СМИ 2 февраля. Истребитель создан в «КБ Сухого». Двигатель разработан в Рыбинском моторостроительном заводе. По состоянию на начало 2010 г. истребитель совершил три испытательных полета, а требуется более двух тысяч. Во второй половине 2010 г. и в начале 2011 г. будут построены еще три опытных истребителя. Первые машины должны поступить в Липецкий центр боевого применения уже в 2013 году, а серийное производство планируется начать в 2015 году.

В Арсеньевской авиационной компании «Прогресс» в конце 2009 г. завершились государственные испытания вертолёта К-52 «Аллигатор». До конца года ВВС должны были получить первые три машины из установочной партии. В 2010 г. должны быть переданы ещё несколько вертолётов. С 2011-2012 г.г. компания «Прогресс» должна выйти на выпуск 20-25 машин в год, однако по плану закупок этих вертолётов для ВВС РФ не сообщается.

Ещё до конца 2008 г. были завершены Госиспытания ещё одного ударного вертолёта МИ-28Н «Ночной охотник». По словам генерал-майора О. Бармина в войска поставлены, с учётом предсерийной партии, 12 машин. Поскольку основным вертолётом в армии будет МИ-28Н, их планируется закупить более 300.

Во время салона подписан контракт на приобретение 20-ти многоцелевых вертолётов МИ-171 в транспортной модификации с компанией «Airfreight Aviation LTD» из Объединённых Арабских Эмиратов.

## БЕСПИЛОТНЫЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫЕ АППАРАТЫ

События августа 2008 г. в Абхазии и Южной Осетии продемонстрировали отсутствие в ВС РФ современных образцов беспилотной техники. Концерн радиостроения «Вега», который занимался созданием беспилотного авиационного комплекса «Типчак», не смог представить достойных технических решений, хотя на эти цели ему было выделено около 1 млрд. рублей. В связи с этим российские военные закупили у израильской компании IAI комплекс мини БПЛА «Bird Eye 400» и беспилотную систему среднетяжелого класса Searcher Mk II.

На МАКС-2009 были представлены новые разработки отечественных БПЛА. В классе микро-БПЛА компанией «Аэрокон» (г. Жуковский) представлен аппарат «Инспектор-301» (рисунок 5). Аппарат имеет размах крыла 1,5 м и максимальную взлетную массу 6 кг. В состав целевой нагрузки массой до 0,4 кг может входить неподвижная камера переднего обзора, стабилизированные по крену и тангажу ТВ-камеры с различным фокусным расстоянием, цифровой фотоаппарат планового обзора, ИК-камеры или датчики наличия газа. Дальность действия БПЛА – 25 км, продолжительность полета в зависимости от его режима составляет 45-120 мин. Наземный комплекс управления функционирует на РС-совместимом компьютере класса «Notebook» со специальным внешним модулем беспроводной связи. Получение и передача информации с борта БПЛА и определение координат наблюдаемых объектов осуществляется в реальном масштабе времени. Взлет осуществляется с пневматической катапульты, а посадка – на парашюте или по-самолетному «на брюхо».

В классе микро-БПЛА корпорацией «Иркут» представлен аппарат «Иркут-3». Размах его крыла 2 м, а масса 3 кг. Аппарат способен находиться в полете 1,5 ч и нести полезную нагрузку массой до 0,3 кг. Для связи и управления используется наземная станция с двумя цифровыми защищенными радиоканалами: канал управления и канал передачи данных. Дальность действия каналов позволяет использовать БПЛА на удалении до 15 км. Запуск его осуществляется с руки, а посадка на парашюте.

Имеется информация о разработке Санкт-Петербургскими компаниями «Транзас» и «Р.Е.Т. Кронштадт» тяжелого БПЛА «Дозор-3» (рисунок 6), взлетная масса которого составляет 610 кг. «Дозор-3» способен находиться в воздухе более 30 ч, совершая полеты на высоте 7000 м. БПЛА может нести полезную нагрузку массой до 120 кг. На БПЛА планируется разместить радиолокационную станцию переднего обзора разработки «Транзаса», активный лазерный локационный комплекс, ИК-станцию переднего обзора, видеокамеры, аппаратуру радиоэлектронной разведки, связи, навигации и опознавания. «Дозор-3» может применяться в автономном режиме с использованием инерциальной навигационной системы, корректируемой по сигналу GPS/Глонас. В случае частичной или полной потери связи БПЛА может продолжать полет с использованием оптической системы навигации и возвратиться на свой аэродром.



Рисунок 5 – БПЛА серии «Инспектор» на пусковой установке



Рисунок 6 – БПЛА «Дозор-3»

Компания «Иркут» представила также новый беспилотный комплекс «Иркут-200». Размах крыла БПЛА около 5,3 м, а максимальная взлетная масса 200 кг. Аппарат может совершать полеты продолжительностью до 12 ч на удалении до 200 км от станции управления. Полезная нагрузка массой до 30 кг может включать телевизионную и тепловизионную камеры, РЛС цифровой фотоаппарат и др. оборудование. В частности, это может быть разработанная компанией «Иркут Инжиниринг» гиросtabilизированная оптико-электронная система. Взлет и посадка БПЛА выполняются по-самолетному с площадок длиной 250 м. Этот аппарат закрыл нишу БПЛА среднего радиуса действия.

Санкт-Петербургская компания «Транзас» представила комплекс с БПЛА «Дозор-5». Взлетная масса аппарата 95 кг и он может совершать полеты продолжительностью до 10 ч. Наземная станция управления на базе внедорожника позволяет вести одновременное управление тремя аппаратами. Дальность каналов связи достигает 100 км, но в автономном режиме БПЛА может пролететь до 1000 км. В качестве полезной нагрузки на борту БПЛА может размещаться видеокамера переднего обзора и фотокамера высокого разрешения, а также совмещенная оптико-телевизионная система с видеокамерой с 10-12-кратным увеличением и тепловизором среднего ИК-диапазона. Взлет и посадка БПЛА осуществляется по-самолетному.

### **АВИАПРИБОРОСТРОЕНИЕ**

Компания «Авиаприбор-Холдинг» представила экспозицию в области системной интеграции бортового радиоэлектронного оборудования для магистральных лайнеров тяжелых военных самолетов. ОАО «Московский институт электромеханики и автоматики» – головная компания холдинга – продемонстрировала свои последние достижения в разработке авионики бесплатформенных инерциальных навигационных систем, комплексных систем управления, датчиков нового поколения и др.

На стенде «Авиаприбор-Холдинга» демонстрировался индикатор на лобовом стекле израильской фирмы «Элбит», который предлагается для модернизированного пассажирского самолета ТУ-204СМ и ОАО «Ульяновское конструкторское бюро приборостроения» (УКБП) для кабины вертолета К-226Т. ОАО «УКБП» представило действующий макет «стеклянной» кабины вертолета К-226Т.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Основными итогами авиасалона стали демонстрация достижений отечественной авиакосмической отрасли и дальнейшая интеграция ее предприятий в мировую индустрию.

#### **Распопов Владимир Яковлевич**

Тульский государственный университет, г. Тула

Доктор технических наук, заведующий кафедрой «Приборы управления»

300600 г. Тула, Проспект Ленина, д. 92

Тел. (4872) 35-19-59

УДК 629.735.45:551.53

В.М. СОЛДАТКИН

## МОДЕЛИ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ОПАСНОСТИ ОТКАЗОВ ИНТЕГРИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

*Раскрывается методика построения моделей количественной оценки влияния отказов систем и блоков бортового оборудования на уровень безопасности полета и использования их в каналах информационно-управляющей системы контроля и парирования отказов бортового оборудования.*

**Ключевые слова:** бортовое оборудование, комплекс, отказы, информативные функции опасности, методика, формирование, использование.

*Reveal a technique for consisting models of quantitative estimation of the influence of airborne equipment systems and units failures on the flight safety level and their application in the channels of a information-control system for inspection and counteraction of airborne equipment failures.*

**Keywords:** airborne equipment, complex, failures, informative functions of danger, technique, formation, application.

### ВВЕДЕНИЕ

Возрастание сложности интегрированного комплекса бортового оборудования (ИК-БО) современных самолетов приводит к увеличению вероятности отказа техники, усложняет деятельность экипажа, является причиной дополнительных ошибок пилотирования. Это обуславливает возрастание роли средств автоматизированного контроля и парирования отказов систем и блоков, входящих в состав ИКБО.

С позиции обеспечения уровня безопасности полета, регламентируемого Авиационными правилами (АП) и Нормами летной годности самолетов (НЛГС) [1], бортовые средства автоматизированного контроля состояния ИКБО должны выполнять функции информационно-управляющей системы контроля и парирования отказов бортового оборудования (ИУС КПО БО) [2], т.е. не только обнаруживать отказы, но и принимать управленческие решения по их парированию с учетом уровня опасности возникшей нештатной ситуации.

### ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ВЛИЯНИЯ ОТКАЗОВ

Используя подход, рассмотренный в работе [3], процесс функционирования ИКБО за время полета представим в виде последовательности определенных этапов: рулежка, разбег, взлет, набор высоты, крейсерский полет, маневрирование, снижение, приземление, пробег и останов.

Если принять, что события  $A_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ), заключающиеся в успешном (безопасном) завершении  $i$ -го этапа, независимы, тогда безопасным завершением полета в целом будет являться событие  $A$ , определяемое как конъюнкция событий

$$A = A_1 \cap A_2 \cap A_3 \dots \cap A_n. \quad (1)$$

Поскольку на каждом этапе полета состав используемых функциональных систем и блоков бортового оборудования (БО) различен, то каждое событие  $A_i$  может быть выражено через логическую сумму событий  $B_{ji}$ , представляющих собой факты нормального функционирования каждой  $j$ -ой комбинации используемых функциональных систем и блоков БО на  $i$ -м этапе полета. При  $j = 1, 2, \dots, m$  имеем

$$A_i = B_{1i} \cap B_{2i} \cap B_{3i} \dots \cap B_{mi}, \quad (2)$$

где  $m$  – число возможных комбинаций основных функциональных систем и блоков бортового оборудования, используемых на  $i$ -м этапе полета.

Каждое событие  $B_{ji}$  представим в виде совместного наступления события  $S_{lji}$ , при котором каждая  $l$ -я функциональная система (блок) БО в  $j$ -ой комбинации на  $i$ -м этапе выполняет свои функции, (т.е. работоспособна).

При  $l = 1, 2, \dots, k$ , получим

$$B_{ji} = S_{1ji} \cap S_{2ji} \cap \dots \cap S_{kji}, \quad (3)$$

где  $k$  – число используемых бортовых систем в  $j$ -ой комбинации на  $i$ -м этапе полета.

Тогда, учитывая соотношения (1) – (3), получим выражение для вероятности  $P(A)$  обеспечения уровня безопасности  $P_{\text{он}}$  в процессе всех этапов полета в виде

$$P(A) = P_{\text{он}} = 1 - \prod_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \prod_{l=1}^k P(\bar{S}_{lji}) P(H/\bar{S}_{lji}), \quad (4)$$

где  $P(\bar{S}_{lji})$  – вероятность отказа  $l$ -ой функциональной системы, обеспечивающей  $i$ -ый этап полета в  $j$ -ой комбинации;

$P(H/\bar{S}_{lji})$  – условная вероятность летного происшествия (нештатной ситуации) при отказе  $l$ -ой функциональной системы бортового оборудования в  $j$ -ой комбинации на  $i$ -м этапе полета.

Анализ выражения (4) позволяет оценить влияние вероятности отказа  $l$ -ой функциональной системы на изменение уровня безопасности полета на различных этапах полета. Кроме того, можно определить количество вспомогательных (резервных) систем, необходимых для обеспечения заданного уровня безопасности на  $i$ -м этапе полета, связанного с отказами используемой техники.

Если известна вероятность безотказной работы  $P(B)$  вспомогательных (резервных) систем, то уровень безопасности полета  $P_T$  из-за возможных отказов техники может быть оценен выражением [4]

$$P_T = [1 - [1 - P(A)][1 - P(B)]].$$

На практике более удобно использовать величину, определяющую уровень опасности (аварийности) полета из-за отказов техники [5]:

$$P_{\text{он}} = [1 - P_m] = [1 - P(A)][1 - P(B)].$$

Находя для  $P(B)$  выражение, аналогичное (4), получим

$$P_{\text{он}} = \left[ 1 - \prod_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \prod_{l=1}^k P(\bar{S}_{lji}) P(H/\bar{S}_{lji}) \right] \times \left[ 1 - \prod_{i=1}^n \sum_{r=1}^M \prod_{q=1}^N P(\bar{S}_{qri}) P(H/\bar{S}_{qri}) \right], \quad (5)$$

где  $r$  – комбинация вспомогательных систем на  $i$ -м этапе полета;

$M$  – число возможных комбинаций вспомогательных систем на  $i$ -х этапах;

$q$  – одна из вспомогательных систем в комбинации  $r$  на  $i$ -м этапе полета;

$N$  – число вспомогательных систем в комбинации  $r$  на  $i$ -м этапе полета;

$P(\bar{S}_{qri})$  – вероятность отказа  $q$ -й вспомогательной системы, обеспечивающей  $i$ -й этап полета в комбинации  $r$ ;

$P(H/\bar{S}_{qri})$  – условная вероятность нештатной ситуации при отказе  $q$ -й вспомогательной системы, обеспечивающей  $i$ -й этап полета в комбинации  $r$ .

Следовательно, используя выражение (5) на каждом этапе полета для каждой комбинации задействованных систем и агрегатов можно выбрать  $l$  систем и агрегатов, отказы которых с определенной вероятностью могут стать причиной возникновения летных происшествий или нештатных ситуаций [6].

Для их отбора можно использовать оценку вероятности  $P(H)_l$  того, что летное происшествие произойдет из-за отказа данной  $l$ -й системы, контролируемой системой контроля бортового оборудования

$$P(H) = \frac{P(\bar{S}_l)P(H/\bar{S}_l)}{\sum_{l=1}^k P(\bar{S}_l)P(H/\bar{S}_l)} = \frac{P(\bar{S}_l)P(H/\bar{S}_l)}{P(H)}, \quad (6)$$

где  $P(\bar{S}_l)$  – вероятность отказа  $l$ -ой функциональной системы;

$P(H/\bar{S}_l)$  – условная вероятность нештатной ситуации (летного происшествия) при отказе  $l$ -ой функциональной системы;

$P(H)$  – полная вероятность летного происшествия по всем отказам функциональных систем данной комбинации  $l$ .

### ИНФОРМАТИВНЫЕ ФУНКЦИИ ОПАСНОСТИ ОТКАЗОВ

Условные вероятности  $P(\bar{S}_l)$  и  $P(H/\bar{S}_l)$  в выражении (6) определяются по значениям условных вероятностей парирования экипажем последствий отказов бортовых систем. Указанные значения определяются путем моделирования отказов бортовых систем на стендах, тренажерах и в условиях полета, или по статистическим данным эксплуатации однотипных систем бортового оборудования [5,7].

При проектировании ИУС КПО БО оценивается влияние следующих основных факторов: отказов техники с вероятностью  $P_T$ ; ошибочных действий летного состава (экипажа) с вероятностью  $P_{Л}$ ; исправной работы информационно-управляющей системы, определяемой вероятностью  $P_{СК}$ ; воздействия внешних возмущений, возникающих с вероятностью  $P_B$ , которые составляют полную группу событий.

За счет реализации организационно-технических мероприятий по поддержанию соответствующей квалификации летного состава уровень частного показателя  $P_{Л}$  нормируется условием  $P_{Л} \geq P_{Л}^{зад}$ . При работе информационно-управляющей системы предотвращения критических режимов уровень показателя  $P_B$  поддерживается не ниже  $P_B^{зад}$ . Поэтому при работе информационно-управляющей системы контроля и парирования отказов бортового оборудования уровень безопасности отдельного полета может быть оценен показателем безопасности  $P_{он}$ , равным

$$P_{он} = P_T P_{СК} = (1 - P_{он}) > P_{он}^{HЭУ}, \quad (7)$$

где  $P_{он}^{HЭУ}$  – нормированное НЛГС значение уровня безопасности, соответствующее нормальным эксплуатационным условиям полета;

$P_{он}$  – вероятность неблагоприятного исхода полета, определяющая уровень опасности данного состояния БО.

Как отмечается в работе [7], наиболее сложной проблемой при оценке влияния отказов функциональных систем на летную годность самолета и, следовательно, уровень безопасности полета, является исследование последствий этих отказов и определение степени опасности возникающей нештатной ситуации. При этом задача состоит в определении степени опасности неблагоприятного фактора отказа  $i$ -го функционального элемента (системы) или условной вероятности его непарирования  $P_{H_i}$  и установления вида особой ситуации  $H_i$ , к которому приводят последствия этого отказа.

Предлагается распространить этот подход для оценки изменения уровня опасности полета самолета при отказах функциональных систем бортового оборудования.

Определим пороговые значения степени опасности отказов функциональных систем БО, по которым можно провести идентификацию их по особым ситуациям, регламентируемым нормами летной годности самолетов (НЛГС).

Вероятности появления различных особых ситуаций  $P_{он}^{H_i}$  регламентированы НЛГС,

поэтому количественно условные вероятности  $P_{H_i}$  непарирования этих ситуаций  $H_i$ , связанные с отказами техники, можно найти из предположения, что за время полета самолета каждая из четырех регламентируемых особых ситуаций ((КС), (АС), (СС) и (УУП)) дает один и тот же уровень риска, равный вероятности возникновения катастрофической ситуации:

$$P_{on} = P_T P_{СК} = 1 - P_{он} = Q = \text{const} = 10^{-9}.$$

При этом ИУС КПО БО в ожидаемых условиях полета при возможных отказах систем БО должна обеспечивать удовлетворение требований НЛГС к уровню безопасности полета [7]:

– возникновение катастрофической ситуации должно оцениваться как событие не более частое, чем практически невероятное, то есть вероятность  $P_{КС}$  возникновения КС для самолета не должна превышать  $P_{КС} < 10^{-9}$  за 1 час полета или за полет в целом;

– суммарная вероятность  $P_{АС}$  аварийной ситуации для самолета не должна превышать  $P_{АС} < 10^{-7}$  за 1 час или за полет в целом, при этом возникновение АС должно рассматриваться как событие не более частое, чем крайне маловероятное ( $10^{-9} < P_{АС} < 10^{-7}$ );

– суммарная вероятность  $P_{СС}$  сложной ситуации для самолета не должна превышать  $P_{СС} < 10^{-5}$  за 1 час или за полет в целом, при этом возникновение СС должно рассматриваться как событие не более частое, чем маловероятное ( $10^{-7} < P_{СС} < 10^{-5}$ );

– суммарная вероятность  $P_{УУП}$  усложнения условий полета (УУП) самолета не должна превышать  $P_{УУП} < 10^{-3}$  за 1 час или за полет в целом, при этом возникновение УУП должно рассматриваться как событие умеренно вероятное и не повторяющееся ( $10^{-5} < P_{УУП} < 10^{-3}$ ).

В соответствии с регламентируемыми требованиями к ИУС КПО БО определим регламентируемые значения условных вероятностей  $P_{on}^{H_i}$  непарирования неблагоприятных факторов (отказов в работе БО)  $r_i$  в  $H_i$  особой ситуации. Частота появления  $H_i$  особой ситуации регламентирована НЛГС, поэтому значения условных вероятностей  $P_{on}^{H_i}$  можно найти из предположения, что в течение одного часа полета или за полет в целом каждая из возможных при отказах бортового оборудования нештатных ситуаций (КС, АС, СС, УУП) не должны превышать уровень опасности  $P_{on}$ , равный по величине регламентируемой НЛГС вероятности возникновения катастрофической ситуации, т.е.

$$P_{on} = P_{H_i} P_{on}^{H_i} = \text{const} = 10^{-9}. \quad (8)$$

С учетом (8), уровни опасности  $P_{on}^{H_i}$  непарирования нештатных ситуаций, обусловленных отказами БО, за 1 час или за полет в целом принимают следующие значения:  $P_{on}^{КС} = 1$  – для катастрофической ситуации;  $10^{-2} \leq P_{on}^{АС} < 1$  – для аварийной ситуации;  $10^{-4} \leq P_{on}^{СС} < 10^{-2}$  – для сложной ситуации;  $10^{-6} \leq P_{on}^{УУП} < 10^{-4}$  – для усложненных условий полета.

При этом условная вероятность  $P_{on}^{HЭУ}$  при полете в нормальных эксплуатационных условиях (при отсутствии отказов) будет определяться неравенством  $10^{-9} \leq P_{on}^{HЭУ} < 10^{-6}$ .

Полученные уровни опасности  $P_{on}^{H_i}$  режима полета при отказах БО на границах перехода от одной особой ситуации в работе БО к другой принимают фиксированные количественные значения: при переходе от нормального (безотказного) полета к УУП  $P_{on}^{H_i} = 10^{-6}$ , на границе УУП и СС  $P_{on}^{H_i} = 10^{-4}$ , на границе СС и АС –  $P_{on}^{H_i} = 10^{-2}$ , на границе АС и КС –  $P_{on}^{H_i} = 1$ , что можно использовать при реализации ИУС КПО БО.

Как указано выше, определяющими признаками влияния отказов БО на возникновение нештатных ситуаций на данном режиме полета являются превышения характерных (кри-

тических) параметров состояния самолета  $x_i$  известных для каждой нештатной ситуации эксплуатационных ограничений (пороговых значений)  $x_{\Pi i}$ . Основные критерии нештатных ситуаций, связанных с отказами агрегатов и систем БО, на каждом режиме полета самолета однозначно известны (например, см. [5, 7]), поэтому могут быть однозначно определены количественные значения  $x_{\Pi i}^{H_i}$  критических параметров  $x_i$  на границах каждой из рассмотренных выше особых ситуаций  $H_i$ . Тогда каждая из особых ситуаций  $H_i$  в полете, обусловленная критическим параметром  $x_i$ , может быть идентифицирована следующими уравнениями: катастрофическая ситуация –  $x_i > x_{\Pi i}^{KC}$ ,  $P_{on}^{x_i} = 1$ ; аварийная ситуация –  $x_{\Pi i}^{AC} \leq x_i < x_{\Pi i}^{KC}$ ,  $10^{-2} \leq P_{on}^{x_i} < 1$ ; сложная ситуация –  $x_{\Pi i}^{CC} \leq x_i < x_{\Pi i}^{AC}$ ,  $10^{-4} \leq P_{on}^{x_i} < 10^{-2}$ ; усложнение условий полета –  $x_{\Pi i}^{УПП} \leq x_i < x_{\Pi i}^{AC}$ ,  $10^{-6} \leq P_{on}^{x_i} < 10^{-4}$ ; нормальный эксплуатационный режим –  $x_i < x_{\Pi i}^{УПП}$ ,  $10^{-9} \leq P_{on}^{x_i} < 10^{-6}$ .

Так как на границах особых ситуаций  $H_i$  связь значений критических параметров  $x_i$  состояния БО и вероятностных показателей опасности режима полета  $P_{on}^{x_i}$  однозначна, то по граничным точкам может быть построена детерминированная непрерывная информативная функция

$$F_{on}^{x_i} = f(x_i), \quad (9)$$

однозначно характеризующая изменение уровня опасности режима полета при отказе  $i$ -ой системы БО, приводящем к изменению критического параметра  $x_i$ .

При формировании информативной функции опасности  $F_{on}^{x_i}$  учитывается отказ функциональной системы, приводящий к изменению параметра  $x_i$ , в предположении, что другие системы БО не отказали и другие параметры  $x_j$  движения самолета находятся в пределах эксплуатационной области и не оказывают заметного влияния на изменение вероятностного показателя опасности  $P_{on}^{x_i}$ . При отказах нескольких функциональных систем и обусловленных ими изменениями различных критических параметров  $x_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  уровень опасности режима полета, обусловленный состоянием БО в целом может быть построена интегральная информативная функция опасности всех отказов БО  $F_{on}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , определяющая изменение уровня опасности режима полета в целом, вида

$$F_{on}(x_1, x_2, \dots, x_n) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - F_{on}^{x_i}) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - f(x_i)]. \quad (10)$$

Параметры  $x_i$  на каждом режиме полета взаимосвязаны через динамику движения самолета, поэтому эти связи учитываются и в полученной информативной функции опасности. Если в соответствии с регламентируемыми НЛГС нештатными ситуациями (НЭУ, УУП, СС, АС, КС) и динамикой изменения критических параметров  $x_i(t)$  по зависимостям вида (9), (10) построить графики изменения во времени частных  $F_{on}^{x_i}$  и интегральной  $F_{on}$  информативных функций достоверности контроля состояния систем и подсистем БО, то по их положению относительно границ регламентируемых НЛГС особых ситуаций можно оценить текущий уровень безопасности режима полета, идентифицировать вид и степень опасности отказов бортовых функциональных систем, вызвавших возникновение нештатной ситуации, и, следовательно, сформировать сигналы предупреждения экипажа и принять меры по восстановлению отказавшей системы за счет реконфигурации бортового оборудования, перестройки штурвального и автоматического управления, принятия других оперативных реше-

ний по парированию последствий отказов.

В более общем случае при отказе функциональных систем бортового оборудования дополнительным фактором, который может осложнить возникающую особую ситуацию, в основном, являются ошибочные действия экипажа. Поэтому при оценке опасности такой особой ситуации в соотношении (7) в общем случае должна учитываться вероятность  $P_{\Delta}$  отклонения действий летного состава (экипажа) от предписанных руководством по летной эксплуатации.

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАТИВНЫХ ФУНКЦИЙ ОПАСНОСТИ ОТКАЗОВ

Рассмотренный подход позволяет решать задачу оценки состояния бортового оборудования и летательного аппарата в целом с помощью предложенных информативных функций  $F_{on}^{x_i}$  опасности отказа  $i$ -ой функциональной системы и обобщенной (интегральной) функции  $F_{on}(x_1, x_2, \dots, x_m)$  опасности всех отказов бортового оборудования, т.е. отклонения контролируемых параметров  $x_i$  от нормальных эксплуатационных значений всех  $m$  контролируемых параметров. При этом с учетом взаимосвязи параметров вектора состояния объекта  $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , частных  $F_{on}^{x_i}$  и обобщенной  $F_{on}(x_1, x_2, \dots, x_m)$  информативных функций опасности можно оценить текущий уровень безопасности полета летательного аппарата и степень опасности возникшей из-за отказов нештатной (особой) ситуации.

Так если за состояние  $H_0$  принять нормальный режим полета (без отказов), соответствующий нормальным эксплуатационным условиям (НЭУ), регламентируемым нормами летной годности самолета (НЛГС), то нахождение функций опасности  $F_{on}^{x_i}$  и  $F_{on}(x_1, x_2, \dots, x_m)$  в области  $H_0$  означает, что их значения удовлетворяют условию

$$F_{on}^{x_i} \leq F_{on}^{\text{нлгс}}, F_{on}(x_1, x_2, \dots, x_m) \leq F_{on}^{\text{нлгс}},$$

где  $F_{on}^{\text{нлгс}}$  регламентируемое НЛГС значение информативной функции опасности отказов, которое не приводит к нарушению нормального эксплуатационного режима полета.

Тогда состоянию  $H_1$  будет соответствовать регламентируемая НЛГС нештатная ситуация – усложнение условий полета и выполняются неравенства

$$F_{on}^{\text{ууп}} \leq F_{on}^{x_i} < F_{on}^{\text{сс}}, F_{on}^{\text{ууп}} \leq F_{on} < F_{on}^{\text{сс}},$$

где  $F_{on}^{\text{ууп}}$  и  $F_{on}^{\text{сс}}$  значения информативных функций опасности отказов, соответствующие границам возникновения регламентируемых НЛГС УУП и сложной ситуации.

Состоянию  $H_2$  будет соответствовать регламентируемая НЛГС СС, когда имеют место неравенства вида

$$F_{on}^{\text{сс}} \leq F_{on}^{x_i} < F_{on}^{\text{ав}}, F_{on}^{\text{сс}} \leq F_{on} < F_{on}^{\text{ав}},$$

где  $F_{on}^{\text{ав}}$  – значения информативных функций отказов, соответствующие границе возникновения аварийной ситуации.

Состояния  $H_3$  и  $H_4$  будут соответствовать регламентируемой НЛГС аварийной и катастрофической ситуаций, когда имеют место неравенства

$$F_{on}^{\text{ав}} \leq F_{on}^{x_i} < F_{on}^{\text{кат}}, F_{on}^{\text{ав}} \leq F_{on} < F_{on}^{\text{кат}};$$

$$F_{on}^{x_i} \geq F_{on}^{\text{кат}}, F_{on} \geq F_{on}^{\text{кат}}.$$

Так как в процессе полета возникновение АС и КС недопустимо, то при исследовании бортовой информационно-управляющей системы контроля состояния бортового оборудования необходимо исследовать только ситуации, характеризуемые функциями опасности  $F_{on}^{x_i}$  и  $F_{on}(x_1, x_2, \dots, x_m)$ , а именно  $H_0$ ,  $H_1$  и  $H_2$ , соответствующие нормальным эксплуатационным условиям полета, усложнению условий полета и сложной ситуации.

Следовательно, задача бортовой ИУС КПО БО сводится к построению и определению в полете текущих значений информативных функций опасности отказов  $F_{on}^{x_i}$  и  $F_{on}(x_1, x_2, \dots, x_m)$  и сравнение их с допустимыми эксплуатационными значениями.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Таким образом, по результатам измерения текущих значений контролируемых параметров бортовых систем можно определить как состояние контролируемой функциональной системы, так и, в случае его отклонения от нормальных эксплуатационных значений, по построенным информативным функциям опасности оценить степень влияния возникшего отказа на уровень безопасности полета и идентифицировать возникновение регламентируемых нормами летной годности самолета особых ситуаций. При этом может быть выделена функциональная система, отказ которой оказывает наибольшее влияние на изменение уровня безопасности полета (т.е. приводит к опасному изменению параметров движения) и определить управление, которое (парирование отказа за счет резервирования). С помощью информативных функций опасности можно прогнозировать возникновение и развитие особых ситуаций, связанных с отказами функциональных систем бортового оборудования, а также решать задачи синтеза алгоритмов автоматического и штурвального управления по выводу летательного аппарата из возникшей нештатной ситуации.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Авиационные правила. Ч.25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории. М.: Изд. Международного авиационного комитета, 1994. – 321 с.
2. Солдаткин, В.М. Методы и средства построения информационно-управляющих систем обеспечения безопасности полета [Текст] / В.М. Солдаткин. - Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. - 2004. - 350 с.
3. Макаров, Н.Н. Теоретические основы построения интегрированной системы обеспечения безопасности функционирования бортового эргатического комплекса [Текст] / Н.Н. Макаров. - Изв. вузов. Авиационная техника. 2007. №4. С. 48 – 52.
4. Майоров, А.В. Безопасность функционирования автоматизированных объектов [Текст] / А.В. Майоров, Г.Н. Москатов, Г.П. Шибанов - М.: Машиностроение, 1998. – 264 с.
5. Сакач, Р.В. Безопасность полетов [Текст] / Р.В. Сакач, Б.В. Зубков, М.Ф. Давиденко и др.; под ред. Р.В. Сакача. - М.: Транспорт, 1989. – 239 с.
6. Кудрицкий В.Д. Автоматизация контроля радиоэлектронной аппаратуры [Текст] / В.Д. Кудрицкий, М.А. Сеница, П.И. Чинаев.; под ред. П.И. Чинаева. - М.: Сов. радио, 1977. – 256 с.
7. Воробьев, В.Г. Технические средства и методы обеспечения безопасности полетов [Текст] / В.Г. Воробьев, Б.В. Зубков, Б.Д. Уриновский - М.: Транспорт, 1989. – 151 с.

#### **Солдаткин Владимир Михайлович**

Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева  
Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Приборы и информационно-измерительные системы»  
Тел. (843) 236-51-21  
E-mail: [xli@piis.rstu-kai.ru](mailto:xli@piis.rstu-kai.ru)

В.Н. ЕСИПОВ, А.И. НЕЗНАНОВ, А.А. РЫБИН

## ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ НЕГОРИЗОНТАЛЬНОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

*Рассмотрены принципы построения маятниковых и инерционных гидроакустических датчиков негоризонтальности железнодорожного пути, приведены выражения функции преобразования и погрешности вследствие увлечения жидкости для инерционного датчика*

**Ключевые слова:** датчик, конструирование, гидроакустический, маятниковый, инерционный, негоризонтальность железнодорожного пути, функция преобразования, выражение погрешности

*The basic principles of the pendulum and inertial hydroacoustic sensors of the disparity in levels of rails designing are described. The mathematical expressions for the sensitive response and error due to the entrainment of liquid with sensor housing of the inertial sensor are given*

**Keywords:** sensor, designing, hydroacoustic, pendulum, inertial, the disparity in levels of rails, sensitive response, error expression

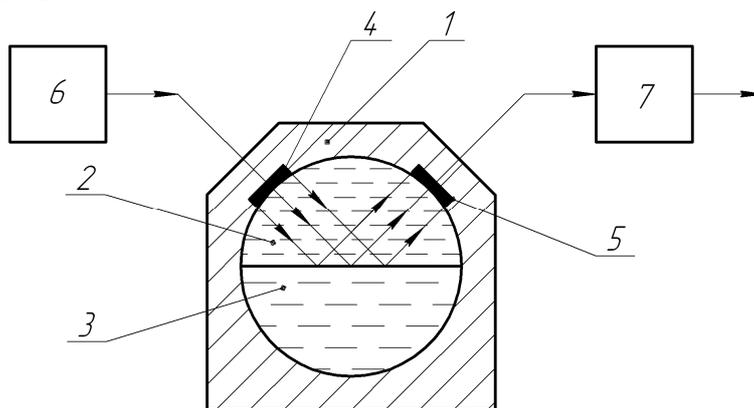
В связи с постоянным ростом грузо- и пассажирооборота на железнодорожном транспорте и увеличением скорости движения составов все время повышаются требования к состоянию железнодорожного пути и в частности к его поперечной горизонтальности. Негоризонтальность приводит, как правило, к повышенному уровню шума и, следовательно, дискомфорту пассажиров при движении поездов, а также к преждевременному износу их ходовых частей. Таким образом, задача поддержания исправного состояния пути является очень важной.

Для ее решения необходимо производить систематический контроль и текущее содержание железнодорожного пути, заключающееся в выправке и стабилизации пути в плане, горизонте и по направлению с помощью специальных путевых машин. Восстановление пути осуществляется выправочно-подбивными машинами. При этом частоты изменения угла негоризонтальности для максимальной производительности не превышают 0,5 Гц. Текущий контроль осуществляется в вагонах-лабораториях, движущихся со скоростью движения поездов. При движении со скоростью 200 км/ч частота изменения угла негоризонтальности достигает 30 Гц. Наклон базы, на которую установлен прибор обычно не превышает  $1^\circ$  (на поворотах –  $8^\circ$ ). Кроме того, следует отметить, что датчики негоризонтальности, как правило, испытывают температурные нагрузки в диапазоне от  $-10$  до  $+40^\circ\text{C}$ , трехкомпонентные вибрационные нагрузки с амплитудой 5...8 g на частотах до 33 Гц по каждой компоненте, а также должны обеспечивать удовлетворительную точность, поскольку допустимая негоризонтальность составляет  $\pm 4,6$  угл. мин.

В настоящее время базовым прибором, которым комплектуются выправочно-подбивные машины, является прибор ELT 133.00 фирмы «Plasser&Theurer» (Австрия). Основными недостатками указанного прибора являются большие габариты (350x145x415 мм) и масса (30 кг), погрешность АЧХ 25 % и фазовое запаздывание  $45^\circ$  при максимальной частоте измеряемого угла. С целью изучения возможности достижения характеристик ELT 133.00 на отечественной элементной базе на кафедре «Приборы управления» ТулГУ был разработан прибор ИН-1 [1]. Этот прибор имеет габаритные размеры 340x130x365 мм, массу 20 кг, погрешность АЧХ 9 %, фазовое запаздывание  $54^\circ$  при максимальной частоте измеряемого угла. Таким образом, разработка датчиков негоризонтальности на опережающем техническом уровне является весьма актуальной задачей.

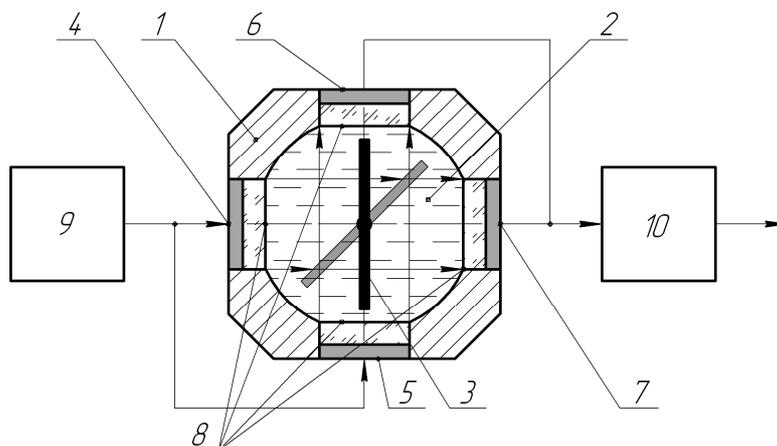
На кафедре «Приборостроение, метрология и сертификация» ОрелГТУ разработаны принципиальные схемы построения гидроакустических датчиков негоризонтальности, в которых за базовую линию принимается горизонталь жидкостного двухкомпонентного маят-

ника, и датчиков, в которых за базовую линию принимается местная вертикаль физического маятника. Для первого случая принципиальная схема датчика представлена на рисунке 1, для второго – на рисунке 2.



**Рисунок 1 – Принципиальная схема жидкостного двухкомпонентного датчика негоризонтальности**

1 – корпус датчика; 2 и 3 – несмешивающиеся жидкости с различными плотностями; 4 – пьезоизлучатель; 5 – пьезоприемник; 6 – генератор; 7 – амплитудный детектор



**Рисунок 2 – Обобщенная принципиальная схема гидроакустического датчика негоризонтальности с механическим маятниковым чувствительным элементом**

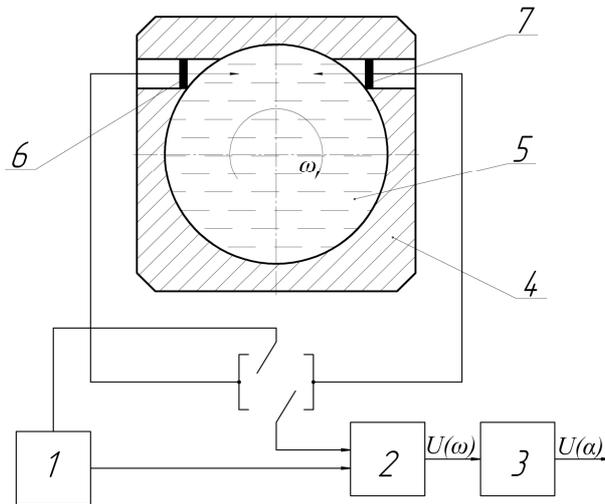
1 – корпус; 2 – цилиндрическая камера, заполненная жидкостью; 3 – маятниковая пластина, подвешенная на торсионах; 4, 5 – пьезоизлучатели ультразвука; 6, 7 – пьезоприемники ультразвука; 8 – диски; 9 – генератор; 10 – амплитудный детектор

В первом случае датчик имеет цилиндрическую полость, заполненную двумя несмешивающимися жидкостями с различными плотностями и ультразвуковую систему съема информации, построенную по принципу «на отражение» [2]. Второй тип датчиков имеет полость, заполненную однородной жидкостью, маятниковую пластину со смещенным центром масс. Датчики с механическим чувствительным элементом могут иметь различные способы построения акустического канала, такие как «на отражение», «на просвет», «вдоль пластины» [3]. В указанных датчиках информативным параметром является амплитуда выходного напряжения пьезоприемника, которое пропорционально количеству падающей на него энергии ультразвука.

Как показывают экспериментальные исследования и результаты математического моделирования, для гидроакустических датчиков погрешность АЧХ не превышает 4 %, а фазовое запаздывание мало (0,012 °). При этом указанные датчики имеют существенно меньшие габариты (не более 250x120x140 мм). Существенным недостатком жидкостного двухкомпонентного датчика является разбиение отражающей ультразвук границы раздела жидкостей

под воздействием вибрационных нагрузок. Собственные частоты колебаний для указанных гидроакустических датчиков значительно выше (около 5 Гц), чем у ELT 133.00 и ИН-1 (0,95 Гц и 0,94 Гц соответственно), однако они ниже частот изменения угла негоризонтальности, которые возникают при его контроле в вагонах-лабораториях. Поэтому, их применение для этой задачи является затруднительным.

Возможным путем решения проблемы является построение гидроакустических датчиков на основе инерционных свойств жидкости. Гидроакустические инерционные датчики имеют существенно больший частотный диапазон, который определяется главным образом параметрами акустического канала. Принципиальная схема такого датчика представлена на рисунке 3.



**Рисунок 3 – Принципиальная схема гидроакустического инерционного датчика негоризонтальности**

1 – опорный генератор; 2 – фазовый детектор; 3 – интегратор; 4 – корпус;  
5 – цилиндрическая камера, заполненная однородной жидкостью; 6, 7 – пьезоэлементы

При подаче сигнала с опорного генератора 1 на пьезоэлемент 6, который в этом случае работает как излучатель ультразвука, в камере датчика 5 возбуждается ультразвуковая волна. Корпус датчика совершает угловые колебания со скоростью, пропорциональной углу негоризонтальности. В результате эффекта Саньяка между входным сигналом датчика и выходным сигналом пьезоэлемента 7, который в этом случае работает как приемник ультразвука, возникает фазовое запаздывание, пропорциональное угловой скорости корпуса. Разность фаз преобразуется в напряжение фазовым детектором 2. Для выделения сигнала, пропорционального углу негоризонтальности в схему включен интегратор 3. Для удвоения чувствительности датчика пьезоэлементы поочередно переключаются из режима излучателя в режим приемника ультразвука и наоборот. Разность фаз между напряжением на приемнике и излучателе ультразвука в случае полной неувлекаемости жидкости в цилиндрической камере датчика с учетом временного разделения каналов определяется выражением [4]:

$$\varphi = \frac{4\pi fLR_0}{c^2} \omega_K, \quad (1)$$

где  $f$ ,  $c$  – соответственно частота и скорость ультразвука;

$L$  – длина акустического пути;

$R_0$  – расстояние от геометрического центра полости до линии, проведенной через центры пьезоэлементов;

$\omega_K$  – угловая скорость корпуса датчика.

Для практически интересного датчика, который имеет цилиндрическую полость радиусом 30 мм при  $R_0 = 22$  мм, частоте ультразвука 2,1 МГц, частоте изменения угла негори-

зонтальности 30 Гц и его амплитуде  $1^\circ$  максимальное фазовое запаздывание между входным и выходным напряжениями датчика составит  $\Delta\varphi_{\max} = 0.5^\circ$ .

В реальности жидкость внутри цилиндрической камеры внутри датчика будет увлекаться корпусом, что при полном увлечении приведет к потере информации. При частичном увлечении жидкости погрешность разности фаз между входным и выходным сигналами датчика будет определяться выражением:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi fLR_0}{c^2} \omega_{\text{увл}}, \quad (2)$$

где  $\omega_{\text{увл}}$  – угловая скорость увлеченной жидкости.

При движении путевой машины или железнодорожного состава угол негоризонтальности меняется по гармоническому закону [1]. Соответственно корпус датчика будет совершать такие же колебания с небольшой амплитудой. Поэтому для определения угловой скорости увлечения жидкости примем гипотезу о том, что при малых угловых скоростях жидкость внутри камеры датчика можно рассматривать как «твердое» тело, вращающееся со скоростью, определяемой вязким трением на границе полости. Тогда справедливо следующее уравнение:

$$J\ddot{\theta} = R\mu(\omega_K - \dot{\theta})S, \quad (3)$$

где  $\theta$  – угол поворота жидкости;

$J$  – момент инерции жидкости, ограниченного цилиндрической полостью датчика;

$\mu$  – динамическая вязкость жидкости, заполняющей цилиндрическую камеру датчика;

$\omega_K = \alpha_m \omega \cos(\omega t)$  – угловая скорость корпуса датчика;

$S$  – площадь боковой поверхности цилиндрической камеры датчика радиуса  $R$ , по которой происходит трение;

$\alpha_m$  – максимальное значение угла негоризонтальности;

$\omega$  – частота изменения угла негоризонтальности.

Решением этого дифференциального уравнения будет функция:

$$\theta(t) = \alpha_m \frac{16v^2 \sin(\omega t) + 4R^2 \omega v e^{-\frac{4\nu}{R^2}} - 4R^2 \omega v \cos(\omega t)}{R^4 \omega^2 + 16v^2}, \quad (4)$$

где  $v = \mu/\rho$  – кинематическая вязкость жидкости.

Угловая скорость увлечения жидкости может быть найдена в соответствии с принятой гипотезой дифференцированием (4) по времени и, следовательно, определяется выражением:

$$\omega_{\text{увл}}(t) = \alpha_m \omega \frac{16v^2 \cos(\omega t) - 16v^2 e^{-\frac{4\nu}{R^2}} + 4R^2 \omega v \sin(\omega t)}{R^4 \omega^2 + 16v^2}. \quad (5)$$

При угле негоризонтальности  $\alpha_m = 1^\circ$  и частотах колебаний корпуса 0,5 Гц и 30 Гц его угловая скорость будет изменяться по закону согласно рисункам 4 и 5. Временная зависимость  $\omega_{\text{увл}}(t)$  для этих условий представлена соответственно на рисунках 6 и 7.

Из сопоставления указанных рисунков можно сделать выводы, что скорость увлечения жидкости намного меньше угловой скорости корпуса, а также скорость увлечения жидкости практически не зависит от частоты изменения угла негоризонтальности. Проанализируем причины этих фактов. Для этого оценим порядок величин, входящих в выражение (5).

Величина  $16v^2/R^4\omega^2$  для датчика с цилиндрической камерой радиуса 30 мм, заполненной жидкостью, близкой по плотности и вязкости к воде составляет третий порядок малости при скоростях движения вагона-лаборатории начиная с 1 км/ч.

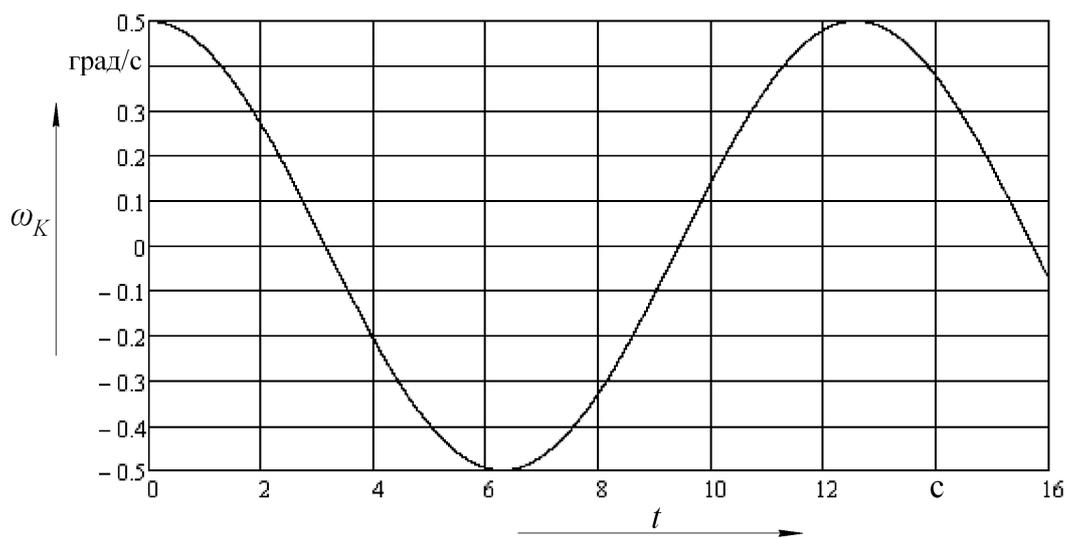


Рисунок 4 – Временная зависимость угловой скорости корпуса датчика при частоте изменения угла негоризонтальности  $\omega=0,5$  Гц

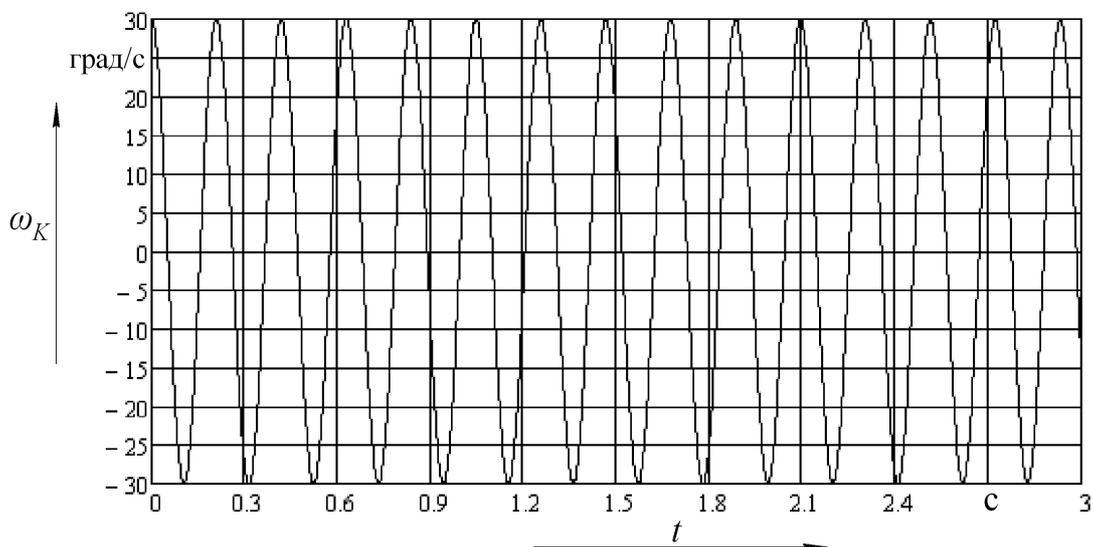


Рисунок 5 – Временная зависимость угловой скорости корпуса датчика при частоте изменения угла негоризонтальности  $\omega=30$  Гц

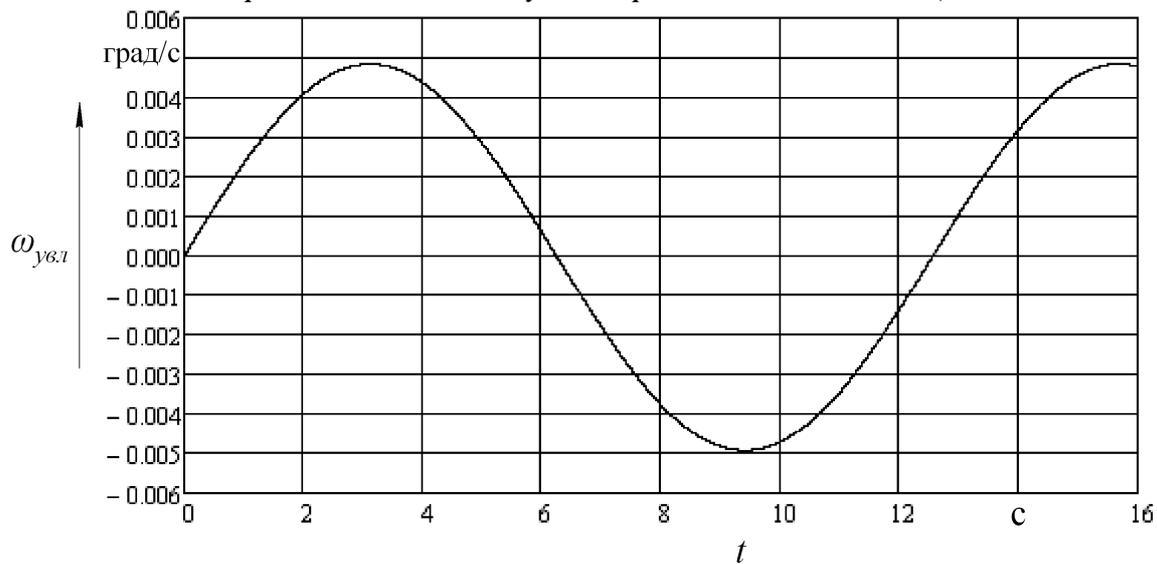


Рисунок 6 – Временная зависимость скорости увлечения жидкости при частоте изменения угла негоризонтальности  $\omega=0,5$  Гц

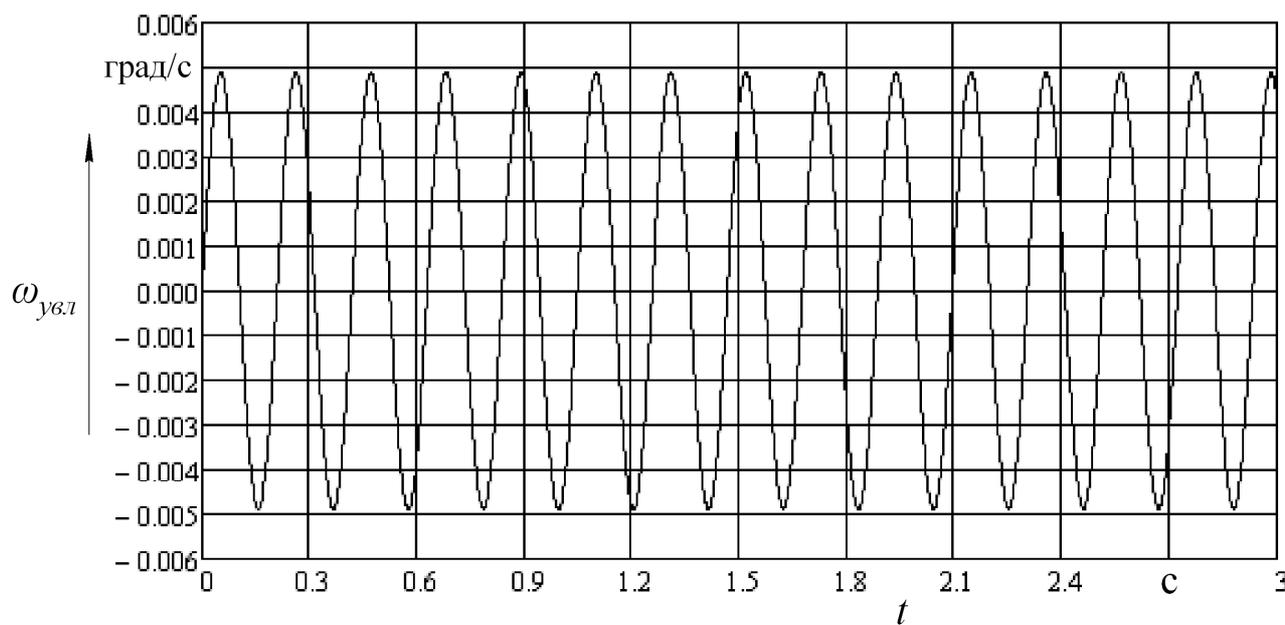


Рисунок 7 – Временная зависимость скорости увлечения жидкости при частоте изменения угла негоризонтальности  $\omega=30$  Гц

Также, следует учитывать, что для этих жидкостей при таких скоростях движения величина  $16v^2$  более, чем на порядок меньше величины  $4R^2\omega v$ . Тогда, выражение (5) может быть существенно упрощено:

$$\omega_{увл}(t) = \frac{4\alpha_m v}{R^2} \sin(\omega t). \quad (6)$$

Заметим, что ранее было принято, что угол негоризонтальности (поворота корпуса) изменяется по гармоническому закону:

$$\alpha(t) = \alpha_m \sin(\omega t). \quad (7)$$

Таким образом, из сопоставления выражений (6) и (7) можно сделать вывод, что скорость увлечения жидкости прямо пропорциональна и синфазна изменению угла негоризонтальности и практически не зависит от частоты его изменения, но определяется его максимальным значением.

Ранее отмечалось, что информативный параметр датчика – фазовый сдвиг между входным и выходным сигналами – прямо пропорционален угловой скорости корпуса. Следовательно, для выделения информации об угле негоризонтальности требуется адаптивный интегратор с переменным временем интегрирования  $T$ . Очевидно, что результат интегрирования за время  $T$  будет также содержать составляющую, пропорциональную углу негоризонтальности  $\Psi_{\alpha_m}$  и составляющую, пропорциональную погрешности вследствие увлечения жидкости  $\Psi_{\omega_{увл}}$ , которые соответственно определяются выражениями:

$$\Psi_{\alpha_m} = \frac{1}{T} \frac{4\pi fLR_0}{c^2} \alpha_m \sin(\omega T), \quad (8)$$

$$\Psi_{\omega_{увл}} = 2 \frac{1}{T} \frac{4\pi fLR_0}{c^2} \frac{4\alpha_m v}{R^2 \omega} \sin^2\left(\frac{\omega T}{2}\right). \quad (9)$$

Если построить адаптивный интегратор таким образом, что постоянная время интегрирования  $T$  будет много меньше периода изменения угла негоризонтальности  $T_\alpha = 1/\omega$ , т.е. если величина  $T/T_\alpha = \omega T$  будет мала, то выражения (8) и (9) можно записать в виде:

$$\Psi_{\alpha_m} = \alpha_m \frac{1}{T} \frac{4\pi fLR_0}{c^2} \omega T, \quad (10)$$

$$\Psi_{\omega_{\text{угл}}} = \frac{2\alpha_m \nu}{R^2} \frac{1}{T} \frac{4\pi fLR_0}{c^2} \omega T^2. \quad (11)$$

Тогда относительную погрешность преобразования вследствие увлечения жидкости можно записать в виде:

$$\delta_{\text{угл}} = \frac{\Psi_{\omega_{\text{угл}}}}{\Psi_{\alpha_m}} \cdot 100\% = \frac{2\nu}{R^2} T \cdot 100\%. \quad (12)$$

Таким образом, анализируя выражение (12), можно утверждать, что выбирая постоянную времени интегрирования  $T$  для конкретного датчика с цилиндрической камерой радиуса  $R$ , который в свою очередь определяет его чувствительность к угловой скорости, а, следовательно, и к углу негоризонтальности, можно добиваться требуемого значения относительной погрешности преобразования вследствие увлечения жидкости. Следует также подчеркнуть, что в соответствии с принятой гипотезой о моделировании жидкости внутри цилиндрической камеры датчика «твердым» телом, а также в соответствии с принятыми допущениями о свойствах жидкости и малых частотах угловых колебаний корпуса датчика, но не ниже частоты при скорости выправки пути или скорости движения вагона-лаборатории, равной 1 км/ч, получается, что относительная погрешность датчика вследствие увлечения жидкости не зависит от частоты изменения угла негоризонтальности и при определенном времени интегрирования, обеспечивающем требуемую чувствительность в определенном диапазоне частот изменения угла она будет являться систематической.

Целью дальнейших исследований является экспериментальная проверка принятой гипотезы о моделировании жидкости в камере датчика «твердым» телом и малом увлечении жидкости корпуса, а также разработка адаптивного интегратора, позволяющего обеспечить большую чувствительность инерционного датчика к углу негоризонтальности и минимальную относительную погрешность при соответствующем радиусе полости  $R$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распопов, В.Я. Датчики уровня систем управления железнодорожных машин: Монография / В.Я Распопов, Ю.В.Иванов. – Тула: Тул. гос. ун-т, 2000.
2. Есипов, А. В. Гидроакустические средства контроля негоризонтальности железнодорожного пути: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Орел: ОрелГТУ, 2004.
3. Есипов, В.Н. Гидроакустические датчики негоризонтальности с механическим маятниковым чувствительным элементом / В.Н. Есипов, А.И. Незнанов // Сб. материалов 10-й Всероссийской научн.-техн. Конференции «Состояния и проблемы измерений». – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – С. 54-55.
4. Есипов, В. Н. Гидроакустические датчики контроля углов и угловых скоростей // Контроль. Диагностика, 2004. – № 9. С. 52-56, 61

### **Есипов Виталий Николаевич**

Орловский государственный технический университет  
г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»  
Тел. (4862) 41-98-76

### **Незнанов Александр Иванович**

Орловский государственный технический университет  
г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Аспирант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»  
Тел. (4862) 41-98-76  
E-mail: orelkir18@gmail.com

### **Рыбин Артем Александрович**

Орловский государственный технический университет  
г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Магистрант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»  
Тел. (4862) 41-98-76

Г.И. УТКИН, В.В. ЧКАН, В.В. МАРКОВ

## ПРОЦЕСС ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭРОЗИИ РАЗЪЕМНЫХ КОНТАКТОВ

*Приведены теоретические исследования динамического режима работы электрических контактов, сопровождающегося электрической эрозией. Выполнен анализ структуры поверхности электрического контакта после воздействия на нее дуговой эрозии.*

**Ключевые слова:** электрический соединитель; коммутация; контакт; трение; износ; электрическая цепь; замыкание электрических контактов; сближение контактирующих поверхностей

*In given article theoretical researches of a dynamic operating mode of the electrical contacts accompanied by electrical erosion are resulted. The analysis of structure of a surface of electrical contact after effect on it of arc erosion is made.*

**Key words:** electrical connection; commutation; contact; friction; wear; electrical chain; circuit the electrical contacts; rapprochement the contacting surfaces

Известно, что практически любое электрическое или электронное устройство должно иметь элементы, позволяющие подключать приёмник электрической энергии к её источнику или отключать его. В настоящее время значительная часть этих операций осуществляется с помощью разъёмных электрических соединителей. Известно также, что качество электрического соединения зависит от сопротивления линии связи. Если электрическая линия связи содержит соединитель, то коэффициент полезного действия линии будет, в основном, определяться переходным сопротивлением контакта в соединителе. Поэтому повышение качества электрических соединителей и снижение их себестоимости является актуальной задачей.

Наиболее сложные электрические и механические процессы в контактных устройствах возникают в динамическом режиме, когда соединение происходит при наличии токов и напряжений. При малых токах и напряжениях (порядка микровольт и микроампер) влиянием электрических процессов на работу контактного устройства можно пренебречь. Однако, когда коммутируемые токи и напряжения достаточно велики, они оказывают существенное влияние на работу контактных устройств.

Электрическая эрозия – явление локального характера, выражающееся в физико-химических изменениях на поверхности электродов. Они сопровождаются направленным выбрасыванием или переносом частиц металла и протекают под воздействием энергии, выделяемой в межэлектродном промежутке при прохождении по нему электрического тока. Электрическая эрозия контактов (мостиковая, дуговая, искровая) вызывает их износ или перенос материала с одного контакта на другой [1-4]. Электрическая эрозия контактов под действием малых токов определяется мостиковой стадией и стадией искрового разряда.

Мостиковая эрозия в чистом виде наблюдается на размыкающихся контактах при условии отсутствия контактной дуги, т.е. она типична для контактов, используемых в слаботочных цепях. Как известно, контакты в замкнутом состоянии соприкасаются, обеспечивая металлический контакт не всеми точками поверхности. При размыкании контактов число этих точек сокращается и наступает момент, когда в отдельных точках контакта, из-за крайне ограниченного их числа, плотность тока нарастает, достигая нескольких тысяч ампер на квадратный сантиметр. Мощность, выделяемая в контакте, резко увеличивается и рассеивается в нескольких точках. В этих точках металлическое покрытие контакта расплавляется.

Между контактами образуется капля жидкого металла, которая при дальнейшей раздвижке контактов переходит в жидкий мостик, соединяющий оба контакта. При достижении на мостике напряжения кипения металл мостика закипает («взрывается») и мостик обрывается. Чаще всего, как показывает опыт, мостики взрываются в зоне, расположенной вблизи анода (можно считать, что сам мостик состоит из металла анода и катода поровну).

Мостиковая эрозия бывает двух форм: симметричная с одинаковым диаметром у анода и катода и несимметричная – с утолщением у одного из электродов. В последнем случае, вследствие асимметрии разрыва, большая часть металла из мостика переходит на катод, то есть износу подвергается только анод (мостиковый перенос в данном случае имеет знак плюс). Объём  $V_0$  мостиковой эрозии в контактах, выполненных из одинакового материала, за одно отключение цепи рассчитывается по формуле:

$$V_0 = K_э \cdot I^3, \quad (1)$$

где  $K_э$  – постоянная;

$I$  – сила тока, протекающая по контакту.

Мостиковая эрозия, согласно тепловой теории, обусловлена тепловой асимметрией мостика из-за туннельного эффекта в стадии проводимости до размыкания контактов, когда анод больше, чем катод. В случае разнородных материалов катода и анода можно подбором их теплофизических параметров компенсировать температурную асимметрию мостика и снижение эрозии, т.е. можно создать условия для самоограничивающегося переноса металла. Однако когда катод и анод состоят из одного и того же материала и имеют одинаковые теплофизические константы, нельзя избежать мостикового переноса вследствие неодинакового температурного режима катода и анода и различных для них средних температур за время процесса размыкания контактов.

Важным фактором, влияющим на износ контактов коммутационных аппаратов, является другая разновидность эрозии – дуговая эрозия, возникающая при размыкании контактов, когда в межконтактном промежутке существует электрический разряд в газовой среде, обычно содержащий некоторое количество паров металла. При определенном соотношении между током и напряжением при размыкании возникает дуга, сопровождающаяся переносом металла с одной поверхности контакта на другую и его потерей, появлением неровностей на поверхностях контактов и образованием пленок из-за высокой температуры.

Дуговая эрозия – явление локального характера, выражающееся в физико-химических изменениях на поверхности электродов. Они сопровождаются направленным выбрасыванием или переносом частиц металла и протекают под воздействием энергии, выделяемой в межэлектродном промежутке при прохождении по нему электрического тока [1-4].

Дуговая эрозия контактов непосредственно связана с энергией, выделяющейся на контактах дугой, которую можно определить уравнением:

$$W = k \cdot (U_k - U_a) \cdot \int_0^t i(t) dt, \quad (2)$$

где  $U_k$  и  $U_a$  – соответственно, катодное и анодное падение напряжения;

$t$  – время горения электрической дуги.

Степень износа контактов за одну операцию отключения зависит от значения тока дуги, длительности её горения, скорости перемещения дуги по поверхности контактирования, материала контактов и конструктивных особенностей аппарата. При больших отключаемых токах и сравнительно редких операциях общий износ находится в прямой зависимости от числа отключений.

Возникновение дуги определяется тем, что при размыкании штыря и гнезда контактов возникает электрическое поле высокой напряженности. В результате этого явления происходит образование электрической дуги, которая не исчезает и при дальнейшем раздвижении контактов в результате сильной ионизации. Условия образования дуги зависят от многих факторов: металла поверхностного покрытия деталей контакта, значений напряжений и токов, состава окружающей среды, состояния контактирующих поверхностей, наличия емкостей и индуктивностей в электрической цепи. Загрязнение окружающей среды и наличие индуктивностей облегчают возникновение дуги и ухудшают работу контактного устройства.

Характеристики дугообразования для незагрязнённой окружающей среды, чистых поверхностей и при отсутствии индуктивностей и емкостей в цепи известны. В первом приближении справедливо выражение для условия дугообразования [5]:

$$(U - U_{\text{д}}) \cdot (I - I_{\text{д}}) \geq k_{\text{д}}, \quad (3)$$

где  $U_{\text{д}}$  и  $I_{\text{д}}$  – соответственно, минимальные значения напряжения и силы тока дуги;  
 $U$  и  $I$  – соответственно, напряжение и сила тока в электрической цепи;

$k_{\text{д}}$  – коэффициент, зависящий от скрытой теплоты испарения металла контактов.

Обычно  $U_{\text{д}} = 8...25$  В,  $I_{\text{д}} = 0,5...1,3$  А. Так, например, для серебра  $U_{\text{д}} = 8$  В,  $I_{\text{д}} = 0,9$  А; для золота  $U_{\text{д}} = 25$  В,  $I_{\text{д}} = 0,5$  А; для меди  $U_{\text{д}} = 25$  В,  $I_{\text{д}} = 1,3$  А. Эти значения указывают границы, в пределах которых следует учитывать явление дуговой эрозии. Области образования дуг для различных металлов представлены на рисунке 1.

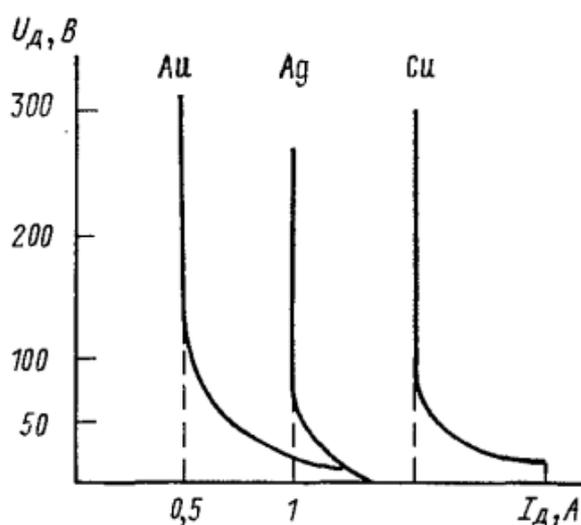


Рисунок 1 – Области образования электрических дуг

Если напряжение и ток в цепи меньше  $U_{\text{д}}$  и  $I_{\text{д}}$ , то дуга не образуется, когда в цепи нет индуктивности. Если в цепи есть индуктивность, то после резкого изменения тока, связанного с размыканием, на ней создается большое напряжение  $U_{\text{к/РАЗМ}}$ , которое практически оказывается приложенным к размыкаемому промежутку. Поскольку  $U_{\text{к/РАЗМ}} > U_{\text{р}}$ , то происходит пробой воздушного промежутка между контактирующими поверхностями. Чем больше коммутируемый ток и индуктивность, тем легче возникает дуга. Этот эффект не наблюдается в соединителях, которые сочленяются и расчленяются в нерабочем состоянии аппаратуры [6].

Поток мощности, приходящий на опорное пятно дуги, определяется формулой:

$$q_{\text{оп}} = \frac{\eta \cdot i_{\text{д}} \cdot u_{\text{д}}}{2 \cdot S_{\text{оп}}}; \quad \eta = \frac{U_{\text{к}} + U_{\text{а}}}{U_{\text{д}}}, \quad (4)$$

где  $u_{\text{д}}$  и  $i_{\text{д}}$  – соответственно, мгновенные значения напряжения и силы тока дуги;  
 $S_{\text{оп}}$  – площадь опорного пятна контакта;

$\eta$  – коэффициент, учитывающий долю энергии, выделенной дугой на контактах и поглощённую ими за счёт приэлектродных явлений [7].

Поток мощности  $q_{\text{оп}}$  на опорное пятно достигает значений единиц (104...105) Вт/см<sup>2</sup> и не распределяется равномерно по его поверхности. Из-за сложности рельефа поверхности опорного пятна на его микронеровностях электрическое поле концентрируется и дискретные потоки мощности  $q_{\text{к}}$ , которые определяются по формуле [7]:

$$q_{\text{к}} = \frac{\eta \cdot i_{\text{д}} \cdot u_{\text{д}}}{2 \cdot n_{\text{к}} \cdot S_{\text{к}}}, \quad (5)$$

где  $n_k$  – число кратеров, одновременно функционирующих на рабочих поверхностях контактов (достигает значений  $10^8$  шт/см<sup>2</sup>).

Под воздействием дискретных потоков мощности  $q_k$  на поверхности опорного пятна дуги возникают микропузырьки, внутреннее давление которых приводит к их взрыву, истечению микроструек плазмы, проводящих ток  $i_k$ , и образованию кратеров. На опорном пятне одновременно функционирует  $n_k = i_d/i_k$  кратеров, имеющих площадь  $S_k$ . Ток в микроструйках плазмы  $i_k$  может составить значение около  $10^2$  А, а плотность тока – около  $10^8$  А/см<sup>2</sup>. Поэтому давление в микроструйке плазмы достигает порядка  $10^8$  Па. Под воздействием реактивного давления микроструек плазмы кратеры взрываются и образуются конусы эрозии и происходит разлет капель жидкого металла и твердых частиц. Угол разлета капель жидкого металла и твердых частиц составляет примерно  $10^\circ$  к поверхности контактов [4].

Расчёты эрозии серебросодержащих контактов, выполненные по экспериментальным данным исследований процессов гашения дуги большой мощности в низковольтных выключателях, с помощью осцилографирования тока и напряжения дуги и скоростной киносъёмки, показали, что при максимальном мгновенном значении тока дуги  $i_{d/\max} = 8,5$  кА эрозия контакта составила 0,59 г, а при  $i_{d/\max} = 24,5$  кА – около 0,89 г [1,2].

Электрические свойства дуги описываются статической вольтамперной характеристикой, представляющей собой зависимость между напряжением и током дуги в состоянии устойчивого горения (рисунок 2). Вольтамперная характеристика дуги имеет три области: падающую – I, жёсткую – II и возрастающую – III. В области I (до 100 А) с увеличением тока напряжение значительно уменьшается. Это происходит в связи с тем, что при повышении тока увеличивается поперечное сечение, а, следовательно, и проводимость столба дуги. В области II (100...1000 А) при увеличении тока напряжение сохраняется постоянным, так как сечение столба дуги и площадь анодного и катодного пятен увеличивается пропорционально току. Область II характеризуется постоянством плотности тока. В области III напряжение возрастает вследствие того, что увеличение плотности тока выше определённого значения не сопровождается увеличением катодного пятна ввиду ограниченности сечения электрода.

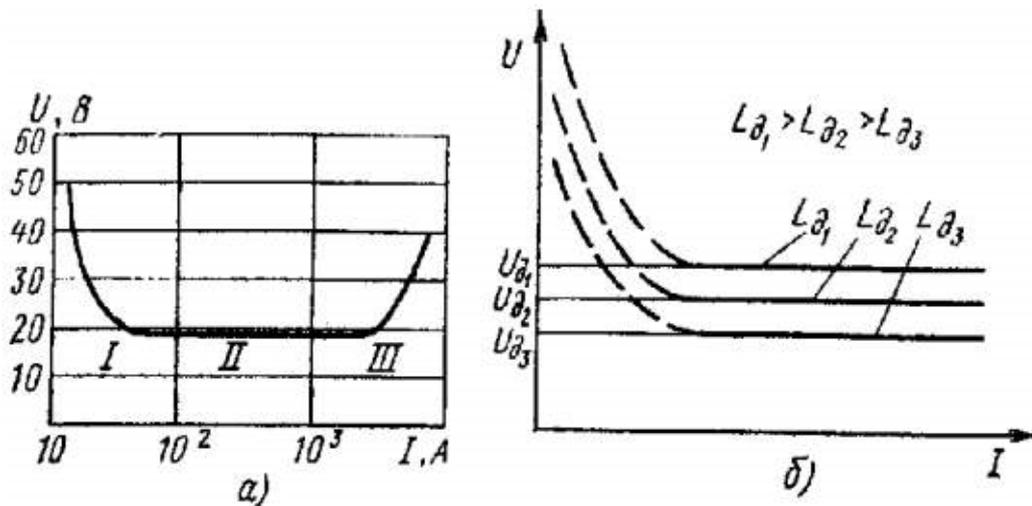


Рисунок 2 – Статическая вольтамперная характеристика электрической дуги

Относительная дугостойкость различных металлов может быть оценена на основании диаграммы (рисунок 3), построенной по результатам опытов с короткой дугой (0,8 мм) при токе 12 кА и продолжительностью его протекания 0,0085 с [8].

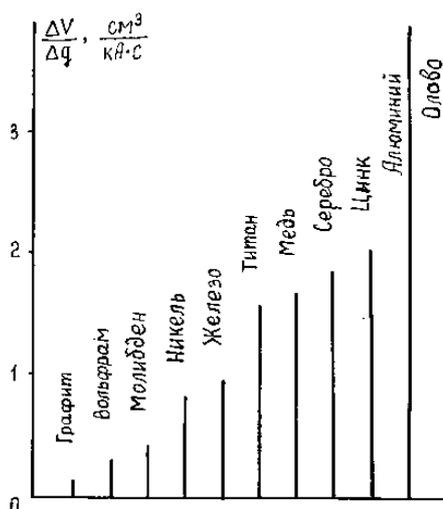


Рисунок 3 – Отношение объёма эрозии к количеству электричества в дуговой стадии для различных контактных материалов

Снижение эрозии стадии искрового разряда может быть достигнуто за счёт применения эрозионно-устойчивых материалов, а также за счёт шунтирования контактов искрогасительными (активно-ёмкостными) цепочками.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электротехнический справочник. В 3-х т. Т.2. Электротехнические устройства [Текст] / Под общ. ред. В.Г. Герасимова, П.Г. Грудинского, Л.А. Жукова [и др.]. – М.: Энергоиздат, 1981. – 640 с.
2. Основы теории электрических аппаратов [Текст] / Под общ. ред. И.С. Таева. – М.: Высшая школа, 1987. – 352 с.
3. Намитоков, К.К. Электроэрозионные явления [Текст]. – М.: Энергия, 1978. – 456с.
4. Буткевич, Г.В. Электрическая эрозия сильноточных контактов и электродов [Текст] / Г.В. Буткевич, Г.С. Белкин, Н.А. Ведешенков, М.А. Жаворонков. – М.: Энергия, 1978. – 256 с.
5. Комаров, А.А. Тяговые и трансформаторные подстанции [Текст]: Учебно-методическое пособие / А.А. Комаров. – Самара: СамИИТ, 2001. – 51 с.
6. Хольм, Р. Электрические контакты [Текст] / Р. Хольм. – М.: Изд-во иностр. лит, 1961. – 464 с.
7. Мещеряков, В.П. Новый метод оценки эрозии контактов под воздействием дугового разряда. Экспозиция [Текст] / В.П. Мещеряков // Энергетика. - 2009. - № 1. – С. 56-64.
8. Бондаренко, И.Б. Соединители и коммутационные устройства [Текст]: Учебное пособие / И.Б. Бондаренко, Ю.А. Гатчин, Н.Ю. Иванова, Д.А. Шилкин. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. – 151 с.

#### Уткин Георгий Игоревич

Орловский государственный технический университет, г. Орёл  
 Аспирант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»  
 Тел. (4862)41-98-76  
 E-mail: [pms35vm@yandex.ru](mailto:pms35vm@yandex.ru)

#### Чкан Виталий Валерьевич

Орловский государственный технический университет, г. Орёл  
 Аспирант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»  
 Тел. (4862)41-98-76  
 E-mail: [pms35vm@yandex.ru](mailto:pms35vm@yandex.ru)

#### Марков Владимир Владимирович

Орловский государственный технический университет, г. Орёл  
 Кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»  
 Тел. (4862)41-98-76  
 E-mail: [pms35vm@yandex.ru](mailto:pms35vm@yandex.ru)

М.В. ЛУНИН, Ю.Р. ТЮЛЯКОВА, В.Ю. КАЗАКОВ

## МЕТОД И СРЕДСТВО ИЗМЕРЕНИЯ ОБЪЁМНОГО РАСХОДА ГАЗА В ПРОЦЕССАХ С МАЛЫМ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЕМ

*В статье рассмотрены основные положения разработки метода и средства контроля объёма пузырька газа. Принцип измерения основан на контроле параметров естественного движения пузырька газа в вязкой среде. Приводятся результаты теоретического исследования с выводами расчётных соотношений для проведения измерения по алгоритму. Приводятся требования к процессу измерения и конструктивным особенностям измерительной кюветы. Приводятся средство измерения временного интервала прохождения пузырьком участка среды, с учётом определения положения центра пузырька.*

**Ключевые слова:** объёмный расход газа, вязкость жидкости, движение пузырька газа.

*In article substantive provisions of working out of a method and a control device of volume of a vial of gas. The measurement principle is based on the control of parameters of natural movement of a vial of gas in the viscous environment. Results of theoretical research with conclusions of settlement parities for measurement carrying out on algorithm are resulted. Requirements to process of measurement and design features measuring ditches are led. Are resulted a gauge of a time interval of passage by a vial of a site of environment, with the account of definition of a material point in the vial centre.*

**Keywords:** the volume expense of gas, viscosity of a liquid, movement of a vial of gas.

### ВВЕДЕНИЕ

В зависимости от количества расхода газов применяют те или иные методы и средства измерений. Особую область в этих измерениях занимает контроль малых и сверхмалых объёмов, для которого непригодны механические, электрические, ультразвуковые и другие методы. Ведущее положение при контроле малых и сверхмалых объёмов газа получили пузырьковые методы. Существующие пузырьковые методы отличаются учётом различных факторов, влияющих на содержание газа в каждом пузырьке, так например, при реализации методов Т. С. Бондарева, В. С. Малышева и Ray F. считается, что размер пузырька газа определяется диаметром сопла, без учета давления в пузырьке. При более точных измерениях необходимо учитывать реологические свойства жидкости, через которую происходит барботирование газа, его температуру и т. д.

Примером процессов, при которых контроль газовой выделения позволяет судить о качестве протекающего процесса, являются процессы брожения, для контроля которых существующая точность измерения расхода газа недостаточна. Поэтому разработка пузырьковых методов контроля повышенной точности является актуальной задачей [1].

### МОДЕЛЬ БАРБОТИРОВАНИЯ ГАЗА ЧЕРЕЗ ЖИДКОСТЬ

При описании поведения пузырька газа при различных температурах и давлениях воспользуемся уравнением Ван-дер-Ваальса [2].

Решение этого уравнения относительно молярного объёма газа позволяет получить зависимость изменения радиуса пузырька и подъёмной силы при его движении вверх в жидкости. Полученные зависимости изменения радиуса пузырька и подъёмной силы позволяют сделать следующие выводы: относительное изменение диаметра пузырька при подъёме с глубины меньше относительного роста подъёмной силы [3].

Объём газа в пузырьке [4]:

$$V_{\Gamma} = \frac{m_{\Gamma}}{\rho_{\Gamma}} \cdot \left( \frac{p_H}{p + a/V_M^2} \right), \quad (1)$$

где  $m_{\Gamma}$  – масса газа;

$\rho_{\Gamma}$  – плотность газа при нормальных условиях;

$p_H$  – нормальное давление;

$p$  – гидростатическое давление, действующее на пузырёк со стороны жидкости;

$V_M$  – молярный объём газа;  $a$  – константа Ван-дер-Ваальса.

Из уравнения Ван-дер-Ваальса с учётом (1):

$$V_{\Gamma} = \frac{m_{\Gamma}}{\rho_{\Gamma}} \cdot \frac{p_H \cdot (V_M - b)}{R \cdot T}, \quad (2)$$

где  $T$  – температура газа в пузырьке;

$R$  – универсальная газовая постоянная;

$b$  – константа Ван-дер-Ваальса.

Так как плотность жидкости много больше плотности газа, тогда силой тяжести, действующей на пузырёк, можно пренебречь. На движущийся в вязкой жидкости пузырёк газа действуют силы, для которых справедливо соотношение:

$$F_A - F_{TP} - m_{\Gamma} \cdot dv/dt = 0, \quad (3)$$

где  $F_A$  – сила Архимеда;

$F_{TP}$  – сила трения;

$m_{\Gamma} \cdot dv/dt$  – сила, действующая на движущийся с ускорением пузырёк.

Учитывая, что при наступлении предельного значения скорости пузырёк начинает двигаться равномерно, величина  $m_{\Gamma} \cdot dv/dt = 0$ . При этом для предельных значений скорости  $v_0$ , при которых сохраняется равномерное движение и ламинарное обтекание шарика жидкостью, справедливо выражение Стокса:

$$F_{TP} = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot R_{ш} \cdot v_0, \quad (4)$$

где  $v_0$  – предельное значение скорости при равномерном движении;

$R_{ш}$  – радиус шара движущегося в жидкости;

$\eta$  – динамическая вязкость жидкости.

Сила Архимеда, определяется выражением:

$$F_A = m_{ж} \cdot g = \rho_{ж} \cdot V_{\Gamma} \cdot g, \quad (5)$$

где  $\rho_{ж}$  – плотность вязкой жидкости;

$g$  – ускорение свободного падения.

Учитывая силы, действующие на сферический пузырёк, можно записать:

$$V_{\Gamma} = \sqrt{\frac{3}{4 \cdot \pi} \cdot \left( \frac{6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot R \cdot T}{\rho_{ж} \cdot g \cdot p_H \cdot (V_M - b)} \cdot v_0 \right)^3}. \quad (6)$$

Для описания физических процессов движения вязких жидкостей воспользуемся формулой Пуазейля [4]:

$$\eta = \frac{(p_1 - p_2) \cdot R_{ш}^2 \cdot t}{4 \cdot l^2} \cdot \left( \frac{R_K^2}{R_{ш}^2} - 1 \right), \quad (7)$$

где  $t$  – время прохождения пузырьком пути  $l$  (учитывая предельное значение скорости, справедливо:  $v_0 = l/t$ );

$R_K$  – радиус измерительной кюветы.

Разность давлений  $(p_1 - p_2)$  определим по формуле:

$$(p_1 - p_2) = \rho_{ж} \cdot g \cdot (h_1 - h_2), \quad (8)$$

где  $h_1$  и  $h_2$  – высоты столбов вязкой среды.

Вязкость большинства жидкостей с ростом температуры уменьшается по закону [4]:

$$\eta = A \cdot \exp(W/k \cdot T), \quad (9)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана;

$A$  – множитель, слабо зависящий от температуры  $T$ ;

$W$  – энергия активации вязкого течения.

Учитывая (7) и (9), перепишем (6) и получим зависимость  $V_r(t)$  в виде:

$$V_r = \sqrt[3]{\frac{3}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{M \cdot L \cdot l \cdot W \cdot \left( R_k^2 - \left( \sqrt[3]{V_r \cdot \frac{3}{4 \cdot \pi}} \right)^2 \right)}{t \cdot \left( k \cdot \ln \left( R_k^2 - \left( \sqrt[3]{V_r \cdot \frac{3}{4 \cdot \pi}} \right)^2 \right) + k \cdot \ln(L) \right)}}, \quad (10)$$

где  $M = \frac{6 \cdot \pi \cdot R}{\rho_{ж} \cdot g \cdot p_H \cdot (V_M - b)}$ ;

$$L = \frac{\rho_{ж} \cdot g \cdot (h_1 - h_2) \cdot t}{4 \cdot l^2}.$$

Таким образом, в основу предлагаемого метода измерения расхода малых объёмов газа заложена гипотеза о том, что контроль реологических свойств жидкости для барботажа можно обеспечить путем использования пузырька-маркера, сформированного естественным путем на границе раздела жидкой и газообразной фаз (например, на выходе сопла) и измерения времени прохождения пузырьком определенных участков, расположенных на траектории его подъема, с определением динамической вязкости по косвенным зависимостям с метрологической оценкой результатов измерения.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЗЫРЬКОВОГО РАСХОДОМЕРА

Учитывая результаты теоретического описания, сформулированы ограничения математической модели и, как следствие, самого метода контроля расхода газа. При этом считаем, что: во-первых, форма пузырьков – сферическая, во-вторых, пузырьки газа поднимаются вертикально вверх вдоль оси цилиндра; в-третьих, каждый пузырек газа образуется в отдельности, отрывается и поднимается независимо от других, не образуя струю и двигаясь на расстоянии не менее, чем расстояние между уровнями расположения оптических линий, и в-четвертых, температура газа в пузырьке не должна значительно отличаться от температуры жидкости.

Теоретический анализ позволил сформулировать принцип измерения вязкости, поясняющийся функциональной схемой (рисунок 1).

Газ через сопло 4 поступает в цилиндрическую кювету 1, заполненную вязкой жидкостью. На выходе сопла 4 образуется пузырек газа 3, который перемещается вдоль оси цилиндрической кюветы. Измерение скорости прохождения пузырька в вязкой среде осуществляется с помощью оптических преобразователей, образованных источниками света 2 и фотоприёмниками 5. При движении пузырьки газа изменяют слой жидкости между источником света и фотоприёмником, что приводит к изменению светового потока, падающего на фотоприёмники, и образованию импульсов, поступающих на устройство 6 измерения временного интервала между импульсами, поступающими последовательно на фотоприёмники при движении пузырька.

Учитывая теоретическое обоснование и полученные расчётные соотношения разработан общий алгоритм измерения:

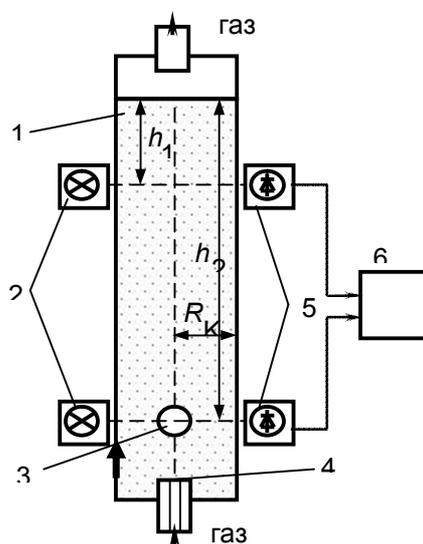
1) предварительно должны быть известны следующие технические характеристики: диаметр сопла, расстояние между соплом и осью первого оптического канала, расстояние

между осями первого и второго оптических каналов, ширина оптического канала, плотность используемого газа при нормальных условиях;

2) кювету заполняют исследуемой жидкостью, удаляя при этом возникшие воздушные пузырьки.

3) в сопло от внешнего источника подают газ, обеспечивая отрыв от сопла в жидкость одного пузырька;

4) определяют динамическую вязкость жидкости по формуле (7).



*Рисунок 1 – Функциональная схема объёмного расходомера, учитывающего свойства жидкости для барботирования*

Для обеспечения измерения по предложенному алгоритму разработан информационно-вычислительный комплекс (ИВК). В общем случае в состав ИВК входят:

- цилиндрическая кювета, заполненная вязкой жидкостью с соплом, расположенном в основании цилиндра;
- оптические линии, состоящие из источников света и фотоприёмников, расположенные на некотором расстоянии друг от друга перпендикулярно по оси цилиндра;
- трубопровод для подачи газа, расход которого измеряется;
- измерительная цепь, подключённая к фотопреобразователям для измерения параметров движения пузырька газа;
- средства автоматической обработки и регистрации информации о расходе и количестве газа.

Для апробации метода была разработана функциональная схема экспериментальной установки измерения реологических параметров оптически прозрачных вязких жидкостей и определения расхода газа, приведенная на рисунке 2.

Определение допустимого диапазона измерения вязкости и поверхностного натяжения проводилось с помощью моделирование на водных растворах глицерина

В соответствии с изложенным, пузырёк газа 3 из сопла 4, поднимается вдоль оси цилиндрической кюветы 1. Величина потока газа и его температура задаются в блоке 13. Терморезистор 10, вместе с блоком 9 осуществляют измерение температуры жидкости. С целью реализации измерения поверхностного натяжения установлен манометр коленного типа 12 подключаемый к газопроводу электромагнитным клапаном 11. Для повышения точности измерения скорости прохождения пузырька в вязкой среде, устанавливается  $n$  оптических каналов представленных парами источников света 2 и фотоприемниками 5. При этом, световому потоку с помощью диафрагмы придаётся прямоугольное сечение. На устройство обработки информации 6 поступают импульсы от фотоприёмника 5, начало которых соответствует моменту вхождения верхней части пузырька в оптический канал, а конец – выходу из

него нижней части пузырька. Эти сигналы обрабатываются соответственно началу и концу движения пузырька в оптическом канале.

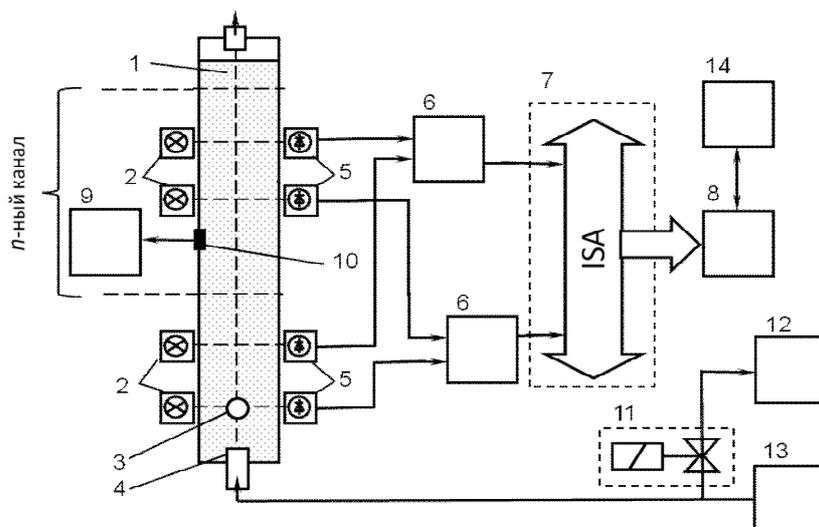


Рисунок 2 – Функциональная схема средства контроля реологических параметров оптически прозрачных жидкостей

Затем определяется интервал времени между парами импульсов, соответствующих входу и выходу пузырька из оптических каналов. Эти интервалы времени не одинаковы, так как в процессе подъёма пузырька он расширяется, поэтому вычисляется среднее значение времени пузырька, соответствующее времени перемещения его центра. Полученные значения интервалов времени вводятся в шину 7 и из неё поступают в цифровой процессор 8, который сравнивает значения интервалов времени, получаемые от двух пар оптических каналов. Блок 6 получает на канале длительность времени движения пузырька в световом пятне, и с учётом засветки последующих каналов определяет среднее значение диаметра пузырька. Цифровой процессор совместно с блоком запоминания и задания констант 14 выполняют измерения постоянства скорости, среднее значение скорости, вязкость, поверхностное натяжение.

При барботировании пузырька через выбранную жидкость выполняется вычисление значения объёма газа в пузырьке путём численного решения уравнения (10) и запоминания полученного значения.

Значение объёмного расхода газа вычисляется по соотношению:

$$Q = \frac{V_{Г1} + V_{Г2} + V_{Г3} + \dots + V_{Гn}}{t_{1-2} + t_{2-3} + t_{3-4} + \dots + t_{(n)-(n+1)}} = \sum_{i=1}^n V_{Гi} / t_{(n)-(n+1)}, \quad (11)$$

где  $V_{Гn}$  – объём газа в  $n$ -ом пузырьке;

$t_{(n)-(n+1)}$  – промежуток времени между моментами появлением в системе текущего пузырька  $t_{(n)}$  и последующего пузырька  $t_{(n+1)}$ .

При использовании данной установки в измерительную кювету заливается жидкость, обладающая вязкостью, обеспечивающей наиболее высокую точность измерения. Для определения этого диапазона были проведены предварительные исследования, так как оптимальное значение вязкости зависит от максимального значения измеренного расхода газа, то жидкость, заполняющая кювету, выбирается в соответствии с диапазоном изменения расхода газа. Затем по приведённой методике уточняется значение вязкости жидкости при заданной температуре.

При многократных измерениях времени прохождения пузырька с воздухом через водные растворы глицерина разной концентрации на установке по схеме (рисунок 2) получены экспериментальные данные, точечные оценки которых изображены на рисунках 3 и 4.

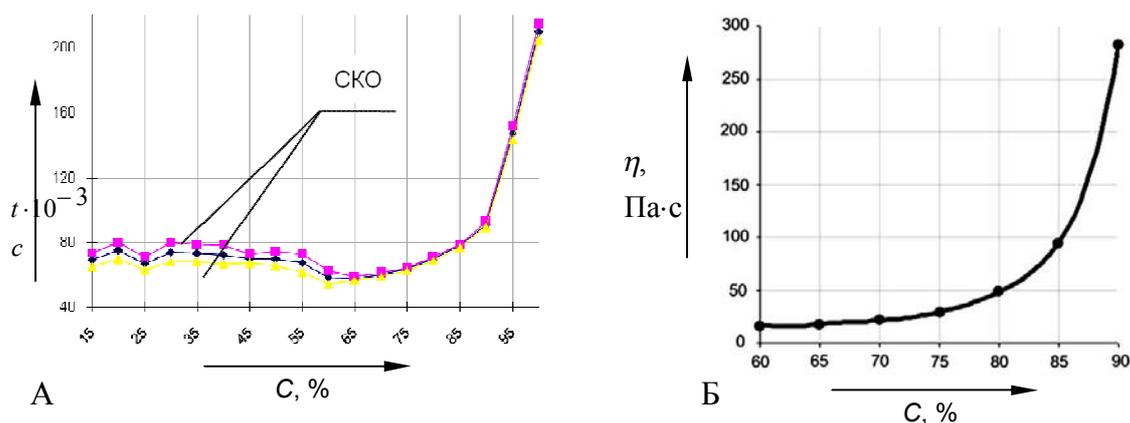


Рисунок 3 – График изотермы изменения времени прохождения пузырьком всех участков с учетом SKO от концентрации раствора глицерина (А); график изотермы динамической вязкости от концентрации раствора глицерина (Б)

Неравномерность перемещения пузырька является причиной высоких значений SKO, приведённых на рисунке. Она незначительно сказывается при значениях более 65 %, что соответствует вязкости 25 Па·с. На рисунке 4 можно заметить, что для водных растворов глицерина относительная погрешность составляет не более 1,8 % в диапазоне концентраций от 70 до 90 %.

Зависимость объёма пузырька от измеренного времени его прохождения между оптическими каналами получена из результатов изменения времени прохождения пузырька в жидкостях с различной вязкостью (рисунок 5).

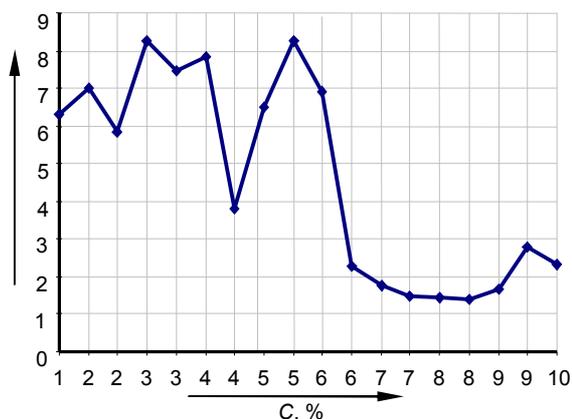


Рисунок 4 – Зависимость SKO серии измерений времени движения пузырька от концентрации раствора глицерина

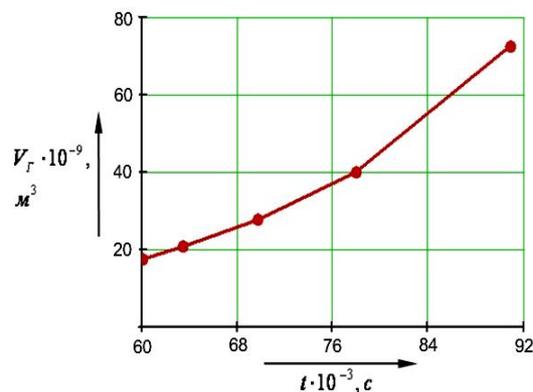


Рисунок 5 – Зависимость объёма пузырька от измеренного времени прохождения пузырька между оптическими каналами

Также возможно произвести выбор жидкости по величине коэффициента поверхностного натяжения. С этой целью, по методу отрыва пузырька внутри жидкости, определена изотермическая зависимость коэффициента поверхностного натяжения от концентрации для водных растворов глицерина (в диапазоне от 60% до 100%). Работоспособность метода для различных вязкостей жидкости при барботировании определяется изотермической зависимостью динамической вязкости от коэффициента поверхностного натяжения (рис.6). Данная зависимость определена путём объединения полученной зависимости коэффициента поверхностного натяжения от концентрации по параметру концентрации с графиком (рисунок 3, Б)

Для барботажной жидкости необходимо соблюдение указанных критериев вязкости и поверхностного натяжения во всём диапазоне рабочих температур. Приведенная суммарная погрешность с доверительной вероятностью 0,95 в диапазоне температур от 20 до 40<sup>0</sup>С для измерительной кюветы и канала не превышает значения 2,1%.

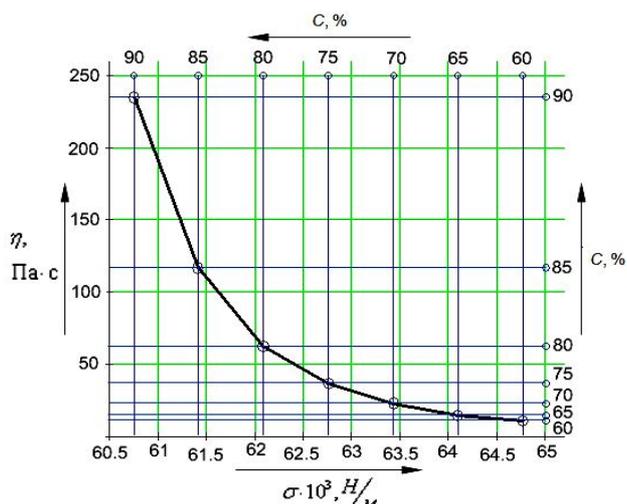


Рисунок 6 – График изотермической зависимости динамической вязкости от коэффициента поверхностного натяжения водных растворов глицерина (температура 20°C)

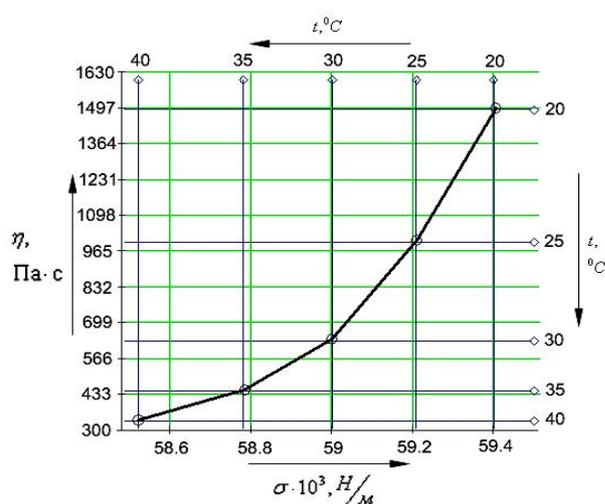


Рисунок 7 - График зависимости динамической вязкости от коэффициента поверхностного натяжения с учетом влияния температуры

На рисунке 8 приведена структурная схема устройства контроля расхода газа.

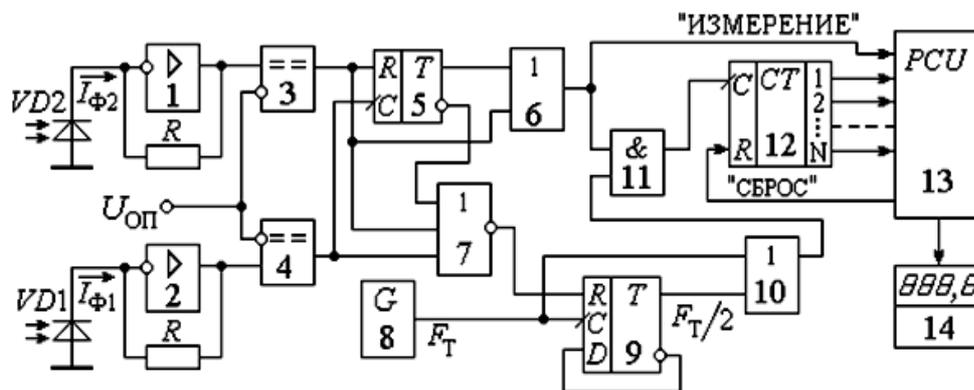


Рисунок 8 - Структурная схема устройства контроля объёмного расхода газа

При движении пузырька газа сначала повышается ток  $I_{\Phi 2}$  и напряжение на выходе усилителя 2 становится больше опорного  $U_2 = I_{\Phi 2}R > U_{\text{оп}}$ . При этом срабатывает компаратор 4, формирует импульс длительностью  $T_{\text{и1}}$  и сравнивает напряжения  $U_2, U_{\text{оп}}$ . Затем повышается напряжение на выходе усилителя 1 и срабатывает компаратор 3, формирующий импульс с длительностью  $T_{\text{и2}}$ . Триггер 5 срабатывает по фронту импульса напряжения  $U_4$  на выходе компаратора 4 и возвращается в исходное состояние по фронту импульса  $U_3$  на выходе компаратора 3, поступающего на R-вход триггера 5. К выходам компараторов 3, 4 подключен элемент 6 типа 2ИЛИ для формирования интервала измерения  $T_{\text{изм}}$ , а также элемент 7 типа 3 ИЛИ-НЕ, которым выделяется интервал  $\Delta T_{\text{изм}} = T_{\text{изм}} - T_{\text{и1}} - T_{\text{и2}}$  времени между выходными импульсами компараторов 3, 4. При появлении на инверсном выходе триггера 5 нулевого уровня напряжения и наличии нулевых сигналов на выходах компараторов 3 и 4 появляется единичный уровень напряжения на выходе элемента 7 типа 3ИЛИ-НЕ, выходным сигналом  $U_7$  которого устанавливает в нулевое состояние триггер 9. При этом на выходе логического элемента 10 типа 2ИЛИ формируются импульсы с частотой  $F_T$ , а в остальное время частота этих импульсов уменьшается вдвое до уровня  $0,5F_T$ .

С выхода элемента 10 типа 2ИЛИ импульсы напряжения  $U_{10}$  переключаемой частоты через логический элемент 11 типа 2И поступают на счетный вход счетчика 12. Элемент типа 2ИЛИ 6 применен для выделения времени измерения  $T_{\text{изм}}$  и формирует сигнал  $U_6$  при появлении высокого уровня напряжения на выходах триггера 5 или компаратора 3. Этот сигнал  $U_6$  также поступает на микропроцессор 13 как команда "Измерение", в начале которой микро-

процессор 13 формирует короткий импульс, подаваемый на R-вход счетчика импульсов 12 для его установки в нулевое состояние. Поэтому счетчик 12 реализует операцию цифрового измерения интервала времени  $T_{\text{ИЗМ}}$  посредством его заполнения тактовыми импульсами с переключаемой частотой  $F_T$  и  $0,5F_T$ . При этом число импульсов, поступающих с выхода элемента 11 на счетчик 12 в течение интервала одного измерения, определяется формулой:

$$N_{11} = 0,5F_T \cdot (T_{\text{И1}} + T_{\text{И2}}) + F_T \cdot \Delta T_{\text{ИЗМ}}. \quad (12)$$

По окончании цикла измерения полученный код  $N_{11}$  с счетчика 12 записывается в оперативное запоминающее устройство микропроцессора 13 и после преобразования в десятичную форму и умножения на коэффициент преобразования выводится на индикатор 14.

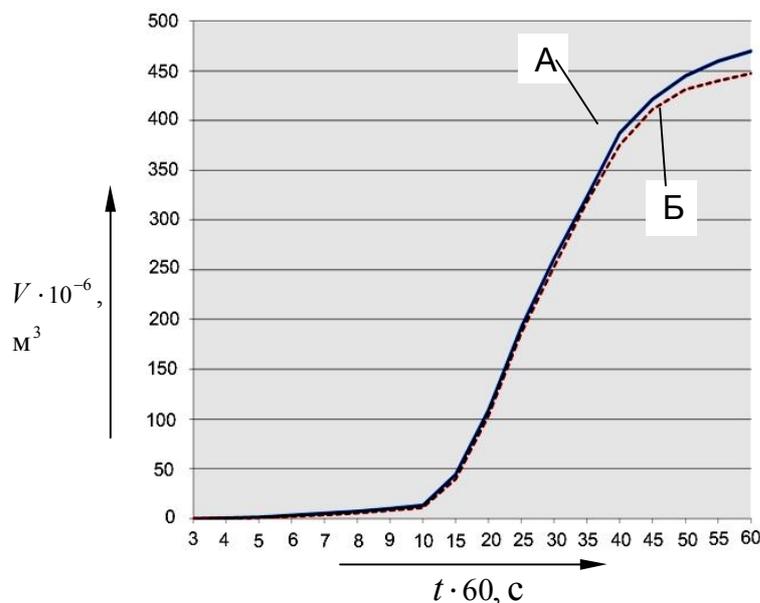


Рисунок 10 – График процесса газовой выделенности в пузырьковой (А) и волюмометрической (Б) системах

Пузырьковый метод имеет преимущества по сравнению с существующим волюмометрическим, что показала апробация метода при исследовании процессов спиртового брожения с использованием микропроб дрожжей. Минус волюмометрического метода заключается в том, что при его реализации растёт давление газа в области его накопления, т. е. условия формирования первого и последнего пузырька отличаются, что отражается на процессе измерения. В таблице приведены данные расхода газа, полученные при указанном процессе обеими методами, а на рисунке 10 – соответствующие им кривые. Разработанный метод позволяет снизить погрешность определения выделенного объема газа на 4,8 % по сравнению с волюмометрическим методом Яго-Островского, что видно из приведенных данных.

Таблица 1 – Результаты исследования процесса газовой выделенности пузырьковым (П) и волюмометрическим (Я) методом Яго-Островского

Оценка результатов измерения	Метод	Минуты, $t \times 60$ , с						
		30	35	40	45	50	55	60
		Объем выделившегося газа, $V_r \times 10^{-9}$ , м <sup>3</sup>						
СР	П	261200	323800	387500	421700	444900	460000	470100
	Я	253700	318200	375700	411000	431400	440200	447500
СКО	П	2468	2426	2271	2362	2294	1336	1185
	Я	2421	2348	1031	1205	1040	2263	2039
СКО СР	П	780,383	767,18	718,002	746,819	725,486	422,446	374,777
	Я	765,652	742,466	325,962	381,165	328,854	715,64	644,916

## ВЫВОДЫ

1. В двухфазной системе между жидкостью и движущимся пузырьком газа происходит ряд процессов, влияющих на результат измерения:

– под действием внешних источников теплоты в объёме вязкой жидкости изменяется тепловое поле, что приводит к изменению энергии активации среды и изменению реологических свойств жидкости;

– изменение давления столба жидкости при движении пузырька газа приводит к его расширению и увеличению подъёмной силы, при этом рост площади поверхности ведёт к увеличению силы трения;

– увеличение подъёмной силы происходит быстрее по сравнению с изменением диаметра пузырька, при этом в области равномерного движения пузырька подъёмная сила уравновешивается силой трения.

2. Предложен принцип измерения, основанный на регистрации параметров движения движущегося в жидкости объекта, плотность которого много меньше плотности жидкости, а именно, пузырька газа, что позволяет измерять реологические свойства вязкой жидкости.

3. Метод контроля объёмного расхода газа, позволяющий учитывать реологические свойства жидкости путем использования пузырька, сформированного естественным путем на границе раздела жидкой и газообразной фазы (на выходе сопла) и измерения времени прохождения пузырьком определенных участков, расположенных на траектории его подъема, с определением динамической вязкости, коэффициента поверхностного натяжения и объёма газа в пузырьке.

4. В разработанном аппаратно-программном комплексе контроля расхода малых объёмов газа, жидкость для барботирования должна обладать следующими показателями: динамическая вязкость не менее 25 Па·с и коэффициент поверхностного натяжения должен находиться в пределе от 60,7 до 63,4 Н/м. Для водных растворов глицерина в диапазоне концентраций 70 – 90% приведенная погрешность не превышает 1,8%.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондарев, Г.С. Дискретный метод измерения малых объемов газа. [Текст] / Г.С., Бондарев, В. С. Мильшев // Измерительная техника. - 1970. - № 5. - С. 102-103.
2. Савельев, И.В. Курс общей физики. [Текст] / Т. 1. М, 1970. – 512 с.
3. Лунин, М.В. Модельное исследование параметров пузырькового расходомера. [Текст] / М.В. Лунин // Известия ОрелГТУ. - № 1/269(544), 2008г., - С. 80 – 85.
4. Матвеев, А.И. Молекулярная физика [Текст] / А.И. Матвеев. - 2-е издание, перер. и доп. - М.: Высшая школа 1987. - 360с.

### **Лунин Максим Викторович**

Орловский государственный технический университет, г. Орёл

Кандидат технических наук, ассистент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»

Тел. (4862)41-98-76

E-mail: [pms35vm@yandex.ru](mailto:pms35vm@yandex.ru)

### **Тюлякова Юлия Романовна**

Орловский государственный технический университет, г. Орёл  
студент

### **Казаков Валентин Юрьевич**

Орловский государственный технический университет, г. Орёл  
студент

П.П. МОИСЕЕВ

## УСТРОЙСТВО ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ УЗЛА СКАНИРОВАНИЯ С ДАТЧИКОМ УГЛОВОГО ПОЛОЖЕНИЯ НА ЭЛЕМЕНТЕ ХОЛЛА

*Проводится анализ структуры построения узла сканирования с возможностью достижения максимальных точностных параметров, для перестраиваемых осциллирующих законов сканирования.*

**Ключевые слова:** узел сканирования, датчик углового положения, элемент холла.

*The analysis of structure for scanning component development for reconfigurable oscillating law of motion with possibility of maximal accuracy parameters achievement is shown.*

**Key words:** scanning component, angular position sensor, Hall effect component.

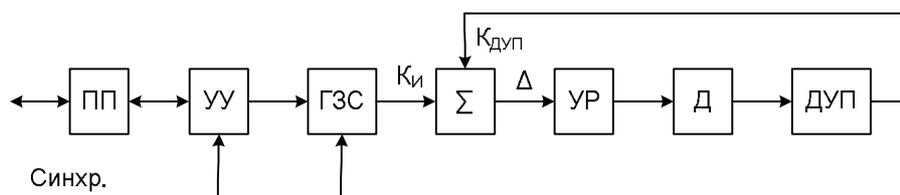
### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Видеоспектральный сканирующий прибор дистанционного зондирования космического объекта может иметь различные осциллирующие законы сканирования, которые переключаются в зависимости от орбиты космического аппарата по отношению к объекту [1]. В основном изменяется два параметра: угловая скорость развертки и угол сканирования. Функциональный контроль узла сканирования (УС) в процессе съемки позволяет улучшить качество съемки и последующую детализацию полученного изображения.

В работе анализируются структурные схемы УС с устройством функционального контроля (УФК) и перенастраиваемым осциллирующим законом сканирования, при использовании в качестве датчика углового положения (ДУП) сканирующего зеркала (СЗ) магниточувствительного датчика на элементе Холла (ЭХ).

### СТРУКТУРНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА УЗЛА СКАНИРОВАНИЯ

Структура УС подробно рассмотрена в [2]. На рисунке 1 показана детализированная структурная электрическая схема УС. Приемно-передатчик ПП обеспечивает обмен командно-служебной информацией УС с электроникой управления прибора. Устройство управления УУ организует работу всего УС. Генератор закона сканирования ГЗС формирует идеальный закон сканирования, который поступает на вычислитель  $\Sigma$ , где сравнивается с данными ДУП СЗ. Сигнал рассогласования  $\Delta$  определяет направление и уровень воздействия УР на двигатель Д, который перемещает СЗ. ДУП контролирует реальное положение СЗ и обеспечивает обратную связь по угловому положению. Процесс сканирования синхронизируется внешними синхроимпульсами от прибора. При этом отметим, что в некоторых съемочных приборах синхронизация производится в обратном направлении, от УС к прибору.

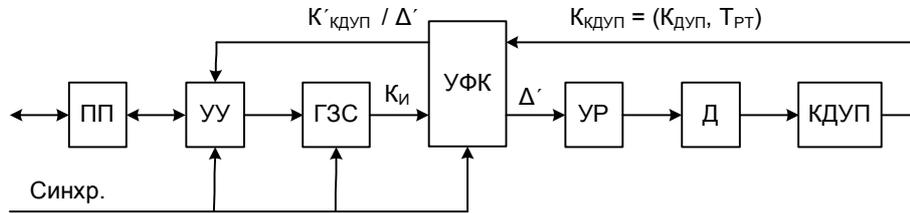


**Рисунок 1 - Структурная электрическая схема узла сканирования**

ПП – приемно-передатчик; УУ – устройство управления; ГЗС – генератор закона сканирования;  $\Sigma$  – вычислитель; УР – устройство регулирования; Д – двигатель; ДУП – датчик углового положения СЗ;  $K_{И}$  – код идеального закона развертки;  $K_{ДУП}$  – код датчика углового положения СЗ;

$\Delta$  – сигнал рассогласования  $K_{И}$  и  $K_{ДУП}$  ( $\Delta = K_{И} - K_{ДУП}$ )

Недостатком данной схемы является отсутствие контроля качества сканирования в процессе съемки и последующей возможности внесения коррекции в результирующее изображение. Для устранения этого недостатка введем в схему УФК. На рисунке 2 приведена структурная электрическая схема с УФК, для организации работы с постоянным осциллирующим законом сканирования.

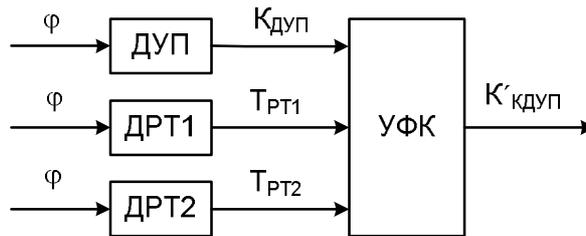


**Рисунок 2 - Структурная электрическая схема УС с УФК и комплексным ДУП, для постоянного осциллирующего закона сканирования**

УФК – устройство функционального контроля; КДУП – комплексный ДУП;  $K'_{кдуп}$  – преобразованный код комплексного датчика углового положения СЗ ( $K'_{кдуп} = f(K_{дуп}, T_{рт})$ );  $\Delta'$  – сигнал рассогласования

$K_{и}$  и  $K'_{кдуп}$  ( $\Delta' = K_{и} - K'_{кдуп}$ );  $T_{рт}$  – сигнал датчика реперной точки

Для повышения точности измерения углового положения СЗ можно применить метод комплексирования [3] для ДУП на ЭХ (рисунок 3), при использовании двух компонент.



**Рисунок 3– Структурная схема комплексного ДУП:**  
ДРТ1 и ДРТ2 – датчики реперных точек

Структура комплексного ДУП основывается на непрерывном измерении с невысокой точностью (в широком диапазоне рабочих температур) одним датчиком и точным измерением в двух реперных точках (РТ) углового диапазона другими датчиками (второй компонент). УФК осуществляет автоматическую обработку сигналов компонентов по определенному алгоритму.

В схемах, представленных на рисунках 2 и 3, УФК обеспечивает коррекцию выходного сигнала ДУП и вычисляет параметр рассогласования  $\Delta'$ , который передает на УР для обеспечения регулирования и на УУ для передачи информации в прибор, с последующей передачей ее на Землю.

Для перенастраиваемого осциллирующего закона сканирования характерно изменения угловой скорость развертки и угла сканирования, поэтому изменение угла сканирования накладывает некоторые дополнительные требования на организацию структуры УС с комплексным ДУП. Это обусловлено тем, что ДРТ1 и ДРТ2 расположены на краях максимального диапазона сканирования и при изменении угла сканирования могут не находиться в зоне текущего сканирования. Соответственно это не позволит осуществлять процесс повышения точности. Для устранения этого ограничения введем в схему УС датчик температуры ДТ (рисунок 4), посредством которого будем определять изменение температурного градиента  $t^{\circ}_{ЭХ}$  в течение временного промежутка от времени последней термокомпенсации. В случае выхода значения градиента за допуск, УФК передаст запрос в УУ на необходимость проведения температурной компенсации.

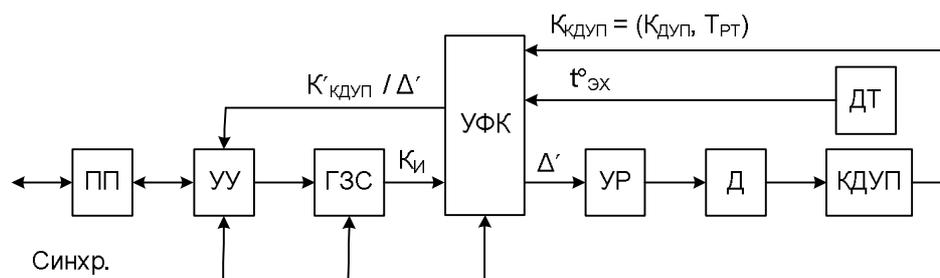


Рисунок 4 - Структурная электрическая схема УС с УФК, комплексным ДУП и датчиком температуры ЭХ, для переменного осциллирующего закона сканирования

На основании проведенного анализа определены основные задачи контроля и выработаны технические требования к УС. Применение УФК позволяет достичь максимальных точностных параметров получения изображения.

### ВЫВОДЫ

1. Результатом анализа является разработка структурных электрических схем УС с УФК и комплексным ДУП для постоянного (рисунок 2), а также дополнительно с датчиком температуры ЭХ для перенастраиваемого (рисунок 4) осциллирующих законов сканирования.

2. Основной задачей УФК являются проведение измерения и оценки выходного параметра рассогласования идеального и реального закона сканирования, а также дополнительно контроля внутреннего параметра изменения температуры вблизи ЭХ. По полученным значениям параметров определять их нахождение относительно допусков на эти контрольные параметры и делать вывод о техническом состоянии УС [4].

3. По информации от УФК, переданной на Землю, можно судить о качестве выполнения закона сканирования и производить коррекцию съемки, что позволяет достичь максимальных точностных параметров получения изображения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рожавский, Э.И., Моисеев П.П., Котцов В.А. Опыт разработки сканирующего устройства видеоспектрометра ОМЕГА с уменьшением его габаритов / Вопросы миниатюризации в современном космическом приборостроении. – Сб. докл. сем. ИКИ РАН. М.: ИКИ РАН, 2005. - С.104-111.
2. Вевюрко, И.А., Прецизионный электропривод с интерферометрическим измерителем перемещений и цифровым программным управлением [Текст] / И.А. Вевюрко, С.В. Медушев, В.Е. Ремизов, С.А. Стома // Прецизионные электромеханические устройства. Труды ВНИИЭМ. Т. 78. С. 5-33.
3. Браславский, Д.А. Точность измерительных устройств [Текст] /Д.А. Браславский, В.В. Петров. – М.: Машиностроение, 1976. - 312 с.
4. Иванов, Ю.П. Контроль и диагностика измерительно-вычислительных комплексов [Текст]: Учеб. пособие / Ю.П. Иванов, В.Г. Никитин, В.Ю. Чернов. - СПб: СПбГУАП, 2004. - 98 с.

#### Моисеев Павел Петрович

ОрелГТУ, кафедра «ПМиС»

ООО «Научно-производственное предприятие «Астрон Электроника»

Тел. (4862) 43-36-93

E-mail: [moiseev\\_pp@pochta.ru](mailto:moiseev_pp@pochta.ru)

Н.В. ДАВЫДОВА

## АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ЕМКОСТНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЯЧЕЙКИ, ЗАПОЛНЕННОЙ СМАЗОЧНЫМ МАТЕРИАЛОМ

*В статье описана физическая модель измерительной ячейки, заполненной смазочным материалом, представлены разработанные схемы замещения ячейки и показано как можно определять электрические параметры смазочного материала по результатам измерения параметров пустой и заполненной смазочным маслом измерительной ячейки.*

**Ключевые слова:** смазочный материал, емкостная ячейка, диэлектрик, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь

*In article the physical model of the measuring cell filled with lubricant is described, the developed equivalent circuits of a cell are presented and it is shown as it is possible to define electric parameters of lubricant by results of measurement of parameters of the measuring cell empty and filled with lubricant oil.*

**Key words:** lubricant, capacity cell, liquid dielectric, dielectric constant, the dielectric power factor

Диэлектрическая проницаемость и проводимость веществ являются фундаментальными характеристиками, по значению которых можно судить о состоянии этих веществ и различных физико-химических процессах, происходящих в них. Однако определение этих характеристик для веществ, являющихся плохими диэлектриками или плохими проводниками, представляет собой трудную задачу, которая не имеет удовлетворительного решения и до настоящего времени [1]. Причина такого положения заключается в необходимости корректного разделения токов проводимости и токов смещения. Особенно сложной эта задача оказывается при использовании методов измерения, при которых электромагнитное поле, воздействующее на исследуемый образец, создаётся с помощью электродов, располагающихся в измеряемой среде. Это создаёт проблемы при измерениях с помощью традиционных мостов и измерителей импеданса из-за затруднений при их амплитудно-фазовых регулировках и исключает применение резонансных из-за значительного уширения резонансной кривой колебательного контура.

Ещё одной проблемой при определении электрических параметров таких веществ является необходимость корректной трактовки и интерпретации полученных результатов. Последнее обстоятельство вызвано необходимостью учёта вклада проводимости при определении диэлектрической проницаемости с одной стороны и учёта вклада диэлектрической проницаемости при определении проводимости жидких веществ, с другой [2]. Учёт этих факторов может быть проведён на основе анализа электрической эквивалентной схемы емкостной измерительной ячейки с исследуемым веществом. Указанные проблемы весьма актуальны при диагностике состояния смазочных масел по их электрическим параметрам.

Смазочные масла по своей физической природе являются жидкими диэлектриками [3]. Однако известно, что идеальных диэлектриков в природе не бывает. Смазочные масла являются заведомо неидеальными диэлектриками ещё и потому, что в них добавляют различные присадки. Кроме того, в процессе хранения и эксплуатации в смазочный материал попадает вода и различные продукты износа. По этой причине смазочные масла являются диэлектриками со значительными диэлектрическими потерями.

Для исследования электрических характеристик смазочных масел их обычно помещают в емкостные измерительные ячейки, представляющие собой либо плоский, либо цилиндрический конденсатор. Недостатком цилиндрической ячейки является неравномерность электрического поля в пространстве между электродами, что вызывает разную поляризацию исследуемой жидкости. В ячейках в виде плоского конденсатора по сравнению с цилиндрической ячейкой значительно влияние краевых эффектов.

На основании результатов измерения определяют параметры комплексного сопротивления измерительной ячейки с маслом, по которым затем с учётом собственных характеристик измерительной ячейки рассчитывают диэлектрическую проницаемость  $\epsilon$  и тангенс угла диэлектрических потерь масла  $\text{tg}\delta$ .

Для физического истолкования параметров исследуемого комплексного сопротивления, в качестве которого выступает измерительная ячейка с маслом, обычно используют представление о двухполюснике с последовательным соединением идеальной ёмкости  $C_I$  и активного сопротивления  $r$  (рисунок 1а) или параллельным соединением этих элементов  $C_{II}$  и  $R$  (рисунок 1б) [4].

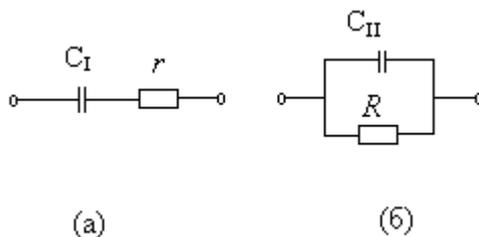


Рисунок 1- Эквивалентные электрические схемы замещения емкостной измерительной ячейки (а) последовательная схема, (б) параллельная схема

В результате измерения могут быть получены различные значения ёмкости и активного сопротивления в зависимости от выбранной схемы замещения. В обоих случаях модуль комплексного сопротивления  $Z$  и тангенс угла диэлектрических потерь одинаковы и определяются выражениями:

$$Z = \sqrt{x^2 + r^2} = \frac{1}{\sqrt{(1/X)^2 + (1/Y)^2}}, \quad (1)$$

$$\text{tg}\delta = r/x = X/R, \quad (2)$$

где  $x = 1/2\pi f C_I$  – реактивное сопротивление измерительной ячейки при последовательной схеме замещения;

$X = 1/2\pi f C_{II}$  – реактивное сопротивление измерительной ячейки при параллельной схеме замещения.

При малых значениях тангенса угла диэлектрических потерь  $x \approx X$ , и поэтому в эквивалентной схеме замещения значения ёмкостей  $C_I$  и  $C_{II}$  также одинаковы.

Однако в случае исследования диэлектриков со значительными углами диэлектрических потерь указанные характеристики ёмкости и активного сопротивления оказываются разными для последовательной и параллельной схем замещения измерительной ячейки.

На основании выражения (2) видно, что параметры измерительной ячейки, определяемые как для параллельной, так и для последовательной схемы замещения, зависят от частоты тока, создающего электрическое поле. Кроме того, у диэлектриков значение диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  и следовательно ёмкости  $C$  также зависят от частоты, что приводит к дополнительному изменению тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  с частотой, поэтому представляет интерес изучение параметров измерительной ячейки с маслом на разных частотах.

При измерениях на постоянном токе имеет место утечка тока через диэлектрик, и следовательно потери, соответствующие этой утечке, которые в схеме замещения могут быть учтены как соответствующее сопротивление утечки  $R_y$ .

При измерениях на переменном токе к этим потерям добавляются потери, обусловленные переменным электрическим полем  $R_f$ . На эквивалентной схеме эти сопротивления должны быть включены параллельно, как показано на рисунке 2. Следует отметить, что в используемых до настоящего времени эквивалентных электрических схемах измерительных ячеек [4, 5], за исключением работы [2], отсутствуют ёмкость и сопротивление потерь непо-

средственно самой исследуемой жидкости, поэтому такие схемы не позволяют описать все процессы, происходящие в условиях наложения переменного электрического поля.

Для более точного определения параметров смазочного масла эквивалентную электрическую схему измерительной ячейки с маслом целесообразно представить в виде параллельного соединения двух двухполюсников (рисунок 3). Один, из двухполюсников характеризует параметры комплексного сопротивления измерительной ячейки без масла  $Z_я$ , а другой изменение полного сопротивления ячейки, обусловленной заливкой её маслом  $Z_м$ .

Значительно проще проводить расчёт параллельной схемы замещения, поэтому в общей эквивалентной электрической схеме замещения измерительной ячейки с маслом ёмкости и активные сопротивления также включены параллельно, как это показано на рисунке 4.

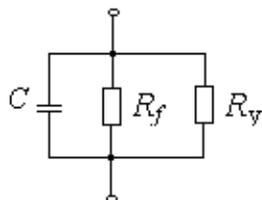


Рисунок 2 – Параллельная схема замещения измерительной ячейки с учетом потерь на утечку и потерь, обусловленных переменным электрическим полем

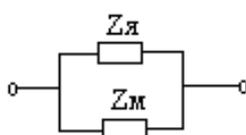


Рисунок 3 – Эквивалентная электрическая схема замещения ёмкостной измерительной ячейки с учётом влияния смазочного масла

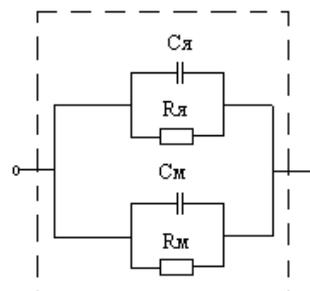


Рисунок 4- Полная эквивалентная электрическая схема ёмкостной измерительной ячейки с учётом влияния смазочного масла

В этом случае общая ёмкость измерительной ячейки состоит из двух составляющих

$$C = C_я + C_м, \quad (3)$$

где  $C_я$ ,  $C_м$  – соответственно ёмкость пустой ячейки и дополнительная ёмкость, обусловленная заполнением ячейки смазочным маслом.

Проводимость ячейки  $1/R$  определяется выражением:

$$1/R = 1/R_я + 1/R_м, \quad (4)$$

где  $R_я$ ,  $R_м$  - соответственно потери в пустой ячейки и дополнительные потери, обусловленные заполнением ячейки смазочным маслом.

Для определения характеристик смазочного материала необходимо измерить параметры ячейки не только с маслом, но и без масла. В последнем случае определяются значения  $C_я$  и  $R_я$  пустой ячейки.

Ёмкость пустой измерительной ячейки складывается из емкостей её рабочей части  $C_p$  и ёмкости, обусловленной краевыми эффектами  $C_к$ :

$$C_я = C_p + C_к, \quad (5)$$

где  $C_p$  - ёмкость рабочего участка электродов, пространство между которыми предназначено для заполнения исследуемым маслом,

$C_к$  - ёмкость, обусловленная электрическим полем между электродами вне рабочей зоны.

В общем виде для плоскопараллельной ячейки ёмкость рабочей части может быть определена как:

$$C_p = a_l \epsilon_0, \quad (6)$$

где  $\epsilon_0 = 8,84418782 \cdot 10^{-12}$  [Ф/м]- диэлектрическая постоянная,

$a_l = S/d$  – геометрический параметр плоскопараллельной ячейки,

$S$  – площадь электродов рабочей части ячейки,

$d$  – расстояние между электродами.

А для цилиндрической ячейки ёмкость рабочей части определяется как:

$$C = a_{II} \varepsilon_0, \quad (7)$$

где  $a_{II} = 2\pi L / \ln(r_2 / r_1)$  – геометрический параметр цилиндрической ячейки,

$L$  – рабочая длина электродов цилиндрического конденсатора,

$r_1, r_2$  – соответственно радиусы внутреннего и внешнего электродов.

Дополнительные ёмкость  $C_M$  и сопротивление потерь  $R_M$ , обусловленные заполнением ячейки смазочным маслом, определяются в соответствии с выражениями (3) и (4).

В этом случае ёмкость пустой ячейки:

$$C_{я} = C_{к} + a\varepsilon_0. \quad (8)$$

Ёмкость ячейки, заполненной смазочным маслом определяется выражением:

$$C_{зан} = C_{к} + a\varepsilon_0\varepsilon_{м}, \quad (9)$$

где  $\varepsilon_{м}$  – диэлектрическая проницаемость смазочного материала, которым заполнена измерительная ячейка.

Так как при заполнении ячейки смазочным маслом, последняя, обычно не заполняется полностью, то вводят коэффициент заполнения  $\lambda$ , определяемый отношением:

$$\lambda = S_3 / S, \quad (10)$$

где  $S_3$  – площадь электродов, пространство между которыми заполнено смазочным маслом.

Выражение (5) для определения общей ёмкости частично заполненной ячейки в этом случае принимает вид:

$$C_{зан\ частично} = C_{к} + \lambda a\varepsilon_0\varepsilon_{м} + (1 - \lambda)a\varepsilon_0. \quad (11)$$

В соответствии с выражением (3) ёмкость  $C_M$ , обусловленная заполнением части ячейки маслом, составляет:

$$C_M = \lambda a\varepsilon_0(\varepsilon_{м} - 1), \quad (12)$$

а диэлектрическая проницаемость смазочного масла:

$$\varepsilon_{м} = \frac{C_M}{\lambda a\varepsilon_0} + 1, \quad (13)$$

Вместе с тем нужно учитывать и то, что коэффициент заполнения, определяемый отношением площадей, неточно характеризует увеличение ёмкости, так как не учитывает влияние мениска поверхности смазочного материала и эффект искривления электрического поля, обусловленный поверхностью смазочного масла.

При определении сопротивления потерь также необходимо учитывать коэффициент заполнения измерительной ячейки.

В этом случае сопротивление потерь пустой измерительной ячейки определяется выражением:

$$R_{я} = R_y + R_f, \quad (14)$$

где  $R_y$  – потери, обусловленные утечкой тока,

$R_f$  – потери, обусловленные переменным электрическим полем,

а тангенс угла диэлектрических потерь в пустой ячейке

$$\operatorname{tg} \delta_{я} = R_{я} 2\pi f C_{я}. \quad (15)$$

Потери и тангенс угла диэлектрических потерь в заполненной ячейке определяются из выражений:

$$1 / R_{зан} = 1 / R_{я} + 1 / R_M, \quad (16)$$

$$\operatorname{tg} \delta_{зан} = R_{зан} 2\pi f C_{зан}; \quad (17)$$

а в частично заполненной измерительной ячейке с учётом коэффициента заполнения  $\lambda$  следующими выражениями:

$$1 / R_{\text{зан частично}} = \lambda / R_{\text{м}} + 1 / R_{\text{я}}, \quad (18)$$

$$\text{tg} \delta_{\text{зан частично}} = R_{\text{зан частично}} 2\pi f C_{\text{зан частично}}. \quad (19)$$

Потери в смазочном масле, определяемые из выражения (4), находят как:

$$R_{\text{м}} = \frac{\lambda R_{\text{зан частично}} R_{\text{я}}}{R_{\text{я}} - R_{\text{зан частично}}}, \quad (20)$$

а тангенс угла диэлектрических потерь для масла как:

$$\text{tg} \delta_{\text{м}} = R_{\text{м}} 2\pi f C_{\text{м}}. \quad (21)$$

При определении сопротивления потерь, обусловленного смазочным материалом, коэффициент заполнения измерительной ячейки учитывать не нужно, так как потерями в воздухе обычно пренебрегают, ввиду их малости. А сопротивления потерь в масле определяется из выражения (6)

$$R_{\text{м}} = R_{\text{я}} / (R_{\text{я}} - R). \quad (22)$$

Таким образом, по результатам измерения параметров пустой и заполненной смазочным маслом ячейки можно определить такие электрические параметры смазочного масла как диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_{\text{м}}$ , потери в смазочном масле  $R_{\text{м}}$  и тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg} \delta_{\text{м}}$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фенин, А.А. Измерение электропроводности и диэлектрической проницаемости методом выделения составляющих импеданса / А.А.Фенин, С.А. Фенин, В.И. Ермаков // Электронный журнал "Исследовано в России", <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2005/162.pdf>
2. Щербаков, В.В. Измерение электропроводности и диэлектрической проницаемости растворов электролитов / В.В. Щербаков, В.И. Ермаков // Электронный журнал "Исследовано в России", <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/1999/036.pdf>.
3. Казарновский, Д.М. Испытания электроизоляционных материалов и изделий [Текст] /Д.М. Казарновский, Б.М. Тареев. - Л.: Энергия, 1980. – 216 с.
4. Теоретические основы электротехники : В 3-х т. Учебник для вузов. Том1.-4-е изд [Текст]/ К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин.- СПб.: Питер, 2004.-463 с.
5. Грилихес М.С., Филановский Б.К. Контактная кондуктометрия: Теория и практика метода [Текст]./ М.С. Грилихес, Б.К. Филановский – Л.: Химия, 1980.

**Давыдова Надежда Владимировна**

Орловский государственный технический университет, г.Орёл

Старший преподаватель кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»,

Тел. (0862)419876

E-mail: [pms@ostu.ru](mailto:pms@ostu.ru)

Н.Н.МИЛЮШИН

## ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ ФАЗОГЕНЕРАТОРНОГО ДАТЧИКА КОНТРОЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ОБЪЕКТОВ

*В статье рассматриваются принцип построения фазогенераторного датчика контроля высокоскоростных электропроводящих объектов.*

*Ключевые слова:* контроль, электропроводящие объекты, переходная характеристика, фазогенераторный датчик.

*The principle of development of phase generation sensors for controlling high-speed electro conductive objects is observed.*

*Key words:* control, electro conductive objects, transfer characteristic, phase generation sensor

### ВВЕДЕНИЕ

Существует класс высокоскоростных электропроводящих объектов, элементы которых в процессе работы перемещаются по трассе с большими линейными скоростями (от 300 м/с до 2000 м/с и более). В процессе трассового движения элементы либо часть элементов могут совершать рыскание по трассе, участвуя при этом ещё и в колебательном движении вокруг одной или нескольких мгновенных осей вращения. Материал объекта может испытывать значительные динамические напряжения и механические деформации, сравнимые с пределами прочности или превышающими их. В последнем случае практически неизбежно возникают аварийные отказы объектов из-за неуправляемого выделения значительной кинетической энергии, приводящие к катастрофическим последствиям с риском для жизни и здоровья обслуживающего персонала и значительным экономическим ущербом. Примерами подобных объектов являются орудия боевых комплексов, газотурбинные двигатели подвижного и стационарного назначения, агрегаты газотранспортных станций, паросиловые энергетические турбоустановки и т.п., техническое состояние которых во многом определяется, например, начальной скоростью снаряда или характером перемещения лопаток лопаточных венцов. Контроль начальной скорости выстреливаемого из ствола боевого комплекса снаряда позволяет оценить степень износа ствола (при уменьшении ее на 5 % для артиллерийских и на 3,5 % для танковых орудий ствол подлежит выбраковке). Контроль рыскания лопаток энергетических турбомашин, а в авиационных турбодвигателях – контроль возникновения флаттера, позволяет избежать опасного режима работы либо критичных переходных процессов, обусловленных, например, сбросом нагрузки.

Обязательным условием обеспечения эффективности и безопасности эксплуатации подобных объектов является объективный контроль параметров движения их подвижных элементов. Указанные объекты объединяют близкие значения динамических параметров движения их элементов. Так, начальная скорость снаряда современного орудия в зависимости от вида и калибра составляет от 1700 до 2100 м/с, при средней длине снаряда 0,5 м отклонение начальной скорости в 3,5 % дает отклонение времени прохождения снарядом контрольного устройства порядка  $7,5 \cdot 10^{-6}$  с. Окружная скорость лопаточного венца паросиловой турбины в зависимости от его диаметра и при синхронной частоте вращения 3000 об/мин может составлять от 650 до 850 м/с, при этом период следования лопаток мимо неподвижной контрольной точки при их типовом числе в венце 94–96 составляет порядка  $2 \cdot 10^{-4}$  с, а длительность прохождения лопаткой контрольной точки – от  $7 \cdot 10^{-6}$  с до  $14 \cdot 10^{-6}$  с. Таким образом, существует актуальная проблема функционального контроля высокоскоростных электропроводящих объектов в процессе их эксплуатации, при этом в качестве диагностических необходимо рассматривать параметры движения или взаимного положения отдельных эле-

ментов этих объектов. Несмотря на определенную специфику контроля различных объектов, динамические параметры движения их элементов имеют значения одного порядка, что позволяет рассматривать решение общих задач по их контролю на примере одного из объектов, в качестве которого в работе выбраны турбомашин.

Наиболее эффективным методом контроля параметров колебаний рабочих лопаток в настоящее время признан бесконтактный дискретно-фазовый метод (ДФМ), в соответствии с которым параметры колебаний определяются математической обработкой измеренных временных интервалов прохождения торцом лопатки нескольких неподвижных контрольных точек за некоторое число оборотов ротора турбомашин [1]. Однако высокая чувствительность ДФМ к погрешности определения границ временных интервалов предполагает жесткие требования к метрологическим характеристикам используемых датчиков.

Анализ состояния вопроса показал, что применяемые в настоящее время импульсные индукционные и емкостные датчики обладают существенными погрешностями, зависящими во многом от параметров движения лопаток. К числу причин погрешностей относятся: искажение симметрии формы выходного сигнала из-за не идеальности изготовления и несимметричности условий взаимодействия датчика и торца лопатки; запаздывание сигнала из-за инерционности процессов в датчике, вихревых потерь и влияния паразитных емкостей; существенное влияние высокочастотной аддитивной помехи, наводимой внешними источниками в сигнальной линии датчика, и т.п. Высокая чувствительность дискретно-фазового метода к погрешности определения границ временных интервалов такова, что погрешность определения параметров колебаний с помощью указанных датчиков в отдельных случаях может быть соизмеримой со значениями параметров колебаний. Кроме того, тенденция к увеличению единичной мощности силовых турбомашин ведет к применению рабочих лопаток увеличенной длины, изготовленных из диамагнитных титановых сплавов, для контроля которых применение описанных выше импульсных датчиков становится весьма затруднительным либо принципиально невозможным. Это обуславливает необходимость исследования путей создания импульсного датчика, удовлетворяющего жестким требованиям дискретно-фазового метода, к числу которых относятся:

- частота переключения – не менее 200 кГц;
- время задержки срабатывания (быстродействие) – не более  $5 \cdot 10^{-6}$  с;
- длительность фронтов выходного сигнала – не более  $15 \cdot 10^{-8}$  с;
- номинальное расстояние срабатывания на сталь – не менее 3 мм;
- материалы объекта контроля – сталь, нержавеющие стали, титановые сплавы, алюминиевые сплавы, медь и медные сплавы;
- вариации расстояния срабатывания датчика на другие металлы относительно расстояния срабатывания на сталь – не более  $\pm 10\%$ ;
- диаметр активной части датчика – не более 15 мм.

В рамках поиска наиболее приемлемого принципа построения датчиков с учетом выдвинутых требований проанализированы известные технические решения, при этом установлено, что при реализации ДФМ контроля можно использовать индуктивные автогенераторные датчики, работающие в режиме срыва автоколебаний (частота контроля несколько десятков килогерц, время срабатывания – не менее  $(75 \div 90) \cdot 10^{-6}$  с, однако, наиболее перспективным типом датчиков представляется датчики на фазогенераторном преобразователе (ФГП), основанном на явлении взаимной синхронизации двух генераторов. Взаимная синхронизация может осуществляться через элементы связи с разным характером проводимости – комплексным, резистивным, взаимоиндуктивным, комбинированным, резонансным и т.п. ФГП обеспечивает фазовое преобразование выходных параметров первичного вихретокового преобразователя (ВТП), в качестве которого применяется катушка индуктивности. Высокая чувствительность ФГП позволяет обнаружить малые относительные изменения индуктивности ВТП (порядка  $L/\Delta L = 10^{-6} \div 10^{-5}$ ). Благодаря высокому уровню выходного сигнала

и его фазовой модуляции ФГП обладают высокой помехозащищенностью. Достоинством ФГП является возможность реализации принципа самосравнения.

Исследованиям ФГП с резистивной связью посвящены работы К.С. Полуляха, Е.Н. Гончарова, Ю.Г. Клетцнера; анализу стационарного режима ФГП со слабой связью и чувствительности ФГП с сильной связью посвящены работы В.В. Володарского; развитию теории комбинационного поличастотного ФГП посвящены работы В.В. Иванова, В.К. Шакурского и С.В. Шлыкова; исследованию ФГП с положительной обратной связью – работы В.В. Рапина.

Несмотря на ряд очевидных достоинств, известные технические решения на основе ФГП не могут быть непосредственно применены для целей контроля высокоскоростных электропроводящих объектов – они создавались для обнаружения металлических объектов малого размера в движущихся с небольшой скоростью потоках технологических сред либо для определения параметров самих сред, и, следовательно, обладают низкими динамическими характеристиками. Потому исследование и разработка фазогенераторного датчика контроля высокоскоростных электропроводящих объектов является актуальной задачей.

### **ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ ДАТЧИКА**

Воздействие движущегося электропроводящего объекта на фазогенераторный преобразователь проявляются через внесение комплексного сопротивления в его колебательный контур посредством трансформаторной связи наведенного токового контура с катушкой индуктивности контура. Внесенное в контур активное сопротивление  $R_{вн}$  в соответствии с теорией воздушного трансформатора может быть представлено соотношением [2]:

$$R_{вн} = R_2 \frac{\omega^2 \kappa_{св}^2 L_k L_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}, \quad (1)$$

где  $R_2$  – омическое сопротивление скин-слоя электропроводящего объекта;

$\kappa_{св}$  – коэффициент связи наведенного контура и катушки индуктивности колебательного контура;

$L_k, L_2$  – соответственно индуктивность колебательного контура и индуктивность наведенного токового контура;

$\omega$  – круговая частота колебаний в контуре преобразователя.

Сопротивление  $R_2$  скин-слоя представим как сопротивление проводника длиной, равной длине окружности наведенного токового контура, с шириной  $\alpha$  мм, равной толщине намотки катушки контура, и толщиной  $\delta$  мм, равной толщине скин-слоя:

$$R_2 = \rho \frac{2\pi r_k 10^{-3}}{\alpha \delta}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление материала электропроводящего объекта;

$r_k$  – радиус контурной катушки преобразователя.

Значение индуктивности контура, соответствующего наведенному контуру, может быть определено как индуктивность одновиткового контура, радиус которого соответствует радиусу контурной катушки. В первом приближении за значение индуктивности наведенного контура можно принять 0,01 от значения индуктивности контура преобразователя. Тогда, пронормировав (1) относительно  $R_2$  с учетом соотношения (2), получим:

$$\frac{R_{вн}}{R_2} = \frac{10^{-2} \omega^2 \kappa_{св}^2 L_k^2}{\rho \frac{2\pi r_k 10^{-3}}{\alpha \delta} + 10^{-4} \omega^2 L_k^2}. \quad (3)$$

Для значений частот в единицы мегагерц вне зависимости электропроводности материала электропроводящего объекта первое слагаемое в знаменателе соотношения (3) существенно мало по сравнению со вторым слагаемым, и им можно пренебречь. После преобразований получим:

$$R_{вн} / R_2 \approx 100\kappa_{св}^2. \quad (4)$$

В качестве коэффициента связи наведенного контура и катушки индуктивности контура применим экспериментально определенный при частотах того же порядка коэффициент связи плоского контура и контура преобразователя. Аналитическая зависимость  $\kappa_{св}$  от расстояния  $h$  между контурами представляется экспериментально определенным соотношением:

$$\kappa_{св}(h) = 0,345e^{-0,167h} \quad (5)$$

Тогда (4) запишем в виде:

$$R_{вн} / R_2 \approx 119e^{-0,334h} \quad (6)$$

Соотношение (6) представлено графически на рисунке 1 для диапазона изменения расстояния  $h$  от 0 до 20 мм при диаметре контуров 12 мм.

Значение внесенной в многовитковый колебательный контур индуктивности так же является функцией расстояния  $h$  от среднего витка контура до электропроводящего объекта. Знак внесенной индуктивности зависит от магнитных свойств материала объекта – для ферромагнитных материалов он положительный, для диамагнитных – отрицательный. Изменение индуктивности  $\Delta L$  контурной катушки преобразователя в зависимости от расстояния  $h$  до поверхности объекта описывается соотношением [3]:

$$\Delta L = \pm \frac{\mu_0}{4\pi} \varpi^2 r_k \Phi\left(\frac{\alpha}{2r_k}; \frac{h}{r_k}\right), \quad (7)$$

где  $\varpi$  – число витков в катушке;

$\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума;

$\Phi\left(\frac{\alpha}{2r_k}; \frac{h}{r_k}\right)$  – нормированная конструктивно-параметрическая функция.

На рисунке 2 приведен график изменения модуля внесенной в контур преобразователя индуктивности в зависимости от расстояния  $h$  для индуктивности контура, равной 125 мкГ, и диаметром катушки 12 мм.

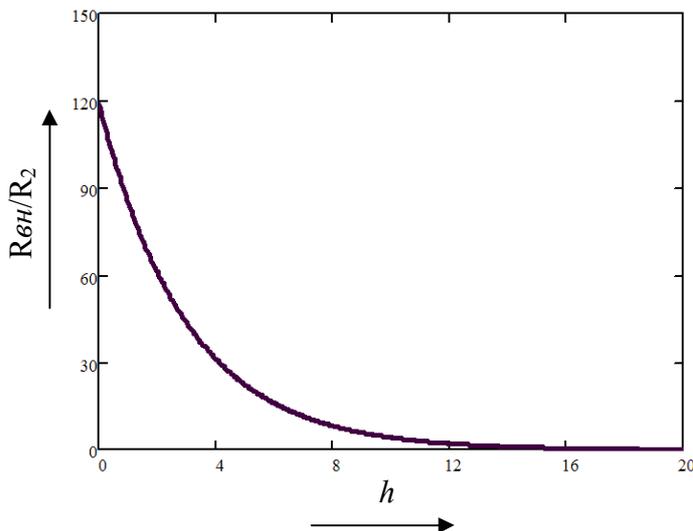


Рисунок 1- Характер зависимости нормированного внесенного активного сопротивления  $R_{вн} / R_2$  от расстояния  $h$  между контурной катушкой и поверхностью электропроводящего объекта

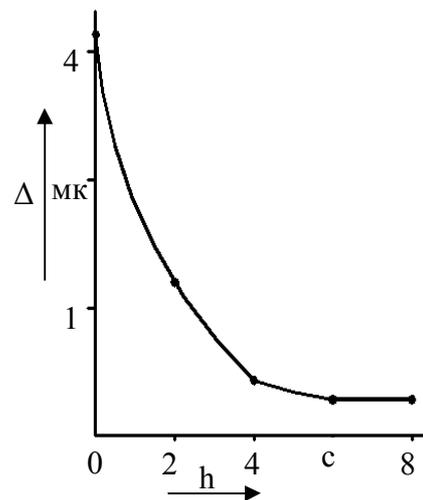


Рисунок 2 - Зависимость модуля внесенной индуктивности  $\Delta L$  от расстояния  $h$  между колебательным контуром и электропроводящим объектом

Рассмотрим влияние сопротивления потерь на характер переходной характеристики параллельного колебательного контура. Известно, что переходная характеристика  $h(t)$  параллельного колебательного контура есть его реакция воздействие в виде единичной ступени.

пенчатой функции  $1(t)$  (функции Хевисайда) и при условии малости относительной расстройки описывается выражением  $h(t) = 1 - e^{-\frac{R}{L}t} \cdot \cos \omega t$ , где  $R, L$  – соответственно сопротивление потерь и индуктивность колебательного контура.

На рисунке 4 а представлены диаграммы начального участка переходной функции  $h(t)$  для трех значений сопротивления потерь  $R_1 < R_2 < R_3$  при неизменном внесенном индуктивном сопротивлении  $\omega L_{вн}$ . Из диаграмм видно, что длительность первого полупериода переходной характеристики  $h(t)$  на уровне амплитуды, равной единице, практически не зависит от значения омического сопротивления потерь в контуре, в тоже время заметно влияние сопротивления потерь на уменьшение амплитуды уже первого пика характеристики. Т.е. уже в первом полупериоде реакции колебательного контура мы наблюдаем проявление влияния сопротивления потерь на вид переходной характеристики. При внесении в контур отрицательного индуктивного сопротивления потерь вид переходных характеристик так же изменяется, что видно из диаграмм рисунка 4 б – характеристики смещаются влево.

Из этого можно сделать предположение, что параметры сигнала переходной характеристики параллельного колебательного контура могут быть использованы для выявления высокоскоростного электропроводящего объекта. В то же время изменения переходной характеристики в первом минимуме более существенны, чем изменения в максимуме первого полупериода, однако использование первого минимума может иметь сложности при обеспечении периодичности процесса из-за нарушения начальных условий – следующая по времени формирования переходная характеристика будет начинаться с ненулевых начальных условий. Поэтому представляется целесообразным использование окончания первого полупериода для формирования второй переходной характеристики воздействием единичной функции с отрицательной амплитудой и с начальными условиями, которые соответствуют уровню первой переходной функции в момент окончания первого полупериода. В этом случае через полпериода мы получим условия, весьма близкие к начальным условиям при формировании первой переходной характеристики, процесс формирования связанной пары переходных характеристик может продолжаться далее не ограниченно долго. Преобразование изменения временного положения заданного значения переходной характеристики под действием внесенного сопротивления в контур в фазу относительно начала функции Хевисайда, инициирующей колебательный процесс в контуре, может быть осуществлено в первом полупериоде амплитудным компарированием.

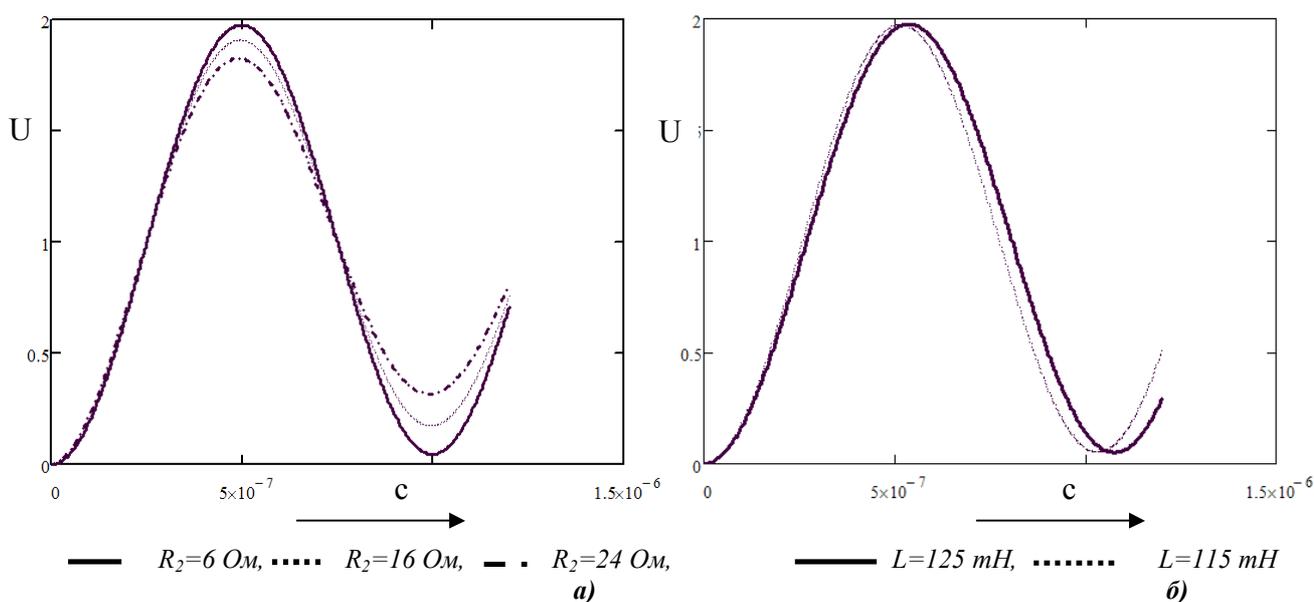


Рисунок 4 – Влияние значения омического сопротивления потерь (а) и индуктивного сопротивления потерь (б) на начальный участок переходной характеристики  $h(t)$  колебательного контура

При подаче на контур последовательных функций Хевисайда положительного и отрицательного знака через интервал времени  $\tau$ , равный длительности половины периода собственных колебаний контура, получается отклик в виде пары плавно сопряженных переходных характеристик, суммарная длительность которых равна периоду собственных колебаний контура. Изменение длительности интервала  $\tau$  в большую или меньшую сторону приводит к увеличению либо к уменьшению длительности периода колебательного процесса в контуре. В то же время момент начала переходного процесса в колебательном контуре всегда будет совпадать с моментом формирования единичной функции.

Таким образом, формируя воздействия на параллельный колебательный контур в виде последовательно задаваемых функций Хевисайда с положительной и отрицательной амплитудами возможно формирование откликов в виде плавно сопряженных переходных характеристик контура. Вариации длительности временного промежутка между последовательными функциями Хевисайда вызывает соответствующее изменение взаимного положения переходных характеристик, что обеспечивает синхронизацию отклика с инициирующим воздействием.

### ВЫВОДЫ

1. Для учета динамических свойств электропроводящего высокоскоростного объекта в математической модели фазогенераторного датчика целесообразно за движущийся электропроводящий объект принять область пространства, простирающуюся от активной поверхности катушки индуктивности контура до объекта, включая глубину его скин-слоя.

2. Для формирования непрерывного колебательного процесса, воспринимающего воздействие электропроводящего объекта, представляется целесообразным периодическое последовательное воздействие на колебательный контур двух функций Хевисайда с положительной и отрицательной амплитудами, следующих одна за другой через интервал времени, равный половине периода собственных колебаний контура, и приводящих к формированию непрерывной последовательности переходных характеристик колебательного контура.

3. Изменение длительности интервала времени между последовательным воздействием на колебательный контур функций Хевисайда приводит к соответствующему изменению длительности интервала времени между плавно сопряженными переходными характеристиками. Это обеспечивает синхронизацию колебательного процесса на контуре с инициирующими функциями Хевисайда.

4. Вносимое в параллельный колебательный контур комплексное сопротивление потерь влияет на вид переходной характеристики и анализ каждой переходной характеристики позволит обеспечить частоту контроля внесенного сопротивления, равную частоте следования инициирующих функций Хевисайда.

5. На основе принципа инициирования плавно сопряженных переходных характеристик параллельного колебательного контура и их анализа представляется возможным построение математической модели и разработка соответствующей структурной схемы фазогенераторного датчика высокоскоростных электропроводящих объектов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Заблочкий, И.Е. Бесконтактные измерения колебаний лопаток турбомашин / И.Е. Заблочкий, Ю.А. Коростелев, Р.А. Шипов. – М.: Машиностроение, 1977.
2. Милюшин, Н.Н. Механизм взаимодействия индуктивного датчика приближения токопроводящей среды и коммутируемого плоского контура / Н.Н. Милюшин // Известия ОрелГТУ. Серия “Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии”. – 2009. – № 2-275(560). – С.71-80.
3. Калантаров, П.Л. Расчет индуктивностей / П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. – Л.: Энергоатомиздат, 1986.

**Милюшин Николай Николаевич**  
ООО РЗА Системз, г. Москва, Россия  
Начальник отдела микропроцессорных разработок  
Тел. +7 920-088-81-26  
E-mail: nicmil2009@yandex.ru

УДК 681.2.082:615.849.19

А.В. ДУНАЕВ, А.И. ЕГОРОВА, Е.А. ЖЕРЕБЦОВ, Д.С. МАКАРОВ

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ТЕПЛОВИДЕНИЯ И МЕТОДОВ НЕИНВАЗИВНОЙ МЕДИЦИНСКОЙ СПЕКТРОФОТОМЕТРИИ В ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКЕ

*В работе исследованы возможности тепловидения и лазерной доплеровской флоуметрии при регистрации и анализе экспериментальных данных в процессе проведения окклюзионной пробы. На основании обработки полученных результатов сделаны выводы о перспективах их использования в диагностике при оценке функционального состояния кровеносных сосудов, а также в решении проблемы индивидуализации лечебных воздействий, в том числе физиотерапевтических.*

**Ключевые слова:** термография, лазерная доплеровская флоуметрия, функциональная диагностика, окклюзионная проба

*This paper is devoted to the research of the possibilities of thermal imaging and laser Doppler flowmetry jointly with the occlusion test. Based on the processing of the results conclusions are drawn about the prospects of their use in diagnosis when evaluating the functional state of the blood vessels, as well as in solving the problem of individualization of the therapeutic treatments, including physiotherapy.*

**Keywords:** thermography, laser Doppler flowmetry, functional diagnostics, occlusion test

В настоящее время одними из наиболее актуальных проблем в медицине являются достоверная неинвазивная диагностика различных заболеваний на ранних стадиях развития и визуализация результатов лечения. Общеизвестные методы диагностики далеко не всегда обладают способностью единовременной комплексной оценки состояния организма пациентов, зачастую не в состоянии выявить заболевание на доклинической стадии, в большинстве случаев они не применяются многократно по причине инвазивности и высокой стоимости.

Огромными возможностями для достоверной одномоментной оценки функционального состояния всего организма, определения патологий отдельных органов и систем располагает тепловизионная диагностика. Тепловидение (термография) – метод регистрации инфракрасного излучения тела человека в целях диагностики различных заболеваний. В норме каждая область поверхности человеческого тела имеет характерную термографическую картину. Различные патологические состояния могут оказывать влияние как на распределение, так и на интенсивность теплового излучения, что может иметь известное диагностическое и прогностическое значение [1]. Накопленный к настоящему времени опыт применения тепловидения позволяет определить некоторые основные направления использования инфракрасной термографии, среди которых – изучение сосудистых заболеваний [2].

Другим методом, отвечающим жестким требованиям, которые предъявляются к информативности, неинвазивности и безвредности проведения исследований у человека, является лазерная доплеровская флоуметрия (ЛДФ) – метод неинвазивной медицинской спектrophотометрии (НМС). Согласно используемым физическим принципам диагностики методы неинвазивной прижизненной спектrophотометрии позволяют оценивать *in vivo* (*in situ*) биохимический состав мягких тканей человека и его динамику во времени, включая изучение кратковременных и ритмичных флуктуаций всех наблюдаемых параметров, возникающих вследствие ритмичной работы сердечно-сосудистой и нервно-рефлекторной систем.

В части регистрации параметров микрогемодинамики наиболее легко регистрируемыми методами неинвазивной биоспектrophотометрии являются: параметр перфузии тканей кровью, параметры частотных сосудистых ритмов, зависящих от нервно-рефлекторной и гуморальной регуляции периферического кровообращения. Наибольшей же информативностью обладают все эти методы при использовании различных функциональных нагрузочных тестов и проб на систему микроциркуляции крови [2, 3].

Так, для диагностики состояния сосудистого русла нередко применяют различные нагрузочные пробы (тесты), среди которых часто используется окклюзионная проба (ОП), ко-

торая реализуется путем пережатия на 1-3 мин соответствующего участка конечности манжетой тонометра таким образом, чтобы вызвать остановку кровотока и соответственно ишемию [4]. Это приводит к понижению температуры кровоснабжаемой области и уменьшению показателя микроциркуляции [5]. После прекращения окклюзии кровотока восстанавливается, и развивается реактивная постокклюзионная гиперемия (избыточное заполнение расширенных артерий, артериол и капилляров нагретой артериальной кровью), которая проявляется в увеличении температуры и показателя микроциркуляции до величин, превышающих их исходные уровни [6, 7]. После достижения максимального уровня температуры не наблюдается резкого ее спада до исходного уровня в отличие от зависимостей показателя микроциркуляции [6].

Вышеописанные особенности изменения температуры биоткани и показателя микроциркуляции крови в процессе проведения окклюзионной пробы являются характерными для здоровых людей. Изменение параметров, описывающих полученные зависимости, может служить индикатором различных патологических состояний, связанных с сосудистыми нарушениями (например, вибрационной болезнью).

Ранее особенности реакции на окклюзионную пробу изучались с использованием методов лазерной доплеровской флоуметрии и оксиметрии [6], тепловизионных исследований реакции конечностей на окклюзию с диагностической целью проводилось крайне мало. Поэтому актуальной задачей является исследование возможностей тепловидения при регистрации и анализе экспериментальных данных в процессе нагрузочных тестов вообще и окклюзионной пробы в частности.

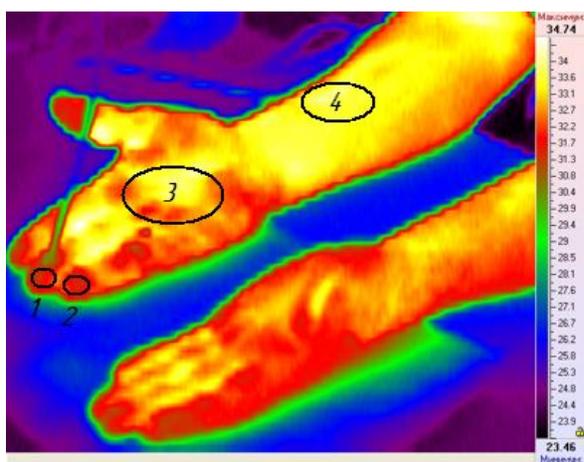
Для исследования подобных зависимостей в рамках поставленной задачи в лаборатории медико-физических исследований Московского областного научно-исследовательского клинического института (МОНКИ) им. М.Ф. Владимирского была проведена серия тестовых экспериментов. Целью данных экспериментов явилось выявление изменения показателя микроциркуляции и одновременное исследование температурной реакции биоткани на окклюзию плечевой артерии у пациентов с вибрационной болезнью.

Для оценки состояния микроциркуляторного русла использовался многофункциональный лазерный диагностический комплекс «ЛАКК-М» (ООО НПП «ЛАЗМА», Россия). Бесконтактные наблюдения температурных изменений на поверхности кисти проводились с использованием медицинского термографа «ИРТИС-2000 МЕ» (ООО «ИРТИС», Россия).

Эксперименты проводились на 7-ми добровольцах. Совокупность экспериментов делалась на 3 группы. При этом в качестве исследуемых областей выбраны вентральная поверхность дистальных фаланг III и IV пальцев руки, вентральная поверхность ладони, а также передняя поверхность предплечья в области нижней трети (рисунок 1).

В базовой группе (2 условно здоровых добровольца) термо- и ЛДФ-граммы записывались непрерывно без проведения каких-либо функциональных проб в течение 16 мин. В контрольной группе (2 условно здоровых добровольца) и группе пациентов с вибрационной болезнью (3 человека) проводилась окклюзионная проба. Перед ее проведением испытуемый адаптировался к комнатным условиям в течение 15-20 мин. Измерялось артериальное давление с целью определить значение давления манжеты, необходимое для создания окклюзии конечностей. При исследовании испытуемый находился в положении сидя (предплечье – на уровне сердца) при этом его рука фиксировалась на поверхности с малой теплоемкостью (специальная подушка), в области плеча располагалась окклюзионная манжета (рисунок 2).

На вентральную поверхность дистальной фаланги III пальца руки нормально поверхности кожи, без надавливания, устанавливался оптоволоконный зонд аппарата «ЛАКК-М». Камера термографа «ИРТИС-2000 МЕ» устанавливалась так, чтобы имелась возможность измерять температуру в области исследования. Окклюзия осуществлялась созданием и поддержанием давления в манжете выше систолического на 30 мм. рт. ст. Общая длительность записи составляла 6 мин. При обработке данных для двух последних групп экспериментов все регистрируемые сигналы были разделены на 3 фрагмента: предокклюзионный, окклюзионный и постокклюзионный.

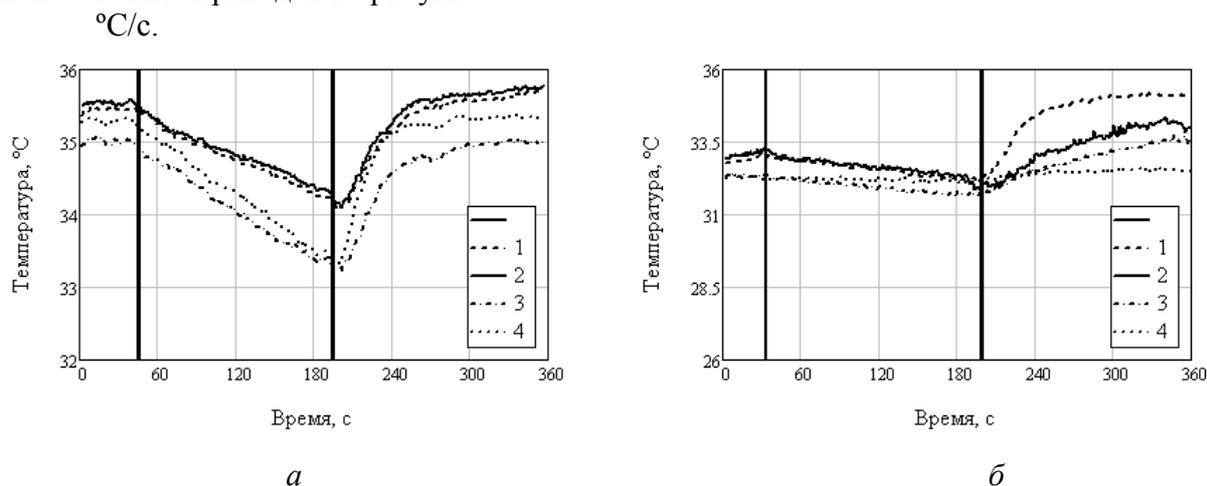


**Рисунок 1 – Термоизображение кистей рук**  
 1 – вентральная поверхность дистальной фаланги III пальца; 2 – вентральная поверхность дистальной фаланги IV пальца; 3 – вентральная поверхность ладони; 4 – передняя поверхность предплечья в области нижней трети



**Рисунок 2 – Методика проведения измерений**

Пример типичных термограмм в контрольной группе и группе пациентов с вибрационной болезнью приведен на рисунке 3.



**Рисунок 3 – Типичный вид зависимостей температуры от времени с начала проведения окклюзионной пробы**

*а* – для контрольной группы; *б* – для пациентов с вибрационной болезнью; температурные кривые: 1 – для III пальца; 2 – для IV пальца; 3 – для ладони; 4 – для предплечья (вертикальными линиями показаны моменты начала и окончания окклюзии)

Записи термо- и ЛДФ-грамм в базовой группе свидетельствуют о том, что результаты, полученные при проведении окклюзионной пробы, носят неслучайный характер, т.е. температурные осцилляции и колебания перфузии непосредственно связаны с моментами начала и окончания окклюзии.

Для описания полученных зависимостей использовались следующие параметры [6]:

$$\Delta T_{1,2} = T_1 - T_2 \quad \Delta T_{1,3} = T_3 - T_1 \quad \Delta T_{2,3} = T_3 - T_2 \quad V_{2,3} = \Delta T_{2,3} / t_{2,3}$$

где  $T_1$  – исходный уровень температуры, °С;

$T_2$  – минимальная температура, достигаемая в окклюзионный период, °С;

$T_3$  – максимальный уровень температуры в постокклюзионный период, °С;

$t_{2,3}$  – время изменения температуры от  $T_2$  до  $T_3$ , °С;

$\Delta T_{1,2}$ ,  $\Delta T_{1,3}$ ,  $\Delta T_{2,3}$ , °С – разности соответствующих температур;

$V_{2,3}$  – средняя скорость возрастания температуры в постокклюзионный период, Значения данных параметров для результатов измерения температуры исследуемых областей представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры температуры биоткани, характеризующие ОП

Группы испытуемых	Номер испытуемого в группе	Области измерения температуры	Параметры						
			$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$T_3, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{1,2}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{1,3}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{2,3}, ^\circ\text{C}$	$V_{2,3}, ^\circ\text{C}/\text{c}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Контрольная	1	III палец	35,53	34,19	35,77	1,34	0,24	1,58	0,010
		IV палец	35,00	33,22	35,05	1,78	0,05	1,83	0,013
		ладонь	34,11	33,80	34,55	0,31	0,44	0,75	0,004
		предплечье	33,17	33,10	33,59	0,07	0,42	0,49	0,003
	2	III палец	32,05	29,51	33,36	2,54	1,31	3,85	0,034
		IV палец	32,35	30,16	33,51	2,19	1,16	3,35	0,027
		ладонь	33,15	32,90	33,65	0,25	0,50	0,75	0,003
		предплечье	33,71	33,33	33,64	0,38	-0,07	0,31	0,003
	Среднее значение	III палец	33,79	31,85	34,57	1,94	0,77	2,72	0,022
		IV палец	33,68	31,69	34,28	1,99	0,60	2,59	0,020
		ладонь	33,63	33,35	34,10	0,28	0,47	0,75	0,004
		предплечье	33,44	33,22	33,62	0,23	0,17	0,40	0,003
Пациенты с вибрационной болезнью	1	III палец	27,67	27,09	30,27	0,58	2,60	3,18	0,028
		IV палец	27,18	26,76	30,30	0,42	3,12	3,54	0,035
		ладонь	30,71	30,26	31,59	0,45	0,88	1,33	0,012
		предплечье	29,38	29,09	29,42	0,29	0,04	0,33	0,003
	2	III палец	32,83	33,05	34,61	-0,22	1,78	1,56	0,007
		IV палец	32,88	33,00	35,03	-0,12	2,15	2,03	0,009
		ладонь	32,85	32,65	34,27	0,20	1,42	1,62	0,006
		предплечье	33,08	31,89	33,21	0,19	0,13	0,32	0,001
	3	III палец	32,03	28,29	32,62	3,74	0,59	4,33	0,034
		IV палец	32,35	29,81	33,50	2,54	1,15	3,69	0,029
		ладонь	32,22	30,66	32,66	1,56	0,44	2,00	0,016
		предплечье	33,49	33,05	33,24	0,44	-0,25	0,19	0,006
	Среднее значение	III палец	30,84	29,48	32,50	1,37	1,66	3,02	0,023
		IV палец	30,80	29,86	32,94	0,95	2,14	3,09	0,024
		ладонь	31,93	31,19	32,84	0,74	0,91	1,65	0,011
		предплечье	31,98	31,34	31,96	0,30	-0,02	0,28	0,003

Данные таблицы 1 показывают, что в группе пациентов с вибрационной болезнью снижены уровни исходной, минимальной и максимальной температур по сравнению с контролем. В ряде случаев наблюдалось уменьшение динамики в окклюзионный и постокклюзионный периоды. Однако по результатам проведенных исследований нельзя однозначно сказать, что средняя скорость возрастания температуры после снятия окклюзии имеет тенденцию к снижению у больных вибрационной болезнью.

Кроме температурных изменений регистрировались также изменения показателя микроциркуляции (рисунок 4).

При интерпретации результатов лазерной доплеровской флоуметрии оцениваются следующие параметры [4]:

$M_{исх}$  – среднее значение показателя микроциркуляции до окклюзии, пф. ед.;

$M_{окл}$  – показатель микроциркуляции в процессе окклюзии, пф. ед.;

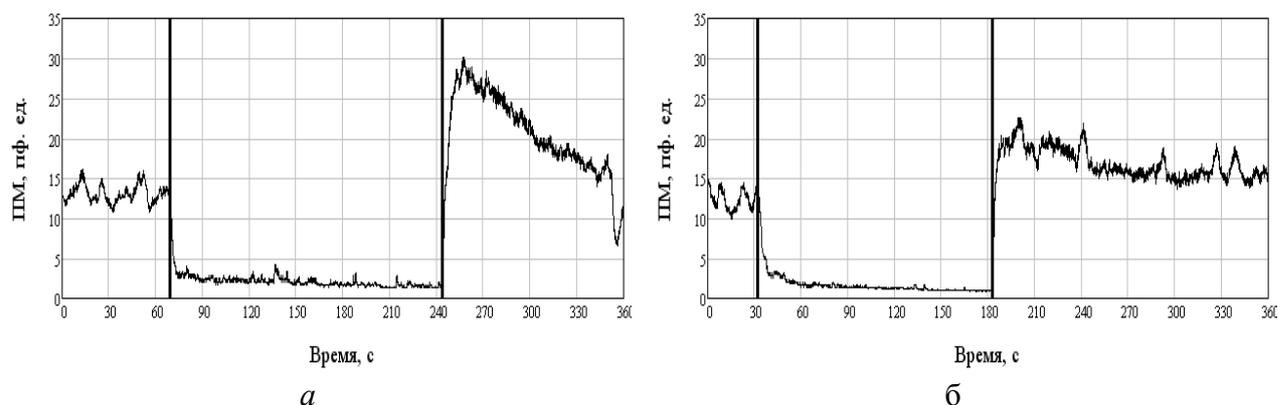
$ПМ_{макс}$  – максимальное значение ПМ в процессе развития реактивной постокклюзионной гиперемии, пф.ед.;

РК – резерв кровотока, рассчитываемый по формуле:

$$PK = \frac{ПМ_{макс}}{M_{исх}} \cdot 100\%;$$

$t_{макс}$  – интервал времени от снятия окклюзии до достижения  $ПМ_{макс}$ , с;

$t_{1/2}$  – время полувосстановления (интервал времени от момента достижения максимума  $ПМ_{макс}$  до момента полувосстановления, определяемого как время достижения половины величины разности  $ПМ_{макс} - M_{исх}$ ), с.



**Рисунок 4 – Типичный вид зависимости показателя микроциркуляции от времени с момента начала проведения окклюзионной пробы**  
*а – для контрольной группы; б – для пациентов с вибрационной болезнью (вертикальными линиями показаны моменты начала и окончания окклюзии)*

Значения параметров для проведенных экспериментальных исследований представлены в таблице 2.

Известно, что у здоровых лиц величина РК составляет 200-300%,  $t_{макс}$  – 10-20 с,  $t_{1/2}$  – 25-40 с [7]. Данные таблицы свидетельствуют о том, что у пациентов с вибрационной болезнью хотя бы один из данных параметров выходит за пределы диапазона, в то время как в контрольной группе значение остается в норме.

Таблица 2 – Параметры показателя микроциркуляции, характеризующие ОП

Группы испытуемых	Номер испытуемого в группе	Параметры					
		$M_{исх}$ , пф.ед.	$M_{окл}$ , пф.ед.	$ПМ_{макс}$ , пф.ед.	РК, %	$t_{макс}$ , с	$t_{1/2}$ , с
Контрольная	1	2,30	1,20	10,40	442,90	11,70	14,40
	2	13,11	2,15	30,20	230,42	13,05	32,85
	Среднее значение	7,70	1,68	20,30	336,66	12,38	23,63
Пациенты с вибрационной болезнью	1	12,42	1,72	22,60	181,96	16,80	4,95
	2	14,47	1,87	31,30	216,29	14,10	7,60
	3	17,10	1,75	26,10	152,60	16,15	38,15
	Среднее значение	14,67	1,78	26,67	183,61	15,68	16,90

Таким образом, проведение окклюзионной пробы стандартными способами доплеровской флоуметрии с одновременным измерением температуры биоткани дает дополнительную информацию об эффективности кровоснабжения и объемного кровенаполнения сосудов [6]. Выявленные особенности температурной реакции и реакции микроциркуляторного русла на окклюзионную пробу могут служить дополнительным диагностическим критерием для оценки функционального состояния кровеносных сосудов и помочь в решении проблемы индивидуализации лечебных воздействий, в том числе физиотерапевтических.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тепловедение и его применение в медицине [Текст] / М.М. Мирошников [и др.]. – М: Медицина, 1981. – 184 с.
2. Результаты термографии тканей голени у больных варикозной болезнью в зависимости от температуры окружающей среды [Электронный ресурс] / Т. В. Замечник [и др.] // Флебология. – 2008. – №1. – Режим доступа: <http://www.mediasphera.ru/journals/flebo/detail/427/6382/>.
3. Дунаев, А.В. К вопросу о возможности использования методов неинвазивной спектродетекции для контроля эффективности низкоинтенсивной лазерной терапии [Текст] / А.В. Дунаев, Д.А. Рогаткин // Известия ОрелГТУ, серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». – №3, 275(561). – 2009. – С.110-115.
4. Лазерная доплеровская флоуметрия микроциркуляции крови [Текст]: Руководство для врачей. / Под ред. А.И. Крупаткина, В.В. Сидорова – М.: Медицина, 2005. – 256 с.: ил.
5. Система кровообращения и артериальная гипертензия: биофизические и генетико-физиологические механизмы, математическое и компьютерное моделирование [Текст] / С.Н. Багаев, Б.Г. Вайнер, М.С. Тарков и др.; отв. ред. Л.Н. Иванова, А.М. Блохин, А.Л. Маркель; Рос. акад. Наук, Сиб. отд-ние, Ин-т физики полупроводников им. А.В. Ржанова [и др.]. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – 252 с.: ил. – (Интеграционные проекты СО РАН; вып. 17).
6. Оценка функционального состояния кровеносных сосудов по анализу температурной реакции на окклюзионную пробу [Текст] / Д.А. Усанов [и др.] // Саратовский научно-медицинский журнал. – 2009. – Т.5, № 4. – С. 554-558.
7. Применение лазерной доплеровской флоуметрии у больных кардиологического профиля [Текст] / А.А. Федорович [и др.] // Материалы IV Всероссийского симпозиума «Применение лазерной доплеровской флоуметрии в медицинской практике». – 2007. – С. 159-169.

### **Дунаев Андрей Валерьевич**

Орловский государственный технический университет,  
г. Орел  
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»  
Тел. +79192619906  
E-mail: [dunaev@ostu.ru](mailto:dunaev@ostu.ru)

### **Егорова Ангелина Ивановна**

Орловский государственный технический университет,  
г. Орел  
Студент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»  
Тел. +79155091484  
E-mail: [angelok1100@rambler.ru](mailto:angelok1100@rambler.ru)

### **Жеребцов Евгений Андреевич**

Орловский государственный технический университет,  
г. Орел  
Аспирант кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»  
Тел. +79536151192  
E-mail: [zherebzow@gmail.com](mailto:zherebzow@gmail.com)

### **Макаров Денис Сергеевич**

ГУ МНИКИ им. М.Ф. Владимирского, г. Москва  
М.н.с. лаборатории медико-физических исследований  
Тел. +7 (495) 6818984  
E-mail: [makarov@medphyslab.com](mailto:makarov@medphyslab.com)

Н.Л. КОРЖУК, М.В. ЛИСНЯК, В.В.ПОЛЯКОВ

## БИОТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ И ЛЕЧЕНИЯ НАРУШЕНИЙ БИНОКУЛЯРНЫХ ФУНКЦИЙ

*Нарушения бинокулярного зрения могут служить ранним сигналом расстройств периферического отдела зрительного анализатора и центральной нервной системы. Актуальной задачей в области медицинского приборостроения является построение системы, способной достоверно диагностировать и эффективно скорректировать эти нарушения.*

**Ключевые слова:** бинокулярное зрение, биотехническая система, диагностика, терапия

*The Breaches of the binocular vision can serve the early signal a frustration of the division of the visual analyzer and central nervous system. The Actual problem in the field of new medical technology is a building of the system, capable realistically to diagnose and effectively correct these breaches.*

**Keywords:** binocular vision, biotechnical system, diagnostics, treatments

Разработанная биотехническая система (БТС) диагностики и лечения нарушений бинокулярного зрения проводит диагностику вида зрения (бинокулярное, монокулярное, одновременное), количественную оценку феномена "бинокулярного соперничества" по частоте смены циклов преобладания то одного, то другого глаза (определение биоритмов бинокулярного зрения), что позволяет достоверно выявить нарушения бинокулярного зрения на ранних этапах. Также, БТС может быть использована для выявления и коррекции нарушений бинокулярного зрения, закрепления бинокулярного зрения в послеоперационном периоде, при гетерофории и для улучшения зрительных функций при амблиопии слабой степени с правильной устойчивой фиксацией. При лечении нарушений зрения с использованием БТС параметры воздействия индивидуально подбираются с учетом особенностей зрительных восприятий и биоритмов пациента [0].



**Рисунок 1** – Блок управления и очки-фотостимуляторы АПК диагностики и лечения нарушений бинокулярного зрения

БТС представляет собой аппаратно-программный комплекс (АПК), состоящий из блока управления, очков-фотостимуляторов, (представлены на рисунке 1), предъявляющих зрительные образы правому и левому глазам в режиме диагностики и цветоимпульсное воздействие в режиме терапии, персонального компьютера, блока электроэнцефалографии (ЭЭГ) (реализующий биологическую обратную связь) и систему бинокулярного зрения человека.

Система бинокулярного зрения включает левый и правый глаза, зрительные пути, перекрещивающиеся в хиазме, левое и правое полушарие головного мозга.

Физиологическая особенность бинокулярного зрения, феномен бинокулярного соперничества [0], условно представлена в виде двух "ключей", управление которыми осуществляется головным мозгом.

Структурная схема биотехнической системы (БТС) приведена на **Ошибка! Источник ссылки не найден.** Она состоит из АПК (рисунок 3) и системы бинокулярного зрения человека. БТС позволяет проводить качественную диагностику вида зрения (бинокулярное, монокулярное, одновременное), количественную оценку феномена "бинокулярного

соперничества" по частоте смены циклов преобладания то одного, то другого глаза (определение биоритмов бинокулярного зрения), что позволяет достоверно выявить нарушения бинокулярного зрения и при необходимости эффективно их скорректировать, при этом параметры воздействия индивидуально подстраиваются под биоритмы пациента.

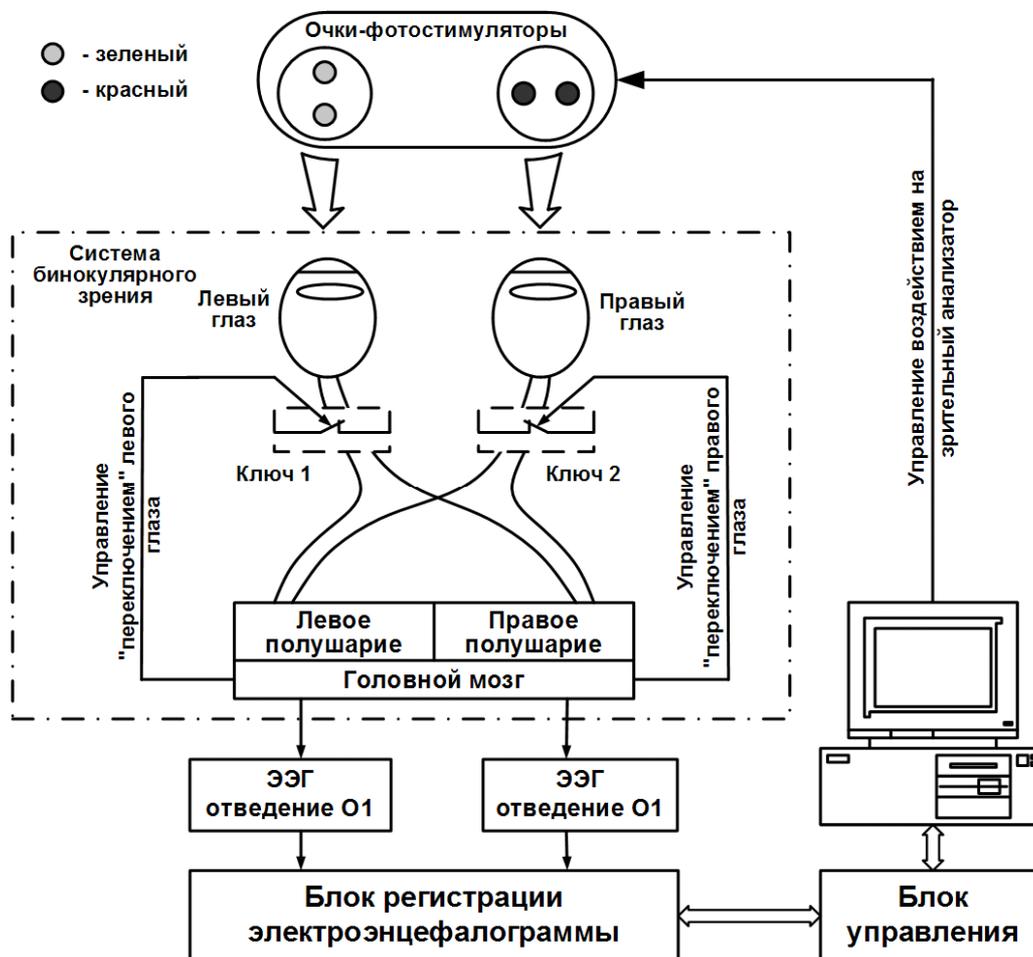


Рисунок 2 – Биотехническая система для диагностики и лечения нарушений бинокулярного зрения

Принцип действия БТС в режиме терапии основан на ритмической фотостимуляции зрительного анализатора видимой областью спектра электромагнитного излучения с длиной волны от 430 до 650 нм (красный, оранжевый, зеленый, синий цвета).

Цветоимпульсное возбуждение оказывает рефлекторное действие на головной мозг, используется для усиления деятельности органов и систем человека, для нормализации биоритмов бинокулярного зрения [0]. Причинами десинхронизации биоритмов зрительного анализатора могут быть переутомление, психоэмоциональное напряжение, неврозы, глазные и общие заболевания. Обычно по мере улучшения общего самочувствия, при выздоровлении больных периодичность зрительного восприятия в основном нормализуется. Поэтому восстановление нормальных биоритмов крайне важно. Для восстановления биоритмов зрительного анализатора в данной БТС используется "навязывание" системе бинокулярного зрения нормального ритма.

В режиме диагностики БТС позволяет качественно определить характер зрения пациента (бинокулярное, монокулярное, одновременное) со слов пациента, а затем количественно определить значения биоритмов зрительных восприятий для правого и левого глаза в автоматическом режиме, с использованием выявленной в ходе исследований взаимосвязи биоритмов бинокулярного зрения и электрофизиологической активности головного мозга.

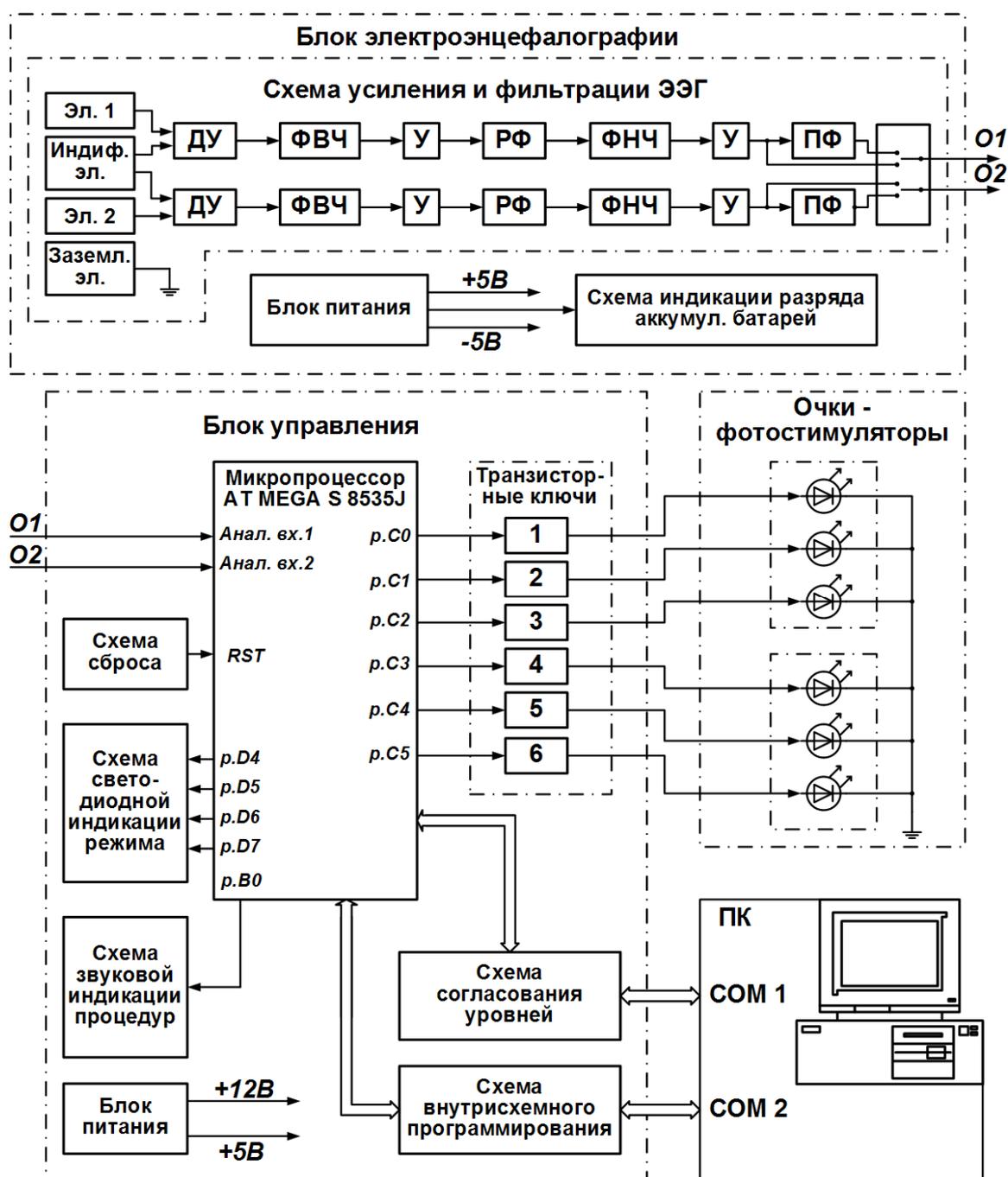


Рисунок 3 – Структурная схема АПК

Отличительной особенностью используемой в БТС процедуры лечения является предварительно проводимый режим количественной диагностики биоритмов зрительных восприятий с целью определения наиболее подходящих для данного пациента параметров воздействия и разработки схемы лечения, а также синхронизация терапевтического воздействия с собственными биоритмами пациента. В этом случае значительно повышается эффективность проводимой процедуры и она не вызывает неприятных ощущений.

Клинические испытания БТС проводились на базе клинко-диагностического центра Тульской областной клинической больницы №1. Методика проведения диагностики и лечения нарушений бинокулярного зрения была разработана совместно с офтальмологами и специалистами функциональной диагностики центра.

Предлагается следующий порядок проведения процедуры.

1. Предъявление тест-объектов левому и правому глазам, адаптация пациента, проверка правильности наложения электродов для регистрации ЭЭГ, отсутствия артефактов в ЭЭГ.

2. Выключение тест-объекта левого глаза (оба глаза открыты, левый глаз находится в темноте), начало записи ЭЭГ.

3. Включение тест-объекта левого глаза, одновременно с этим в мозге испытуемого происходит "переключение" поля зрения с правого глаза на левый, что было достоверно определено в ходе экспериментов. Запись ЭЭГ продолжается, момент включения тест-объекта является синхронизирующим для автоматического определения биоритмов бинокулярного зрения.

4. Выключение тест-объекта правого глаза, окончание записи ЭЭГ.

5. Автоматический расчет значений биоритмов левого и правого глаза, основанный на анализе записей ЭЭГ-сигнала по двум отведениям O1 и O2.

6. Рекомендации по проведению лечебного воздействия, выбор его схемы и расчет его индивидуальных для каждого пациента параметров.

7. Проведение цветоимпульсного воздействия тремя выбранными цветами поочередно на левый и правый глаза по три минуты каждым цветом, начиная с правого глаза. Длительности подач световых импульсов подбираются индивидуально для каждого пациента в зависимости от найденных значений его биоритмов.

Терапевтический курс включает десять процедур, в результате которых биоритмы бинокулярного зрения пациента приближаются к "синхронизирующим" значениям, а также большинство пациентов отмечает улучшение зрительных функций и повышение четкости наблюдения переключений полей зрения.

Таким образом, в предлагаемой БТС диагностики и лечения нарушений бинокулярного зрения в качестве объективного критерия переключений полей зрения, происходящих в течение актов бинокулярного зрения, используются изменения электрофизиологической активности головного мозга, а не субъективные ощущения пациента. Применение этой системы в медицинской практике позволит повысить достоверность диагностирования и эффективность лечения нарушений бинокулярного зрения.

Система может быть использована для снятия зрительного утомления при работе за персональным компьютером, для восстановления бинокулярных зрительных функций в областях, требующих повышенного внимания, например, у водителей транспортных средств, а также для коррекции нарушений зрительных функций у детей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щеглова, М.В. Биотехническая система диагностики и лечения нарушений бинокулярного зрения: [Текст]: дисс. ... канд. техн. наук.: Тула, 2006 – 145 с.
2. Сеченов, И.М. Физиология органов чувств. Зрение [Текст] / Избранные труды. – М.–Л., 1935. – 488 с.
3. Тетерина, Т.П. Глаз и мозг. Основа цветотерапии [Текст] / Кн. II. – Калуга: ГУП «Облиздат», 2001. – 364 с.

### **Коржук Николай Львович**

ГОУ ВПО Тульский государственный университет, г. Тула

Кандидат технических наук, профессор кафедры "Приборы и биотехнические системы"

Тел. +7(910)943-67-50

### **Лисняк Мария Викторовна**

ГОУ СПО Тульский областной медицинский колледж, г. Тула

Студент, "Лечебное дело"

Тел. +7(905)626-08-80

E-mail: mavis@mail.ru

### **Поляков Виктор Владимирович**

ООО "ЭВИДЕНС", г. Тула

Ген. директор

## **КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТЫ И МАТЕРИАЛЫ**

УДК 621.833.6

Е.В.ШАЛОБАЕВ

### **МОДЕРНИЗИРОВАННЫЕ РЕДУКТОРЫ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА**

*Рассмотрены направления развития отечественного редукторостроения. Показано, что модернизированная российская продукция вполне конкурентоспособна не только на российском, но и на внешних рынках.*

**Ключевые слова:** модернизация, редукторостроение, надежность, долговечность, ресурс, нагрузки, точность, крутящий момент.

*Considered the main directions of national transmitter-construction. Proved that modern Russian production is quite competitive not only in the country, but also abroad.*

**Key words:** modernization, reliability, transmit-construction, loadings, precision, resource, long duration, a turned moment.

Понятие «модернизация» ставшее популярным в последнее время, в отечественной промышленности имеет вполне конкретное и осязаемое наполнение.

Модернизация в российском редукторостроении стала активно использоваться в начале XXI века [1]. Основные направления развития отечественного редукторостроения изложены в основополагающей статье проф. Г.А.Снесарева [2], хотя и написанной в 1991 году, но до сих пор не потерявшей своей актуальности, о чем свидетельствовали российская программа «Прогрессивные зубчатые передачи» (1998) [3] и материалы последней Всесоюзной (Ленинград, 1991) и последующих Всероссийских и Международных конференций (Ижевск, 1996; Ижевск, 1998; Тула, 2000; Санкт-Петербург, 2002; Ижевск, 2004).

Первым в качестве направления развития указано построение модифицированного профиля с учетом не традиционного геометро-кинематического подхода, а на основе энергетического подхода, предложенного проф. В.В.Шульцем [4], что находит отражение и в более поздних, современных публикациях [5-8]. Кроме того, актуальными являются любые исследования эксплуатационных свойств цилиндрических редукторов с модифицированным зацеплением [9].

Вторым направлением является создание инженерных расчетов прочности и напряжений для модифицированных профилей [10]. Развитием этого направления является разработка российских предложений по корректировке стандартов ISO по расчету на прочность зубчатых передач, в том числе универсальных методов расчета [3].

Третье направление – решение вопроса об основных параметрах редукторов. Проф. Г.А.Снесарев считал, что отказ от унификации позволит поднять технический уровень редукторов. Движение по этому пути – движение по пути создания прогрессивных мехатронных модулей [11], что в свою очередь предполагает некоторые изменения в конструкциях зубчатых колес [12].

Четвертое – проектирование должно вестись на весь срок его службы без капитального ремонта. Замена могут подлежать лишь подшипники и контактные уплотнители. Такой же принцип заложен при проектировании мехатронных модулей [11].

В настоящее время указанное направление развития редукторостроения расширено до внедрения в практику ресурсного проектирования.

Основной целью указанного проектирования является обеспечение требуемого уровня надежности при минимально возможной стоимости всего жизненного цикла проектируе-

мой машины, включающей затраты на разработку, изготовление и испытания опытных образцов, организацию серийного производства, технического обслуживания и ремонта в процессе эксплуатации, на утилизацию отработавших назначенный ресурс изделий [13].

Одной из важных тенденций современного редукторостроения является повышение точности передач, в первую очередь быстроходных, ответственных за вибро-акустическую характеристику редуктора, которая приобретает все большее коммерческое значение. Критерия оптимальной точности и алгоритма его реализации не существует и его необходимо создать. Решению проблемы по первой части этой тенденции посвящены работы [14-16]. Проблема о необходимости совершенствования нормирования точности зубчатых колес и передач была поставлена в 1990-1991 годах в работе [17], что и констатировалось в [18,19].

Материал зубчатых колес и способ их упрочнения являются важнейшими факторами, определяющими несущую способность редукторов. Будущее безраздельно принадлежит поверхностно упрочненным передачам. Важнейшим способом подобного упрочнения является цементация [20]. Дальнейшие исследования, например, немецких ученых, показали, что именно цементация позволяет равноценно заменить бронзовые или латунные венцы червячных колес стальными [21]. И если в Германии подобная замена материала делалась для удешевления конструкции и дальнейшей ее утилизации (при однородности материала редуктора не требуется его разборка для разделения материала, поскольку проектирование идет согласно CALS-технологии или технологии полного жизненного цикла изделия), то в нашей стране то же делалось для исключения выхода из строя, например, лифтовых редукторов вследствие сдачи их в металлолом. Кроме указанного выше в нашей стране актуальными являются исследования и разработка методов наплавки бронзы на заготовки червячных колес [9].

В работе [2] ставилась задача создания единой специальной марки стали для колес, применяемых в редукторах, что до сих пор является проблемой. При этом в техническом задании на ее материал указано, что минимальное коробление при цементации и закалке – потеря одной степени точности на уровне 6-й по ГОСТ 1643-81. Есть указание и на широкое применение в перспективе пластических материалов, что и было впоследствии подтверждено и исследовано в работах [6, 22].

Наиболее отсталой частью редукторостроения была и еще остается технология, а среди важнейших технологических проблем проф. Г.А.Снесаревым названы следующие [2]:

- освоение способов цементации, обеспечивающих существенное уменьшение коробления, например, ионной;
- создание технологии, позволяющей дополнительно увеличить твердость шестерни на 8...12 единиц Роквелла;
- освоение упрочняющей технологии, увеличивающих изломную прочность зуба;
- освоение способов бездефектного обеспечения точности, например дорезание лезвийным инструментом;
- освоение горячей и холодной накатки зубьев высокой степени точности,
- создание оборудования для модификации профилей зубьев;
- освоение тонкостенного чугунного литья,
- создание высокопроизводительных зуборезных станков,
- создание роботизированных гибких автоматизированных производственных систем.

К сожалению, и через 20 лет ряд из указанных выше проблем не решен.

В работе Г.А. Снесарева констатировано, что смазка является одним из самых отсталых элементов редукторостроения, что отрицательно сказывается на надежности и КПД редукторов. Поскольку полная универсальность смазки невозможна, то задача сводится к рациональной минимизации номенклатуры масел различающихся по типам зацепления, контактным давлениям и скоростям. В ряде случаев необходимо обеспечить большое перекрытие свойств по всем параметрам, например, в случае червячно-цилиндрических редукторов, передачи которых смазываются из одной ванны.

Ресурс определяет не только расход смазки и трудоемкость обслуживания. Ресурс и универсальность взаимосвязаны. Чем меньше ресурс, тем важнее универсальность смазки, и

наоборот. Увеличение ресурса до полного срока службы, дает возможность заправлять редуктор оптимальной смазкой на заводе-изготовителе. Однако слишком большие ресурсы не рациональны – так свыше 20000 часов (два года и четыре месяца непрерывной работы) работают лишь 8% всех общепромышленных редукторов. Принцип безотказной работы редуктора в течение заданного ресурса хорошо коррелирует с однократной заводской заправкой. Оптимизация сроков службы, которая в большинстве случаев приведет к снижению неоправданно больших величин, облегчит проблему выбора смазки.

В более поздних работах ставились задачи применения синтетических масел, а также противодействия коррозионным воздействиям, вызванным жидкостной смазкой [23].

Главной задачей для осуществления перехода к объективному и нетрудоемкому сплошному контролю редукторов является распространение вибрационного контроля на ряды однотипных редукторов, имеющих наборы передаточных отношений и разные допускаемые нагрузочные моменты.

Основанием для такого вывода проф. Г.А.Снесарева является то, что вибрационный контроль в начале 1990-х годов и до сего дня является наиболее совершенным контролем, установки и методы которого хорошо отработаны в авиапромышленности. Можно добавить, что развитие видеотехники способствовало постоянному мониторингу износа, например крупногабаритных колес шахтных подъемников [24].

В последние годы XX века стали развиваться методы акустического контроля [25] и продолжается использование комплексного контроля [26].

Важной задачей редукторостроения является создание энергосберегающего испытательного стенда, работающего по замкнутому методу. Дело в том, что окончательным доказательством надежности редуктора являются ресурсные испытания. Ускоренные испытания имеют как положительные, так и отрицательные стороны. Поэтому необходимо иметь стенды, воспроизводящие реальные условия нагружения. Открытие стенды сложны, дороги и энергозатратны. Отсюда и вытекает поставленная выше задача [27].

Модернизации требовало состояние отечественного редукторостроения, которое было зафиксировано на первой Всероссийской конференции «Редукторостроение России: состояние, проблемы и перспективы», созданная по инициативе отечественных редукторных заводов в 2002 году, одним из организаторов которой и был автор данной публикации.

Тогда говорили о трех главных аспектах, главным образом, определяющих на начало XXI века отставание отечественного редукторостроения [28].

– максимальные упрощения конструкций редукторов и технологий их изготовления в процессе производства, в основном, связанные с исключением чистовых и отделочных операций обработки поверхностей зубьев и понижением точности изготовления всех деталей, и поэтому привлекательные для всех неискушенных потребителей таких редукторов;

– существенно пониженные, по сравнению с зарубежными аналогами, технические характеристики (передаваемая мощность и крутящий момент) а так же малая долговечность и недостаточная надежность в эксплуатации, вследствие чего работа оборудования, в составе которого применяются такие редукторы, становится неэффективной;

– весьма ограниченное разнообразие конструктивных схем и вариантов исполнения редукторов и мотор-редукторов.

Учитывая тенденции развития современного редукторного рынка России и прежде всего возросшие требования к надежности, долговечности и к качеству продукции, одним из первых российских редукторных предприятий НТЦ «Редуктор» произвел модернизацию многих типоразмеров выпускаемых редукторов и мотор-редукторов, в основе которых лежали прогрессивные конструкторско-технологические решения, в том числе и свои «ноу-хау», заявленные на редукторном рынке России как «модернизация», в том числе [29]:

- повышение твердости рабочих поверхностей зубьев;
- значительное уменьшение шероховатости и повышения точности обработки зубьев;
- оптимизация размеров и положения пятна контакта в зацеплении;
- модификация зубчатых зацеплений;

– использование качественных материалов.

Непосредственно работая в отечественном редукторостроении в 2002-2005 годах (НТЦ «Редуктор», Санкт-Петербург), а так же изучая и рецензируя работы отечественных ученых, автор столкнулся с негативным мнением ряда не только наших потребителей, но, к сожалению, и специалистов-«зубчатников» о продукции российского редукторного производства [30]. Подобная ситуация достаточно массово тиражируется и на определенном этапе в той или иной мере это соответствовало действительности.

Однако в настоящее время положение дел на редукторном рынке в России достаточно быстро меняется, но этот факт оперативно не отражается на страницах отечественных научно-технических и научно-производственных журналов, что не отражает реалии в нашей промышленности и не способствует качеству подготовки кадров и их правильной ориентации.

На повестке дня повышение конструкторско-технологической подготовки специалистов в части овладения технологиями химико-термической обработки зубчатых колес и их последующим шлифованием. Именно недостаточность подготовки в этой области и материально-технического оснащения затрудняет получение колес более высокой степени точности, что априори способствует повышению долговечности и надежности продукции редукторостроения, внедрению редукторов с использованием зацепления Новикова-Вильдгабера.

Для конкретики рассмотрим положение дел с производством планетарных редукторов и мотор-редукторов. Последней разработкой отечественной промышленности являются планетарные редукторы серии ЗП и ЗМП.

В типовых сериях были представлены редукторы с радиусами расположения осей сателлитов от 25 до 160 мм и номинальным крутящим моментом от 75 до 16000 Нм.

Претензии к указанным редукторам предъявляются следующие:

- разработка серии относится к 1980-м годам;
- ряды типоразмеров российских типовых редукторов (радиус расположения осей сателлитов R) гораздо реже, чем у зарубежных аналогов;
- нагрузочный момент на валу на порядки меньше, чем у западных аналогов;
- конструкция типовых редукторов устарела.

В модернизированных планетарных редукторах НТЦ «Редуктор» [31] при разработке нового модульного ряда планетарных редукторов ЗП в качестве основного применен параметрический ряд с коэффициентом R20 вместо R10, что позволяет производить подбор наиболее оптимального типоразмера редуктора по габаритам, весу, передаваемой мощности, долговечности, выбирая наиболее экономичный вариант. Ряды типоразмеров расширились – наряду со значениями R, равными 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100; 125, 160 и 200 мм, появились R равные 28; 35,5; 45; 56; 71; 91; 112; 140 и 180 мм. Номинальный крутящий момент  $T_2$  находится в пределах 76...31400 Нм. В обоих рассматриваемых случаях наблюдаем фактически двойное увеличение типоразмеров.

Что касается конструкции, то при разработке новой гаммы планетарных редукторов НТЦ «Редуктор» использовал блочно-модульный принцип их построения, в соответствии с которым к базовому редуктору (модулю) присоединяют функционально законченные блоки (быстроходную приставку, вариатор скорости, электродвигатель, тормоз, устройство плавного пуска, частотный преобразователь и т.п.). Конструктивно корпуса редукторов и мотор-редукторов выполняют на лапах или на фланце.

В модернизированных планетарных редукторах НТЦ «Редуктор» реализован ряд прогрессивных технологических решений, которые позволяют повысить надежность редукторов, совершенствовать и повышать работоспособность планетарных передач [31]:

- применение процессов цементации, закаливания и шлифования зубьев позволяет повысить твердость и точность изготовления передач, что увеличивает эксплуатационную прочность редуктора, износостойкость зубчатых колес и снижает уровень шума;
- плавающие водила быстроходной и промежуточной степеней обеспечивают компенсацию погрешностей изготовления деталей конструкции и выравнивание динамических нагрузок на сателлиты;

- специальные конструкции манжетных узлов исключают вытекание смазки;
- применены подшипники повышенной грузоподъемности;
- применены разнообразные исполнения выходных валов – цилиндрические, конические, полые со шлицами или со шпоночным пазом, что позволяют легко встраивать редукторы в требуемый привод.

Все вышеизложенные положения обеспечивают потребителям возможность применять редукторы, которые по качеству и надежности не уступают зарубежными аналогам, и пользоваться их эксплуатационными преимуществами.

Конкретный пример. По сравнению с типовыми ЗМП-31,5; -40; -50 модернизированные ЗМП-М, производимые НТЦ «Редуктор» характеризуются [31]:

- долговечностью повышенной в 1,6-3 раза (при одинаковой нагрузке);
- нагрузочной способностью повышенной в 1,4-2 раза (при одновременной повышенной сопротивляемостью износу);
- снижением уровня шума на 4-6 дБ.

Таким образом, модернизированные планетарные редукторы отечественного производства приближены по надежности и долговечности к зарубежным аналогам.

Новые разработки НТЦ «Редуктор», расширяющие модельный ряд планетарных редукторов, полностью восполняют прежние пробелы, ликвидируют отставание отечественного редукторостроения и позволяют российским потребителям, не прибегая к услугам западных фирм, производить оптимальный выбор планетарных редукторов из множества вариантов их исполнения.

Здесь необходимо отметить, что параметрические ряды, например, межосевого расстояния в червячных передачах зарубежных, в частности, итальянских редукторов отличаются от отечественных: у первых - 60, а у вторых - 60. Следовательно, сами редукторы и мотор-редукторы уже не могут быть заменены на отечественные, отсюда появляется дальнейшая полная зависимость от зарубежных агрегатов.

И в заключение необходимо привести еще ряд цифр. Годовое производство рассматриваемой в статье продукции НТЦ «Редуктор» увеличилось с 1000 штук в 2003 году до 6000 штук в 2006 году, и в 2010 году уже вполне реально достигнет 10000 штук.

С НТЦ «Редуктор» сотрудничают европейские редукторные фирмы испанская Pujol Muntalá (серия редукторов ES совместного производства, гарантия 3-5 лет) [32] и бельгийская «Watteeuw» (серия редукторов ES-плюс совместного производства, гарантия до 10 лет, срок службы до 25 лет). Кстати, такую же позицию разделяет ОАО «Редуктор» (Ижевск), которое встало на путь сотрудничества с итальянскими редукторостроителями в области производства редукторов на основе червячных передач [30].

Конечно, в области нормативной документации еще имеет место отставание и определенный застой, поскольку ГОСТы в области нормирования параметров точности зубчатых колес и передач не пересматривались уже почти 30 лет. Однако, ничто не мешает принять в качестве ГОСТ международный стандарт ИСО 1628 в редакции 2006 года, что было предложено в работе [17] почти 20 лет назад, и что уже реализовала Украина (филиал НТЦ «Редуктор» в Киеве действует по международному стандарту).

Резюмируя вышеизложенное, необходимо отметить, что положение дел в отечественном редукторостроении сдвинулось в лучшую сторону, например, по сравнению с 2002 годом, когда состоялась первая Всероссийская конференция «Редукторостроение России: состояние, проблемы и перспективы», созванная по инициативе отечественных редукторных заводов.

Создана обширная информационно-организационная база:

- в 2002 году на базе участников Всероссийской конференции «Редукторостроение России: состояние, проблемы и перспективы» было принято решение о реорганизации Ассоциации инженеров механических трансмиссий и приводов (АМТ), которая и была осуществлена в 2003 году (В правление АМТ вошли руководители большинства редукторных заводов России, а научно-технический совет составили представители редукторной науки);

- создана единая экспозиция членов АМТ на Всероссийской выставке «Привэкс» [33];
- стали издаваться научно-производственные журналы «Редукторы и приводы», «Рынок приводной техники», «Новости приводной техники»;
- созданы электронные порталы Gear.ru (Москва), reduktorntc.ru (НТЦ «Редуктор»), reduktorntc-k.com.ua (филиал НТЦ «Редуктор» в Киеве), tmm.ru (СПб) и др.

Пути развития отечественного редукторостроения в настоящее время определились. Годы перестройки и первые постсоветские годы открыли путь на отечественный рынок для редукторов западных фирм. Интервенция западной продукции на российский рынок осуществлялась как напрямую, так и через дилерскую сеть, состоящую из коммерческих структур. Затем в качестве дилеров вместо посреднических структур стали выступать отечественные производители редукторов (например, НТЦ «Приводная техника», Москва), поскольку именно они были способны не только принять заказ и вызвать дорогостоящего консультанта из-за границы, но и провести реальное сервисное обслуживание.

Следующим этапом был переход к научно-техническому сотрудничеству между российскими и западными производителями (НТЦ «Редуктор», Санкт-Петербург, НТЦ «Приводная техника», Москва, ОАО «Редуктор», Ижевск). В первом случае – испанские и бельгийские редукторные фирмы, во втором и третьем – профильные итальянские фирмы.

В основе сотрудничества соблюдение паритета – совместные исследования, разработка, изготовление и сборка продукции. Таким примером является серия ES (НТЦ «Редуктор», Санкт-Петербург и испанская фирма Pujol Muntalá) [32].

Правда, некоторые отечественные производители переходят на параметрические ряды западных фирм (НТЦ «Приводная техника», Москва), другие наоборот требуют соблюдения национальных стандартов (НТЦ «Редуктор», Санкт-Петербург).

Именно такой путь – путь сотрудничества выбрали ведущие редукторные фирмы России, который приведет к развитию отечественного редукторостроения на базе использования передовых мировых технологий, с использованием своих «ноу-хау», успешно конкурирующего с продукцией передовых западных фирм не только на внутреннем, но и на внешних рынках. Все это важно в связи с ожидаемым вхождением России во Всемирную торговую организацию (ВТО). Возможно, что затянувшиеся на более чем 15 лет переговоры о таком вхождении, сыграли в данном случае положительную роль.

В изложенном выше и состоит современная отечественная модернизация редукторного производства.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шалобаев, Е.В. Модернизация - веление времени [Текст] // Промышленный вестник. - 2002. - №10. - С.12.
2. Снесарев, Г.А. Генеральные задачи редукторостроения // Передачи и трансмиссии. - 1991. №1.- С.5 - 7.
3. Гольдфарб, В.И. Российская программа «Прогрессивные зубчатые передачи» // Передачи и трансмиссии. 1998. №2. – С.30 - 41.
4. Шульц, В.В. Форма естественного износа деталей машин и инструмента [Текст] / В.В. Шульц. - Л.: Машиностроение, 1990. - 208 с.
5. Сухоруков, Ю.Н. Модификация эвольвентных цилиндрических зубчатых колес [Текст]/ Ю.Н. Сухоруков //Справочник. - Киев: «Тэхніка», 1992. - 197 с.
6. Старжинский, В.С. Конструкции пластмассовых передачи в точном приборостроении [Текст] / В.С. Старжинский, Е.В. Шалобаев // В кн.: Пластмассовые зубчатые колеса в механизмах приборов. СПб.-Гомель: изд-во ИММС НАН Б, 1998. – С.346 - 404.
7. Медунецкий, В.М. Обеспечение качественных показателей комбинированных цилиндрических передач [Текст] / В.М. Медунецкий //СПб.: изд-во Политехника. - 2002. – 160 с.
8. Шалобаев, Е.В. Комплексный подход к профильной модификации зубчатых колес для повышения их качественных показателей [Текст] / Е.В. Шалобаев, В.М. Медунецкий, Ю.С. Монахов // Сборка в машиностроении, приборостроении. - 2004. - №11. – С.31 - 34.
9. Воссоздадим эффективную связь науки с производством // Редукторы и Приводы. - 2007. - №1. - С.42 - 43.

10. Айрапетов, Э.Л. Состояние и перспективы развития методов расчета нагруженности и прочности передач зацеплением [Текст] / Э.Л. Айрапетов // Ижевск-М.: изд-во ИжГТУ. - 2000. - 116 с.
11. Егоров, О.Д. Конструирование мехатронных модулей [Текст] / О.Д. Егоров, Ю.В. Подураев. - М.: ИЦ МГТУ Станкин, 2004. - 360 с.
12. Олексюк В. Роль зубчатых передач в мехатронных устройствах [Текст] / В. Олексюк // Передачи и трансмиссии. - 2001. - №1. - С.44-57.
13. Берестнев, О.В. Основные принципы ресурсного проектирования механических трансмиссий самоходных машин [Текст] / О.В. Берестнев, Ю.Л. Солитерман, А.М. Гоман // Передачи и трансмиссии. - 2001. - №1. - С.4-13.
14. Тимофеев, Б.П. Расчет точности зубчатых передач и цепей [Текст] / Б.П. Тимофеев, Е.В. Шалобаев // В кн.: Пластмассовые зубчатые колеса в механизмах приборов. СПб.-Гомель: изд-во ИММС НАН Б, 1998. - С.296-346.
15. Шалобаев Е.В. Конструкторско-технологическое обеспечение точности приборных зубчатых передач // В кн.: Технология производства и методы обеспечения качества зубчатых колес и передач. Изд. 2-е исп. и доп. СПб.: Профессия, 2007. - С.527 - 535.
16. Шалобаев, Е.В. Методика определения степени точности зубчатых колес в передаче по нормам кинематической точности с учетом погрешностей изготовления и монтажа деталей [Текст] / Е.В. Шалобаев // В кн.: Технология производства и методы обеспечения качества зубчатых колес и передач. Изд. 2-е исп. и доп. СПб.: Профессия, 2007. - С.794 - 801.
17. Тимофеев Б.П., Шалобаев Е.В. Состояние и перспективы развития нормирования точности зубчатых колес и передач [Текст] / Б.П. Тимофеев, Е.В. Шалобаев // Вестник машиностроения. - 1991. - №12. - С.34 - 39.
18. Попов, П.К. Предпосылки пересмотра нормативной документации по расчету точности зубчатых передач [Текст] / П.К. Попов, Л.О. Штриплинг // Вестник машиностроения. -1998. -№6. - С.59 - 62.
19. Нежурин И.П. Точность зубчатых передач. Допуски [Текст]: В кн.: Производство зубчатых колес газотурбинных двигателей / Под ред. Ю.С.Елисеева. - М.: Высшая школа, 2001. - С.44 - 87.
20. Зинченко В.М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки [Текст] / В.М. Зинченко. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. - 303 с.
21. Пфеффлин, Б. Исследования червячных передач с сочетанием материалов сталь/сталь [Текст] / Б. Пфеффлин, М. Штернберг, К. Лангенберг, А. Гаас // Передачи и трансмиссии. - 1997. - №1. - С.30 - 39.
22. Старжинский, В.Е. Передачи с зубчатыми колесами из термопластов: Проектирование и технология производства. Обзор [Текст] / В.Е. Старжинский, С.А. Осипенко // Передачи и трансмиссии. - 2001. - №1. - С.57 - 70.
23. Зеер-Гоос, Г.Ц. История отказов зубчатых передач [Текст] / Г.Ц. Зеер-Гоос // Передачи и трансмиссии. -1996. - №1. - С.29- 32.
24. Домбек З., Крушевски Т., Шалобаев Е.В. Проблемы измерения параметров крупномодульных зубчатых колес и метод видеосъемки [Текст] / З. Домбек, Т. Крушевски, Е.В. Шалобаев // Контроль. Диагностика. - 2004. - №12. - С.58-60.
25. Буденков, Г.А. Использование методов акустической эмиссии для диагностики зубчатых передач [Текст] / Г.А. Буденков, О.В. Недзвецкая // Передачи и трансмиссии. - 1997. - №1. - С.40-52.
26. Вулгаков Э.Б. Информационно-измерительная система контроля состояния авиационных и общемашиностроительных редукторов, приводов и коробов передач [Текст] / Э.Б. Вулгаков, В.В. Голованов, А.В. Климов. - М.: изд-во ЦИАМ им. П.И.Баранова, 1990. - 64 с.
27. Тескер, Е.И Стенд для испытания силовых передач гусеничных машин в режиме пуск-остановка [Текст] / Е.И. Тескер, А.О. Куликов, В.В. Шеховцов, С.В. Зленко, Д.И. Кумсков, А.Е. Стульников // Передачи и трансмиссии. - 1998. - №1. - С.36-42.
28. Молчанов, С.М. О состоянии и задачах редукторостроения России [Текст] / С.М. Молчанов, В.И. Парубец, Ш.П. Пшизов // Материалы Всероссийской конференции: Редукторостроение России: состояние, проблемы и перспективы / Под ред. Е.В.Шалобаева. Изд. 2-е доп. и испр. СПб.: ЦЦП «Светоч», 2003. - С.27-29.
29. Применение модернизированных редукторов – веление времени [Текст] // Редукторы и Приводы. - 2005. - №1-2. - С.7-9.
30. Редукторы и мотор-редукторы с червячной передачей производства Италии и России [Текст] // Рынок приводной техники. - 2006. - №3. - С.14-17.
31. Новые планетарные редукторы 3П-М и мотор-редукторы 3МП-М – настоящее и будущее редукторной России [Текст] // Редукторы и Приводы. - 2007. - №1-2. - С.4-8.
32. Кузьмин, А.Е. Серия ЕС: цилиндрические соосные мотор-редукторы (редукторы) [Текст] / А.Е. Кузьмин // Редукторы и Приводы. - 2005. - №2-3. - С.17-22.
33. Крымов, Б.М. Объединяя усилия российских производителей редукторов [Текст] / Б.М. Крымов // Редукторы и приводы. -2005. - № 2-3. - С.6-7.

### Шалобаев Евгений Васильевич

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики – Национальный исследовательский университет, г. Санкт-Петербург

Кандидат технических наук, профессор, директор Академии методов и техники управления

Тел. (812) 373-71-17

E-mail: [shalobaev47@mail.ru](mailto:shalobaev47@mail.ru), [director@limtu.ru](mailto:director@limtu.ru)

М.П. ШИШКАРЕВ

## ОПТИМИЗАЦИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АДАПТИВНОЙ ФРИКЦИОННОЙ МУФТЫ С БИФУНКЦИОНАЛЬНЫМ УПРАВЛЯЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ

*Для оценки оптимального соотношения нагрузочной способности и точности срабатывания адаптивной фрикционной муфты с бифункциональным управляющим устройством введен критерий оптимизации в форме произведения величины номинального вращающего момента муфты на коэффициент точности.*

**Ключевые слова:** Адаптивная фрикционная муфта, управляющее устройство, точность срабатывания, коэффициент усиления.

*For an estimation of an optimum relationship of load-carrying capacity and exactitude of wear of an adaptive friction coupling with the bifunctional actuation device the criterion of optimisation in the form of product of magnitude of a nominal torque of a clutch on exactitude factor is injected.*

**Keywords:** An adaptive frictional clutch, the actuation device, exactitude of operation, an amplification factor.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследованием установлено, что нагрузочная способность и точность срабатывания АФМ с бифункциональным управляющим устройством (УУ) увеличиваются по мере роста величины коэффициента усиления (КУ) обратной связи [1]. При постоянных радиальных габаритах АФМ увеличение нагрузочной способности возможно только за счет повышения силы прижатия друг к другу пар трения фрикционной группы. Однако указанное увеличение силы прижатия ограничено допустимым давлением на поверхностях фрикционных контактов [2]. В связи с этим реальное увеличение нагрузочной способности АФМ возможно за счет увеличения ее радиальных габаритов (при увеличении усилия прижатия друг к другу пар трения) или путем увеличения числа пар трения, что неизбежно ведет к увеличению осевых габаритов АФМ.

Увеличение нагрузочной способности АФМ с бифункциональным УУ и соответствующее ему увеличение габаритов муфты ведет к росту ее массы и момента инерции, что ухудшает эксплуатационные характеристики привода и машины в целом.

Повышение точности срабатывания АФМ за счет увеличения КУ позволяет уменьшить действующие в приводе нагрузки и, тем самым, оптимизировать размеры и совокупную массу элементов привода, защищаемых муфтой от чрезмерных перегрузок.

Задача исследования состоит в разработке и анализе способа оптимизации величины КУ АФМ с бифункциональным УУ, обеспечивающей улучшение эксплуатационных характеристик муфты.

Объектом исследования является АФМ с бифункциональным УУ, принципиальная схема которой приведена на рисунке. Муфта содержит полумуфты 1 и 2, кинематически связанные между собой посредством трения пакетом фрикционных дисков 3 и 4. Диски 3 связаны со ступицей нажимного диска 5 посредством подвижного в осевом направлении шлицевого соединения, диски 4 связаны с барабаном полумуфты 2 ана-

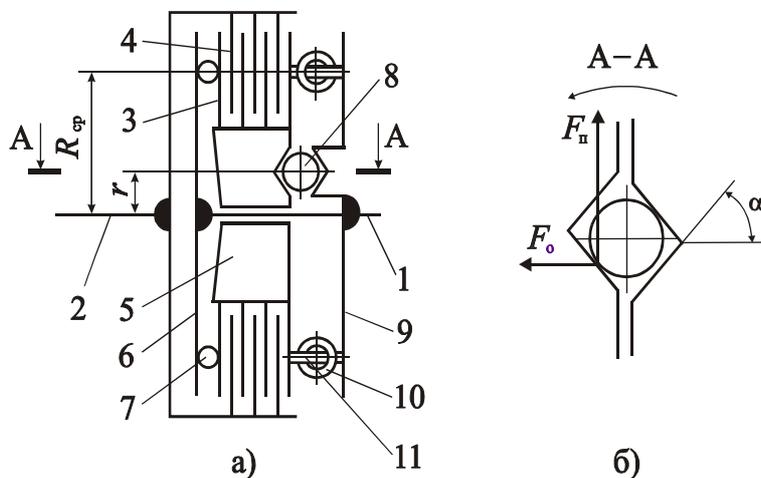


Рисунок – Принципиальная схема АФМ с бифункциональным УУ

логичным способом. Нажимной диск 5 не имеет кинематической связи с полумуфтой 1 в окружном направлении.

Слева (по рисунку, вид а) пакет фрикционных дисков 3 и 4 опирается на упорный диск 6 посредством упорного подшипника 7, следовательно, нажимной диск 5 передает полный вращающий момент муфты и все пары трения являются ведущими [3].

Передача нагрузки от полумуфты 1 на нажимной диск 5 (если полумуфта 1 ведущая) или от нажимного диска на полумуфту 1 (если ведущей является полумуфта 2) осуществляется посредством тел качения 8. Последние размещены в скошенных гнездах нажимного диска 5 и опорного диска 9, жестко закрепленного на ступице полумуфты 1 (см. рисунок, вид б, сечение А-А).

Силовое замыкание пакета фрикционных дисков 3 и 4 осуществляется за счет тангенциально установленных пружин 10, которые опираются на бобышки 11, закрепленные соответственно на нажимном 5 и жестко закрепленном на ступице полумуфты 1 опорном 9 дисках. Окружные силы пружин 10, действуя на нажимной диск 5, создают момент сил, благодаря чему тела качения 8 заклиниваются в гнездах между их противоположными стенками (рисунок, вид б, сечение А-А). В результате этого между телами качения и стенками гнезд возникает сила нормального давления (имеется в виду сила, приведенная к одному гнезду), осевая составляющая которой создает усилие замыкания пар трения фрикционной группы.

Благодаря этому УУ АФМ, состоящее из дисков 5 и 9, а также из тел качения 8, выполняет одновременно функцию нажимного устройства, обеспечивающего возбуждение сил трения между парами фрикционной группы и, следовательно, передачу нагрузки муфтой.

Изменим подход к оптимизации величины КУ по установленному критерию. Новый подход основан на оптимизации величины комплексного параметра, включающего параметры КУ и коэффициент точности муфты [4]. Теоретическое обоснование данного подхода заключается в следующем.

Увеличение КУ, сопровождаемое повышением точности срабатывания АФМ, приводит к увеличению габаритных размеров и массы привода машины. Однако повышение точности срабатывания АФМ позволяет уменьшить максимальные напряжения, действующие в деталях привода при перегрузках и, соответственно, их размеры и массу.

Таким образом, при увеличении нагрузочной способности АФМ уменьшается относительное рассеяние величины предельного вращающего момента муфты за счет повышения точности ее срабатывания. В соответствии с этим комплексной характеристикой оптимизации величины КУ должно быть произведение величины номинального вращающего момента на величину коэффициента точности, т. е.

$$P_1 = T_{\text{ном}} K_T. \quad (1)$$

В соответствии с рекомендациями, изложенными в работе [1], можно записать:

$$T_{\text{ном}} = z F_{\text{п}} R_{\text{ср}} C \frac{f_{\text{min}}}{1 + z C f_{\text{min}}}, \quad (2)$$

где  $z$  – число пар трения 3–4;  $F_{\text{п}}$  – суммарная сила натяжения пружин 10;

$R_{\text{ср}}$  – средний радиус поверхностей трения фрикционных дисков 3 и 4;

$f_{\text{min}}$  – минимальное значение коэффициента трения между фрикционными дисками 3 и 4;

$C$  – КУ обратной связи АФМ:

$$C = \frac{R_{\text{ср}}}{r} \operatorname{tg} \alpha,$$

$\alpha$  – угол скоса гнезд под тела качения 8 (рисунок, вид б, сечение А-А);  $r$  – радиус окружности, на которой расположены тела качения 8 (см. рисунок, вид а).

Величина коэффициента точности муфты определяется по формуле:

$$K_T = \frac{f_{\text{max}} (1 + z C f_{\text{min}})}{f_{\text{min}} (1 + z C f_{\text{max}})}, \quad (3)$$

где  $f_{\max}$  – максимальный коэффициент трения между фрикционными дисками 3 и 4. После подстановки правых частей соотношений (2) и (3) в формулу (1) получим:

$$p_1 = zF_{\Pi}R_{\text{ср}}C \frac{f_{\max}}{1 + zCf_{\max}}. \quad (4)$$

В качестве критерия оптимальности изменения величины  $C$  необходимо принять минимальное значение  $p_1$ . Функция (4) возрастает по аргументу  $C$ , причем, характер ее изменения идентичен характеру изменения функции нагрузочной способности АФМ по аргументу  $f$  [1]. Это означает, что увеличение нагрузочной способности АФМ при возрастании  $C$  не может компенсировать повышение точности ее срабатывания. Следовательно, абсолютное рассеяние величины предельного вращающего момента АФМ с увеличением КУ  $C$  будет возрастать, что неблагоприятно скажется на прочности узлов и деталей привода машины.

Критерием оптимальности должна быть минимальная величина коэффициента  $p_1$ . Минимальным значениям последнего соответствуют минимальные величины КУ  $C$ .

Заметим, что нагрузочная способность АФМ с бифункциональным УУ будет равна нагрузочной способности АФМ 1-го поколения [4], если принять  $C=1$ . В соответствии с этим, при оптимизации величины КУ  $C$  необходимо, с целью получения эффекта повышения нагрузочной способности АФМ с бифункциональным УУ, ограничивать величину КУ  $C$  снизу, соблюдая условие  $C>1$ .

АФМ с бифункциональным УУ нецелесообразно использовать при величинах КУ  $C$ , таких, что  $C<1$ , поскольку в данном случае ее нагрузочная способность будет ниже, чем у АФМ 1-го поколения, со значительным уменьшением точности срабатывания.

Результаты исследования могут быть использованы при расчетах АФМ с бифункциональным УУ для установления минимального значения КУ обратной связи, обеспечивающего более высокие показатели нагрузочной способности и точности срабатывания муфты.

Выводы. 1. Для обеспечения оптимального соотношения нагрузочной способности и точности срабатывания АФМ с бифункциональным УУ критерий оптимизации в форме произведения величины номинального вращающего момента муфты на коэффициент точности должен принимать минимальные значения. 2. При оптимизации величины КУ для АФМ с бифункциональным УУ необходимо ее ограничение снизу значением, равным единице. 3. При значениях КУ, меньших единицы, точность срабатывания АФМ с бифункциональным УУ меньше, чем точность срабатывания АФМ 1-го поколения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шишкарёв М.П. Улучшение эксплуатационных показателей адаптивных фрикционных муфт [Текст] / ГОУ Рост. гос. акад. с.-х. машиностроения, Ростов н/Д, 2008. – 148 с.
2. Шишкарёв М.П. Эффективность применения адаптивных фрикционных муфт // Изв. вузов. Машиностроение. – 2001. – № 1. – С. 27–31.
3. Шишкарёв М.П. Об ограничениях при выборе параметров некоторых типов адаптивных фрикционных муфт // Вестн. машиностроения. – 2001. – № 7. – С. 8–11.
4. Поляков В.С., Барбаш И.Д., Ряховский О.А. Справочник по муфтам. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1974. – 352 с.

### Шишкарёв Михаил Павлович

Ростовский-на-Дону институт энергетике и машиностроения Донского государственного технического университета, г. Ростов-на-Дону

Доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой «Информационное обеспечение автоматизированного производства»

Тел. (863-2) 52-41-35

E-mail: [Shishkarev@tam.rgashm.ru](mailto:Shishkarev@tam.rgashm.ru)

# **МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ** **И ИНСТРУМЕНТЫ**

УДК 621. 787.004

Д.Л. СОЛОВЬЕВ, А.В. КИРИЧЕК, С.А. СИЛАНТЬЕВ, А.В. ВАСИЛЬЕВ

## **ПОВЕРХНОСТНОЕ ПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ДЛИННОМЕРНЫХ ОТВЕРСТИЙ**

*Предлагается новый способ упрочняющей обработки длинномерных отверстий динамическим методом с использованием статической и ударной нагрузки, который позволяет увеличить глубину упрочненного слоя и снизить затраты на обработку.*

**Ключевые слова:** *поверхностное пластическое деформирование; статическое воздействие; динамическое воздействие; длинномерные отверстия; глубина упрочненного слоя.*

*The new way of strengthening handling of lengthy holes by dynamic method with use of static and shock loading which allows to augment depth of the strengthened stratum and to lower expenditures for handling.*

**Key words:** *surface plastic deformation; static effect; dynamic effect; lengthy holes; depth of the strengthened stratum.*

Развитие технологий поверхностного пластического деформирования (ППД) связано с расширением их области применения и созданием новых более эффективных возможностей формирования упрочненного поверхностного слоя.

Известно, что для получения большой глубины и степени упрочнения энергетически более выгодными являются способы ППД, использующие для нагружения металла ударную нагрузку [1, 2]. Однако не всегда геометрия упрочняемой поверхности позволяет осуществить ударное нагружение. Поэтому ударные способы ППД редко применяются для обработки внутренних цилиндрических поверхностей, доля которых в машиностроении достаточно велика. Так, для ППД отверстий большого диаметра (более 100...120 мм) может использоваться центробежная обработка или ударное раскатывание, сочетающее комбинированное нагружение статической и ударной нагрузкой. Для упрочнения отверстий с меньшими диаметрами (менее 100...120 мм) такие способы применить сложно, т.к. вследствие малого пространства возникают трудности ориентации инструмента относительно обрабатываемой поверхности. Поэтому единственной возможностью упрочнения ППД таких отверстий является дорнование, при котором инструмент – дорн проходит под действием статической нагрузки вдоль упрочняемого отверстия, формируя наклепанный слой [3]. Диаметр дорна выполняют больше диаметра упрочняемого отверстия на величину натяга. Для получения большой степени и глубины упрочнения необходимо увеличение натяга и соответственно силы прикладываемой к дорну. При дорновании прикладываемая сила может быть толкающей, инструмент – дорн сжатия (выглаживающая прошивка), или тянущей, инструмент – дорн растяжения (выглаживающая протяжка).

Использование ударной нагрузки при ППД отверстий с диаметром менее 100 мм было реализовано в статико-импульсном дорновании (СИД) по схеме прошивания, когда инструмент – дорн проходит вдоль упрочняемого отверстия под действием комбинированной толкающей статической и ударной нагрузки [4-7]. При этом ударная нагрузка преимущественно определяла параметры наклепанного слоя. Оценка производительности процесса СИД показала, что скорость обработки отверстий снижается с повышением натяга, а также при уменьшении диаметра инструмента. При сравнении производительности при СИД и при дорновании для тех же условий [1], установлено, что при СИД производительность составила не менее 4,6 мм/с, что более чем в два раза выше, чем при дорновании.

Сравнение энергоемкости оборудования применяемого при дорновании (протяжные станки и прессы различных типов) и при СИД (генератор импульсов) показывает, что создание больших сил порядка 285...340 кН при дорновании требует использования оборудования, потребляемая мощность которого достигает 40 кВт. Применение при СИД генератора импульсов позволяет создавать при энергии удара 160 Дж ударную нагрузку порядка 450 кН. При этом потребляемая мощность всей установки, включая гидроцилиндр, осуществляющий

предварительное статическое нагружение, не превышают 18 кВт, что более чем в 2 раза меньше, чем потребляемая мощность при дорновании.

Однако при СИД по способу прошивания длина обрабатываемых отверстий ограничивается 100...150 мм. Это связано с тем что при обработке более длинных отверстий возможно искажение положения оси отверстия относительно наружной и торцевой поверхностей обрабатываемой детали. Поэтому для отверстий с большой длиной целесообразно использовать дорнование по способу протягивания. Для упрочнения ППД протягиванием комбинированная статико-импульсная нагрузка не применялась.

Авторами предлагается схема упрочнения ППД длинномерных отверстий деталей машин, основными отличительными особенностями которой являются: использование для нагружения комбинированной статической и ударной нагрузки, а также комбинированного тянущего и толкающего воздействия на инструмент.

Реализация процесса должна осуществляться при относительном движении заготовки 1 и инструмента – дорна 2, состоящего из деформирующих колец посаженных на оправке. В данной схеме неподвижной остается заготовка 1, которая торцом упирается в плиту 3 базирuemую на стойках 4 и имеющую отверстие, через которое могут свободно проходить кольца дорна. Дорн 1 перемещается вдоль упрочняемого отверстия: с одной стороны его тянет статическая нагрузка  $P_{ст}$ , а с другой толкает ударная  $P_{и}$ . Статическая нагрузка дорну 1 сообщается продольным перемещением по направляющим 5 салазок 6, за которые дорн закреплен левым концом через пружину 7. Ударная нагрузка сообщается правому торцу дорна генератором импульсов 8, который жестко смонтирован на салазках 6 и перемещается вместе с ними. Рабочими элементами генератора импульсов являются боек 9 и волновод 10. В процессе работы генератора импульсов боек 9 ударяет по волноводу 10, передавая через него ударные импульсы дорну 1 и проталкивая его вдоль обрабатываемого отверстия. Для ограничения хода волновода, совершаемого под действием на него статической нагрузки, в корпусе генератора импульсов предусмотрен палец 11 (рисунок 1).

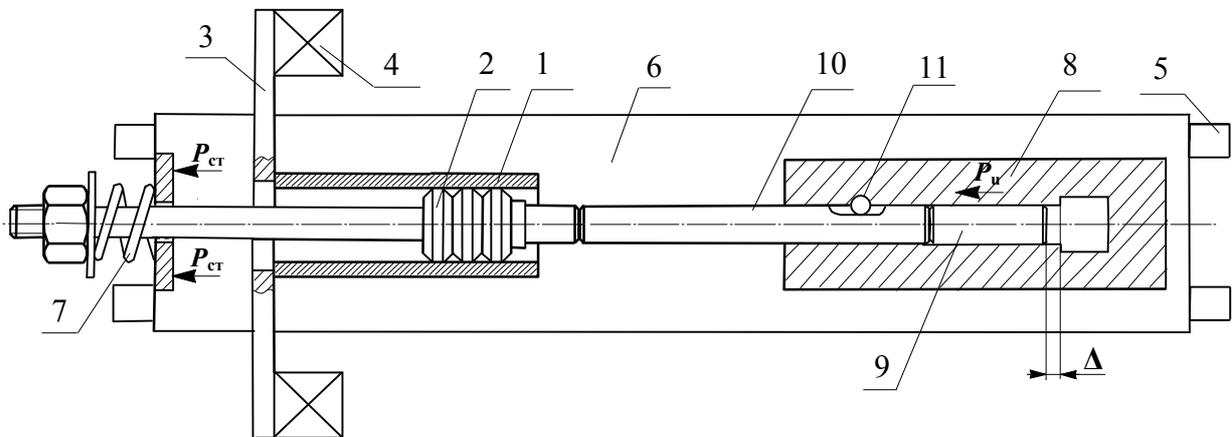


Рисунок 1 - Схема статико-импульсного упрочнения длинномерных отверстий деталей машин (вид сверху)

Схема работает следующим образом. Заготовка 1 устанавливается таким образом, чтобы ее правый торец упирался в плиту 3. Левый конец оправки дорна 2 пропускают сквозь упрочняемое отверстие заготовки 1 таким образом чтобы первое (направляющее) кольцо частично вошло в упрочняемое отверстие, после чего правый торец дорна подпирается волноводом генератора импульсов 8, а левый конец оправки дорна крепится к салазкам 6 через пружину 7. При включении подачи пружина 7 начинает сжиматься, а кольца дорна внедряются в упрочняемое отверстие, пластически деформируя его стенки. По мере увеличения внедрения дорна 1 в обрабатываемое отверстие, сопротивление внедрению будет увеличиваться, а скорость внедрения будет уменьшаться за счет увеличения скорости сжатия пружины 7. В результате, скорость перемещения салазок 6 с жестко закрепленным на нем генератором импульсов 8 будет больше скорости внедрения дорна 1 в отверстие. За счет этого волновод 10 генератора импульсов, под действием на него дорна, будет перемещаться вправо, взводя боек 9. Как только величины взвода бойка будет достаточно (обычно это происходит, когда бо-

ек полностью выходит из тормозной камеры, т.е. компенсируется расстояние  $\Delta$ ), произойдет его удар по торцу волновода. Величина взвода бойка будет определять энергию ударов: чем больше смещение бойка вправо, тем больше энергия ударов. Таким образом, чем больше сопротивление прохождению дорнов через отверстие, тем большая энергия ударов будет сообщаться дорну, т.е. происходит адаптация энергии ударных импульсов к условиям пластического деформирования. Увеличение энергии ударных импульсов будет происходить до максимально возможной величины для данной конструкции генератора импульсов. Для ограничения дальнейшего передвижения бойка вправо под действием статической нагрузки, которое может привести к снижению величины разгона бойка и соответственно снижению скорости и энергии ударов, предусмотрен ограничительный палец 11. Подача салазок рассчитывается таким образом, чтобы сила статического воздействия осуществляла, в основном, направляющее действие на дорн, исключая «уход» оси отверстия характерный при прошивании, а упругопластическое деформирование упрочняемой поверхности осуществлялось за счет импульсной нагрузки.

### Выводы.

1. Разработанная схема сочетает преимущества протягивания и прошивания и впервые позволяет упрочнять ППД отверстия большой длины с использованием ударной нагрузки, что дает возможность снизить энергоемкость процесса, увеличить глубину упрочненного поверхностного слоя.

2. Появляется возможность адаптировать энергию ударных импульсов к условиям пластического деформирования обрабатываемого металла: при увеличении сопротивления внедрению инструмента кинетическая энергия ударов увеличивается и наоборот.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Одинцов, Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием [Текст]: Справ. М.: Машиностроение, 1987.328 с.
2. Киричек, А.В. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием. Библиотека технолога [Текст] / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.Г. Лазуткин. - М.: Машиностроение, 2004. 288 с.
3. Монченко, В.П. Деформирующая обработка отверстий втулок и гильз гидropневмоцилиндров [Текст] / В.П. Монченко, В.В. Белотелов. - М.: НИИМАШ. 1976. 91 с.
4. Киричек, А.В. Статико-импульсная обработка внутренних цилиндрических поверхностей [Текст] / А.В. Киричек, А.Г. Лазуткин, Д.Л. Соловьев, С.А. Силантьев // Известия ОрелГТУ. Машиностроение. Приборостроение. - 2004. - № 3. - С. 16-17.
5. Киричек, А.В. Деформационное упрочнение отверстий статико-импульсной обработкой [Текст] / Киричек А.В., Соловьев Д.Л. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. - № 5. - С. 3-5.
6. Киричек, А.В. Исследование влияния параметров статико-импульсного дорнования на глубину упрочненного слоя [Текст] / А.В. Киричек, А.В. Поляков, Д.Л. Соловьев // Известия ОрелГТУ. Машиностроение. Приборостроение. 2008. - № 3-7. - С. 47-50.
7. Киричек, А.В. Упрочнение отверстий статико-импульсным дорнованием [Текст] / А.В. Киричек, А.В. Поляков, Д.Л. Соловьев // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2009. - № 6. - С.14-16.

*Исследования выполнены при поддержке гранта МД-5864.2010.8*

### **Соловьев Дмитрий Львович**

Муромский институт Владимирского государственного университета

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Станки и инструмент»

тел.(49234)77101

E-mail: [murstin@yandex.ru](mailto:murstin@yandex.ru)

### **Силантьев Сергей Александрович**

Муромский институт Владимирского государственного университета

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Станки и инструмент»

тел.(49234)77101

E-mail: [murstin@yandex.ru](mailto:murstin@yandex.ru)

### **Киричек Андрей Викторович**

Орловский государственный технический университет, г Орел

Доктор технических наук, профессор, директор Технологического института ОрелГТУ

тел./ fax (4862)555524

E-mail: [avk@ostu.ru](mailto:avk@ostu.ru)

### **Васильев Антон Викторович**

Муромский институт Владимирского государственного университета

Аспирант кафедры «Станки и инструмент»

тел.(49234)77101

E-mail: [murstin@yandex.ru](mailto:murstin@yandex.ru)

УДК 621.787

А.Н. ИСАЕВ, С.А. ЗЕМЛЯНОЙ, Э.И. ФЕДИН

## ДЕФОРМАЦИИ И КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ ОТВЕРСТИЙ СВАРНЫХ ТРУБ, ОБРАБОТАННЫХ ДОРНОВАНИЕМ

*Рассмотрен механизм деформации грата в отверстии сварной трубы в процессе многопроходного дорнования. Представлены результаты измерений шероховатости на поверхности деформированного шва*

**Ключевые слова:** сварная труба, грат, деформирование, шероховатость, дорнование

*The mechanism of a strain of a rag in a hole of a welded pipe in the course of multipass dornovaniya is considered. Results of measurements of a roughness on a surface of the deformed weld are presented*

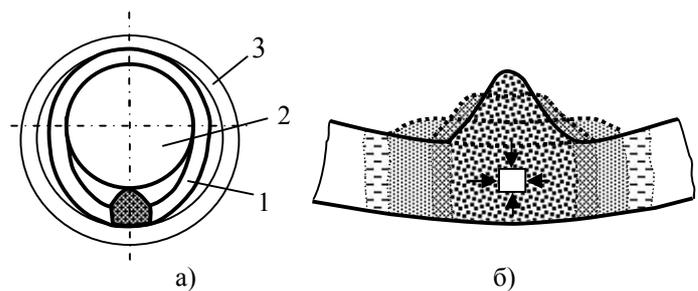
**Keywords:** a welded pipe, a rag, deformation, a roughness, dornovaniya

Особенностью сварных трубчатых заготовок является наличие грата на поверхности отверстия, что существенно усложняет процесс его обработки дорнованием. Наиболее простое решение проблемы может быть достигнуто в случае предварительного удаления грата, однако для этого требуются значительные дополнительные затраты на конструкторско-технологическое обеспечение процесса. Поэтому выявление условий обработки сварных трубчатых заготовок в исходном состоянии является актуальной задачей, решение которой способствует повышению эффективности использования сварных труб. В данной работе поставлена задача определения условий обработки заготовок из сварных труб, позволяющих обеспечить требуемые однородные свойства по точности и шероховатости поверхности отверстия в заготовках из сварных труб с полным объемным смещением грата в область сплошного материала стенки трубы.

Интенсивность деформирования валика сварного грата существенно возрастает в условиях всестороннего сжатия, что особенно важно при обработке заготовок из сварных труб, разнородных по составу материалов и имеющих пониженную пластичность в области сварного шва. Поэтому чтобы предотвратить возможность разрушения трубы при дорновании необходимо обеспечить деформирование в условиях всестороннего сжатия материала в очаге деформации, для чего деформируемую заготовку следует помещать в контейнер (обойму), препятствующую радиальному смещению деформируемой стенки трубы в процессе ее раздачи. Дорнование втулки в обойме приводит в основном к увеличению ее внутреннего диаметра и длины, при этом увеличение наружного диаметра мало или отсутствует. Схема главных деформаций в данном случае может быть отнесена к виду «сжатия».

Некоторые особенности деформирования сварных трубчатых заготовок отражены на рисунке 1. В начальный момент контакта дорна с заготовкой происходит искажение поперечного сечения, при этом, благодаря малой площади соприкосновения с инструментом, на грат оказывается повышенное давление и его интенсивное сглаживание. Увеличение натяга приводит к сглаживанию поверхности отверстия и постепенному уменьшению размеров грата до полного исчезновения.

Избытки материала грата в условиях объемного напряженного состояния сжатия, способствующего повышению пластичности, переходят в стенку заготовки, длина ее периметра растет до момента заполнения первоначального зазора между заготовкой и обоймой. Деформирование грата происходит до тех пор, пока не выровняется давление по всей контактной



**Рисунок 1- Деформации сварной трубы при дорновании отверстия: а – искажение поперечного сечения в начальный момент контакта; б – формоизменение сварного шва при увеличении натяга дорнования**

поверхности. В дальнейшем условия деформирования сварной заготовки соответствуют условиям дорнования обычных втулок в обойме.

Для определения условий, гарантирующих качественные требования к изделию из сварной трубы, выполнены экспериментальные исследования. В эксперименте использованы образцы втулок из электросварных труб с гратом, форма и размеры которого определялись дополнительно. Применялось многопроходное дорнование, которое обеспечивает повышенный уровень давлений и сжимающих напряжений в области контакта дорна с гратом и высокую интенсивность деформации.

В литературе отсутствуют данные о форме и размерах внутреннего грата – металла вытекшего внутрь трубы при ее изготовлении электросваркой сопротивлением. Поэтому предварительно были произведены измерения грата труб разных диаметров с различной толщиной стенки, выпускаемых в массовом производстве металлургическими предприятиями. Для определения высоты и ширины внутреннего грата после каждого прохода дорна по специальной методике делались слепки (реплики) и на инструментальном измерительном микроскопе модели УИМ-23 производились соответствующие измерения.

Таблица 1- Результаты измерений внутреннего грата сварных труб, мм.

Наружный диаметр	Толщина стенки	Высота внутреннего грата $h$	Ширина внутреннего грата $b$
Ø27	2,5	2,2...2,6	2,3...2,5
Ø33,5	2,5	2,7...3	2,5...2,8
Ø42	2,6	3,5...3,8	3,5...3,8
Ø48	3,5	4...4,3	3,9...4,1

Анализ измерений показал, что форма внутреннего грата сварных труб в поперечном сечении близка к равнобедренному треугольнику, основанием которого является ширина грата  $b$ , а высота  $h$  в большинстве случаев примерно равна ширине (таблица 1). Размеры грата уменьшаются с уменьшением толщины стенки сварных труб.

Основными факторами исследования были выбраны натяг дорнования и число проходов дорна. Внешний цилиндр (обойма) был изготовлен из стали 45 с диаметром отверстия Ø34,5 мм и наружными диаметрами 44,5 мм. В качестве образцов применялись заготовки из сварных труб, полученных путем свертывания металлической ленты из стали на вальцах с последующей сваркой в среде инертных газов, с явно выраженным сварным швом, не превышающим стандартные размеры. Образцы имели наружный диаметр  $D=33,5$  мм и внутренний  $d=28,5$  мм. Длина всех образцов была одинаковой, равной  $L=80$  мм. При дорновании использовался набор дорнов с увеличивающимися диаметрами через 0,5 мм (воспроизводилась схема многозубого дорнования).

В начальный период деформирования грата до момента его исчезновения происходит удлинение поперечного периметра трубы, зависящее от толщины стенки  $S_0$ , ширины  $b$  и высоты  $h$  сварочного грата, в результате чего наружный радиус трубы увеличивается на величину, равную:

$$\delta = bh/2\pi S_0 .$$

Величина  $2\delta$  является мерой зазора между обоймой и заготовкой, устраняемого за счет деформации грата в процессе дорнования. Суммарный натяг, при котором в рассматриваемом опыте приводил к полному исчезновению грата, был равен 2–3 мм в зависимости от высоты грата  $h$ . Дополнительно установлено, что на интенсивность деформирования грата влияет величина первоначального зазора между обоймой и заготовкой и толщина ее стенки. Установлено также, что при больших начальных зазорах между обоймой и заготовкой возможен разрыв последней по шву.

Качество поверхности после дорнования в области сварного шва оценивалось параметрами шероховатости. Исходные заготовки труб имели дополнительные неровности, полученные при прокатке листового материала, и внутренний сварочный грат на поверхности отверстия после сварки. Размеры поперечного сечения сварной трубы соответствовали стандарту.

В ходе экспериментов определялись условия, при которых остаточные макронеровности и получаемая шероховатость равномерно распределяются по всей обработанной поверхности отверстия. Шероховатость измерялась после выравнивания поверхности отверстия, т.е. после полного деформирования грата. Измерения осуществлялись на профилометре АБРИС-ПМ7. Данные измерений и их результаты после автоматической обработки выводились на экран дисплея. Измерение параметров шероховатости производилось по системе средней линии в соответствии с номенклатурой и диапазонами значений, предусмотренными ГОСТ 2789-73. Длина трассы ощупывания задавалась переключателем путем выбора количества базовых длин на участке измерения. На каждом из участков осуществлялся независимый расчет параметров шероховатости, а затем производилось усреднение результатов расчета и вывод на устройство индикации. Управление всем циклом измерения осуществлялось счетно-решающим устройством по специальной программе путем выдачи управляющих команд на исполнительные устройства. Все параметры шероховатости в режиме «профилограф-профилометр» рассчитывались за один проход датчика и выводились на экран вместе с профилограммами. Параметры шероховатостей внутренней поверхности сварной трубы до и после дорнования представлены в таблице 2. Профилограммы измеренных шероховатостей представлены на рисунке 2.

Исследования показали, что в представленном варианте дорнование в обойме приводит к существенному снижению высоты неровностей по всей поверхности отверстия при натяге, обеспечивающем полное устранение зазора между заготовкой и обоймой увеличение наружного диаметра обоймы на 0,1–0,15 мм. Однако замечено, что в области сварного шва шероховатость даже при достаточно больших натягах остается существенно более высокой, чем на остальной поверхности отверстия.

Таблица 2 – Параметры шероховатостей внутренней поверхности сварной трубы

Число проходов дорна	Основная поверхность		Область сварного шва	
	Ra, мкм	Rz, мкм	Ra, мкм	Rz, мкм
До дорнования	3,96	19,579	-	-
4	2,02	9,7	-	-
6	-	-	2,64	9,57
7	0,363	1,284	1,07	7,32
8	0,32	1,07	0,75	3,29
9	0,15	0,62	0,29	1,43

Возможно, это явление связано с упрочнением материала сварного шва на предварительном этапе деформирования. На основной поверхности отверстия интенсивность сглаживания неровностей с увеличением степени деформации снижается, при больших натягах шероховатость практически сохраняется на одном уровне.

Сглаживание шероховатостей приводит к заметному изменению относительной опорной длины профиля  $t_p$ , особенно вблизи вершин неровностей (рисунок 3). С ростом натяга дорнования интенсивность увеличения опорной длины профиля на малых уровнях сечений возрастает, следовательно возрастает и контактная жесткость обработан-

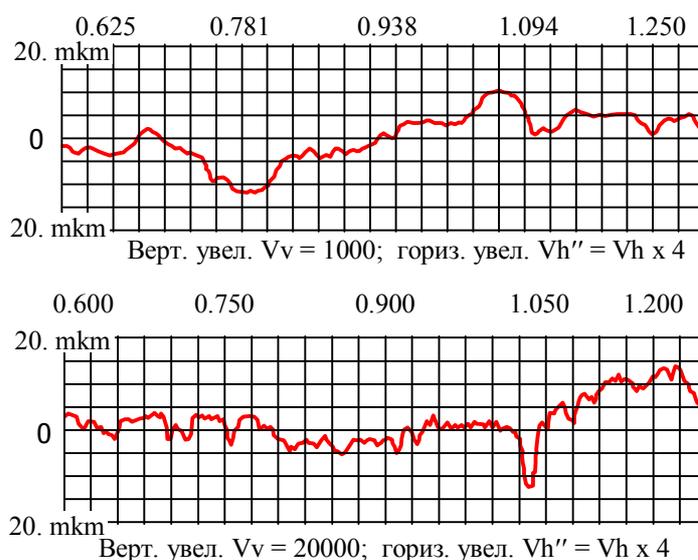


Рисунок 2- Профилограммы внутренней поверхности сварного образца после дорнования с натягами 0,5 мм (вверху) и 1,5 мм (внизу)

ной поверхности. Можно отметить, что относительная опорная длина профиля  $t_p$  в области сварного шва значительно больше, чем на остальной поверхности.

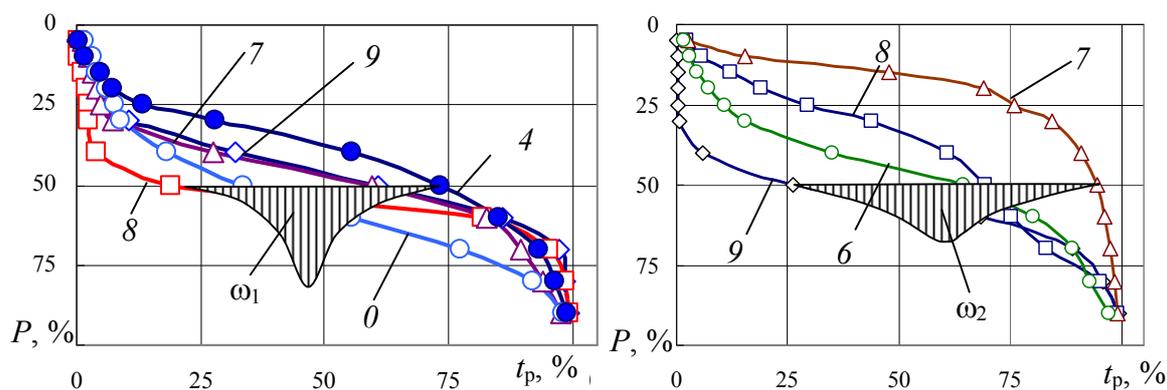


Рисунок 3- Изменение относительной опорной длины профиля  $t_p$  на поверхности отверстия (слева) и в области сварного шва (справа). Цифры на графиках – число проходов дорна

## ВЫВОДЫ

1. Эффективность деформирования грата сварной трубы зависит от толщины ее стенки, ширины и высоты сварочного валика. Суммарный относительный натяг дорнования, при котором происходит полная деформация грата, составляет 7..10% от диаметра отверстия.

2. Интенсивность деформации грата зависит от величины первоначального зазора между обоймой и заготовкой и толщин их стенок. При больших начальных зазорах возможен разрыв заготовки по шву.

3. Сглаживание шероховатостей в области сварного шва существенно выше, чем на поверхности отверстия, что приводит к заметному увеличению относительной опорной длины профиля.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исаев, А.Н. Параметры сопряжения элементов составного цилиндра, изготовленного методом дорнования [текст] / А.Н. Исаев, П.С. Арапов, Ю.В. Любимов // Известия ОрелГТУ. Серия «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии» – Орел: ОрелГТУ - 2009, №2-3/274(560).- С. 73–79

### Исаев Альберт Николаевич

Ростовский-на-Дону институт энергетики и машиностроения Донского государственного технического университета, г. Ростов-на-Дону  
 Доктор технических наук, профессор кафедры «Информационное обеспечение автоматизированного производства»  
 тел. (863) 2524135, 9061836725  
 E-mail: [anis@tam.rgashm.ru](mailto:anis@tam.rgashm.ru)

### Земляной Сергей Александрович

Ростовский-на-Дону институт энергетики и машиностроения Донского государственного технического университета, г. Ростов-на-Дону  
 Аспирант кафедры «Информационное обеспечение автоматизированного производства»

### Федин Эдуард Игоревич

Ростовский-на-Дону институт энергетики и машиностроения Донского государственного технического университета, г. Ростов-на-Дону  
 Старший преподаватель кафедры «Информационное обеспечение автоматизированного производства»

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ\*

[621.7+621.9]:658.512.2

Е.А. СЕРКОВ, Е.Ю. ВАСИЛЬЕВ

## РАЗРАБОТКА ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА СИЛ И МОМЕНТОВ РЕЗАНИЯ

*Характеризуемое в статье приложение предназначено для автоматизированного расчета сил и моментов резания. Разработка выполнена в среде VBA системы SolidWorks 2009. Описана структура данного программного продукта. Дано описание составных частей приложения. Выполнена оценка возможностей практического использования разработки. Охарактеризованы пути совершенствования программного продукта при расширении его функциональных возможностей.*

**Ключевые слова:** приложение, VBA, автоматизация, расчет сил и моментов резания.

*Application characterized in article is intended for the automated calculation of cutting forces and cutting moments. Application is made by using software-development kit VBA in system SolidWorks 2009. The structure of the given software solution is described. The description of components of application is given. The possibilities of practical usage of application are described. For the extension of functional capabilities of a software solution the ways of development of are described.*

**Key words:** application, VBA, automation, calculation of forces and moments of the cutting.

Если рассматривать современное промышленное производство, то его невозможно представить без технологической оснастки (ТО). Стоимость новой продукции и сроки её появления на рынке во многом зависят от стоимости и длительности проектирования и изготовления ТО. Одной из наиболее сложных и трудоемких групп ТО являются станочные приспособления [0]. Поэтому важную роль играет их рациональное проектирование и изготовление.

На сегодняшний день в инженерной практике выработана типовая методика проектирования приспособлений, включающая в себя решение ряда задач. В перечень таких задач в общем случае входит расчет сил и моментов резания, возникающих при обработке заготовки в приспособлении. По результатам расчета происходит проектирование зажимного устройства, служащего для противодействия указанным силам и моментам резания и закрепления заготовки.

Справочная информация для проведения расчета содержится в специальной литературе [0]. В указанном источнике даны соответствующие формулы для расчета сил и моментов резания. В частности, при фрезеровании принято выделять главную составляющую силы резания – окружную силу  $P_z$  и крутящий момент на шпинделе  $M_{кр}$ . Другие составляющие силы резания, направленные вдоль двух оставшихся осей координат, находятся из таблицы, в которой дана их зависимость от окружной силы  $P_z$ . Расчетная формула для окружной силы  $P_z$ , Н:

$$P_z = \frac{10C_p t^x s_z^y B^z}{D^q n^w} K_{мп}, \quad (1)$$

где  $C_p$  – коэффициент, учитывающий условия обработки;

$t$  – глубина резания, мм;

$s_z$  – подача на зуб, мм/зуб;

$B$  – ширина фрезерования, мм;

$z$  – число зубьев фрезы;

$K_{\text{мр}}$  – коэффициент, учитывающий влияние качества материала на условия обработки;

$D$  – диаметр фрезы, мм;

$n$  – частота вращения фрезы, об/мин;

$x, y, n, q, w$  – показатели степени.

Значения выше указанных величин для частного случая в качестве примера приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Примеры значений параметров

Фрезы	Материал режущей части инструмента	Коэффициент и показатели степени					
		$C_p$	$x$	$y$	$n$	$q$	$w$
1	2	3	4	5	6	7	8
Торцовые	Твердый сплав	825	1,0	0,75	1,1	1,3	0,2
	Быстрорежущая сталь	82,5	0,95	0,8	1,1	1,1	0
Цилиндрические	Твердый сплав	101	0,88	0,75	1,0	0,87	0
	Быстрорежущая сталь	68,2	0,86	0,72	1,0	0,86	0
Дисковые, прорезные и отрезные	Твердый сплав	261	0,9	0,8	1,1	1,1	0,1
	Быстрорежущая сталь	68,2	0,86	0,72	1,0	0,86	0
Концевые	Твердый сплав	12,5	0,85	0,75	1,0	0,73	-0,13
	Быстрорежущая сталь	68,2	0,86	0,72	1,0	0,86	0
Фасонные и угловые	Быстрорежущая сталь	47	0,86	0,72	0,1	0,86	0

В таблице 1 приведены значения коэффициента  $C_p$ , учитывающего условия обработки, и показателей степени для одного из видов обрабатываемых материалов (конструкционной углеродистой стали с  $\sigma_B = 750$  МПа).

Значение коэффициента, учитывающего влияние качества материала на условия обработки,  $K_p$  также определяют по справочным таблицам.

Параметры режимов резания  $t$ ,  $s_z$  и  $n$  определяют одним из нескольких возможных путей: выбирают уже определенные заранее значения из технологической документации, рассчитывают с помощью одной из систем автоматизированного проектирования (САПР) для разработки технологических процессов (например, система Вертикаль компании Аскон), либо рассчитывают их по формулам и табличным данным, содержащимся в рассматриваемой справочной литературе.

Обобщая вышеизложенное, отметим, что традиционный расчет сил и моментов резания заключается в трудоемком поиске по таблицам справочной литературы всех необходимых исходных данных и последовательном вычислении требуемых величин по нескольким формулам.

Следует отметить, что указанная область обладает высокой степенью формализации и, следовательно, для нее возможна эффективная автоматизация расчетов. Необходимость этого может возникнуть как при традиционном проектировании приспособления с использованием инструментов универсальных САПР, так и при автоматизированном проектировании в специализированном приложении, ориентированном, например, на определенный класс приспособлений.

Важной функциональной возможностью многих современных универсальных САПР являются встроенные среды разработки пользовательских приложений. В качестве примера можно привести среду VBA программного продукта SolidWorks 2009. Эти среды основаны на эффективных технологиях разработки программ, что дает возможность пользователю

достаточно продуктивно разрабатывать необходимые ему приложения или ставить задачу разработки специалистам в области информационных технологий.

Таким образом, существуют предпосылки для разработки программного продукта, предназначенного для проведения расчета сил и моментов резания.

Исходя из указанных предпосылок, в рамках выполнения бакалаврской работы на кафедре «Технология приборостроения» Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики было разработано приложение для выполнения таких расчетов. Основной целью работы было создание опытного программного продукта с автоматизацией расчетов для некоторого круга задач.

Приложение основано на методике выполнения расчетов, содержащейся в [0]. Исходными данными для расчета являются все необходимые параметры, выбираемые при традиционном расчете из соответствующих таблиц (например, материал заготовки, диаметр фрезы  $D$  и др.) Значения конечных расчетных величин выводятся пользователю на экран в полях вывода результата. Приложение разработано в среде VBA системы SolidWorks 2009. Область применения приложения – расчет сил и моментов резания для тонкого точения и растачивания, а также для чернового фрезерования торцевыми, цилиндрическими и дисковыми фрезами из быстрорежущей стали и твердого сплава. Иными словами, была выполнена автоматизация расчетов для некоторых видов обработки, приведенных в [0].

Структура приложения представлена на рисунке 1. Формам, приведенным на рисунке 1, для удобства присвоены порядковые номера. На рисунках 2 и 3 представлен внешний вид интерфейса форм 1, 4 и 5. На рисунке 4 представлен внешний вид интерфейса формы 3 с выведенными результатами расчета.

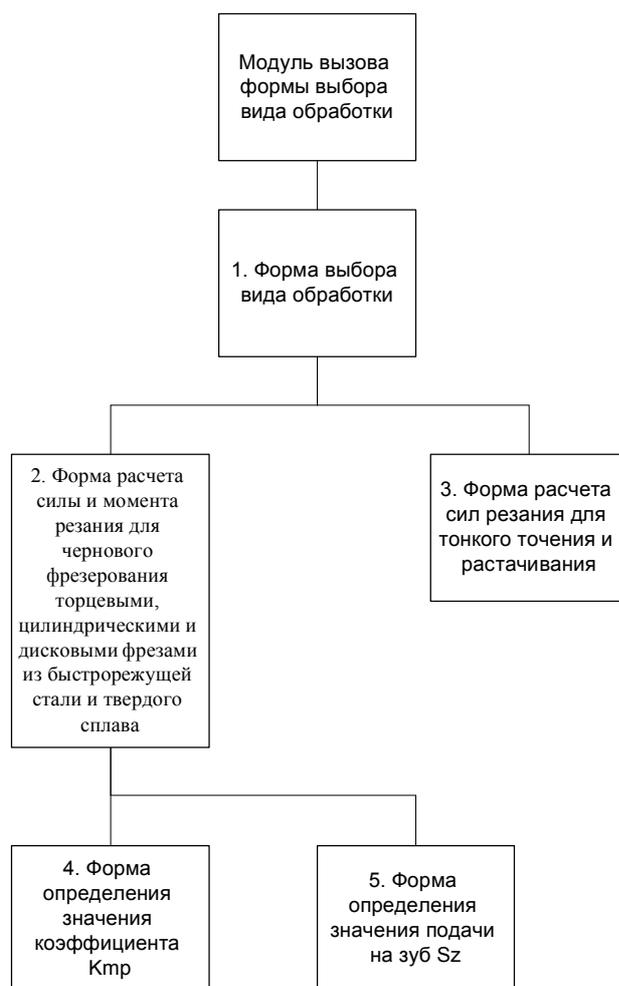


Рисунок 1 – Структура приложения

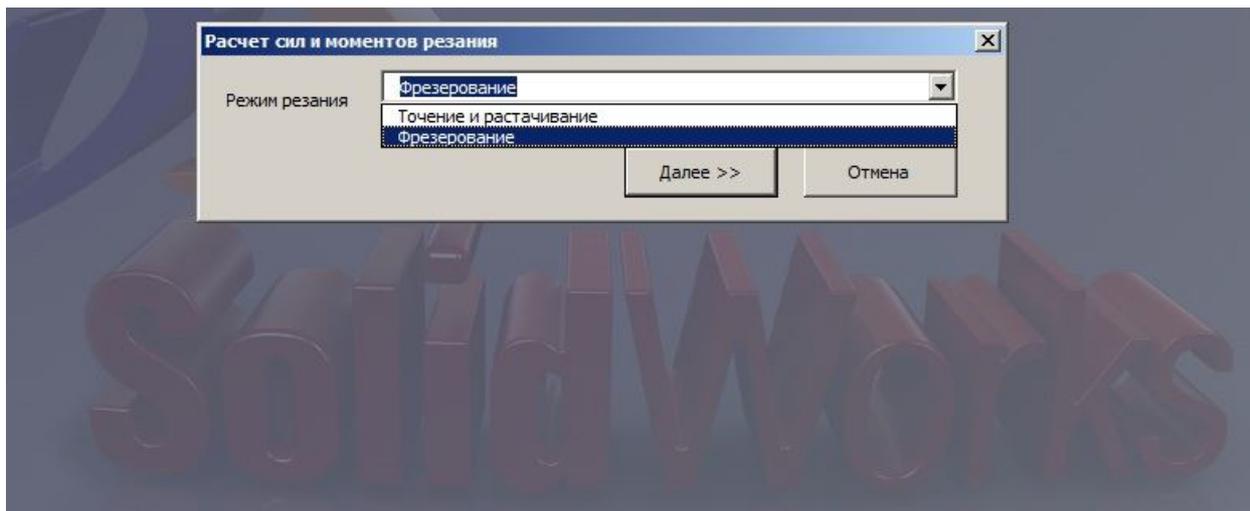


Рисунок 2 – Форма выбора вида обработки

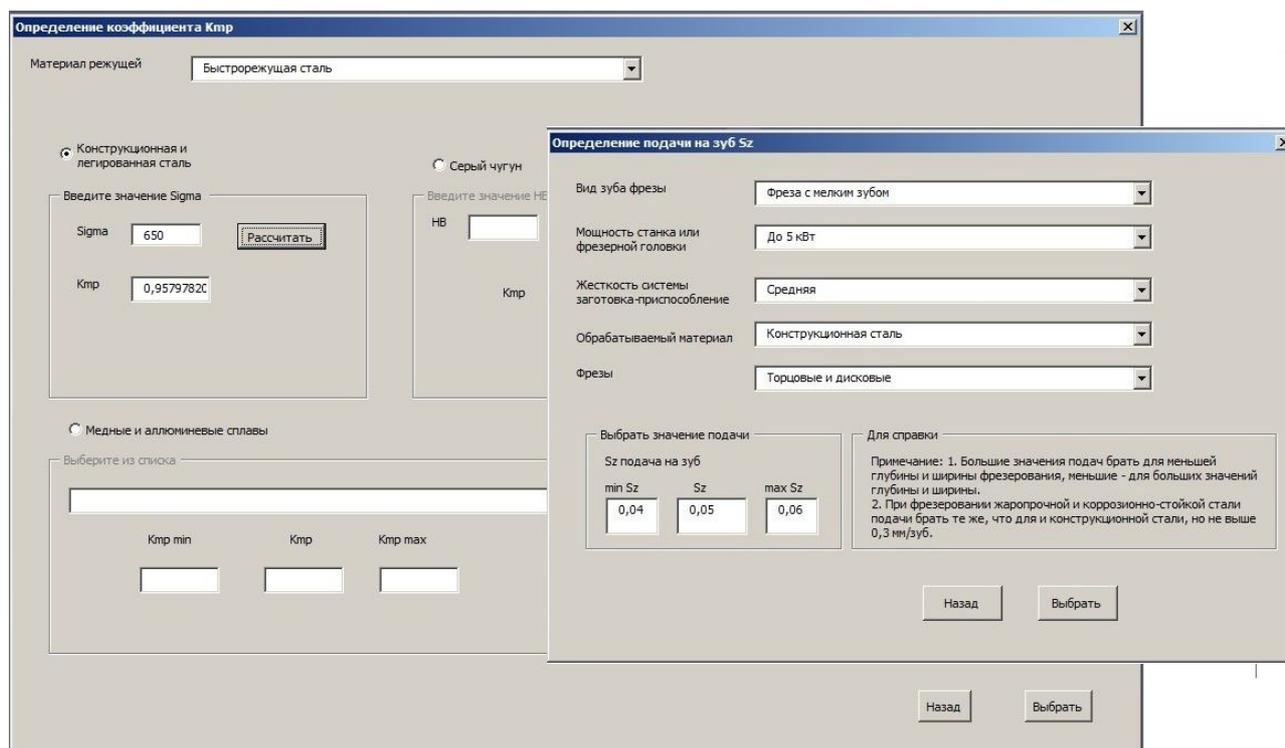


Рисунок 3 – Формы определения подачи на зуб  $S_z$  и коэффициента, учитывающего влияние качества материала на условия обработки,  $K_{MP}$

Расчет сил и моментов резания: Фрезерование

Вид фрезерования: Черновое фрезерование

Материал заготовки: Конструкционная углеродистая сталь

Тип фрезы: Торцовые

Материал рабочей части инструмента: Быстрорежущая сталь

**Составляющие**

D (диаметр фрезы, мм): 80

t (глубина резания, мм): 0,5

z (количество зубьев): 20

B (ширина резания, мм): 30

n (частота оборотов, об/мин): 3500

K<sub>mp</sub> (коэффициент): 0,9579

S<sub>z</sub> (подача на зуб, мм): 0,05

**Силы резания**

P<sub>z</sub> (окружная сила, Н): 253,2

M<sub>кр</sub> (момент резания, Н\*м): 101,28

<< Назад  Выход

Рисунок 4 – Форма расчета окружной силы  $P_z$  и момента резания  $M_{кр}$  при фрезеровании

В форме 1 пользователь выбирает вид обработки. В форме 2 происходит ввод всех необходимых исходных данных для выполнения расчетов по формуле (1). Определение величин  $s_z$  и  $K_{mp}$  выполняется с помощью форм 4 и 5. Для двух оставшихся параметров режимов резания ( $n$  и  $t$ ) предлагается ручной ввод, но их определение также возможно автоматизировать путем разработки дополнительных модулей.

Определение состава модулей и форм приложения основано, главным образом, на структуре данных, предложенной в справочной литературе. В приложении каждой из таблиц или группе однотипных таблиц поставлена в соответствие своя форма. Данные таблиц размещены в программном коде форм.

Оценивая выполненную работу, сделаем ряд выводов.

1. В результате работы была показана возможность автоматизировать расчеты сил и моментов резания с помощью приложения, разработанного в среде VBA системы SolidWorks 2009.

2. Данное приложение может быть использовано при проектировании приспособлений в качестве независимого модуля, а также быть интегрировано в специализированную САПР для проектирования приспособлений и автоматически передавать результаты расчета в модуль для автоматизированного проектирования зажимных устройств.

3. При разработке более масштабного приложения, позволяющего выполнять расчеты сил и моментов резания для всех видов обработки и расчеты режимов резания, в целях повышения эффективности программирования представляется целесообразным решение следующих задач:

– оценка возможности разработки унифицированного интерфейса пользовательских форм, общей методики работы с данными таблиц и построения рациональной структуры системы;

– обоснование способа хранения табличных данных для расчетов, обеспечивающего построение системы с рациональной структурой.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Корсаков, В.С. Основы конструирования приспособлений [Текст]: учебник для вузов / В.С. Корсаков – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1983 .– 277 с.

2. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2/ Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Сулова, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова .– 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение-1, 2001 .– 944 с. : ил.

#### **Серков Евгений Александрович**

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики

Ассистент кафедры «Технология приборостроения», аспирант 2 года обучения

г. Санкт-Петербург, пр. Кронверкский, д.49

Тел.: 8 (812) 233-58-98, моб. тел. 8-921-780-19-90

E-mail: [ifmo\\_serkov@mail.ru](mailto:ifmo_serkov@mail.ru)

#### **Васильев Евгений Юрьевич**

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики

Магистрант 1 курса кафедры «Технология приборостроения»

г. Санкт-Петербург, пр. Кронверкский, д.49

Тел.: 8 (812) 233-58-98

E-mail: [xronik11@mail.ru](mailto:xronik11@mail.ru)

**ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ**

УДК 539.375

С.М. ГУЛИЕВ

**ПОПЕРЕЧНЫЙ СДВИГ КУСОЧНО-ОДНОРОДНОЙ  
УПРУГОЙ СРЕДЫ С ТРЕЩИНАМИ**

*Дается решение задачи механики разрушения для перфорированного тела, ослабленного прямолинейными трещинами со связями между берегами в концевых зонах. Считается, что в круговые отверстия впаяны без натяга упругие шайбы из другого материала.*

**Ключевые слова:** перфорированное тело, упругие шайбы, поперечный сдвиг, трещины со связями между берегами

*The solution of a problem of mechanics of fracture for the punched body weakened by rectilinear cracks with bonds between faces in end zones is given. It is considered, that in circular holes elastic washers from other material are soldered in without a tightness.*

**Keywords:** the punched body, elastic washers, cross-section shear, cracks with interfacial bonds.

Рассматривается упругая плоскость  $D$ , ослабленная двоякопериодической системой круговых отверстий, имеющими радиусы  $\lambda$  ( $\lambda < 1$ ) и центры этих отверстий находятся в точках  $P_{m,n} = m\omega_1 + n\omega_2$  ( $m, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ),  $\omega_1 = 2$ ;  $\omega_2 = 2h_*e^{i\alpha}$ ,  $h_* > 0$ ,  $\text{Im}\omega_2 > 0$ .

В круговые отверстия впаяны без натяга упругие шайбы из другого материала. Упругие включения и плоскость считаются ослабленными прямолинейными трещинами со связями между берегами в концевых зонах. Считается, что длины трещин с концевыми зонами в плоскости и включении не одинаковые. Берега трещин сдвига вне концевых зон свободны от внешних усилий, а на перфорированное тело воздействуют напряжения  $\tau_{xy} = \tau_{xy}^\infty$ ,  $\sigma_x = 0$ ,  $\sigma_y = 0$  (сдвиг на бесконечности). Начало системы координат совмещен с геометрическим центром отверстия  $L_{0,0}$  в упругой плоскости.

Моделирование концевых областей трещин состоит в рассмотрении их как части трещин и в явном приложении к поверхностям трещин в концевых зонах сил сцепления, сдерживающих их раскрытие. Размеры концевых зон трещин считаются соизмеримыми по сравнению с длиной трещин. Взаимодействие берегов концевых зон трещин моделируется путем введения между берегами зоны предразрушения связей с заданной диаграммой деформирования. Физическая природа таких связей и размеры зон предразрушения зависят от вида материала. При действии внешней нагрузки на кусочно-однородное тело в связях, соединяющих берега зон предразрушения, возникают касательные усилия  $q_y(x)$ ,  $q_x(x)$  в плоскости и  $q_y^{(0)}(x)$  во включении соответственно. Эти напряжения заранее неизвестны и подлежат определению в процессе решения краевой задачи механики разрушения.

Рассматриваемая задача сводится к отысканию двух пар функций  $\Phi(z)$ ,  $\Psi(z)$  и  $\Phi_0(z)$ ,  $\Psi_0(z)$  комплексного переменного  $z = x + iy$ , аналитических в областях, занятых средой и шайбой, и удовлетворяющих граничным условиям [1]:

$$\begin{aligned} \Phi(\tau) + \overline{\Phi(\tau)} - [\overline{\tau}\Phi'(\tau) + \Psi(\tau)]e^{2i\theta} &= \Phi_0(\tau) + \overline{\Phi_0(\tau)} - [\overline{\tau}\Phi_0'(\tau) + \Psi_0(\tau)]e^{2i\theta} \\ - \chi \overline{\Phi(\tau)} + \Phi(\tau) - [\overline{\tau}\Phi'(\tau) + \Psi(\tau)]e^{2i\theta} &= \end{aligned}$$

$$= \frac{\mu}{\mu_0} \left\{ -\chi_0 \overline{\Phi_0(\tau)} + \Phi_0(\tau) - [\overline{\tau} \Phi_0'(\tau) + \Psi_0(\tau)] e^{2i\theta} \right\};$$

$$\Phi_0(t) + \overline{\Phi_0(t)} + t \overline{\Phi_0'(t)} + \overline{\Psi_0(t)} = q^0; \tag{1}$$

$$\Phi(t) + \overline{\Phi(t)} + t \overline{\Phi'(t)} + \overline{\Psi(t)} = q_1;$$

$$\Phi(t_1) + \overline{\Phi(t_1)} + t_1 \overline{\Phi'(t_1)} + \overline{\Psi(t_1)} = q_2.$$

Здесь  $q^0 = 0$  на свободных берегах трещины во включении;

$q^0 = q_y^{(0)}(x)$  на берегах концевых зон трещины во включении;

$q_1 = 0$  на свободных берегах трещин коллинеарных оси абсцисс;

$q_1 = q_y(x)$  на берегах концевых зон трещин коллинеарных оси абсцисс;

$q_2 = 0$  на берегах вне концевых трещин коллинеарных оси ординат;

$q_2 = q_x(x)$  на берегах концевых зон трещин коллинеарных оси ординат;

$\mu, \chi$  и  $\mu_0, \chi_0$  - модули сдвига и постоянная Мусхелишвили для плоскости и включения соответственно.

Основные соотношения поставленной задачи необходимо дополнить соотношениями, связывающими раскрытие берегов концевых зон и усилия в связях. Без потери общности эти соотношения представим в виде

$$u^+(x, 0) - u^-(x, 0) = C(x, q_y(x)) q_y(x),$$

$$u^+(0, y) - u^-(0, y) = C(y, q_x(y)) q_x(y), \tag{2}$$

$$u_0^+(x, 0) - u_0^-(x, 0) = C_0(x, q_y^0(x)) q_y^0(x),$$

где функции  $C(x, q_y(x))$ ,  $C(y, q_x(y))$  и  $C_0(x, q_y^0(x))$  можно рассматривать как эффективные податливости связей.

Решение краевой задачи (1) ищем в виде

$$\Phi_0(z) = \Phi_{01}(z) + \Phi_{02}(z); \quad \Psi_0(z) = \Psi_{01}(z) + \Psi_{02}(z) \tag{3}$$

$$\Phi_{01}(z) = \frac{1}{2\pi i} \int_{-\ell}^{\ell} \frac{g_0(t_1)}{t_1 - z} dt_1; \quad \Phi_{02}(z) = i \sum_{k=0}^{\infty} a_{2k} z^{2k} \tag{4}$$

$$\Psi_{01}(z) = \frac{1}{2\pi i} \int_{-\ell}^{\ell} \left[ \frac{g_0(t_1)}{t_1 - z} - \frac{t_1 g_0(t_1)}{(t_1 - z)^2} \right] dt_1, \quad \Psi_{02}(z) = i \sum_{k=0}^{\infty} b_{2k} z^{2k}$$

$$\Phi(z) = \Phi_1(z) + \Phi_2(z) + \Phi_3(z) \tag{5}$$

$$\Psi(z) = \Psi_1(z) + \Psi_2(z) + \Psi_3(z)$$

$$\Phi_1(z) = i\tau_{xy}^{\infty} + i \sum_{k=0}^{\infty} \alpha_{2k+2} \frac{\lambda^{2k+2} \gamma^{(2k)}(z)}{(2k+1)!} \tag{6}$$

$$\Psi_1(z) = i\tau_{xy}^{\infty} + i \sum_{k=0}^{\infty} \beta_{2k+2} \frac{\lambda^{2k+2} \gamma^{(2k)}(z)}{(2k+1)!} - i \sum_{k=0}^{\infty} \alpha_{2k+2} \frac{\lambda^{2k+2} Q^{(2k+1)}(z)}{(2k+1)!}$$

$$\Phi_2(z) = \frac{1}{2\pi} \int_{L_1} g(x) \zeta(x-z) dx + A' \tag{7}$$

$$\Psi_2(z) = \frac{1}{2\pi} \int_{L_1} [\zeta(x-z) + Q(x-z) - x\gamma(x-z)] g(x) dx + B'$$

$$\Phi_3(z) = \frac{i}{2\pi} \int_{L_2} \zeta(it_1 - z) g_1(t_1) dt_1 + A'' \tag{8}$$

$$\Psi_3(z) = -\frac{i}{2\pi} \int_{L_2} \left\{ \zeta(it_1 - z) \overline{g_1(t_1)} - [Q(it_1 - z) + it_1 \gamma(it_1 - z)] g_1(t_1) \right\} dt_1 + B''$$

Здесь  $g(t)$ ,  $g_1(t_1)$ ,  $g_0(t)$  - искомые функции, интегралы в (7) и (8) берутся по линии  $L_1 = \{[-h, -a] + [a, h]\}$ ;  $L_2 = \{[-r, -b] + [b, r]\}$ .

Из условия двоякопериодичности поля напряжений, а также постоянства главного вектора всех сил, действующих на дугу, которая соединяет две конгруэнтные точки в  $D$ , получим следующие соотношения

$$(A + \overline{A})\omega_k + \overline{B}'\overline{\omega}_k - \overline{B}''\overline{\omega}_k = (\delta_k + \overline{\delta}_k)a + (\gamma_k + \overline{\delta}_k)a + (\overline{\delta}_k - \delta_k)b + (\overline{\delta}_k - \overline{\gamma}_k)\overline{b} + \beta_2 \lambda^2 \overline{\delta}_k + \alpha_2 \lambda^2 (\delta_k + \overline{\gamma}_k) \quad (k=1, 2) \quad (9)$$

$$a = -\frac{1}{2\pi} \int_{L_1} t g(t) dt; \quad b = -\frac{1}{2\pi} \int_{L_2} t_1 g_1(t_1) dt_1;$$

$$A = A' + A''; \quad B = B' + B''$$

К основным представлениям следует добавить дополнительные условия, вытекающие из физического смысла задачи

$$\int_{-\ell}^{\ell} g_0(t_1) dt_1 = 0; \quad \int_{-h}^{-a} g(t) dt = 0; \quad \int_a^h g(t) dt = 0 \quad (10)$$

$$\int_{-r}^{-b} g_1(t_1) dt_1 = 0; \quad \int_b^r g_1(t_1) dt_1 = 0$$

Применяя метод степенных рядов [1], получим соотношения, определяющие коэффициенты  $a_{2k}$ ,  $b_{2k}$  функций  $\Phi_0(z)$ ,  $\Psi_0(z)$ . Неизвестная функция  $g_0(x)$  должна быть определена из краевого условия (1). Подставляя (3) – (4) в (1), получим сингулярное интегральное уравнение, которое после замены переменных и использования квадратурных формул [2], заменяется конечной системой алгебраических уравнений. Для определения неизвестных коэффициентов  $\alpha_{2k}$ ,  $\beta_{2k}$  функций  $\Phi_1(z)$  и  $\Psi_1(z)$  рассмотрим решение [3] упругой задачи для плоскости, причем величины  $A_{2k}$  считаем пока заданными ( $A_{2k}$  найдем ниже).

Используя полученные соотношения и выполняя [4] некоторые преобразования, получаем формулы, определяющие коэффициенты  $\alpha_{2k}$ ,  $\beta_{2k}$ ,  $A_0$ ,  $A_{-2k}$  через величины  $A_{2k}$ , а также бесконечную систему линейных алгебраических уравнений относительно  $A_{2k}$ :

$$i\alpha_{2j+2} = \frac{1 - \mu/\mu_0}{1 + \chi} A_{2j+2}, \quad (11)$$

$$A_{-2j} = \frac{\mu_0}{\mu_0 + \chi_0/\mu} (C_{-2j}^* - C_{-2j}) - \frac{(1 + \chi_0)\mu}{\mu_0 - \mu\chi_0} B_{-2j} + \frac{\mu_0 - \mu}{\mu_0 + \chi_0\mu} \sum_{k=0}^{\infty} \lambda^{2j+2k+2} r_{j,k} A_{2k+2},$$

$$A_0 = \sum_{k=0}^{\infty} e_{0,k} \lambda^{2k+2} A_{2k+2} + ie_0 + e_1,$$

$$A_{2j+2} = \sum_{k=0}^{\infty} D_{j,k} A_{2k+2} + T_j \quad (j = 0, 1, 2, \dots).$$

Теперь подставив (5) – (7) в краевое условие (1), после некоторых преобразований получим систему двух сингулярных интегральных уравнений относительно искомой функций  $g(x)$  и  $g_1(y)$

$$\frac{1}{2\pi} \int_{L_1} g(t) K(t-x) dt + H(x) = q_1(x); \quad (12)$$

$$K(x) = 3\zeta(x) + Q(x) - x\gamma(x);$$

$$H(x) = A' + \overline{A}' + \overline{B}' + x\Phi'_s(x) + \Psi'_s(x);$$

$$\begin{aligned} \Phi_s(x) &= \Phi_1(x) + \Phi_3(x); & \Psi_s(x) &= \Psi_1(x) + \Psi_3(x); \\ \frac{1}{2\pi} \int_{L_2} \{ & g_1(t_1) [i\zeta(it-iy) - i\zeta(\overline{it-iy})] + \\ & + \overline{g_1(t_1)} [iQ(it-iy) + (it-iy)\gamma(\overline{it-iy}) - i\zeta(\overline{it-iy})] \} dt_1 + N(y) = q_2(x), \\ N(y) &= iy\overline{\Phi_0'(iy)} + \overline{\Psi_0'(iy)} + A'' + \overline{A''} + \overline{B''}. \end{aligned} \quad (13)$$

$$\Phi_0(z) = \Phi_1(z) + \Phi_2(z); \quad \Psi_0(z) = \Psi_1(z) + \Psi_2(z).$$

Используя разложение [4] функций  $\zeta(z)$ ,  $\gamma(z)$ ,  $Q(z)$ , замену переменных, а также квадратурные формулы [2], интегральные уравнения сведем к двум конечным алгебраическим системам относительно приближенных значений  $p_k^0$ ,  $R_v^0$  искомой функции в точках по чебышевским узлам

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n a_{m,k} p_k^0 + \frac{1}{2} H_*(\eta_m) &= q_1(\eta_m) & (m=1, 2, \dots, n-1), \\ \sum_{v=1}^n b_{m,v} R_v^0 + \frac{1}{2} N_*(\eta_m) &= q_2(\eta_m). \end{aligned} \quad (14)$$

К полученной системе уравнений (14) добавляются дополнительные уравнения (10), записанные в дискретной форме

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n \frac{p_k^0}{\sqrt{\frac{1}{2}(1-\lambda_1^2)(\tau_k+1)+\lambda_1^2}} &= 0, \\ \sum_{v=1}^n \frac{R_v^0}{\sqrt{\frac{1}{2}(1-\lambda_2^2)(\tau_v+1)+\lambda_2^2}} &= 0. \end{aligned} \quad (15)$$

В правые части полученных алгебраических систем входят неизвестные значения напряжений  $q_y(\eta_m)$ ,  $q_x(\eta_m)$  и  $q_y^0(\eta_m)$  в узловых точках, принадлежащих конечным зонам предразрушения. Неизвестные значения напряжений в связях, возникающие на берегах зон предразрушения, определяются из дополнительных условий (2). Используя полученное решение, соотношения (2) можно записать в виде

$$\begin{aligned} g_0(x) &= \frac{2\mu_0}{1+\chi_0} \frac{d}{dx} [C(x, q_y^0(x)) q_y^0(x)]; \\ g(x) &= \frac{2\mu}{1+\chi} \frac{d}{dx} [C(x, q_y(x)) q_y(x)]; \\ g_1(x) &= \frac{2\mu}{1+\chi} \frac{d}{dy} [C(y, q_x(y)) q_x(y)]. \end{aligned} \quad (16)$$

Эти уравнения служат для определения усилий в связях. Для построения недостающих уравнений потребуем выполнения условий (16) в узловых точках, содержащихся в конечных зонах. При этом используется метод конечных разностей.

Для замкнутости полученных алгебраических уравнений не хватает пяти уравнений, определяющих размеры конечных зон трещин. Так как решение интегральных уравнений ищется в классе всюду ограниченных функций (напряжений), то к полученным системам необходимо добавить условия ограниченности напряжений на концах конечных зон трещин. Эти условия имеют вид

$$\sum_{k=1}^M (-1)^k p_{0k}^0 \operatorname{ctg} \frac{\theta_k}{2} = 0;$$

$$\begin{aligned}
\sum_{k=1}^M (-1)^{k+M} p_k^0 \operatorname{tg} \frac{\theta_k}{2} &= 0; \\
\sum_{k=1}^M (-1)^k p_k^0 \operatorname{ctg} \frac{\theta_k}{2} &= 0; \\
\sum_{v=1}^M (-1)^{v+M} R_v \operatorname{tg} \frac{\theta_v}{2} &= 0; \\
\sum_{v=1}^M (-1)^v R_v^0 \operatorname{ctg} \frac{\theta_v}{2} &= 0.
\end{aligned} \tag{17}$$

Так как размеры концевых зон трещин неизвестны, объединенная алгебраическая система уравнений является нелинейной даже при линейных связях. Для ее решения используется метод последовательных приближений [2]. В каждом приближении объединенная алгебраическая система решалась методом Гаусса с выбором главного элемента. В случае нелинейного закона деформирования связей при определении усилий в зонах предразрушения используется итерационный метод, подобный методу упругих решений [5]. В численных расчетах полагалось  $N = n = 30$ , что соответствует разбиению интервала интегрирования на 30 чебышевских узлов. Расчеты выполнены для правильных нормированных сеток центров отверстий. Исследовались случаи расположения отверстий в вершинах треугольной ( $h_* = 1, \alpha = \pi/3$ ) и квадратной ( $h_* = 1, \alpha = \pi/2$ ) сеток.

Для определения предельного состояния, при котором происходит рост трещин, используется условие критического раскрытия трещины. Используя полученное решение, условиями, определяющими предельную внешнюю нагрузку, являются следующие

$$\begin{aligned}
C(\lambda, q_x^0(\lambda)) q_x^0(\lambda) &= \delta_c^0, \\
C(\lambda_*, q_y(\lambda_*)) q_y(\lambda_*) &= \delta_c, \\
C(\lambda_*^1, q_x(\lambda_*^1)) q_x(\lambda_*^1) &= \delta_c,
\end{aligned} \tag{18}$$

где  $\delta_c^0$  и  $\delta_c$  – характеристики трещиностойкости материала включения и плоскости, соответственно;

$\lambda$ ,  $\lambda_*$  и  $\lambda_*^1$  – координаты точек у основания зон предразрушения для включения и плоскости соответственно.

Анализ предельно равновесного состояния кусочно-однородной среды, при котором происходит рост трещины, сводится к параметрическому исследованию объединенной алгебраической системы и критерия роста трещин (18) при различных законах деформирования связей, упругих постоянных материалов и геометрических характеристиках перфорированного тела.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мухелишвили, Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости [Текст] - М.: Наука, 1966. – 707 с.
2. Мирсалимов, В.М. Неодномерные упругопластические задачи [Текст] - М.: Наука, 1987. – 256 с.
3. Мирсалимов, В.М. Разрушение упругих и упругопластических тел с трещинами [Текст] - Баку: Элм, 1984. – 124 с.
4. Григолюк, Э.И. Перфорированные пластины и оболочки [Текст] / Э.И. Григолюк, Л.А. Фильштинский. - М.: Наука, 1970. – 556 с.
5. Ильюшин А.А. Пластичность [Текст] - М.; Л.: Гостехтеоретиздат, 1948. – 376 с.

**Гулиев Салег Мирзахан оглы**  
к.т.н., доцент Азербайджанского  
государственного педагогического  
университета  
тел.: (+99412) 472-38-96  
E-mail: [salehm@rambler.ru](mailto:salehm@rambler.ru)

А.В. БОБРОВ

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СПИНОВЫХ ПОЛЕЙ МАТЕРИАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ – ФАКТОР, КОНТРОЛИРУЮЩИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЕ МНОГОКЛЕТОЧНЫХ ЖИВЫХ ОРГАНИЗМОВ

*В основе механизма образования сложных многоклеточных организмов лежит экспериментально обнаруженный феномен информационного взаимодействия спиновых полей материальных объектов. К этому выводу автор приходит на основании совпадения основных признаков, характеризующих феномены информационного взаимодействия спиновых полей материальных объектов и известного в биологии феномена Индукции, контролирующего процессы детерминации и дифференцировки клеток эмбриона, обуславливающих возникновение сложных многоклеточных организмов. Обнаружение природы феномена Индукции закрывает многочисленные "белые пятна в биологии, в том числе в нейрофизиологической науке,*

**Ключевые слова:** индукция, спиновые поля, многоклеточные организмы, органогенеза, детерминирование, дифференцировка фактор, информационное воздействие

*In the base of mechanism of formation the complicated many-celled organisms is the experimental founded phenomenon of information interaction of spin-fields of material objects. The autor make this conclusion of the base of coincidence the bases signs, characterizing the phenomenons of information interaction of the spin-fields of material objects and known in the biology as a phenomenon induction, controlling the processes of determination and differential of celled embrion, calling the origin of many celled. The discovery of native of phenomenon induction closes many "white stain" in the biology.*

**Key words:** induction, spin-fields, multicellular organism, organogenesis, determination, factor differentiation, informational influence

### ЯВЛЕНИЕ ИНДУКЦИИ

В 20-м столетии в экспериментах физиологов, хорошо знакомых с двумя активными факторами, определяющими развитие и жизнедеятельность клеток – рецессией генов и метаболизмом, – начали накапливаться данные, свидетельствующие о существовании ещё одного фактора, контролирующего процессы детерминирования и дифференцировки клеток эмбриона на начальной стадии органогенеза. На более поздних стадиях этот фактор участвует также в формировании и поддержании жизнедеятельности организма. Биологи, вследствие отсутствия каких либо представлений о его природе и за неимением ничего лучшего, присвоили ему название Индукция [1].

Исследования показали: будущая специализация клеток определяется задолго до появления внешних признаков дифференцировки – еще на стадии детерминации клетки, когда в ней происходят изменения, отличающие её и её потомков от других клеток эмбриона и предопределяющие их стойкое развитие по специализированному пути. В общем случае фактор индукции, обуславливающий детерминацию клетки-предшественника, определяется отложившимися в "памяти" клетки её пространственным расположением и окружающими её структурами в различные периоды развития эмбриона.

Дифференцированные клетка-предшественница и клетки, возникшие в результате её последующего деления сохраняют общий – специфический для данного организма геном с заданной для каждой из них программой экспрессии генов, обуславливающей дальнейшее развитие определенной ткани или органа.

Итак, *возникновение сложных многоклеточных организмов обусловлено существованием фактора индукции, обуславливающего возникновение и развитие различных тканей и органов и последующее сохранение взрослого организма.*

## ЯВЛЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО НЕЛОКАЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СПИНОВЫХ ПОЛЕЙ МАТЕРИАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

. Все материальные объекты, в том числе биологические, и входящие в них компоненты обладают собственными спиновыми полями, несущими информацию о структуре их спиновой системы. Спиновая система определяет свойства вещества материального объекта и протекающие при его участии процессы – физические, физико-химические и биологические. Факторами, определяющими протекания процессов, являются форма объекта и структура его вещества.

Главным отличительным признаком, объединяющим процессы Индукции и взаимодействия спиновых полей, является изменение свойств материальных объектов. При этом, однако, местоположение самих объектов, не меняется [2].

Сравнение признаков, характеризующих феномены Индукции и взаимодействия спиновых полей, позволяет заключить, что **в основе феномена Индукции лежат информационные взаимодействия спиновых полей исследуемых объектов.**

Согласно [2], спиновые поля материальных объектов, расположенных в "ближней зоне" на расстоянии до 0,8-1 м друг от друга, взаимодействуют непосредственно. Эффективность информационного взаимодействия увеличивается нелинейно с уменьшением расстояния между ними. Роль этого фактора резко возрастает при исследовании взаимовлияния биологических объектов, например, в ЦНС, где расстояние между двумя клетками может составлять всего несколько десятков нм.

Реакция на взаимовлияние спиновых полей биологических объектов возникает, например, при взаимодействии между клетками, между клеткой и внеклеточным матриксом *in vivo*, между клетками и подложкой, или стенками сосуда *in vitro* и т.д. Особую значимость этот фактор приобретает на начальном этапе образования многоклеточных организмов – в процессах идентификации и дифференцировки клеток. Здесь фактору взаимодействия спиновых полей отведена ведущая роль в образовании сложных многоклеточных организмов.

С целью оценки значимости участия полевого информационного фактора в решении проблем фундаментальной биологии ниже приведена цитата из источника [1] (с. 111)

### ИНДУКЦИОННЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ РАЗВИТИИ ЭПИТЕЛИЕВ

Многие органы состоят из двух или большего числа различных клеточных популяций, которые возникли независимо друг от друга, а позже объединились и стали взаимодействовать между собой. Дифференцировка клеток в одной ткани может определяться влиянием другой ткани, тесно контактирующей с первой, и **такое явление называют индукцией.** Подобного рода, взаимодействия играют особенно важную роль в развитии эпителиев у позвоночных животных.

**Мезодерма индуцирует образование различных частей нервной трубки из Эктодермы.** Как показали эксперименты на амфибиях, проведенные в первые десятилетия 20-го века, образование нервных структур из эктодермы обусловлено индуцирующим воздействием подстилающей мезодермы. Если на стадии гастролы из участка, расположенного под будущей нервной трубкой одного зародыша, взять кусочек мезодермы и имплантировать его под эктодерму другого зародыша на брюшной стороне, то эктодерма здесь начнет утолщаться и сворачиваться, образуя в этом необычном месте отрезок нервной трубки. При этом особенности данного отрезка будут зависеть от происхождения трансплантированной мезодермы. Если мезодерма была взята из переднего участка, из эктодермы образуется часть головного мозга; мезодерма из заднего участка вызовет образование отрезка спинного мозга. Это позволяет предполагать, что клетки эктодермы приобретают определенные позиционные значения в зависимости от позиционных значений подстилающих клеток мезодермы. На более поздних стадиях развития дифференцировка многих эпителиальных структур тоже в основном контролируется подстилающей мезенхимой. Именно таким образом из компонентов эпителия и мезенхимы образуются кожа и кишка со всеми их специализированными элементами и производными. Мы рассмотрим сначала образование производных кожи.

**Характер и распределение производных эпидермиса контролируются дермой.** Кожа состоит из двух слоев - эпидермиса (эпителий, образующийся из эктодермы) и дермы (соединительная ткань, образуемая главным образом мезодермой). Из эпидермиса формируются кератинизированные придатки кожи (волосы, перья, чешуя и когти), а также многие железы. Для разных участков тела характерны различные виды кератинизированных производных: на спине и крыльях у цыпленка образуются перья, а на ногах чешуйки. При этом на спине основания перьев располагаются в виде упорядоченной гексагональной структуры и образуют ясно выраженные цепочки.

Если у куриного эмбриона взять эпидермис с ноги, где он позже образует чешуйки, и объединить с дермой спины - области, где в норме вырастают перья, то из него вместо чешуек будут формироваться перья.

По-видимому, сигнал из дермы, вызывающий образование перьев из эпидермиса у цыпленка, сходен с сигналом, вызывающим образование волос у мыши. Если объединить дерму с того участка мышинового эмбриона, где должны будут расти вибриссы, с эмбриональным эпидермисом цыпленка, то этот эпидермис начинает формировать зачатки перьев, расположенные наподобие вибрисс мыши.

**Эпителий погружается в мезенхиму и образует протоки желез.** Большая часть желез формируется путем врастания эпителия в подстилающую мезенхиму. Каждый тип желез характеризуется определенной геометрической формой и химизмом секреции. Например, молочная железа возникает в виде эктодермального зачатка, который погружается в мезенхиму и неоднократно разветвляется, образуя «дерево» протоков; на концах протоков появляются особые эпителиальные клетки, которые после соответствующей гормональной стимуляции начнут выделять молоко,- единственные клетки тела, способные выполнять эту функцию. Для развития железы необходимы индуцирующие сигналы от клеток мезенхимы, однако интерпретация этих сигналов зависит также от природы реагирующего эпителия. На ранних стадиях образования различных желез можно разделять будущие эпителиальные и мезенхимные элементы этих желез и снова объединять их в различных комбинациях *in vitro*. Такой подход позволяет изучать межклеточные взаимодействия, контролирующие развитие желез. При объединении эпителия молочной железы с мезенхимой слюнной железы образующиеся протоки ветвятся по типу слюнной железы. Однако если такую железу подвергнуть гормональному воздействию (путем имплантации беременной самке), то эпителиальные клетки, выстилающие концы протоков, начинают вырабатывать молоко, т.е. секрет, соответствующий их происхождению. По-видимому, в данном случае мезенхима контролирует геометрическую форму железы, а химия секреции к этому моменту уже предопределена характером клеток, образующих ранний эпителиальный зачаток. В иных случаях дело может обстоять иначе".

В заключение отметим: приведенные материалы, свидетельствующие о ведущей роли феномена взаимодействия спиновых полей в организации процесса возникновения сложных многоклеточных организмов, закрывает многочисленные "белые поля" в биологии, в том числе в нейрофизиологической науке,

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Албертс, Б. Молекулярная биология клетки [Текст]: в 3 т. / Б. Албертс., Ц. Брей и др. – М.: Мир, 1987, - 111 с.
2. Бобров, А. В. Взаимодействие спиновых полей материальных объектов [Текст] / А.В. Бобров // Сознание и физическая реальность" – М.: Фолиум. – 2010. – С. 37

**Бобров Андрей Владимирович**

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Кандидат биологических наук, доцент кафедры "Приборостроение, метрология и сертификация"

Телефон: (4862)41-98-76

E-mail: [pms35@ostu.ru](mailto:pms35@ostu.ru)

Л.А. САВИН, С.В. МАЙОРОВ, В.И. ЖУРАВЛЕВ, А.А. СТРУЧКОВ

## КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*В статье впервые рассмотрен подход на основе метода конечных элементов к решению задачи анализа напряженно-деформированного состояния нагретой заданным неоднородным полем температур, применительно к многослойным противопожарным конструкциям. Даны базовые соотношения для получения разрешающей системы линейных алгебраических уравнений.*

**Ключевые слова:** Напряженно-деформированное состояние многослойной конструкции, метод конечных элементов.

*In article the approach on the basis of a method of final elements to the decision of a problem of the analysis of the is intense-deformed condition warm by the set non-uniform field of temperatures, with reference to multilayered fire-prevention designs for the first time is considered. Base parities for reception of resolving system of the linear algebraic equations are given.*

**Keywords:** Stress-strain state of a multilayered structure, finite element method.

Анализ напряженно-деформированного состояния нагретых многослойных конструкций является важной задачей при проектировании противопожарных конструкций [1]. Для расчета таких объектов авторами предложена математическая модель, аналитическое решение которой на практике громоздко и затруднительно. Альтернативным вариантом решения задачи является использование численных методов, из их огромного числа, существующего на сегодняшний день, был выбран один из наиболее зарекомендовавших себя для решения подобных задач метод конечных элементов (МКЭ).

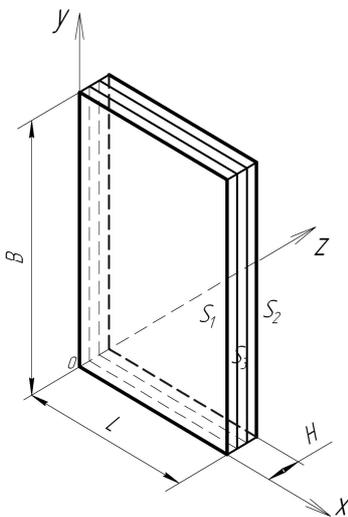


Рисунок 1 – Многослойный массив

Кратко сформулируем задачу: дан  $n$ -слойный массив конечных размеров ( $B$  – ширина,  $L$  – высота,  $H$  – толщина), зашпеленный по торцам (рисунок 1). Материалы слоев толщиной  $h_i$  считаются однородными и изотропными, а их свойства характеризуются следующими постоянными:  $E_i$  – модуль Юнга;  $\nu_i$  – коэффициент Пуассона;  $\alpha_i$  – коэффициент объемного теплового расширения ( $i$  – индекс, соответствующий номеру слоя). По всему объему массива задано распределенное поле температур  $T(x, y, z)$ , а также температура массива  $T_0$ , соответствующая недеформированному состоянию. Требуется определить поля перемещений, напряжений и деформаций вызванные нагревом.

Для определения связей между компонентами тензоров напряжений и деформаций воспользуемся следующими соотношениями известными из теории упругости [2, 3]:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon^e\}, \quad (1)$$

где  $\{\sigma\} = [\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z \ \sigma_{xy} \ \sigma_{yz} \ \sigma_{xz}]^T$  – вектор напряжений, составленный из компонентов тензора (рисунок 2);  $[D]$  – матрица упругости;  $\{\varepsilon^e\} = \{\varepsilon\} - \{\varepsilon^T\}$  – вектор деформаций, вызываемых механическими напряжениями,  $\{\varepsilon\} = [\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \varepsilon_{xy} \ \varepsilon_{yz} \ \varepsilon_{xz}]$  – вектор полных деформаций, составленный из компонентов тензора полных деформаций, аналогичного тензору напряжений,  $\{\varepsilon^T\}$  – вектор температурных деформаций.

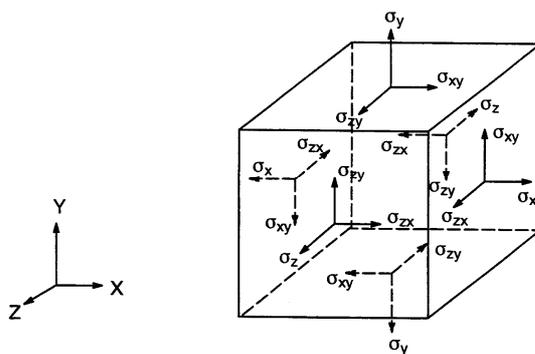


Рисунок 2 – Вектор напряжений

Матрица упругости для изотропного материала будет выглядеть следующим образом:

$$[D] = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$ ;

$$\mu = G = \frac{E}{2(1 + \nu)},$$

$G$  – модуль сдвига;

$E$  – модуль упругости;

$\nu$  – коэффициент Пуассона (здесь и далее индекс « $i$ » номера слоя для простоты опущен).

Температурные деформации определяются следующим соотношением:

$$\{\varepsilon^T\} = \Delta T [\alpha_x \quad \alpha_y \quad \alpha_z \quad 0 \quad 0 \quad 0], \quad (3)$$

где  $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$  – коэффициенты температурного расширения вдоль осей  $x, y$  и  $z$  (в нашем случае для изотропного тела примем  $\alpha_x = \alpha_y = \alpha_z = \alpha$ );  $\Delta T = T(x, y, z) - T_0$ .

Используя все выше сказанное, можно записать выражение для определения суммарных деформаций:

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon^T\} + [D]^{-1} \{\sigma\}, \quad (4)$$

где  $[D]^{-1}$  – матрица обратная  $[D]$ .

Компоненты тензора деформаций и компоненты  $(u_x, u_y, u_z)$  вектора перемещений связаны между собой соотношениями Коши [3]:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x}; \quad \varepsilon_{xy} = \left( \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right); \\ \varepsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y}; \quad \varepsilon_{xz} = \left( \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right); \\ \varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z}; \quad \varepsilon_{yz} = \left( \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right). \end{cases} \quad (5)$$

Решение поставленной задачи удобно решать относительно компонент вектора перемещений. Метод конечных элементов основан на идее аппроксимации непрерывных функций (компонент вектора перемещений) дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей, называемых конечными элементами [5 – 7]. Исследуемая геометрическая область разбивается на элементы таким образом, чтобы на каждом из них неизвестная функция аппроксимировалась пробной функцией (как правило, полиномом). Причем эти пробные функции должны удовлетворять граничным условиям непрерывности, совпадающим с граничными условиями, налагаемыми самой задачей. Выбор для каждого элемента аппроксимирующей функции будет определять соответствующий тип элемента. Для этого геометрическая область разбивается на конечные элементы, представляющие собой прямоугольные параллелепипеды (рисунок 3,а).

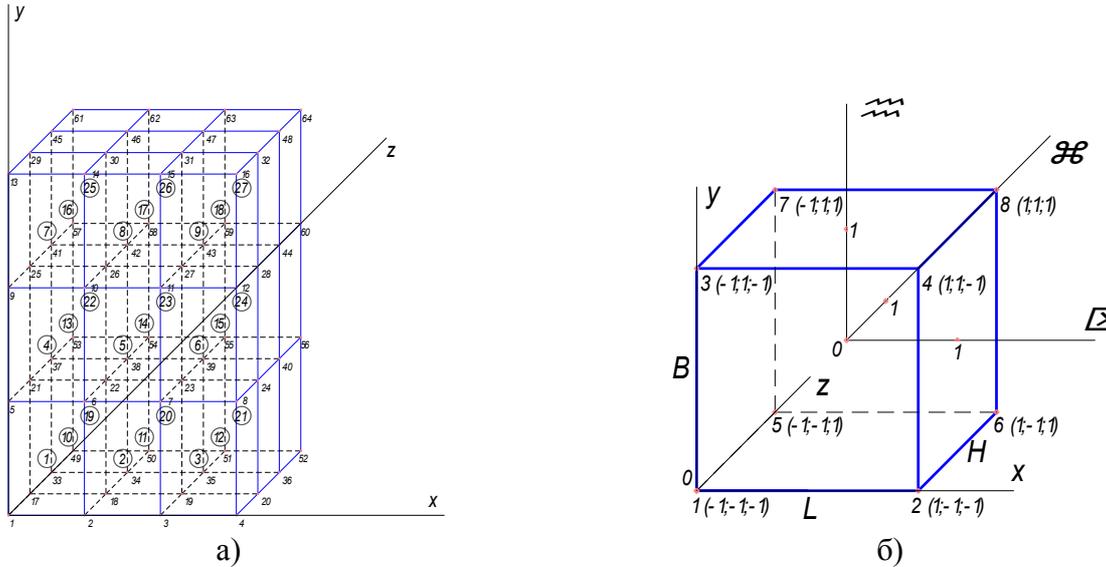


Рисунок 3 – Конечно-элементная модель  
 а) исследуемая геометрическая область; б) схема конечного элемента

Каждый элемент данной сетки представляет собой параллелепипед с прямолинейными сторонами и восемь узлов. Нумерация узлов в каждом элементе проводится, как показано на рисунке 3,б.

Узловые значения некой величины  $\varphi$  (в компонента вектора перемещений) обозначаются через  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4, \Phi_5, \Phi_6, \Phi_7, \Phi_8$ , а координаты восьми узлов – через  $(X_1; Y_1; Z_1), (X_2; Y_2; Z_2), (X_3; Y_3; Z_3), (X_4; Y_4; Z_4), (X_5; Y_5; Z_5), (X_6; Y_6; Z_6), (X_7; Y_7; Z_7), (X_8; Y_8; Z_8)$ . В узлах элемента выполняются условия:  $\varphi = \Phi_i$  при  $x = X_i, y = Y_i, z = Z_i$ .

Выражение для полинома  $\varphi$  представляется в виде:

$$\varphi = N_1\Phi_1 + N_2\Phi_3 + \dots + N_8\Phi_8, \tag{6}$$

где  $N_1, N_2, \dots, N_8$  – функции формы элемента.

Функции формы в локальных координатах  $(\xi, \eta, \zeta)$  для данного элемента:

$$N_i = \frac{1}{8}(1 + \xi\xi_i)(1 + \eta\eta_i)(1 + \zeta\zeta_i), \tag{7}$$

где  $\xi_i, \eta_i, \zeta_i$  – локальные координаты  $i$ -го узла.

Функциональная зависимость между локальными и глобальными координатами определяется следующими соотношениями:

$$\xi(x) = \frac{2(x - X_C)}{L}; \eta(y) = \frac{2(y - Y_C)}{B}; \zeta(z) = \frac{2(z - Z_C)}{H}, \tag{8}$$

где  $X_c = \frac{L}{2}, Y_c = \frac{B}{2}, Z_c = \frac{H}{2}$  – координаты центра элемента.

Согласно принципу виртуальной работы [2], очень малое изменение внутренней энергии деформации должно компенсироваться таким же изменением внешней работы приложенных к телу нагрузок, т.е.

$$\delta U = \delta R, \tag{9}$$

где  $U$  – энергия деформации (внутренняя работа),

$R$  – работа внешних сил;

« $\delta$ » – символ вариации.

Виртуальная энергия деформации определяется выражением:

$$\delta U = \int_V \{\delta \varepsilon^e\}^T \{\sigma\} dV, \tag{10}$$

где  $V$  – объем элемента.

В предположении линейности поведения материала и малых (линейных) изменений геометрии это уравнение приводится к виду:

$$\delta U = \int_V \left( \{\delta \varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon\} - \{\delta \varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon^T\} \right) dV. \tag{11}$$

Деформации связаны с перемещениями узлов соотношением:

$$\{\varepsilon\} = [B] \{u\},$$

где  $[B]$  – матрица градиентов, получаемая из (5) на основании (6) – (8);

$\{u\}$  – вектор узловых перемещений.

$[B]$  и  $\{u\}$  для  $i$ -го узла в элементе запишутся следующим образом:

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} & \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial x} \end{bmatrix}, \tag{12}$$

где  $N_i$  – функция формы  $i$ -го узла элемента;

$$\{u\} = \begin{Bmatrix} u_x^i \\ u_y^i \\ u_z^i \end{Bmatrix}, \tag{13}$$

где  $u_x^i, u_y^i, u_z^i$  – перемещения  $i$ -го узла соответственно вдоль осей  $x, y$  и  $z$ .

С учетом последнего и (1) – (4), а также считая, что вектор  $\{u\}$  не меняется по объему элемента, запишем:

$$\delta U = \{\delta u\}^T \int_V [B]^T [D] [B] dV - \{\delta u\}^T \int_V [B]^T [D] \alpha \Delta T dV. \tag{14}$$

Так как, кроме температурных, наша конструкция не испытывает других внешних нагрузок, то виртуальная работа внешних сил будет равна нулю.

$$\delta R = 0.$$

В итоге, согласно принципу виртуальной работы, окончательно получим:

$$\{\delta u\}^T \int_V [B]^T [D][B] dV = \{\delta u\}^T \int_V [B]^T [D] \alpha \Delta T dV. \quad (15)$$

Если обратить внимание на то, что вектор  $\{\delta u\}^T$ , представляющий собой набор произвольных виртуальных перемещений, является общим для каждого из слагаемых, то это уравнение можно представить в виде, более наглядном для метода конечных элементов:

$$[K_e]\{u\} = \{F_e^T\}, \quad (16)$$

где  $[K_e] = \int_V [B]^T [D][B] dV$  – матрица жесткости элемента,

$$\{F_e^T\} = \int_V [B]^T [D] \alpha \Delta T dV$$
 – вектор тепловых нагрузок для элемента.

Уравнение (16) представляет собой матричную запись системы линейных алгебраических уравнений описывающих напряженно деформированное состояние одного конечного элемента. Составив для всех элементов конструкции подобные системы уравнений, а затем, проведя стандартную для метода конечных элементов процедуру ансамблирования [5 – 7], получим разрешающую систему линейных алгебраических уравнений для всей конструкции. Для учета условий защемления по торцам из последней системы необходимо выкинуть уравнения, соответствующие узлам на торцевой поверхности, так как они заведомо равны нулю. Решая, полученную таким образом систему, найдем неизвестные узловые перемещения. Используя, которые с помощью выражений (1) – (8) можно анализировать напряженно-деформированное состояние конструкции. Следующим шагом развития рассматриваемого подхода является создание алгоритма и программного обеспечения для инженерного анализа работоспособности противопожарных конструкций, на основе предложенной в работе математической модели и конечно-элементной реализации, чему будут посвящены последующие работы авторов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования.
2. Демидов С.П. Теория упругости: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1979. -432 с.
3. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости – М.: Наука, 1975. -576 с.
4. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. - 318 с.
5. Зенкевич О., Морган К. Метод конечных и аппроксимация. – М.: Мир, 1986. - 318 с.
6. Zienkiewicz O., Taylor R. The finite element method. Vol. 1. The basis. – Oxford, Butterworth-Heinemann, 2000. – 694 p.

### Савин Леонид Алексеевич

Орловский государственный технический университет, г.Орел  
д.т.н., зав. кафедрой «Мехатроника и международный инжиниринг»  
Тел. (4862) 41-98-49  
E-mail: savin@ostu.ru

### Журавлев Валерий Игоревич

Орловский государственный технический университет, г.Орел  
соискатель кафедры «Мехатроника и международный инжиниринг»  
Тел. (4862) 41-98-49  
E-mail: pmpl@ostu.ru

### Майоров Сергей Анатольевич

Орловский государственный технический университет, г.Орел  
к.т.н., инженер кафедры «Мехатроника и международный инжиниринг»  
Тел. (4862) 41-98-49  
E-mail: pmpl@ostu.ru

### Стручков Александр Александрович

Орловский государственный технический университет, г.Орел  
к.т.н., доцент кафедры «Мехатроника и международный инжиниринг»  
Тел. (4862) 41-98-49  
E-mail: pmpl@ostu.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 3 до 7 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).
- В одном сборнике может быть опубликована только **одна** статья **одного** автора, включая соавторство.
- Статьи должны быть набраны шрифтом Times New Roman, размер 12 pt с одинарным интервалом, текст выравнивается по ширине; абзацный отступ – 1,25 см, правое поле – 2 см, левое поле – 2 см, поля внизу и вверху – 2 см.
- Название статьи, а также фамилии и инициалы авторов обязательно дублируются на английском языке.
- К статье прилагается перечень ключевых слов на русском и английском языке.
- Сведения об авторах приводятся в такой последовательности: Фамилия, имя, отчество; учреждение или организация, ученая степень, ученое звание, должность, адрес, телефон, электронная почта.
- В тексте статьи желательно:
  - не применять обороты разговорной речи, техницизмы, профессионализмы;
  - не применять для одного и того же понятия различные научно-технические термины, близкие по смыслу (синонимы), а также иностранные слова и термины при наличии равнозначных слов и терминов в русском языке;
  - не применять произвольные словообразования;
  - не применять сокращения слов, кроме установленных правилами русской орфографии, соответствующими государственными стандартами.
- Сокращения и аббревиатуры должны расшифровываться по месту первого упоминания (вхождения) в тексте статьи.
- **Формулы** следует набирать в редакторе формул Microsoft Equation 3.0. **Формулы, внедренные как изображение, не допускаются!**
- **Рисунки** и другие иллюстрации (чертежи, графики, схемы, диаграммы, фотоснимки) следует располагать непосредственно после текста, в котором они упоминаются впервые.
- Подписи к рисункам (полужирный шрифт курсивного начертания 10 pt) выравниваются по центру страницы, в конце подписи точка не ставится:

*Рисунок 1 – Текст подписи*

С полной версией требований к оформлению научных статей Вы можете ознакомиться на сайте [www.ostu.ru](http://www.ostu.ru).

*Плата с аспирантов за опубликование статей не взимается.*

*Адрес учредителя:*

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«Орловский государственный технический университет»  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
Тел. (4862) 42-00-24  
Факс (4862) 41-66-84  
www.ostu.ru  
E-mail: unpk@ostu.ru

*Адрес редакции:*

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«Орловский государственный технический университет»  
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29  
(4862) 41-98-48, 55-55-24, 41-98-03, 43-48-90  
www.ostu.ru  
E-mail: met\_lit@ostu.ru

Технический редактор: М.С. Сидорова  
Компьютерная верстка: М.С. Сидорова

Подписано в печать 18.11.2010 г.  
Формат 60x88 1/8. Усл. печ. л. 8,9.  
Тираж 600 экз.  
Заказ № \_\_\_\_\_

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе ОрелГТУ  
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.