

<p>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. Колчунов В.И. д-р техн. наук, проф. Попова Л.В. д-р экон. наук, проф. Степанов Ю.С. д-р техн. наук, проф. Константинов И.С. д-р техн. наук, проф. Новиков А.Н. д-р техн. наук, проф.</p>	<h2>Содержание</h2>
<p>Главный редактор серии: Степанов Ю.С. д-р техн. наук, проф., заслуженный деятель науки Российской Федерации</p>	<h3>Механика</h3>
<p>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.</p>	<p><i>Варламов А.В., Варламова Н.Х., Малинин В.Г., Мулюкин О.П., Злобин С.Н.</i> Использование магнитожидкостных механизмов для предупреждения и разрушения сводообразований в бункерах хранения и выпуска плохосыпучих материалов..... 3 <i>Тихомиров В.П., Воробьев Д.В., Чвала А.Н.</i> Оценка площади контакта шара с шероховатой поверхностью..... 9 <i>Заркеи Дж.И.</i> Взаимодействие трещин со связями между берегами во фрикционной накладке... 16 <i>Зюлгернеи И.И.</i> Моделирование зарождения трещин при внутреннем сжатии цилиндрических тел 22 <i>Морев П. Г.</i> Скоростной вариационный принцип квазистатического равновесия абсолютно жёсткого тела в контактных задачах..... 30 <i>Корнеева Е.Н., Гордон В.А., Корнеев Ю.С.</i> Методы Рунге и Штермера для решения дифференциальных уравнений первого порядка..... 33</p>
<p>Редколлегия: 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. Зубчинов 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 Корндорф С.Ф. д-р техн. наук, проф. Малинин В.Г. д-р физ.-мат. 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.</p>	<h3>Машиностроение и металлообработка</h3> <p><i>Афонин А.Н., Киричек А.В.</i> Схемы деформирования при накатывании резьбы..... 39 <i>Василенко Ю.В., Руднева Ю.Ю.</i> Способ охлаждения зоны резания при шлифовании периферией круга..... 43</p>
<p>Ответственный за выпуск: Григорьева О.Ю.</p>	<h3>Моделирование технологических процессов</h3> <p><i>Александров Д.В., Журавлев В.И., Стручков А.А.</i> Расчет температурных полей в многослойных пластинах методом конечных элементов..... 48 <i>Капырин К.И., Короткий Г.П., Дорофеев О.В.</i> Численное моделирование интенсивной пластической деформации при обкатке цилиндрических тел в трехроlikовой матрице..... 53 <i>Морозов В.В., Стариков А.Н.</i> Разработка стенда по исследованию характеристик исполнительного механизма мехатронного модуля с помощью оборудования NI..... 62 <i>Ремизов А.Е., Карелин О.О.</i> К вопросу определения толщины пограничного слоя в условиях схода потока..... 68 <i>Тарапанов А.С., Чепикова И.М.</i> Самоприспосабливающиеся технологические системы..... 72</p>
<p>Адрес редколлегии серии: 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29 (4862) 43-48-90, 41-98-48, 55-55-24, 41-98-03 www.ostu.ru E-mail: met_lit@ostu.ru</p>	<h3>Технологии легкой и пищевой промышленности</h3> <p><i>Демидова Н.А., Моськина Е.Л., Зайцева Е.В., Викторова Е.В.</i> Влияние вынужденных вибраций корпуса раскройной машины на технологию изготовления швейных изделий..... 76 <i>Кваскова Т.В., Павловская А.А., Проколова Е.В.</i> Новые аспекты создания специальной одежды для тепличниц..... 81</p>
<p>Зарег. в Федеральной службе по надзору в сфере связи массовых коммуникаций. Свидетельство: ПИ № ФС77-35719 от 24 марта 2009 года</p>	<h3>Приборостроение и системы управления</h3> <p><i>Иванов Б.Р., Лисичкин В.Г., Шведов С.Н.</i> Двухпараметрическое устройство контроля влажности.. 84 <i>Петров С. П., Мажков М. Н., Сафронова Н.А.</i> Оценка качества переходного процесса в СУ КСЦТ по интегральному квадратическому критерию..... 89 <i>Хорольский В.Я., Бондарь М.С., Ефанов А.В.</i> Системный подход – методологическая основа повышения качества процесса аналого-цифрового преобразования..... 95</p>
<p>Подписной индекс 29504 по объединенному каталогу «Пресса России»</p>	<h3>Испытания, контроль, диагностика, мониторинг</h3> <p><i>Шкатов П.Н., Волков Б.И., Прохоров В.В., Бондарь К.М., Родюков М.С.</i> Повышение достоверности контроля лопаток паровых турбин вихретоковым методом..... 99 <i>Сычев С.Н., Гаврилина В.А., Подмастерьев К.В., Пахолкин Е.В., Пузырев С.Г.</i> Критерии образования устойчивых адсорбционных слоев на полярных и неполярных поверхностях..... 103 <i>Богданов Н.Г., Комолов Д.В.</i> Нейросетевой метод диагностирования мультисервисной информационной сети предприятия..... 107 <i>Федин В. В.</i> Исследование возможности определения степени упрочнения ферромагнитных материалов на основе эффектов памяти наведенной магнитной анизотропии..... 111</p>
<p>© ОрелГТУ, 2009</p>	<h3>Стандартизация и управление качеством</h3> <p><i>Уткин Г.И., Чкан В.В., Марков В.В.</i> Показатели назначения электрических соединителей, характеризующие техническое состояние контактов..... 114</p>



Scientific and technical journal
of Orel State Technical University
The journal is published since 1995
The journal is published 6 times a year
№ 6/278(577) 2009

Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology

Izvestia Orel State Technical University

The founder – The State Higher Education Professional Institution
Orel State Technical University

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.

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.

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.

Editorial Committee

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.

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
Rossii**» **29504**

© OSTU, 2009

Contents

Mechanics

<i>Varlamov A.V., Varlamova N.H., Malinin V.G., Mulyukin O.P., Zlobin S.N.</i> The usage of magneto-liquid machinery for the prevention and damage of the bridging and for emission of bad-loose materials...	3
<i>Tihomirov V.P., Vorobyev D.V., Chvala A.N.</i> The estimate of the circle area contact on the uneven surface.....	9
<i>Zarkesh J.I.</i> Interaction of cracks with interfacial bonds in the frictional lining.....	16
<i>Zulgarneyn I.I.</i> Modelling of nucleation of cracks at internal compression of cylindrical bodies.....	22
<i>Morev P. G.</i> A rate variational principle of quasistatic equilibrium for rigid body in contact problems.....	30
<i>Korneeva E.N., Gordon V.A., Korneev Y.S.</i> Runge and Shtermer's methods for decision of a differential equations of the first order.....	33

Engineering and metalworking

<i>Afonin A.N., Kirichek A.V.</i> Schemes of deformation at a thread rolling.....	39
<i>Vasilenko YU.V., Rudneva YU.YU.</i> The way of cooling of the zone of cutting at grinding by circle periphery.....	43

Modeling engineering processes

<i>Alexandrov D.V., Zhuravlyov V.I., Struchkov A.A.</i> Calculation of temperature fields in multilayered plates the method of final elements.....	48
<i>Kapyrin K.I., Korotki G.P., Dorofeev O.V.</i> Numerical modeling to intensive plastic deformation under rolling by rollers cylindrical details in three rollers to matrix.....	53
<i>Morozov V.V., Starikov A.N.</i> Development the research stand of characteristics of the mechatronic modules with the help of equipment NI.....	62
<i>Remizov A.E., Karelin O.O.</i> To the question of determining of boundary layer thickness in swirling flow.....	68
<i>Tarapanov A.S., Chepikova I.M.</i> A self-adapting technological systems.....	72

Light and food industry technologies

<i>Demidova N.A., Moskina E.L., Zaitseva E.V., Viktorova E.V.</i> The influence of the forced vibrations of the cloth-cutting machine case on manufacturing techniques of garments.....	76
<i>Kvaskova T.V., Pavlovskaja A.A., Prokopova E.V.</i> New aspects in the development of working clothes for the greenhouse workers.....	81

Instrument Engineering

<i>Ivanov B.R., Lisichkin V.G., Shvedov S.N.</i> Two-parametrical control unit of water content.....	84
<i>Petrov S. P., Mayakov M. N., Safronova N. A.</i> The evaluation of transient process quality in controlling system of cogenerated system of centralized heat supply.....	89
<i>Khorolskiy V. Y., Bondar M. S., Yefanov A. V.</i> The system approach as a methodological basis for improving of process quality in analogue-digital transformation.....	95

Tests, control, diagnostics, monitoring

<i>Shkatov P.N., Volkov B.I., Prohorov V.V., Bondar K.M., Rodukov M.S.</i> Increase the reliable of check the blades of steam-turbines the method of electromagnetically currents.....	99
<i>Sychev S.N., Gavrilina V.A., Podmasteriev K.V., Pakholkin E.V., Puzirev S.G.</i> Criteria of formation steady adsorption layers on polar and not polar surfaces.....	103
<i>Bogdanov N.G., Komolov D.V.</i> The neural approach to enterprise multiservice information network diagnostics.....	107
<i>Fedin V. V.</i> Research of the possibility definition of hardening degree ferromagnetic materials on the basis of the memory effects induced magnetic anisotropy.....	111

Standardization and quality control

<i>Utkin G.I., Chkan V.V., Markov V.V.</i> Indexes of fixing the electrical connections, is characterizing the technical condition of contacts.....	114
---	-----

Journal is included into the list of the Higher Examination Board for publishing the results of theses for competition the academic degrees.

УДК 656.225.073.437:633.1

 А.В. ВАРЛАМОВ, Н.Х. ВАРЛАМОВА, В.Г. МАЛИНИН,
 О.П. МУЛЮКИН, С.Н. ЗЛОБИН

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ МЕХАНИЗМОВ ДЛЯ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ СВОДООБРАЗОВАНИЙ В БУНКЕРАХ ХРАНЕНИЯ И ВЫПУСКА ПЛОХОСЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ *

В статье рассмотрен прогрессивный способ предупреждения и разрушения сводообразований в бункерах хранения и выпуска плохосыпучих материалов при помощи магнитожидкостных сводообрушителей.

Ключевые слова: плохосыпучие материалы, бункер, магнитожидкостные сводообрушители.

The designs of Mechanisms of the prevention and destruction of the arches hard-running materials in bunkers on the basis of a magnetic liquid are considered in article.

Key words: bad-friable materials, bunker, magneto-liquid vault down-faller.

Российскими лидерами в области создания магнитожидкостных устройств являются Институт прикладной механики МГУ (ИПМ МГУ), Ивановский энергетический университет и связанное с ним Специализированное конструкторско-технологическое бюро «Полус».

Магнитные жидкости (МЖ) представляют собой коллоидные дисперсии магнитных материалов (ферромагнетиков: магнетита, ферритов) с частицами от 5 нанометров до 10 микрометров, стабилизированных в полярной (водной или спиртовой) и неполярной (углеводороды и силиконы) среде с помощью поверхностно-активных веществ (ПАВ) или полимеров. Они сохраняют устойчивость в течение двух-пяти лет и обладают при этом хорошей текучестью в сочетании с магнитными свойствами [1].

Применение магнитной жидкости основано на ее свойстве притягиваться к магниту и становиться твердым телом в присутствии магнитного поля.

Уникальное свойство МЖ превращаться в твердое тело при наведении магнитного поля реализовано в разработанном оригинальном, не имеющим аналогов в мировой практике, магнитожидкостном механизме предотвращения и разрушения сводообразований (МЖМПРС) в бункерах хранения и выпуска сыпучих материалов (песок, костная мука и пр.) в мобильные транспортировочные средства (рисунок 1), который открывает новое направление создания сводообрушающих устройств в бункерах.

Важность для отечественной промышленности разработки механизмов такого рода обуславливается следующими положениями [2,3]:

1. Объем операций с сыпучими грузами на промышленных предприятиях нашей страны исчисляется миллиардами тонн. Значительная часть этих грузов в процессе переработки хранится в бункерах, технологический процесс работы которых достаточно часто нарушается вследствие образования полностью прекращающих выгрузку материалов из выпускного отверстия бункера в транспортировочную емкость мобильного транспортного средства.

* Работа выполнена в рамках календарного плана договора № 1-06 от 27.04.2006 г о научно-техническом и педагогическом сотрудничестве ОрелГТУ и СамГУПС на 2006-2010 г.г.

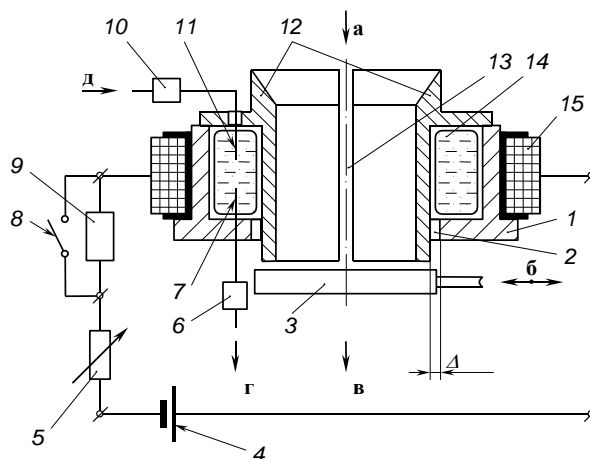


Рисунок 1 – Структурная схема МЖМПС

- 1 – основание бункера; 2 – зазор Δ , регламентируемой величины;
 3 – заслонка выпускного отверстия бункера; 4 – источник электрической энергии;
 5 – потенциометр; 6, 10 – элементы гидроавтоматики;
 7, 11 – герметичные трубопроводные вводы; 8 – выключатель электропитания;
 9 – реле; 12 – разрезная (многосекторная) втулка с пазами 13;
 14 – упруго-непроницаемая емкость с МЖ; 15 – соленоидная катушка
 а – загрузка сыпучего материала; б – направление рабочего перемещения заслонки 3;
 в – выгрузка сыпучего материала; г – отвод МЖ; д – подвод МЖ

2. К настоящему времени не удалось создать высоконадежные и одновременно достаточно экономичные универсальные разгрузочные устройства, способные обеспечить равномерное истечение сыпучих материалов и полное опорожнение бункерных устройств.

Принцип действия МЖМПС заключается в следующем.

При хранении в бункере плохосыпучего материала с целью предотвращения его слипания и последующего свободообразования периодически (в соответствии со сроками профилактического регламента) задействуется реле 9, которое через определенные промежутки времени подает или отключает электропитание соленоидной катушки 15 (при наличии сбоев в работе реле 9 его функции возлагаются на включаемый вручную выключатель 8). В результате этого происходит периодический переход МЖ, заключенной в герметичном упругом сосуде 14, из жидкого состояния в твердое и наоборот. Этим создается знакопеременный (пульсирующий) заброс давления МЖ, прокачиваемой через блок зарядных клапанов 10, 6. Следствием этого явится вибрирующее радиальное перемещение разрезной втулки 12 в пределах зазора Δ , которое способствует интенсивному перемешиванию отдельных слипшихся частиц сыпучего материала в общем его бункерном объеме и препятствует зарождению свободообразований.

В процессе выгрузки сыпучего материала из выпускного отверстия бункера (при открытии заслонки 3) рабочий продукт со входа «а» поступает на выход «в» для заполнения транспортировочных емкостей мобильных транспортных средств. При этом также периодически включается и выключается реле 9, обеспечивающее, в силу сказанного выше, колебательные радиальные перемещения разрезной втулки 12 для предотвращения свободообразования сыпучего продукта.

Если же свободообразование в бункере все же произойдет, то в линии «д» срабатывает дополнительно предусмотренный мультипликатор давления (на рисунке 1 не представлен), который обеспечивает резкое повышение давления МЖ в линии «д – г». Вследствие этого при сжатии разрезных частей стакана 12 произойдет радиальное сжатие возникшего свободообразования значительным радиальным усилием. В результате этого наружный диаметр сформированного свободообразования уменьшится и при последующем переключении реле 9, обуславливающим увеличение внутреннего диаметра стакана 12, свободообразование проскальзывает в выпускное отверстие бункера.

На базе охарактеризованной базовой конструкции МЖМПС разработан модульный ряд механизмов такого рода под специфические особенности разнотипных плохосыпучих материалов.

С целью обеспечения компактности и конструктивного упрощения МЖМПС в бункерах вместо ранее охарактеризованной конструкции такого механизма, размещаемого по внутренней стенке бункера (рисунок 1), возможно применение магнитожидкостного разрушителя сводообразований, устанавливаемого по центру бункера (рисунок 2).

Следует отметить, что в случае задействования электропитания данного устройства аналогично конструкции на рисунке 1 принцип их действия и функциональные характеристики идентичны.

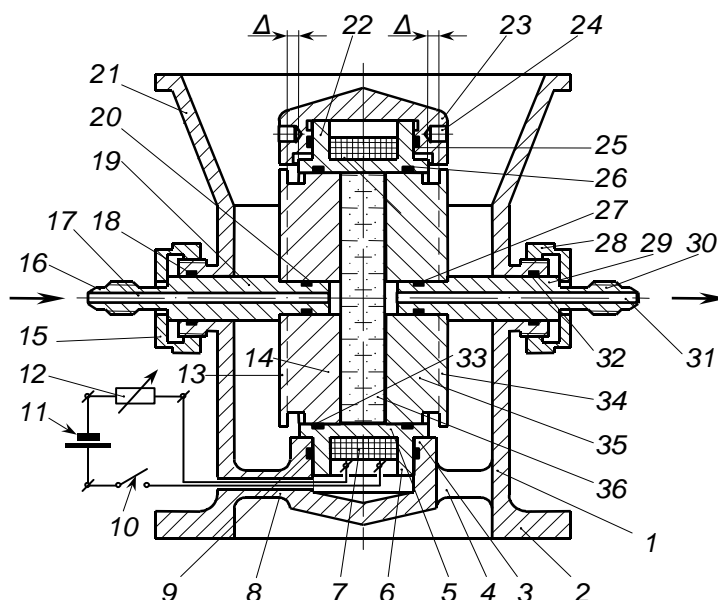


Рисунок 2 – Структурная схема магнитожидкостного сводообрушителя, размещаемого по центру бункера хранения и выпуска плохосыпучих материалов
 1 – корпус; 2, 21 – фланец, соответственно, выходной и входной;
 3 – силовой подпятник; 4, 8 – пилон; 5 – направляющая втулка;
 6, 22 – цилиндрическое окончание втулки 5; 7 – соленоидная катушка;
 9, 18, 20, 25, 26, 27, 32, 33 – уплотнение; 10 – выключатель;
 11 – источник электрической энергии; 12 – потенциометр;
 13, 34 – разрезная втулка; 14, 35 – цилиндрические направляющие разрезной втулки 13, 34;
 15, 28 – гайка регулирования зазора Δ ; 19, 29 – опорная штанга;
 16, 30 – штуцер прокачки МЖ; 17, 31 – проходной тракт МЖ;
 23 – заглушка-обтекатель; 24 – технологические отверстия для демонтажа заглушки 23 из устройства; 36 – герметичная полость с МЖ.

На рисунке 2 представлена упрощенная схема управления магнитожидкостным разрушителем вручную за счет механического включения или выключения выключателя 10, размещенного в цепи запитки соленоидной катушки 7 электрической энергией, и изменения силы тока в электрической цепи за счет реостата 12.

В ряде случаев представляется рациональным следующий режим работы данного устройства при хранении плохосыпучего материала в бункере и его выпуске:

– в полость 36 закачивается максимально допустимое рабочее давление МЖ.

При этом полувтулки 14 и 35 раздвигаются от центра бункера к его периферии до упора в опорные штанги 19, 29 с образованием между деталями 13, 5 и 34, 5 максимального зазора Δ (см. исходное положение устройства на рисунке 2);

– путем включения выключателя 10 осуществляется запитка электроэнергией соленоидной катушки 7.

Под действием электромагнитного поля катушки 7 МЖ, находящаяся в полости 36, переходит в твердое состояние («замораживается»), что позволяет отключить насосную прокачку МЖ через штуцеры 16, 30;

– после этого бункер при закрытом фланце 1 устройства (на рисунке 2 не показано) загружается плохосыпучим материалом, который подвергается хранению. При этом величина зазора Δ остается неизменной;

– для выпуска материала из бункера фланец 2 открывается (рисунок 2), и рабочая среда выдается в транспортировочную емкость мобильного транспорта.

Если же в бункере возникло сводообразование и выдача материала прекращается, то выключается выключатель 10, что обесточивает соленоидную катушку 7. В результате МЖ из твердого состояния переходит в жидкое и переливается по каналу 31 штуцера 30 на вход насоса прокачки МЖ через устройство (на рисунке 2 не показан). При этом полувтулки 13, 34 под действием силы тяжести находящегося в бункере материала перемещаются в сторону его центра до выбора зазора Δ . Следствием этого явится разрушение возникшего в бункере сводообразования и возобновление выдачи материала из бункера в транспортировочную емкость.

Для плохосыпучих материалов с повышенными адгезионными свойствами в ряде случаев охарактеризованное выше перемещение полувтулок 13, 34 под действием силы тяжести находящегося в бункере материала может не произойти. Для бункеров хранения и выпуска таких материалов в магнитожидкостных сводоразрушителях применяют механические или приводные механизмы перемещения опорных штанг 19, 29 для выбора полувтулками 13, 34 зазора Δ .

Примером такого механизма может служить авторская разработка дифференциальной опорной штанги 2, 3, размещаемой в полости 8, запитываемой через трехходовой кран 10 (рисунок 3).

Конструктивное исполнение механизмов такого рода может быть весьма многообразным (комбинации дифференциального поршня с электромагнитным клапаном, пневмораспределительным устройством, с магнитными релейными устройствами и др.), что нашло обстоятельное освещение в работах [3,4].

Для предупреждения сводообразований некоторых специфических видов плохосыпучих материалов могут оказаться эффективными несложные по конструкции магнитожидкостные распылительные механизмы.

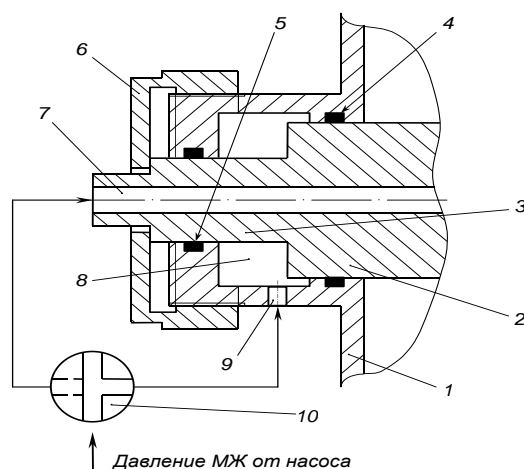


Рисунок 3 – Приводной механизм перемещения опорных штанг на конструкции по рисунку 2

1 – корпус; 2, 3 – дифференциальная опорная штанга (дифференциальный поршень); 4, 5 – уплотнение; 6 – гайка-упор; 7, 9 – каналы подвода рабочего давления МЖ; 8 – полость дифференциального поршня; 10 – трехходовой кран

Структурная схема такого рода механизма приведена на рисунке 4.

Перед загрузкой (при выключенном выключателе 7) от насоса через перепускной клапан 10 МЖ подается под определенным давлением в полость 6 до полного её заполнения и дренирования через микрожиклеры 4, выполненные в корпусе 1 (создание внутри стенки корпуса 1 так называемой водно-дисперсной завесы). При включении выключателя 7 электропитание от источника электроэнергии 8 подается на соленоидную катушку 9. Под действием электромагнитного поля катушки 9 МЖ в полости 6 и водно-дисперсная завеса на внутренней стенке корпуса 1 переходят в твердое состояние. При этом пружинный перепускной клапан 10 закрывается, разобщая насос подачи МЖ в устройство от полости 6.

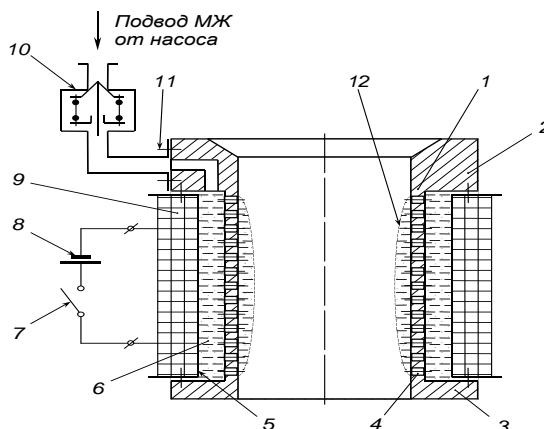


Рисунок 4 – Структурная схема магнитожидкостного распылительного механизма предупреждения и разрушения сводообразований в бункерах хранения и выпуска плохосыпучих материалов

- 1 – корпус бункера; 2, 3 – соответственно, входной и выходной фланец;
4 – жиклер; 5 – герметичный кожух; 6 – полость с МЖ; 7 – выключатель;
8 – источник электрической энергии; 9 – соленоидная катушка; 10 – перепускной клапан;
11 – крепежно-герметизирующий элемент; 12 – водно-дисперсная завеса из МЖ**

Далее осуществляется загрузка в бункер плохосыпучего материала, при этом «замороженная» водно-дисперсная завеса на внутренней стенке корпуса 1 играет роль антиадгезионной пленки, препятствующей прилипанию материала к стенкам корпуса 1 при его длительном хранении в бункере.

Если же при выпуске материала прилипание продукта к стенкам корпуса 1 всё же возникнет, и обнаружатся трудности с его выпуском через выходной фланец 3, то выключают выключатель 7. При этом МЖ в полости 6 и МЖ в виде водно-дисперсной завесы за стенкой корпуса 1 перейдет из твердого в жидкое состояние, при этом адгезионные связи между плохосыпучим продуктом и стенкой корпуса 1 разрушатся, что вновь обеспечит бесперебойный выпуск материала из выходного фланца.

Включение выключателя 7 вновь обеспечит создание на внутренней стенке корпуса 1 твердотельной водно-дисперсной завесы.

Существенным недостатком таких механизмов является непроизводительный расход МЖ, уносимой плохосыпучим продуктом при его выгрузке из бункера. Кроме того, не всегда допустимо смешение выдаваемого из бункера материала с сложной по составу магнитной жидкостью.

В перспективе следует ожидать создания новых типов механизмов разрушения сводообразований плохосыпучих материалов в бункерных устройствах, которым будут приданы дополнительные функции по закрытию и открытию выпускного фланца бункера. Структурная схема такого механизма представлена на рисунке 5.

Данный механизм включает упруго-герметичный сосуд 3 с МЖ, который изменяет свой объем при увеличении давления прокачиваемой МЖ с соответствующим переходом из положения I в положение II.

Возможно, что при открытии бункера (положение I сосуда 3) выпуск материала из него будет затруднен вследствие возникновения сводообразований по внутренней стенке сосуда 3. В этом случае путем создания пульсации давления МЖ, протекающей через сосуд 3, за счет изменения плотности МЖ при изменении силы тока в соленоидной катушке 4 при помощи процессора 8 (по аналогии с конструкцией на рисунке 1), возникшее сводообразование будет разрушено. Иногда целесообразно комбинированное применение данного способа с чередованием полного сброса давления МЖ из сосуда 3 и повторного его заполнения МЖ.

Представленная на рисунке 5 структурная схема обладает многовариантностью конструктивного исполнения «растягиваемого» давлением герметичного упругого сосуда 3 (в виде металлической сварной мембраны или сварного сильфонного узла; резинокордового баллона; уплотненной поршневой пары, в том числе дифференциального типа).

В каждом конкретном случае принимаемая конструкция устройств такого рода

определяется тактико-техническими требованиями, предъявляемыми к бункерам хранения и выпуска плохосыпучих материалов, и физико-механическими свойствами последних.

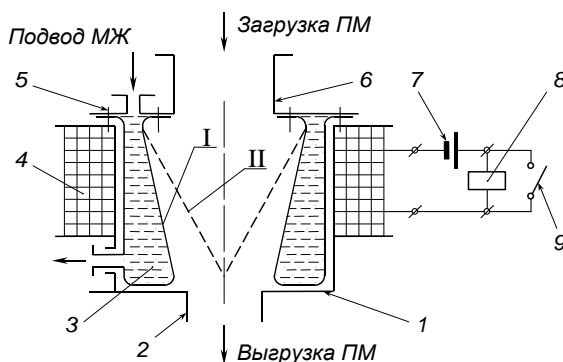


Рисунок 5 – Структурная схема магнитожидкостного механизма выпуска и разрушения сводообразований плохосыпучих материалов в бункерном устройстве
1 – корпус бункера; 2 – выпускной фланец; 3 – упруго-герметичный сосуд с МЖ;
4 – соленоидная катушка; 5 – крепежно-герметизирующий элемент;
6 – входной фланец; 7 – источник электрической энергии; 8 – процессорное устройство;
9 – выключатель (I – положение сосуда 3 при открытом выпускном фланце 2;
II – положение сосуда 3 при закрытом выпускном фланце 2)

ЛИТЕРАТУРА

1. Лаврусъ, О.Е. Беспружинная предохранительно-регулирующая пневмогидроарматура с магнитными твердотельными и жидкостными исполнительными органами (принципы построения, конструкции): Монография / О.Е. Лаврусъ, А.В. Варламов, О.П. Мулюкин. – Самара: СамГУПС, 2008. – 91с.: ил.
2. Варгунин, В.И. Теория и практика применения щелевых бункеров на железнодорожном транспорте и в агропромышленном комплексе: Монография [Текст] / В.И. Варгунин, В.С. Горюшинский, А.В. Варламов, Н.Х. Варламова. – Самара: СамГУПС, 2007. – 107 с.: ил.
3. Чегодаев, Д.Е. Элементы клапанных устройств авиационных агрегатов и их надежность: Учебное пособие [Текст] / Д.Е. Чегодаев, О.П. Мулюкин. – М.: Изд-во МАИ, 1994. – 208 с.: ил.
4. Чегодаев, Д.Е. Гидропневмотопливные клапанные агрегаты с управляемым качеством динамических процессов: Учебно – справочное пособие [Текст] / Д.Е. Чегодаев, О.П. Мулюкин, А.Н. Кирилин и др.; Под ред. Д.Е. Чегодаева и О.П. Мулюкина. – Самара: СГАУ, 2000. – 546 с.: ил.

Варламов Александр Васильевич

Доцент кафедры «Железнодорожные станции и узлы» СамГУПС, г. Самара
Телефон сотовый: 8-902-293-35-87

Варламова Нелли Хасановна

Доцент кафедры «Управление эксплуатационной грузовой и коммерческой работой» СамГУПС, г. Самара
Телефон сотовый: 8-902-293-35-72

Малинин Владислав Георгиевич

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Динамика и прочность машин»
Телефон: (4862) 41-98-13
E-mail: malinin@otsu.ru

Мулюкин Олег Петрович

Самарский государственный университет путей сообщения, г. Самара
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Инженерная графика»
Телефон: (846) 249-64-73
E-mail: om46@mail.ru

Злобин Сергей Николаевич

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автопласт»
Телефон: (4862) 43-20-96
E-mail: zsn2@rambler.ru

УДК. 669.017:621.891

В.П. ТИХОМИРОВ, Д.В. ВОРОБЬЕВ, А.Н. ЧВАЛА

ОЦЕНКА ПЛОЩАДИ КОНТАКТА ШАРА С ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Рассмотрен один из подходов оценки фактической площади контакта. Проведен вычислительный эксперимент показавший существенную зависимость характеристик контактирования от величины фрактальной размерности.

Ключевые слова: шероховатость, площадь контакта, фрактальный объект.

The estimate of the circle area contact on the uneven surface. The software has been developed and the computing experiment has been carried out which had shown the essential dependence of touchdown parameters according the value of the fractal size.

Key words: asperity, contact area, fractal object.

В рамках изложенного подхода рассмотрим задачу оценки фактической площади контакта шара с шероховатой поверхностью.

Контактирование шара с шероховатой поверхностью. Задача о контактировании шара с шероховатой поверхностью рассматривалась в работах [2,3 и др.]. Полученные результаты свидетельствуют о росте контурной площади контакта при наличии шероховатости по сравнению с площадью, определяемой решением Г. Герца. В [3] показано, что применение модели шероховатой поверхности в виде ансамбля большого количества тел правильной геометрической формы (например, сферических сегментов), вершины высот которых подчиняются определенному закону распределения, приводит к значительной ошибке при определении фактической площади касания при малых нагрузках. В этом случае число пятен касания в пределах контурной площади контакта может быть чрезвычайно малым. Подобная картина наблюдается в приборных устройствах, в системе магнитная головка - диск, на скользящих электрических контактах и т.п.

Слабо нагруженные подвижные сопряжения являются предметом изучения сравнительно нового научного направления в области трения и изнашивания твердых тел - микротрибологии. Для оценки микротриботехнических характеристик используют многоуровневые структурные модели, описывающие шероховатость и субшероховатость поверхности твердых тел. При этом уровень описания лежит в диапазоне от микрометров до нанометров, что предполагает применение в исследовательской практике не только профилографов-профилометров, но и сканирующих микроскопов с соответствующим программным обеспечением для обработки получаемой информации о структурных особенностях изучаемой поверхности.

Характерные черты фрактального объекта повторяются на разных уровнях увеличения, т.е. речь идет о геометрическом самоподобии поверхностных структур. Применение понятия фрактального объекта, имеющего дробную размерность, дает возможность построить модели широкого класса случайных нетривиальных масштабно-структурных образований на уровнях шероховатости и субшероховатости.

Фрактальная размерность поверхности в зависимости от вида обработки и покрытий лежит в пределах $2 < D_s < 3$ [3]. Фрактальные объекты, имея сложную структуру, обладают физико-механическими свойствами, отличающимися от свойств материалов отдельных элементов, которые входят в рассматриваемое структурное образование. Таким образом, свойства фрактального объекта будем характеризовать эффективным модулем

$$E_{eff} = E \varepsilon^{-\frac{\zeta}{D_s - 3}},$$

где E - модуль упругости материала, ε - относительное сближение контактируемых тел, ξ - параметр, входящий в показатель степени.

Как видно из выражения (1), эффективный модуль является параметром, зависящим от относительного сближения. Это обстоятельство усложняет решение задачи контактного взаимодействия и требует применения численных методов и итерационных процедур. При таком подходе шероховатый слой представим в виде покрытия толщиной, сравнимой с высотными параметрами шероховатости и переменным модулем упругости. Методика определения параметра ζ приведена в [5]. Решение поставленной задачи проводилось в два взаимосвязанных этапа. На первом этапе определялась контурная площадь, а на втором – фактическая площадь контакта.

Используем результаты, полученные Е. Финкиным [6] на основании аналитического решения о контакте шара с полупространством при наличии тонкого упругого покрытия, представленного в работе [7]. Здесь шероховатый слой рассматривается как упругое покрытие толщиной Rp . Введение высоты выступа Rp в качестве толщины покрытия является оправданным при малых нагрузках. Тогда, зависимость между нагрузкой F_n и радиусом контурной площади a запишем в виде

$$F_n = \frac{E(1-\mu)a^{\frac{4(D_s-3)-2\zeta}{D_s-3}}}{4(1-2\mu)(1-\mu)(RRp)\frac{D_s-3-\zeta}{D_s-3}} \times \quad (2)$$

$$\left(2 - \left\{ \left[1 + 2(\sqrt{K})\frac{Rp}{a} + (K - \sqrt{K} - 1)\frac{Rp^2}{a^2} \right] \operatorname{erf} \sqrt{\frac{a}{2Rp}} - \frac{\sqrt{\frac{2}{\pi} \left(1 - \frac{a}{Rp} \right)}}{\sqrt{\frac{a}{Rp}}} \exp\left(\frac{-a}{2Rp}\right) \right\} \right)$$

Здесь $K = \frac{2(1-2\mu)}{(1-\mu)^2}$, μ – коэффициент Пуассона, R – радиус шара, $\operatorname{erf}(\dots)$ – интеграл вероятности.

Численное решение выражения (2) позволяет получить зависимость радиуса контурной площадки от нагрузки (рисунок 3).

В качестве исходных данных для расчета были приняты: $R=3,18$ мм (радиус стального шара), $\zeta=1$, $D_s=2,85$ (эти данные относятся к шероховатой поверхности плоского медного образца).

Как видно из рисунка 1, сравнение полученных расчетным путем данных с экспериментом удовлетворительное, что говорит о правомерности излагаемого подхода. На этом графике также показана зависимость радиуса контакта для случая контакта сферы с гладким полупространством, выражаемая теорией Г. Герца. Как видно, при малых нагрузках имеет место существенное расхождение в оценке радиуса контакта, получаемых теорией Г.Герца и учетом шероховатости поверхности. При повышенных нагрузках это расхождение уменьшается.

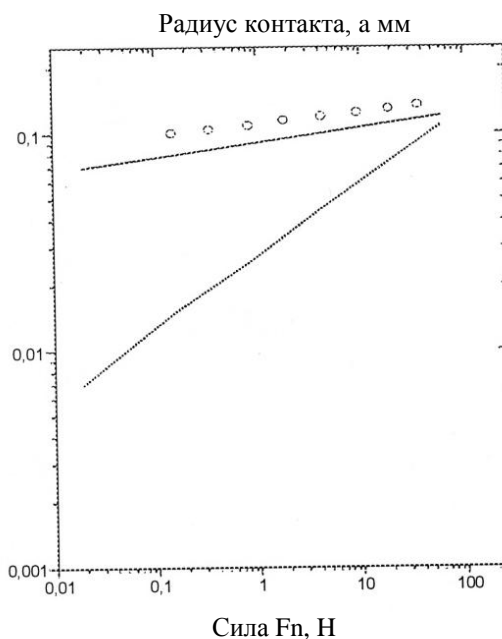


Рисунок 1 – Зависимость радиуса контактной площади контакта шара с шероховатой поверхностью от нагрузки:
 пунктирная линия – решение Г. Герца, сплошная линия – расчет по уравнению (3),
 кружки вверху рисунка – экспериментальные данные [3]

Для оценки ФПК требуется знание о размерах и числе пятен касания, которые, в свою очередь, зависят от сближения поверхностей. При незначительных нагрузках, когда число пятен мало, использование закона распределения пятен по высоте приводит к существенной погрешности в оценке фактической площади контакта.

Для моделирования случайной величины x с заданным законом распределения необходимо выполнить нелинейное преобразование $F(\xi)=\gamma$; $\xi = F^{-1}$, где $\gamma = \text{Rav}[0,1]$. Здесь γ – случайная величина, равномерно распределенная на отрезке $[0,1]$. Площадки пятен касания определяются выражениями: $\xi = \gamma^{2/(2-B)}$ и $a_i = a_{\max}(\varepsilon) \xi_i$, $i=1, \dots, n$. Эти площадки находятся в упругом или пластическом состояниях. Связь между нагрузкой и деформацией определялась теорией Г. Герца (для упругого контакта) и теорией пластического течения для неровностей, деформация которых превышала критическое значение.

Рассмотрим подробнее алгоритм расчета характеристик контактирования. Полагаем известным критерий перехода от упругого состояния пятна контакта к пластическому, выражаемый известным соотношением вида $\delta_{kp} = kr_E (c\sigma_T / E)^2$. Считая, что сечение неровности плоскостью, параллельной срединной, представляет собой круг площадью A_i ; найдем следующую зависимость приведенного значения относительной деформации неровности

$$\varepsilon_* = \frac{\pi G^{2(D-1)}}{5,35(4A_i)^{(D-1)}(c\sigma_T / E)^2}$$

Здесь E – модуль упругости, c – коэффициент ($c \approx 3$), σ_T – предел текучести.

Параметр G можно с определенной точностью определить из выражения

$$G = \left\{ \frac{Rp}{[4A_{\max}^0 (\varepsilon = 1) / \pi]^{1-D/2}} \right\}^{1/(D-1)},$$

Давление на пятнах контакта представим следующим соотношением

$$q_r = Ck \cdot \exp(-f / 0,3)Hm ,$$

где f - коэффициент трения, Hm - предельная твердость по Майеру, Ck - параметр, значение которого равно [4]

$$Ck = \begin{cases} \varepsilon_*^{1/2}, & \varepsilon_* \leq 0,136 \\ 0,56\varepsilon_*^{0,21}, & 0,136 < \varepsilon_* \leq 6,737 \\ 0,64\varepsilon_*^{0,14}, & 6,737 < \varepsilon_* \leq 24,23 \\ 1, & \varepsilon_* > 24,23 \end{cases}$$

Рассмотрим алгоритм определения характеристик контактирования, например величину сближения сопрягаемых поверхностей с учетом шероховатости:

1. Зная фрактальную размерность и значение $A^0 \max(\varepsilon)$ для произвольно взятого относительного сближения найдем вектор $\{A_1, \dots, A_N\}$ площадок выступов, воспринимающих нагрузку Q .

2. Для каждой площадки, используя соотношение (3), определяем давление q . Тогда сила, воспринимаемая отдельной площадкой касания, будет равна

$$Fni = q \cdot A_i .$$

3. Проверяем условие равновесия

$$Q = \sum_{i=1}^N Fni ,$$

Если Q меньше или больше данной суммы, то следует изменить относительное сближение и повторить шаги 1 и 2.

Используя метод половинного деления и назначив точность $[s_a]$, находят условие, при котором

$$\left| \frac{Q - \sum_{i=1}^N Fni}{Q} \right| \leq [\varepsilon_a] .$$

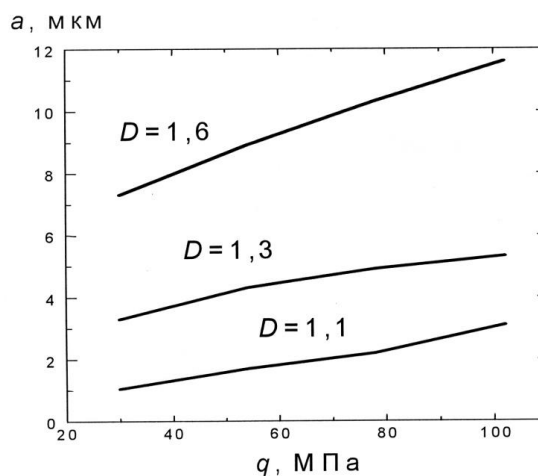


Рисунок 2 – Зависимость сближения от давления при разных значениях фрактальной размерности

На основании приведенного выше алгоритма разработано программное обеспечение и проведен вычислительный эксперимент. Предварительные результаты, полученные с

помощью вычислительного эксперимента, показали существенную зависимость характеристик контактирования от величины фрактальной размерности (рисунок 2).

Оценка характеристик контакта шара с шероховатой поверхностью производилась с помощью имитационного моделирования. При этом характеристики контактирования определялись с учетом равенства реакций пятен касания внешней нагрузке.

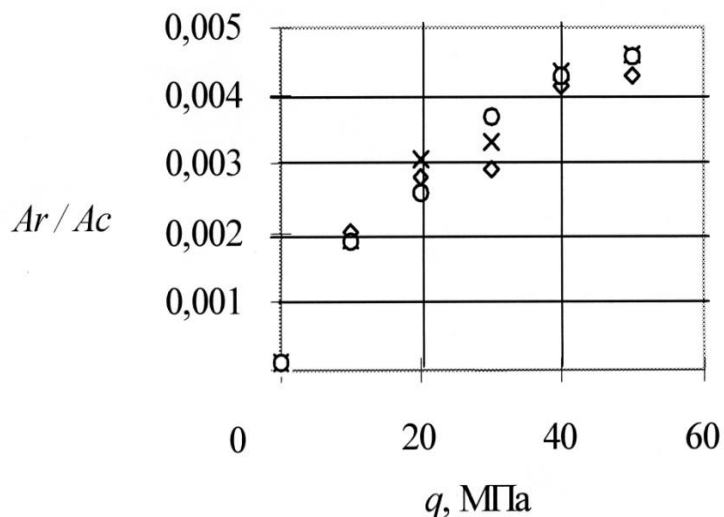


Рисунок 3 – Зависимость относительной площади контакта Ar/Ac от давления q

Данные, приведенные на рисунке 3, получены при $Rp=3,82$ мкм и фрактальной размерности $D=1,85$. Число статистических испытаний равнялось трем.

Отношение фактической площади контакта Ar к контурной Ac (рисунок 3) нелинейно растет при увеличении давления, равного нагрузке, деленной на проекцию контурной площади.

Исследования влияния электрического тока и магнитного потока на трибологические характеристики контакта проводились на опытной установке [8]

На рисунках 4 – 6 приведены некоторые результаты исследований.

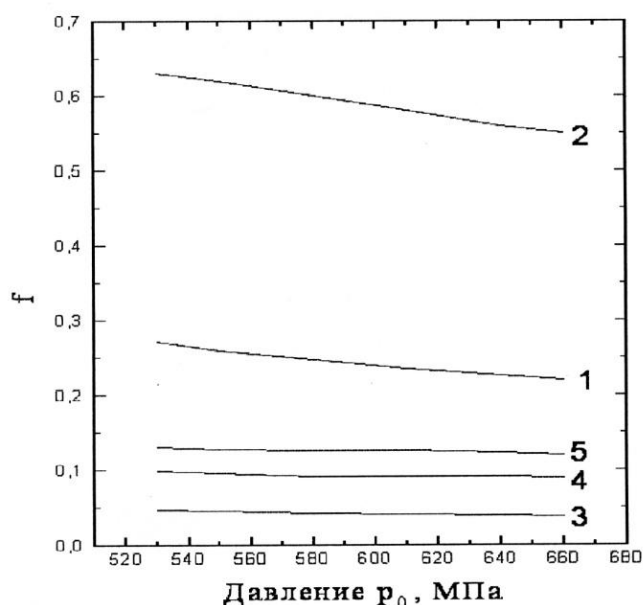


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента трения от давления при силе тока, проходящего через контакт $I = 50$ А; тока в катушке, создающей магнитное поле $\Phi = 400$ мА: 1 – контакт без вводимой промежуточной среды; 2 – наличие песка в зоне контакта; 3 – контакт смазан солидолом; 4 – наличие в зоне контакта трансформаторного масла; 5 – наличие воды в зоне контакта

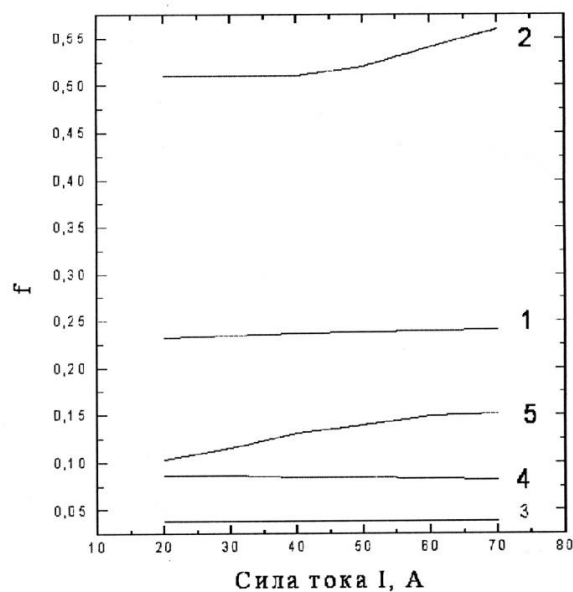


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента трения от силы тока при давлении $p_0 = 663$ МПа и тока в катушке, создающей магнитное поле $\Phi = 500$ мА (обозначения те же, что и на рисунке 4)

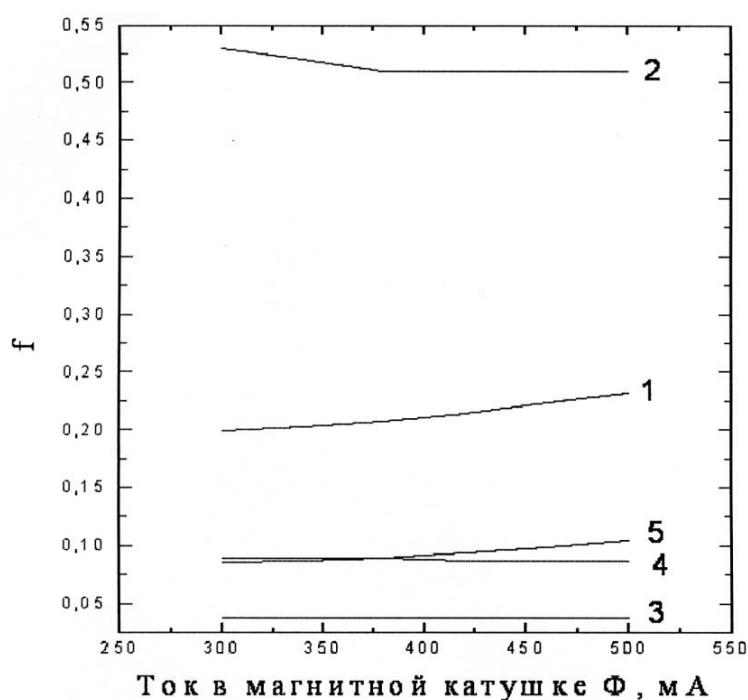


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента трения от силы тока в катушке, создающей магнитное поле Φ при давлении $p_0 = 663$ МПа и силе тока, проходящего через контакт $I = 20$ А (обозначения те же, что и на рисунке 4)

В заданных диапазонах изменения контактного давления, силы тока и тока в магнитной катушке коэффициент трения практически постоянен при наличии на контакте промежуточных сред: солидола, трансформаторного масла. При наличии воды коэффициент трения растет с увеличением силы тока и тока в магнитной катушке.

Для "сухого" контакта без вводимой промежуточной среды коэффициент трения несколько возрастает с ростом давления и при увеличении тока в магнитной катушке.

При наличии песка в зоне контакта с ростом силы тока коэффициент трения увеличивается и несколько уменьшается при увеличении тока в магнитной катушке. Падение коэффициента трения с ростом давления можно связать с дроблением в зоне контакта частиц

песка и меньшего внедрения этих частиц в элементы пары трения, а рост коэффициента трения с увеличением силы тока при постоянном давлении объясняется электропластическим эффектом, приводящим к росту площади металлического контакта. Фактическая площадь контакта составляет малую долю от номинальной (по Герцу), что приводит к высоким значениям плотности тока (порядка 1000 А/мм).

ЛИТЕРАТУРА

1. Маджумдар А., Бхушан Б. Фрактальная модель упруго-пластического контакта шероховатых поверхностей// Современное машиностроение. Сер. Б, 1991.-№6.-С.11-23.
2. Гринвуд Д.А., Трипп Д.Х. Упругий контакт шероховатых сфер//Прикладная механика, 1967.-Т.34, №4.- С.7-13.
3. Свириденко А.И., Чижик С.А., Петраковец М.И. Механика дискретного фрикционного контакта. Минск: Навука и техника, 1990.
4. Демкин Н.Б. Расчет характеристик контакта при малых нагрузках/фрикционный контакт деталей машин. -Калинин, Калининский политехи, ин-т, 1989.
5. Тихомиров В.П., Горленко О.А. Фрактальная модель контакта шара с шероховатой поверхностью //Механика и физика фрикционного контакта.- Тверь, ТГТУ, 1998. - С.-14.
6. Финкин Е. Уравнение износа твердых смазочных пленок для оценки их износной долговечности //Проблемы трения и смазки, 1970.-№2.-С.104-110.
7. Александров В.М., Бабешко В.А., Кучеров В.А. Контактные задачи для упругого слоя малой толщины//Прикладная математика и механика, 1966.-Т.30, вып.1.- С.124-142.
8. Воробьев, Д.В. Моделирование сцепления колеса с рельсом при помощи одношарикового нового трибометра./ Д.В. Воробьев, В.Д. Шаров// научный информационный сборник ВИНТИ, РАН. Транспорт: Наука, техника управления. 2004. - №12.- С. 29-32.

Тихомиров Виктор Петрович

Брянский государственный технический университет
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Детали машин»
Тел. 8 (4832) 56-02-61

Воробьев Дмитрий Владимирович

Брянский государственный технический университет
Кандидат технических наук, инженер кафедры «Локомотивы»
Тел. 8 (4832) 68-81-57

Чвала Андрей Николаевич

Брянский государственный технический университет
Аспирант кафедры «Локомотивы»
Тел. 8 (4832) 60-20-32
E-mail: Chvala_A.N.@mail.ru



К67 Корнеев, Ю.С. **Теория механизмов** и машин: учебное пособие для вузов / Ю.С. Корнеев, А.Ю. Корнеев, Б.Г. Кобцев. - Изд-е 2-е, дон. Орел: ОрелГТУ, 2009. – 243 с.

В учебном пособии представлены разделы теории механизмов и машин, которая наряду с теоретической механикой, сопротивлением материалов и деталями машин вводит студентов с круг общих и специальных дисциплин, обеспечивающих общеинженерную подготовку.

Предназначено студентам машиностроительных и технологических специальностей очной и очно-заочной форм обучения, изучающим дисциплину «Теория механизмов и машин». Будет полезным при подготовке к экзаменам, зачетам и защите курсовых проектов и курсовых работ по вышеуказанной дисциплине.

Дж.И. ЗАРКЕШ

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТРЕЩИН СО СВЯЗЯМИ МЕЖДУ БЕРЕГАМИ ВО ФРИКЦИОННОЙ НАКЛАДКЕ

Рассматривается плоская задача механики разрушения для фрикционной накладки. Считается, что при многократном торможении происходит разрушение материала фрикционной накладки. Задача о равновесии фрикционной накладки с трещинами со связями между берегами в концевых зонах сводится к системе нелинейных сингулярных интегродифференциальных уравнений с ядром типа Коши.

Ключевые слова: фрикционная накладка, силы сцепления, трещины со связями между берегами.

The flat problem of the mechanics of fracture for a frictional lining is considered. It is considered, that at repeated braking there is a fracture of a material of a frictional lining. The problem about balance of a frictional lining with cracks with interfacial bonds is reduced to system nonlinear singular integral the equations with a Cauchy-type kernel.

Key words: friction lining, cohesive forces, cracks with interfacial bonds.

Контактная пара «барабан-накладка» колодочных тормозных механизмов работает в условиях сложного напряженного состояния. Важное значение имеет разработка математической модели, в рамках которой можно было бы эффективно прогнозировать развитие трещины во фрикционной накладке при торможении.

Пусть в упругой накладке вблизи поверхности трения имеется произвольно размещенная система прямолинейных трещин длиной $2l_k$. Режимы работы фрикционной пары, в которых могут возникнуть остаточные деформации, считаются недопустимыми. В центрах трещин разместим начала локальных систем координат $x_k O_k y_k$, оси x_k которых совпадают с линиями трещин и образуют углы α_k с осью Ox . Рассматривается [1,2] модель трещины при наличии областей, в которых берега взаимодействуют. Полагаем, что эти области примыкают к вершинам трещин, а их неизвестные размеры могут быть сравнимы с размером трещины. Взаимодействие берегов трещины в концевой зоне моделируется введением между берегами трещины сил сцепления (связей), имеющих заданную диаграмму деформирования. Физическая природа таких связей и размер концевой зоны, в которой осуществляется взаимодействие берегов трещины, зависят от вида материала. Берега трещины вне концевых областей свободны от внешних нагрузок. Выделим части трещин d_{1k} и d_{2k} (концевые зоны), примыкающие к вершинам, в которых берега взаимодействуют.

При работе фрикционной пары под действием внешней силовой нагрузки (контактного давления и сил трения) на накладку в связях, соединяющих берега трещин, будут возникать в общем случае нормальные $q_{y_k}(x_k)$ и касательные $q_{x_k y_k}(x_k)$ усилия.

Следовательно, к берегам трещин в концевых зонах будут приложены нормальные и касательные усилия $q_{y_k}(x_k)$ и $q_{x_k y_k}(x_k)$ соответственно. Значения этих напряжений заранее неизвестны и подлежат определению в процессе решения краевой задачи механики разрушения.

Фрикционную накладку моделируем кривым (круговым) брусом с сечением близким к узкому прямоугольнику. Считаем, что наружный контур накладки близок к круговому. Как известно реальная обработанная поверхность никогда не бывает абсолютно гладкой, и всегда имеет микро или макроскопические неровности технологического характера, образующие шероховатость и оказывающие существенное влияние на разнообразные эксплуатационные свойства трибосопряжения [3].

Фрикционная накладка будет изгибаться в плоскости кривизны под действием контактного давления на внешней границе. Отнесем накладку к полярной системе координат r, θ , выбрав начало координат в центре концентрических окружностей L_0, L с радиусом R_0, R соответственно. Рассмотрим некоторую произвольную реализацию шероховатостей внешней поверхности накладки. В области, занятой фрикционной накладкой, компоненты тензора напряжений $\sigma_r, \sigma_\theta, \tau_{r\theta}$ должны удовлетворять уравнениям плоской теории упругости [4].

Представим границу внешнего контура накладки L' в виде

$$r = \rho(\theta), \quad \rho(\theta) = R + \varepsilon H(\theta)$$

где $\varepsilon = R_{\max}/R$ – малый параметр;

R_{\max} – наибольшая высота выступа (впадины) неровности поверхности трения;

$H(\theta)$ – функция не зависящая от малого параметра.

Внутренняя вогнутая поверхность накладки неподвижна, т.е. жестко скреплена с твердой колодкой

$$v_r = 0; v_\theta = 0 \text{ при } r = R_0, \quad (1)$$

где v_r и v_θ – радиальное и касательное смещение точек накладки.

Выпуклая наружная поверхность фрикционной накладки в процессе торможения находится под действием контактного давления и касательных напряжений, связанных с контактным давлением по закону Кулона. Для наружной поверхности на контуре L' имеем

$$\text{при } r = \rho(\theta) \quad \sigma_n = -p(\theta); \tau_{nt} = -fp(\theta), \quad (2)$$

где $p(\theta)$ – контактное давление;

f – коэффициент трения пары.

Для прямолинейных концов накладки принимаем, что усилия, действующие на этих концах статически эквиваленты главному вектору и главному моменту равным нулю. На прямолинейных концах накладки граничные условия принимаются в виде

$$\text{при } \theta = \pm\theta_0 \quad \int_{R_0}^R \sigma_\theta dr = 0, \quad \int_{R_0}^R \tau_{r\theta} dr = 0, \quad \int_{R_0}^R \sigma_\theta r dr = 0 \quad (3)$$

Считаем, что трещины ориентированы в направлении максимальных растягивающих напряжений, возникающих во фрикционной накладке.

Основные уравнения поставленной задачи необходимо дополнить соотношениями, связывающими раскрытие берегов концевых зон предразрушения и усилия в связях. Без потери общности эти условия можно записать [2] в виде

$$v_k^+(x_k, 0) - v_k^-(x_k, 0) - i \left(u_k^+(x_k, 0) - u_k^-(x_k, 0) \right) = C(x_k, \sigma_k) \left(q_{y_k}(x_k) - i q_{x_k y_k}(x_k) \right), \quad (4)$$

($k = 1, 2, \dots, N_0$)

где функции $C(x_k, \sigma_k)$ можно рассматривать как эффективные податливости связей, зависящие от натяжения; $\sigma_k = \sqrt{q_{y_k}^2 + q_{x_k y_k}^2}$ – модуль вектора усилий в соответствующих связях.

Для определения напряженно-деформированного состояния фрикционной накладки с системой трещин со связями между берегами в концевых зонах при торможении необходимо совместное решение уравнений плоской теории упругости [2] при граничных условиях нагружения накладки (1)-(3). К этим граничным условиям добавляются условия на берегах трещин с концевыми зонами при торможении

$$\text{при } y_k = 0 \quad \begin{cases} \sigma_{y_k} = 0, & \tau_{x_k y_k} = 0 & \text{на свободных берегах трещин} \\ \sigma_{y_k} = q_{y_k}(x_k), & \tau_{x_k y_k} = q_{x_k y_k}(x_k) & \text{в концевых зонах трещин} \end{cases}, \quad (6)$$

а также дополнительные комплексные соотношения (4).

Перечисленные дифференциальные уравнения и условия составляют замкнутую систему для определения напряжений и деформаций во фрикционной накладке в процессе торможения.

Напряжения и перемещения в накладке ищем в виде разложений по малому параметру ε . Значения компонент тензора напряжений при $r=\rho(\theta)$ найдем, разлагая в ряд выражения для напряжений в окрестности $r=R$. Используя метод возмущений, получим граничные условия в каждом приближении. Для нулевого приближения имеем:

$$\text{при } r=R \quad \sigma_r^{(0)} = -p^{(0)}(\theta); \quad \tau_{r\theta}^{(0)} = -fp^{(0)}(\theta) \quad (7)$$

$$\text{при } r=R_0 \quad v_r^{(0)} = 0, \quad v_\theta^{(0)} = 0$$

$$\text{при } \theta=\pm\theta_0 \quad \int_{R_0}^R \sigma_\theta^{(0)} dr = 0, \quad \int_{R_0}^R \tau_{r\theta}^{(0)} dr = 0, \quad \int_{R_0}^R \sigma_\theta^{(0)} r dr = 0 \quad (8)$$

$$\text{при } y_k = 0 \quad \begin{cases} \sigma_{y_k}^{(0)} = 0, \quad \tau_{x_k y_k}^{(0)} = 0 & \text{на свободных берегах трещин} \\ \sigma_{y_k}^{(0)} = q_{y_k}^{(0)}(x_k), \quad \tau_{x_k y_k}^{(0)} = q_{x_k y_k}^{(0)}(x_k) & \text{в концевых зонах трещин} \end{cases} \quad (9)$$

Для первого приближения имеем:

$$\text{при } r=R \quad \sigma_r^{(1)} = N - p^{(1)}(\theta); \quad \tau_{r\theta}^{(1)} = T - fp^{(1)}(\theta) \quad (10)$$

$$\text{при } r=R_0 \quad v_r^{(1)} = 0, \quad v_\theta^{(1)} = 0$$

$$\text{при } \theta=\pm\theta_0 \quad \int_{R_0}^R \sigma_\theta^{(1)} dr = 0, \quad \int_{R_0}^R \tau_{r\theta}^{(1)} dr = 0, \quad \int_{R_0}^R \sigma_\theta^{(1)} r dr = 0 \quad (11)$$

$$\text{при } y_k = 0 \quad \begin{cases} \sigma_{y_k}^{(1)} = 0, \quad \tau_{x_k y_k}^{(1)} = 0 & \text{на свободных берегах трещин} \\ \sigma_{y_k}^{(1)} = q_{y_k}^{(1)}(x_k), \quad \tau_{x_k y_k}^{(1)} = q_{x_k y_k}^{(1)}(x_k) & \text{в концевых зонах трещин} \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{Здесь } N = -H(\theta) \frac{\partial \sigma_r^{(0)}}{\partial r} + 2\tau_{r\theta}^{(0)} \frac{1}{R} \frac{dH}{d\theta}; \quad \text{при } r=R \quad (13)$$

$$T = \left(\sigma_\theta^{(0)} - \sigma_r^{(0)} \right) \frac{1}{R} \frac{dH}{d\theta} - H(\theta) \frac{\partial \tau_{r\theta}^{(0)}}{\partial r}.$$

Используя формулы Колосова-Мусхелишвили [7] задачу в каждом приближении сведем к определению двух аналитических функций. Комплексные потенциалы, описывающие напряженно-деформированное состояние во фрикционной накладке в нулевом приближении ищем в виде

$$\Phi^{(0)}(z) = \Phi_0^{(0)}(z) + \Phi_1^{(0)}(z) + \Phi_2^{(0)}(z), \quad (14)$$

$$\Psi^{(0)}(z) = \Psi_0^{(0)}(z) + \Psi_1^{(0)}(z) + \Psi_2^{(0)}(z)$$

$$\text{Здесь } \Phi^{(0)}(z) = A \ln z + d_0 + d_1 z + \frac{d_{-1}}{z} + \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k^0 z^k, \quad (15)$$

$$\Psi^{(0)}(z) = \frac{d'_{-1}}{z} + \frac{d'_{-2}}{z^2} + \frac{d'_{-3}}{z^3} + \sum_{k=-\infty}^{\infty} b_k^0 z^k,$$

$$\Phi_1^{(0)}(z) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^{N_0} \int_{-l_k}^{l_k} \frac{g_k^0(t) dt}{t-z_k}; \quad \Psi_1^{(0)}(z) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^{N_0} e^{-2i\alpha_k} \int_{-l_k}^{l_k} \left[\frac{\overline{g_k^0(t)}}{t-z_k} - \frac{\overline{T_k} e^{i\alpha_k}}{(t-z_k)^2} g_k^0(t) \right] dt; \quad (16)$$

$T_k = te^{i\alpha_k} + z_k^0$; $z_k = e^{-i\alpha_k} (z - z_k^0)$; $g_k^0(x_k)$ – искомые функции, характеризующие раскрытие берегов трещин в нулевом приближении

$$g_k^0(x_k) = \frac{2\mu}{i(1+k_0)} \frac{d}{dx_k} \left[u_k^+(x_k, 0) - u_k^-(x_k, 0) + i \left(v_k^+(x_k, 0) - v_k^-(x_k, 0) \right) \right], \quad (17)$$

μ – модуль сдвига материала накладки, $k_0=3-4\nu$; ν – коэффициент Пуассона.

Неизвестные искомые функции $g_k^0(x_k)$ и комплексные потенциалы $\Phi_2^{(0)}(z)$ и $\Psi_2^{(0)}(z)$ должны быть определены из краевых условий контуре L ($r=R$) и берегах трещин с концевыми зонами. Удовлетворяя граничному условию на внешнем контуре накладки, после некоторых преобразований и вычислений соответствующих интегралов, находим

$$\Phi_2^{(0)}(z) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^{N_0} \int_{-l_k^0}^{l_k^0} \left[\left(\frac{1}{z\overline{T_k} - 1} + \frac{1}{2} \right) \overline{T_k} e^{i\alpha_k} g_k^0(t) + \left(\frac{T_k}{2} - \frac{z^2 \overline{T_k} - 2z + T_k}{(z\overline{T_k} - 1)^2} \right) \overline{g_k^0(t)} \cdot e^{-i\alpha_k} \right] dt \quad (18)$$

$$\Psi_2^{(0)}(z) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^{N_0} \int_{-l_k^0}^{l_k^0} \left[g_k^0(t) \frac{e^{i\alpha_k} \overline{T_k}^3}{(z\overline{T_k} - 1)^2} + (z^2 \overline{T_k}^2 + 4 - 3z\overline{T_k} + zT_k \overline{T_k} - 3T_k \overline{T_k}) \frac{\overline{T_k} e^{-i\alpha_k}}{(z\overline{T_k} - 1)^3} g_k^0(t) \right] dt$$

Удовлетворяя комплексными потенциалами (14) краевым условиям на круговых границах накладки, а также учитывая разложения функции $p^{(0)}(\theta)$, которую мы считаем известной, получаем систему алгебраических уравнений относительно a_k^0 и b_k^0 :

$$\begin{aligned} 2A \ln R - A + a_0^0 + \overline{a_0^0} - b_{-2}^0 R^{-2} + d_0 + \overline{d_0} - \frac{d'_{-2}}{R^2} &= -(1-if)A_0, \\ A(1-k_0) \ln R_0 - A + a_0^0 + k_0 \overline{a_0^0} - b_{-2}^0 R^{-2} + d_0 - k_0 \overline{d_0} &= -A_0^0, \\ (1-k) a_k^0 R^k + \overline{a_{-k}^0} R^{-k} - b_{k-2}^0 R^{k-2} &= A_k'', \\ (1-k) a_k^0 R_0^k - k_0 \overline{a_{-k}^0} R_0^{-k} - b_{k-2}^0 R_0^{k-2} &= A_k'' \end{aligned} \quad (19)$$

Следуя [6], постоянные $A, d_0, d_1, d_{-1}, d'_{-1}, d'_{-2}, d'_{-3}$ можно выразить через три величины $\varepsilon_*^0, \alpha^0, \beta^0$, представляющие собой (согласно принятой в §45 [4] терминологии) характеристики дисторсии. Решение полученной системы (19) не представляет трудностей и описано в [4].

Согласно условию (8) при $\theta = \pm \theta_0$ после интегрирования, получим три уравнения для определения величин $\varepsilon_*^0, \alpha^0, \beta^0$.

Удовлетворяя функциями (14) краевым условиям (9) на берегах трещин с концевыми зонами, получим систему N_0 сингулярных интегральных уравнений относительно неизвестных функций $g_k^0(x_k)$ ($k = 1, 2, \dots, N_0$):

$$\sum_{k=1}^{N_0} \int_{-l_k^0}^{l_k^0} \left[K_{nk}(t, x) g_k^0(t) + L_{nk}(t, x) \overline{g_k^0(t)} \right] dt = \pi f_k^0 \quad |x_k| \leq l_k^0 \quad (20)$$

К системе сингулярных интегральных уравнений (20) следует добавить дополнительные равенства, выражающие однозначность смещений при обходе контура внутренних трещин с концевыми зонами

$$\int_{-l_k^0}^{l_k^0} g_k^0(t) dt = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, N_0) \quad (21)$$

Сингулярные интегральные уравнения (20) при дополнительных условиях (21) с помощью процедуры алгебраизации (см. [5], приложение) сводятся к системе алгебраических уравнений $N_0 \times M$ для нахождения $N_0 \times M$ неизвестных $g_k(t_m)$ ($k = 1, 2, \dots, N_0$; $m = 1, 2, \dots, M$)

$$\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{N_0} \ell_k \left[g_k^0(t_m) K_{nk}(\ell_k t_m, \ell_n x_r) + \overline{g_k^0(t_m)} L_{nk}(\ell_k t_m, \ell_n x_r) \right] = f_n^0(x_r),$$

$$\sum_{m=1}^M g_n(t_m) = 0 \quad (22)$$

где $t_m = \cos \frac{2m-1}{2M} \pi$ ($m = 1, 2, \dots, M$); $x_r = \cos \frac{\pi r}{M}$ ($r = 1, 2, \dots, M-1$).

В правые части алгебраических систем (22) входят неизвестные значения нормальных $q_{y_k}^{(0)}$ и касательных $q_{x_k y_k}^{(0)}$ усилий в узловых точках соответствующих концевых зон. Используя полученное решение, находим

$$g_k^0(x_k) = \frac{2\mu}{i(1+k_0)} \frac{d}{dx_k} \left[C(x_k, \sigma_k^0) (q_{y_k}^{(0)}(x_k) - i q_{x_k y_k}^{(0)}(x_k)) \right] \quad (23)$$

где x_k – аффикс точек берегов k -той концевой зоны трещины. Эти комплексные уравнения служат для нахождения приближенных значений усилий $q_{y_k}^{(0)}(t_m)$ и $q_{x_k y_k}^{(0)}(t_m)$ в узловых точках. Потребуем выполнения условий (23) в узловых точках t_m содержащихся концевых зонах. При этом используется метод конечных разностей. В результате получается комплексная алгебраическая система $N_0 \times M_l$ уравнений для определения значений $q_{y_k}^{(0)}(t_m)$,

$q_{x_k y_k}^{(0)}(t_m)$ ($k = 1, 2, \dots, N_0$; $m = 1, 2, \dots, M$) в узловых точках концевых зонах трещины.

Для замкнутости полученных алгебраических уравнений не хватает $2 \times N_0$ комплексных уравнений, определяющих размеры концевых зон трещин в нулевом приближении. Так как решение системы сингулярных интегральных уравнений (20) ищется в классе всюду ограниченных функций (напряжений), то к системе (22) необходимо добавить условия ограниченности напряжений на концах концевых зон трещин

$x_k = \pm l_k^0$ ($k = 1, 2, \dots, N_0$):

$$\sum_{m=1}^M (-1)^{M+m} g_k^{(0)}(t_m) t g \frac{2m-1}{4M} \pi = 0, \quad \sum_{m=1}^M (-1)^M g_k^{(0)}(t_m) c t g \frac{2m-1}{4M} \pi = 0. \quad (24)$$

Полученная алгебраическая система (22)-(24) из-за неизвестных размеров концевых зон трещин даже при линейно-упругих связях оказывается нелинейной. Для решения объединенной алгебраической системы использовали метод последовательных приближений. В случае нелинейного закона деформирования связей для определения усилий в концевых зонах трещин использовался также алгоритм, подобный методу упругих решений А.А. Ильюшина [6].

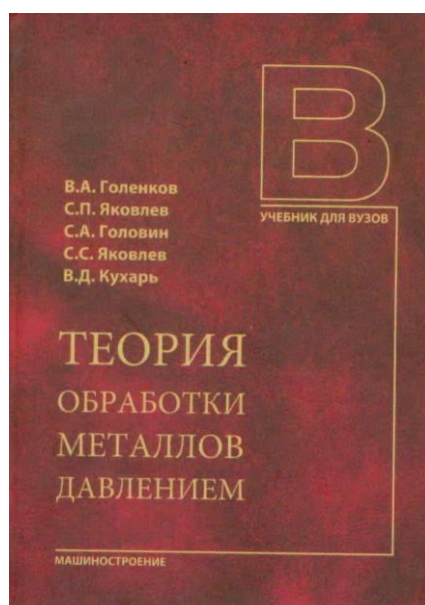
После решения объединенной алгебраической системы перейдем к построению решения задачи в первом приближении. При $r=R$ находим функции N и T . С помощью формул Колосова-Мухелишвили [4] граничные условия в первом приближении можно записать в виде краевой задачи для определения комплексных потенциалов $\Phi^{(1)}(z), \Psi^{(1)}(z)$. Функции $\Phi^{(1)}(z), \Psi^{(1)}(z)$ ищутся в виде подобном (14)-(16) с очевидными изменениями. Дальнейший ход решения задачи такой же как в нулевом приближении. После определения искомых величин для прогнозирования критического значения контактного давления в тормозном механизме, при котором происходит рост трещин использовали критерий (5).

ЛИТЕРАТУРА

1. Mirsalimov V.M. Cracks with bonding between the lips in bushings of friction couples/ V.M. Mirsalimov // Materials Science, 2006, v. 42, №2, – p.200-209.
2. Mirsalimov V.M. The solution of a problem in contact fracture mechanics on the nucleation and development of a bridged crack in the hub of a friction pair/ V.M. Mirsalimov //J. of Applied mathematics and mechanics, 2007, v. 71, №1, – p.120-136.
3. Основы трибологии /Под редакцией Чичинадзе А.В. – М.: Машиностроение, 2001, – 664с.
4. Мухелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. / Н.И. Мухелишвили –М.: Наука, 1966. – 707 с.
5. Мирсалимов В.М. Неоднородные упругопластические задачи. / В.М. Мирсалимов – М.: Наука, 1987. –256 с.
6. Ильюшин А.А. Пластичность. / А.А. Ильюшин –М.: Гостехиздат., 1948, –376 с.

Заркеш Джалил Ибрагим Халил оглы

Институт математики и механики Национальной Академии наук Азербайджана, г. Баку
аспирант
тел. (+99412) 472-20-57; (+99450) 327-07-25
E-mail: irakon63@hotmail.com



Представлены базовые сведения о кристаллографическом и реальном строении металлов. Особое внимание уделено механизмам развития пластической деформации на основе теории дислокаций на микро- и макроскопическом уровнях. Показаны основные закономерности структурообразования при холодной и горячей обработке металлов давлением, а так же проявления процессов упрочнения, разупрочнения, ползучести, сверхпластичности в металлах и сплавах.

Изложены вопросы теории напряженного и деформированного состояния металлов, методы анализа силовых и деформационных параметров процессов обработки металлов давлением. Значительное внимание уделено вопросам устойчивости пластического деформирования, рассмотрены принципы теории подобия и размерности применительно к процессам обработки металлов давлением. Приведены примеры решения технологических задач, а так же задания для самоконтроля.

Предназначен для бакалавров техники и технологии направления 150400 «Технологические машины и оборудование» и направления 150200 «Машиностроительные технологии и оборудование», для инженеров и магистров специальности 150201 «Машины и технология обработки металлов давлением», а также для научных работников и специалистов в области механики пластического формоизменения, обработки металлов давлением и технологии машиностроения. Может быть полезен инженерно-техническим и научным работникам.

И.И. ЗЮЛГЕРНЕИН

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАРОЖДЕНИЯ ТРЕЩИН ПРИ ВНУТРЕННЕМ СЖАТИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ

Рассматривается задача механики разрушения о зарождении трещин во втулке плунжерной пары. Считается, что при многократном возвратно-поступательном движении плунжера происходит зарождение трещин и разрушение материалов элементов пары. Зародышевые трещины моделируются полосами предразрушения со связями между берегами, которые рассматриваются как области ослабленных межчастичных связей материала. Принято, что внутренний контур втулки близок к круговому и имеет шероховатую поверхность.

Ключевые слова: *фрикционная пара, втулка, плунжер, зарождение трещин, зоны предразрушения со связями между берегами, силы сцепления.*

The problem of the mechanics of fracture about nucleation of cracks in the bushing friction pairs is considered. It is considered, that at repeated back and forth motion friction there is an nucleation of cracks and fracture of materials of elements of pair. Germinal cracks are modelled by strips of prefracture with interfacial bonds which are considered as area of the weakened interpartial bonds of a material. It is accepted, that the internal contour of the bushing is close to circular and has a rough surface.

Key words: *friction pair, bushing, plunger, nucleation of crack, prefracture zone with interfacial bonds, cohesive forces.*

Рассматривается контактное деформирование при внутреннем сжатии цилиндрических тел близких радиусов в предположении, что поверхности тел в области контакта имеют шероховатую поверхность. Считаем, что внешний цилиндр (втулка) представляет собой неограниченную пластину с отверстием близким круговому, в которое вставлен упругий цилиндр (вал). В центре вала приложена сосредоточенная сила P_0 , прижимающая его к границе отверстия, и сосредоточенная пара, момент которой определяется из условия предельного равновесия цилиндра под действием сил кулонового трения.

Для определения контактного давления необходимо рассмотреть [1,2] контактную задачу о вдавливания плунжера в поверхность втулки при наличии износа.

Пусть к внутренней поверхности втулки с механическими характеристиками G (модуль сдвига) и μ (коэффициент Пуассона), на некотором неизвестном участке прижимается вал с механическими характеристиками G_1 и μ_1 . Условие, связывающие перемещения втулки и вала, запишется в виде [1,2]

$$v_1 + v_2 = \delta(\theta) \quad \theta_1 \leq \theta \leq \theta_2 \quad (1)$$

Здесь $\delta(\theta)$ – осадка точек поверхности втулки и вала, определяемая формой внутренней поверхности втулки и плунжера, а также величиной прижимающей силы P_0 ;

$\theta_2 - \theta_1$ – величина угла (площадка) контакта.

В зоне контакта, кроме контактного давления, действует касательное напряжение $\tau_{r\theta}$, связанное с контактным давлением $p(\theta, t)$ по закону Кулона

$$\tau_{r\theta}(\theta, t) = f p(\theta, t), \quad (2)$$

где f – коэффициент трения пары «втулка-вал».

Отнесем втулку контактной пары к полярной системе координат $r\theta$, выбрав начало координат в центре окружности L с радиусом R . Будем считать, что внутренний контур втулки и наружный контур вала близки к круговому.

Представим границу внутреннего контура втулки L' в виде

$$r = \rho(\theta), \quad \rho(\theta) = R + \varepsilon H(\theta)$$

где $\varepsilon = R_{max}/R$ – малый параметр;

R_{\max} – наибольшая высота выступа (впадины) неровности поверхности трения.

Аналогично контур вала может быть представлен

$$\rho_1(\theta) = R' + \varepsilon H_1(\theta), \quad H_1(\theta) = \sum_{k=0}^n \left(a_k^1 \cos k\theta + b_k^1 \sin k\theta \right).$$

Считается, что износ втулки и вала носит абразивный характер.

Для перемещений точек поверхности трения втулки имеем

$$v_1 = v_{1y} + v_{1u} + v_{1u}, \quad (3)$$

где v_{1y} – упругие перемещения контактной поверхности втулки;

v_{1u} , v_{1u} – перемещения, вызванные снятием микровыступов и износом поверхности втулки, соответственно.

Аналогично, для перемещений контактной поверхности вала имеем

$$v_2 = v_{2y} + v_{2u} + v_{2u}. \quad (4)$$

Скорость изменения перемещений поверхности при износе втулки и вала будет [2]

$$\frac{dv_{ju}}{dt} = K^{(j)} p(\theta, t) \quad (j=1,2), \quad (5)$$

где $K^{(j)}$ – коэффициент изнашивания материала втулки и вала ($j=1,2$) соответственно.

По мере нагружения втулки в процессе работы контактной пары силовой нагрузкой будут возникать зоны предразрушения, которые моделируем как области ослабленных межчастичных связей материала. Взаимодействие берегов этих областей моделируется путем введения между берегами полосы предразрушения связей, имеющих заданную диаграмму деформирования. Физическая природа таких связей и размеры областей предразрушения, в которых осуществляется взаимодействие берегов областей межчастичных связей, зависят от вида материала. Так как указанные зоны малы по сравнению с остальной частью втулки, их можно мысленно удалить, заменив разрезами, поверхности которых взаимодействуют между собой по некоторому закону, соответствующему действию удаленного материала.

Считается, что закон деформирования связей задан. Отметим, что в работах [3-5] рассматривались уравнения деформирования связей для различных материалов.

В исследуемом случае возникновение трещин представляет собой процесс перехода области предразрушения в область разорванных связей между поверхностями материала.

Будем полагать, что полосы предразрушения ориентированы в направлении максимальных растягивающих напряжений, возникающих во втулке. В центрах полос предразрушения разместим начала локальных систем координат $x_k O_k y_k$, оси x_k которых совпадают с линиями полос и образуют углы α_k с осью $x(\theta=0)$.

При действии внешних нагрузок на втулку в связях, соединяющих берега полосы предразрушения, будут возникать нормальные $q_{y_k}(x_k)$ и касательные $q_{x_k y_k}(x_k)$ усилия.

Величины этих напряжений заранее неизвестны и подлежат определению в процессе решения краевой задачи механики разрушения.

Для определения перемещений v_{1y} и v_{1u} необходимо решить следующую задачу теории упругости для втулки:

$$\sigma_n = -p(\theta); \quad \tau_{nt} = -fp(\theta) \quad \text{при } r = \rho \text{ на контактной площадке} \quad (6)$$

$$\sigma_n = 0; \quad \tau_{nt} = 0 \quad \text{при } r = \rho \text{ вне площадки контакта}$$

на берегах полос предразрушения

$$\sigma_{y_k} = q_{y_k}(x_k); \quad \tau_{x_k y_k} = q_{x_k y_k}(x_k) \quad \text{при } |x_k| \leq l_k, \quad (7)$$

n, t – натуральные коэффициенты; $\sigma_n, \sigma_t, \tau_{nt}$ – компоненты тензора напряжений.

Аналогично ставится задача теории упругости для определения перемещений v_{2y}, v_{2u} контактной поверхности вала

$$\text{при } r = -\rho(\theta) \quad \sigma_n = -p(\theta); \quad \tau_{nt} = -fp(\theta) \text{ на площадке контакта} \quad (8)$$

$$\sigma_n = 0; \quad \tau_{nt} = 0 \quad \text{вне площадки контакта.}$$

Основные соотношения рассматриваемой задачи должны быть дополнены следующим уравнением

$$v_k^+(x_k, 0) - v_k^-(x_k, 0) - i(u_k^+(x_k, 0) - u_k^-(x_k, 0)) = C(x_k, \sigma_k) \left(q_{y_k}(x_k) - iq_{x_k y_k}(x_k) \right) \quad (9)$$

$(k = 1, 2, \dots, N_0)$

Здесь функцию $C(x_k, \sigma_k)$ можно рассматривать как эффективную податливость связей, зависящую от натяжения;

σ_k – модуль вектора усилий в связях,

Используя изложенную в [6] расчетную методику, найдем граничные условия в каждом приближении: для нулевого приближения задачи

$$\sigma_r^{(0)} = -p^{(0)}(\theta); \quad \tau_{r\theta}^{(0)} = -fp^{(0)}(\theta) \quad \text{при } r=R \text{ на площадке контакта} \quad (10)$$

$$\sigma_r^{(0)} = 0; \quad \tau_{r\theta}^{(0)} = 0 \quad \text{при } r=R \text{ вне площадки контакта}$$

на берегах полос предразрушения

$$\sigma_{y_k}^{(0)} = q_{y_k}^{(0)}; \quad \tau_{x_k y_k}^{(0)} = q_{x_k y_k}^{(0)} \quad \text{при } |x_k| \leq l_k, \quad (k = 1, 2, \dots, N_0) \quad (11)$$

для первого приближения задачи

$$\sigma_r^{(1)} = N - p^{(1)}(\theta); \quad \tau_{r\theta}^{(1)} = T - fp^{(1)}(\theta) \quad \text{при } r=R \text{ на площадке контакта} \quad (12)$$

$$\sigma_r^{(1)} = N; \quad \tau_{r\theta}^{(1)} = T \quad \text{при } r=R \text{ вне площадки контакта}$$

на берегах полос предразрушения

$$\sigma_{y_k}^{(1)} = q_{y_k}^{(1)}; \quad \tau_{x_k y_k}^{(1)} = q_{x_k y_k}^{(1)} \quad \text{при } |x_k| \leq l_k \quad (13)$$

$$\text{Здесь } N = -H(\theta) \frac{\partial \sigma_r^{(0)}}{\partial r} + 2\tau_{r\theta}^{(0)} \frac{1}{R} \frac{dH}{d\theta}; \quad \text{при } r = R$$

$$T = \left(\sigma_{\theta}^{(0)} - \sigma_r^{(0)} \right) \frac{1}{R} \frac{dH}{d\theta} - H(\theta) \frac{\partial \tau_{r\theta}^{(0)}}{\partial r}.$$

Аналогично можно записать краевые условия в каждом приближении для вала. Дополнительные соотношения (9) соответственно принимают следующий вид:

$$\begin{aligned} & \left(v_k^{(0)+}(x_k, 0) - v_k^{(0)-}(x_k, 0) \right) - i \left(u_k^{(0)+}(x_k, 0) - u_k^{(0)-}(x_k, 0) \right) = \\ & = C(x_k, \sigma_k^{(0)}) \left[q_{y_k}^{(0)}(x_k) - iq_{x_k y_k}^{(0)}(x_k) \right] \end{aligned} \quad (14)$$

в первом приближении

$$\begin{aligned} & \left(v_k^{(1)+}(x_k, 0) - v_k^{(1)-}(x_k, 0) \right) - i \left(u_k^{(1)+}(x_k, 0) - u_k^{(1)-}(x_k, 0) \right) = \\ & = C(x_k, \sigma_k^{(1)}) \left[q_{y_k}^{(1)}(x_k) - iq_{x_k y_k}^{(1)}(x_k) \right] \end{aligned} \quad (15)$$

Краевые условия задачи в нулевом приближении (10)-(11) с помощью формул Колосова-Мусхелишвили [7] запишем для комплексных потенциалов $\Phi^{(0)}(z)$ и $\Psi^{(0)}(z)$. На круговых границах втулки они будут иметь вид

$$\Phi^{(0)}(z) + \Phi^{(0)}(\bar{z}) - e^{2i\theta} \left[\bar{z} \Phi^{(0)\prime}(\bar{z}) + \Psi^{(0)}(z) \right] = X^{(0)}(\theta) \quad (16)$$

$$z = Re^{i\theta}; \quad X^{(0)}(\theta) = \begin{cases} -(1-if)p^{(0)}(\theta) & \text{на контактной площадке} \\ 0 & \text{вне площадки контакта} \end{cases}$$

Граничные условия на берегах полос запишутся в виде:

$$\Phi^{(0)}(t) + \overline{\Phi^{(0)}(t)} + \bar{t}\Phi^{(0)\prime}(t) + \Psi^{(0)}(t) = q_{y_k}^{(0)} + iq_{x_k y_k}^{(0)}, \quad (17)$$

$$(k = 1, 2, \dots, N_0)$$

где t – аффикс точек берегов полосы предразрушения.

Комплексные потенциалы $\Phi^{(0)}(z)$, $\Psi^{(0)}(z)$, $\Phi_1^{(0)}(z)$, $\Psi_1^{(0)}(z)$ и $\Phi_2^{(0)}(z)$, $\Psi_2^{(0)}(z)$ ищем в виде

$$\Phi^{(0)}(z) = \sum_{k=0}^2 \Phi_k^{(0)}(z); \quad \Psi^{(0)}(z) = \sum_{k=0}^2 \Psi_k^{(0)}(z) \quad (18)$$

$$\Phi_1^{(0)}(z) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^{N_0} \int_{-l_k}^{l_k} \frac{g_k^0(t) dt}{t - z_k}; \quad (19)$$

$$\Psi_1^{(0)}(z) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^{N_0} e^{-2i\alpha_k} \int_{-l_k}^{l_k} \left[\frac{g_k^0(t)}{t - z_k} - \frac{\bar{T}_k e^{i\alpha_k}}{(t - z_k)^2} g_k^0(t) \right] dt;$$

$$T_1 = te^{i\alpha} + z_1^0; \quad z_1 = e^{-i\alpha} (z - z_1^0)$$

$$\Phi_2^{(0)}(z) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^{N_0} \int_{-l_k}^{l_k} \left[\left(-\frac{1}{z} - \frac{\bar{T}_k}{z - \bar{T}_k} \right) e^{i\alpha_k} g_k^0(t) + \overline{g_k^0(t)} \cdot e^{-i\alpha_k} \frac{1 - T_k \bar{T}_k}{\bar{T}_k (1 - z \bar{T}_k)^2} \right] dt$$

$$\Psi_2^{(0)}(z) = \frac{1}{2\pi z} \sum_{k=1}^{N_0} \int_{-l_k}^{l_k} \left\{ g_k^0(t) \left[\frac{1}{z T_k} - \frac{2}{z^2} - \frac{\bar{T}_k}{z(1 - z \bar{T}_k)} + \frac{\bar{T}_k^2}{(1 - z \bar{T}_k)^2} \right] e^{i\alpha_k} + \right.$$

$$\left. + e^{-i\alpha_k} \overline{g_k^0(t)} \left[-\frac{1}{1 - z T_k} + \frac{1 - T_k \bar{T}_k}{z \bar{T}_k (1 - z \bar{T}_k)^2} - \frac{2(1 - T_k \bar{T}_k)}{(1 - z \bar{T}_k)^3} \right] \right\} dt \quad (20)$$

Здесь $g^0(t)$ – искомые функции, характеризующие раскрытие берегов при переходе через полосу предразрушения.

Для определения потенциалов $\Phi_0^{(0)}(z)$ и $\Psi_0^{(0)}(z)$ используем метод Н.И.Мусхелишвили [7].

$$\Phi_0^{(0)}(z) = -\frac{1}{2\pi i} \int \frac{X^{(0)}(\sigma) d\sigma}{\sigma - z}, \quad \sigma = e^{i\theta} \quad (21)$$

$$\Psi_0^{(0)}(z) = \frac{1}{z^2} \Phi_0^{(0)}(z) + \frac{1}{z^2} \overline{\Phi_0^{(0)}\left(\frac{1}{z}\right)} - \frac{1}{z} \Phi_0^{(0)\prime}(z)$$

Удовлетворяя перечисленными функциями (18)-(20) краевому условию на берегах полос предразрушения, находим сингулярное интегральное уравнение относительно неизвестной функции $g^0(x_1)$:

$$\sum_{k=1}^{N_0} \int_{-l_k}^{l_k} \left[R_{nk}(t, x_k) g_k^0(t) + S_{nk}(t, x_k) \overline{g_k^0(t)} \right] dt = \pi \left[q_{y_n}^0 - i q_{x_n y_n}^{(0)} + f_n^0(x_n) \right] \quad |x_n| \leq l_n \quad (22)$$

$$f_n^{(0)}(x_n) = - \left[\Phi_0^{(0)}(x_n) + \overline{\Phi_0^{(0)}(x_n)} + x_n \overline{\Phi_0^{(0)'}}(x_n) + \overline{\Psi_0^{(0)}}(x_n) \right],$$

где переменные x_n, t, z_n^0 и l_n – безразмерные величины, отнесенные к R ;

R_{nk}, S_{nk} определяются по соотношениям (VI.61) книги [8].

К сингулярному интегральному уравнению для внутренних полос предразрушения в нулевом приближении следует добавить дополнительное равенство

$$\int_{-l_k}^{l_k} g_k^0(t) dt = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, N_0) \quad (23)$$

С помощью процедуры алгебраизации [8,9] сингулярное интегральное уравнение (22) при отмеченном условии (23) сводится к системе $N_0 \times M$ комплексных алгебраических уравнений для нахождения $N_0 \times M$ неизвестных $g_k^{(0)}(t_m) = v_k^0(t_m) - i u_k^0(t_m)$ ($m=1, 2, \dots, M$; $k = 1, 2, \dots, N_0$)

$$\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{N_0} \ell_k \left[g_k^{(0)}(t_m) R_{nk}(\ell_k t_m, \ell_n x_r) + \overline{g_k^{(0)}(t_m)} S_{nk}(\ell_k t_m, \ell_n x_r) \right] =$$

$$= f_n^0(x_r) + q_{y_n}^{(0)}(x_r) - i q_{x_n y_n}^{(0)}(x_r), \quad r = 1, 2, \dots, M-1$$

$$\sum_{m=1}^M g_k^{(0)}(t_m) = 0$$

где $t_m = \cos \frac{2m-1}{2M} \pi$ ($m = 1, 2, \dots, M$); $x_r = \cos \frac{\pi r}{M}$ ($r = 1, 2, \dots, M-1$).

Если в (24) перейти к комплексно сопряженным значениям, получим еще M алгебраических уравнений. В правые части (24) входят неизвестные значения усилий $q_{y_k}^{(0)}(x_r)$ и $q_{x_k y_k}^{(0)}(x_r)$ в связях. Условием, определяющим усилия в связях, возникающие на берегах полосы предразрушения, является дополнительные условия (14) в нулевом приближении. В рассматриваемой задаче эти дополнительные условия удобнее записать для производной раскрытия берегов полосы предразрушения

$$g_k^{(0)}(x_k) = \frac{2G}{i(1+k_b)} \frac{d}{dx_k} \left[C(x_k, \sigma_k^{(0)}) \left(q_{y_k}^{(0)}(x_k) - i q_{x_k y_k}^{(0)}(x_k) \right) \right] \quad (25)$$

где $k_b=3-4\mu$ для плоской деформации, $k_b=(3-\mu)/(1+\mu)$ для плоского напряженного состояния.

Для построения недостающих алгебраических уравнений для нахождения приближенных значений усилий $q_{y_k}^{(0)}(x_r)$ и $q_{x_k y_k}^{(0)}(x_r)$ в узловых точках потребуем выполнения условия (25) в узловых точках. При этом используем метод конечных разностей.

Записывая условия конечности напряжений, находим еще $N_0 \times M$ недостающих уравнения в виде

$$\sum_{m=1}^M (-1)^m g_k^{(0)}(t_m) \operatorname{ctg} \frac{2m-1}{4M} \pi = 0, \quad (26)$$

$$\sum_{m=1}^M (-1)^{M+m} g_k^{(0)}(t_m) \operatorname{tg} \frac{2m-1}{4M} \pi = 0. \quad (k = 1, 2, \dots, N_0)$$

С помощью комплексных потенциалов (18)-(20), формул Колосова-Мухелишвили [7] и интегрирования кинетического уравнения (5) изнашивания материала втулки в нулевом приближении находим перемещения $u_1^{(0)}$ контактной поверхности втулки. Аналогично находится решение задачи теории упругости для вала в нулевом приближении. Используя его и кинетическое уравнение изнашивания материала вала в нулевом приближении, находим перемещение $u_2^{(0)}$ контактной поверхности вала. Найденные величины $u_1^{(0)}$ и $u_2^{(0)}$ подставляем в основное контактное уравнение (1) в нулевом приближении. Для алгебраизации основного контактного уравнения неизвестные функции контактного давления в нулевом приближении ищутся в виде разложений

$$p^{(0)}(\theta, t) = p_0^0(\theta) + t p_1^0(\theta) + \dots; \quad (27)$$

$$p_0^0(\theta) = \sum_{k=0}^{\infty} \left(\alpha_k^0 \cos k\theta + \beta_k^0 \sin k\theta \right);$$

$$p_1^0(\theta) = \sum_{k=0}^{\infty} \left(\alpha_k^1 \cos k\theta + \beta_k^1 \sin k\theta \right).$$

Подставляя соотношение в основное контактное уравнение в нулевом приближении, получим функциональные уравнения для последовательного определения $p_0^0(\theta)$, $p_1^0(\theta)$ и т.д. Для построения алгебраической системы нахождения α_k , β_k приравняем коэффициенты при одинаковых тригонометрических функциях в левой и правой частях функционального уравнения контактной задачи. Получаем бесконечную алгебраическую систему относительно α_k^0 ($k=0, 1, 2, \dots$), β_k^0 ($k=1, 2, \dots$) и α_k^1 , β_k^1 и т.д.

Из-за неизвестных величин θ_1 и θ_2 система уравнений оказывается нелинейной. Для определения величин θ_1 и θ_2 ($\theta_1 = \theta_1^0 + \varepsilon \theta_1^1 + \dots$; $\theta_2 = \theta_2^0 + \varepsilon \theta_2^1 + \dots$) имеем условие:

для нулевого приближения

$$p^{(0)}(\theta_1^0) = 0; \quad p^{(0)}(\theta_2^0) = 0;$$

для первого приближения

$$p^{(0)}(\theta_1^1) = 0; \quad p^{(0)}(\theta_2^1) = 0.$$

В правые части бесконечных алгебраических систем относительно α_k , β_k входят интегралы от неизвестной функции $q_k^{(0)}(x_k)$. Таким образом, бесконечные алгебраические

системы относительно α_k , β_k и конечные системы относительно $q_k^{(0)}(x_k)$, $q_{y_k}^{(0)}$, $q_{x_k y_k}^{(0)}$, ℓ_k связаны между собой и их надо решать совместно. Объединенная система уравнений даже при линейно-упругих связях из-за неизвестных величин θ_1 , θ_2 , ℓ_k оказывается нелинейной. Для ее решения в нулевом приближении использовали методы редукции и последовательных приближений [9]. В случае нелинейного закона деформирования связей для определения усилий в связях используем также итерационный алгоритм, подобный методу упругих решений [10]. Нелинейная часть кривой деформирования связей представлялась в форме

билинейной зависимости [11] выходящий участок, которой соответствовал упругому деформированию связей ($0 < V(x_l) < V_*$) с максимальным натяжением связей. При $V(x_l) > V_*$ закон деформирования описывался нелинейной зависимостью, определяемой двумя точками (V_*, σ) и $(\delta_{cr}, \sigma_{cr})$, причем при $\sigma_{cr} \geq \sigma_*$ имеем возрастающую линейную зависимость (линейное упрочнение, соответствует упругопластической деформации связей).

После определения искоемых величин нулевого приближения можно перейти к построению решения задачи в первом приближении. На основании полученного решения при $r=R$ определяются N и T . Краевые условия (12), (13) можно записать в виде граничной задачи для отыскания комплексных потенциалов $\Phi^{(1)}(z)$ и $\Psi^{(1)}(z)$, которые ищем в виде как (18) с очевидными изменениями. Дальнейший ход решения как в нулевом приближении.

Полученное комплексное интегральное уравнение относительно $g_k^{(1)}(t), \overline{g_k^{(1)}}(t)$ при дополнительном условии типа (23) с помощью процедуры алгебраизации сводится к системе M алгебраических уравнений для определения $N_0 \times M$ неизвестных $g_k^{(0)}(t_m)$ ($m=1, 2, \dots, M$).

В правую часть этой системы входят искоемые коэффициенты разложения контактного давления $p^{(1)}(\theta)$, неизвестные значения усилий в связях $q_{y_k}^{(0)}(x_k)$ и $q_{x_k y_k}^{(0)}(x_k)$.

Построение недостающих уравнений для определения неизвестных усилий в связях в узловых точках и размера зоны предразрушения осуществляется аналогично нулевому приближению. Таким же образом решается задача теории упругости для вала в первом приближении. Алгебраизация разрешающего уравнения контактной задачи в первом приближении проводится аналогично нулевому приближению. Для этого искоемые функции контактного давления представляются в виде

$$p^{(1)}(\theta, t) = p_0^1(\theta) + t p_1^1(\theta) + \dots;$$

$$p_0^1(\theta) = \alpha_{0,0}^1 + \sum_{k=0}^{\infty} \left(\alpha_{k,0}^1 \cos k\theta + \beta_{k,0}^1 \sin k\theta \right);$$

$$p_1^1(\theta) = \alpha_{0,1}^1 + \sum_{k=0}^{\infty} \left(\alpha_{k,1}^1 \cos k\theta + \beta_{k,1}^1 \sin k\theta \right), \dots$$

В результате получаем бесконечные линейные алгебраические системы относительно $\alpha_{0,0}^1, \alpha_{k,0}^1, \beta_{k,0}^1$ ($k=1, 2, \dots$) и $\alpha_{0,1}^1, \alpha_{k,1}^1, \beta_{k,1}^1$ ($k=1, 2, \dots$) и т.д.

Из-за неизвестных величин θ_1^1 и θ_2^1 система уравнений оказывается нелинейной. Построенная объединенная система уравнений является замкнутой и позволяет при заданных функциях $H(\theta)$ и $H_l(\theta)$ численными расчетами найти контактное давление, усилия в связях, размеры полос предразрушения, напряженно-деформированное состояние и износ втулки и вала контактной пары. Функции $H(\theta)$ и $H_l(\theta)$ описывающие шероховатости внутренней поверхности втулки и вала, рассматривали как детерминированные совокупности неровностей профиля контуров, а также стационарной случайной функцией с нулевым средним значением и известной дисперсией.

Наибольшие значения контактного давления, как правило, находятся в средней части контактной поверхности в зависимости от угла обхвата, коэффициента трения. Наличие сил трения в зоне контакта приводит к смещению графика распределения контактного давления в сторону противоположную действию момента.

Используя решение задачи, вычислим смещения на берегах полосы предразрушения

$$-\frac{1+k_b}{2G} \int_{-\ell_k}^{x_k} g(x_k) dx_k = v_k(x_k, 0) - i u_k(x_k, 0).$$

Полагая $x_k = x_0$, применяя замену переменной, заменяя интеграл суммой, находим вектор смещения на берегах полосы предразрушения при $x_k = x_0$

$$V_0 = \sqrt{u^2 + v^2} = \frac{1+k_b}{2G} \frac{\pi \ell}{M} \sqrt{A^2 + B^2}; \quad (28)$$

$$A = \sum_{m=1}^{M_1} v^0(t_m) + \varepsilon v^1(t_m); \quad B = \sum_{m=1}^M u^0(t_m) + \varepsilon u^1(t_m)$$

Здесь M_1 – число узловых точек, содержащихся в интервале $(-\ell_k, x_0)$.

В качестве условия зарождения трещины принимаем критерий критического раскрытия берегов полосы предразрушения. Учитывая соотношение (9), предельное условие можно записать в виде

$$C(x_0, \sigma(x_0)) \sigma(x_0) = \delta_{cr} \quad (29)$$

где δ_{cr} – характеристика сопротивления материала втулки трещинообразованию.

Совместное решение объединенной алгебраической системы и условия (29) дает возможность при заданных характеристиках трещиностойкости материала определить предельную величину внешней нагрузки (контактного давления), размеры полос предразрушения для состояния предельного равновесия, при которых зарождаются трещины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Галин Л.А. Контактные задачи теории упругости и вязкоупругости. / Л.А. Галин – М.: Наука, 1980.– 304 с.
2. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. / И.Г. Горячева – М.: Наука, 2001. – 478 с.
3. Budiansky B. Fiber-matrix de bonding effects on cracking in aligned fiber ceramic composites / B. Budiansky, A.G. Evans, J.W. Hutchinson // Int. J. Solid Structures, 1995, v. 32, №3-4. –p. 315-328.
4. Ji. H., Adhesion via Connector Molecules: The Many-Stitch Problem / H. Ji, P.G. de Gennes, // Macromolecules. 1993. v.26. – p. 520-525.
5. Cox B.N., Concepts for bridged cracks fracture and fatigue / B.N. Cox, D.B. Marshall // Acta Met. Mater, 1994, v. 42, №2, – p. 341-363.
6. Mirsalimov V.M. Simulation of bridged crack closure in contact pair bushing/ V.M. Mirsalimov // Mechanis of Solids, 2009, v. 44. №2, – p. 232-243.
7. Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. / Н.И. Мусхелишвили –М.: Наука, 1966. – 707 с.
8. Панасюк В.В., Распределение напряжений около трещин в пластинах и оболочках. / В.В. Панасюк, М.П. Саврук, А.П. Дацишин – Киев: Наук. думка, 1976. – 443 с.
9. Мирсалимов В.М. Неоднородные упругопластические задачи. / В.М. Мирсалимов – М.: Наука, 1987. –256 с.
10. Ильюшин А.А. Пластичность. / А.А. Ильюшин –М.: Гостехиздат., 1948, –376 с.
11. Гольдштейн Р.В., Рост трещин по границе соединения материалов // Проблемы механики: Сб. статей к 90-летию со дня рождения А.Ю.Ишлинского / Под ред. Д.М.Климова. / Р.В. Гольдштейн, М.Н.Перельмутер – М.: Физматлит, 2003. – с. 221-238.

Зюлгернеин Ибрагим Искендер оглы

Институт математики и механики Национальной Академии наук Азербайджана, г. Баку
аспирант

тел. (+99412) 439-13-37

E-mail: irakon63@hotmail.com

СКОРОСТНОЙ ВАРИАЦИОННЫЙ ПРИНЦИП КВАЗИСТАТИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ АБСОЛЮТНО ЖЁСТКОГО ТЕЛА В КОНТАКТНЫХ ЗАДАЧАХ

Рассматривается квазистатическое равновесие абсолютно жёсткого тела. Исходя из принципа виртуальной мощности Журдена и формулы для обобщённых сил выводится вариационный принцип, являющийся необходимым и достаточным условием равновесия. В отличие от известных принципов он включает в себя как распределённую нагрузку, так и обобщённые силы.

Ключевые слова: контактная задача, квазистатическое равновесие, вариационный принцип, обобщённая сила.

An equilibrium of a rigid body in contact problem is considered. Based on a virtual power principle and a generalized force formula a variational principle is deduced. It turns out that the principle is a necessary and sufficient condition of equilibrium. In opposite to known principles, both a distributed loading and a generalized force are involved.

Key words: contact problem, quasistatic equilibrium, variational principle, generalized force.

Вариационные принципы служат основой численных конечноэлементных моделей. В механике деформируемого твёрдого тела получили широкое распространение скоростные вариационные принципы как наиболее общие. К таковым относится принцип квазистатического равновесия [1] деформируемого тела, подверженного воздействию объёмной и поверхностной нагрузок. Данная работа посвящена выводу принципа квазистатического равновесия абсолютно жёсткого тела с учётом специфики контактных задач, где это тело часто играет роль обрабатывающего инструмента, воздействующего на деформируемое тело.

Введём следующие обозначения: t – время, либо параметр нагружения; $V(t)$ – область неподвижного пространства, занимаемая абсолютно жёстким телом, на которой действует распределённая по объёму внешняя нагрузка \mathbf{f} ; (ξ^1, ξ^2, ξ^3) – подвижная система координат, связанная с абсолютно жёстким телом и движущаяся вместе с ним так, что координаты ξ^1, ξ^2, ξ^3 произвольной материальной точки неизменны во времени; \mathbf{r} – радиус-вектор произвольной материальной точки в неподвижной системе отсчёта; $S(t) \subset \partial V(t)$ – поверхность контакта с деформируемым телом, на которой действует распределённая нагрузка \mathbf{p} ; $S'(t) \subset \partial V(t)$ – часть поверхности, на которой действует распределённая нагрузка \mathbf{p}' (неважно, контактная или другой природы); (q^1, \dots, q^6) – система обобщённых координат, определяющая положение абсолютно жёсткого тела в неподвижном пространстве; $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$ – поле скорости материальных точек деформируемого тела; \mathbf{d} – тензор деформации скорости [2], относящийся к деформируемому телу; \mathbf{n} – внешняя нормаль к поверхности абсолютно жёсткого тела.

Приступим непосредственно к выводу. Применяя принцип виртуальной мощности Журдена к абсолютно жёсткому телу, находящемуся в состоянии квазистатического равновесия, получим

$$\iint_{S(t)} \delta \dot{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{p} dS + \iint_{S'(t)} \delta \dot{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{p}' dS + \iiint_{V'(t)} \delta \dot{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{f} dV = 0 \quad (1)$$

Но вариация $\delta\dot{\mathbf{r}}$ скорости материальных точек абсолютно жёсткого тела зависит от вариаций обобщённых скоростей $\delta\dot{q}^i$ в силу соотношения $\mathbf{r} = \mathbf{r}(q^1, \dots, q^6, \xi^1, \xi^2, \xi^3)$ (координаты ξ^1, ξ^2, ξ^3 каждой такой точки, как было отмечено, фиксированы и не варьируются):

$$\delta\dot{\mathbf{r}} = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial q^i} \delta\dot{q}^i \quad (2)$$

По повторяющимся индексам здесь и далее подразумевается суммирование. Подставляя (2) в (1) и вводя обозначение

$$Q_i = \iint_{S'(t)} \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial q^i} \cdot \mathbf{p}' dS + \iiint_{V'(t)} \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial q^i} \cdot \mathbf{f} dV$$

перепишем (1) в виде

$$Q_i \delta\dot{q}^i + \iint_{S(t)} \delta\dot{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{p} dS = 0 \quad (3)$$

Полученное равенство позволяет интерпретировать величины Q_i как энергетически сопряжённые обобщённым координатам q^i обобщённые силы, действующие на абсолютно жёсткое тело. Отсюда, учитывая (2) и произвольность вариаций $\delta\dot{q}^i$, выводим

$$Q_i + \iint_{S(t)} \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial q^i} \cdot \mathbf{p} dS = 0 \quad (4)$$

Если провести рассуждения в обратном порядке, то из (4) можно вывести (1). Таким образом, (1) и (4) равносильны. Для того чтобы получить скоростной вариационный принцип, вычислим скорости обобщённых сил:

$$-\dot{Q}_i = \iint_{S(t)} \left(\frac{\partial \dot{\mathbf{r}}}{\partial q^i} \cdot \mathbf{p} + \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial q^i} \cdot \dot{\mathbf{p}} + \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial q^i} \cdot \mathbf{p} \lambda \right) dS$$

где $\lambda = \nabla \cdot \mathbf{v} - \mathbf{n} \cdot \mathbf{d} \cdot \mathbf{n}$ есть скорость относительного изменения элемента площади поверхности деформируемого тела в зоне контакта. Правую часть разобьём на два слагаемых:

$$-\dot{Q}_i = \iint_{S(t)} \frac{\partial \dot{\mathbf{r}}}{\partial q^i} \cdot \mathbf{p} dS + \iint_{S(t)} \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial q^i} \cdot (\dot{\mathbf{p}} + \mathbf{p} \lambda) dS \quad (5)$$

Далее найдём свёртку $\dot{Q}_i \delta\dot{q}^i$, умножив обе части этого равенства на $\delta\dot{q}^i$ и учитывая (2):

$$-\dot{Q}_i \delta \dot{q}^i = \iint_{S(t)} \frac{\partial^2 \mathbf{r}}{\partial q^i \partial q^j} \dot{q}^j \delta \dot{q}^i \cdot \mathbf{p} dS + \iint_{S(t)} \delta \dot{\mathbf{r}} \cdot (\dot{\mathbf{p}} + \mathbf{p} \lambda) dS$$

Вводя аналоги символов Кристоффеля Γ_{ij}^k , определяемые из соотношения $\frac{\partial^2 \mathbf{r}}{\partial q^i \partial q^j} = \Gamma_{ij}^k \mathbf{e}_k$,

где $\mathbf{e}_k = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial q^k}$, перепишем последнее равенство в виде

$$\dot{Q}_i \delta \dot{q}^i + \dot{q}^j \delta \dot{q}^i \iint_{S(t)} \Gamma_{ij}^k \mathbf{e}_k \cdot \mathbf{p} dS + \iint_{S(t)} \delta \dot{\mathbf{r}} \cdot (\dot{\mathbf{p}} + \mathbf{p} \lambda) dS = 0 \quad (6)$$

Напомним, что независимыми здесь являются лишь вариации $\delta \dot{q}^i$, тогда как вариация $\delta \dot{\mathbf{r}}$ зависит от $\delta \dot{q}^i$. Полученное равенство представляет собой искомым скоростной принцип равновесия абсолютно жёсткого тела. Он может быть использован для вариационных постановок контактных задач совместно с каким-либо принципом равновесия деформируемого тела (например, [1]). Докажем, что (6) является достаточным условием равновесия. Поскольку вариации $\delta \dot{q}^i$ произвольны, то из (6) следует формула (5) для скоростей обобщённых сил. Считая, что в начальный момент времени t_0 абсолютно жёсткое тело находится в состоянии равновесия, а значит выполняется (4), проинтегрируем (5) по времени от t_0 до произвольного момента t . В результате получим формулу (4) для обобщённых сил, равносильную, как это было отмечено, принципу Журдена (1). Достаточность доказана.

Замечание 1. В [3] дано не вполне удачное определение скоростей обобщённых сил, поскольку оно не привязано к принципу виртуальной мощности и отличается от (5) отсутствием первого слагаемого в правой части.

Замечание 2. Соотношение (6) можно получить из (3) дифференцированием по времени при дополнительном предположении о дифференцируемости вариаций $\delta \dot{q} = \delta \dot{q}(t)$.

Автор благодарит проф. ТулГУ А.А. Маркина за постановку задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Толоконников О.Л., Маркин А.А., Астапов В.Ф. Исследование процесса формоизменения с учётом конечности деформаций // Прикладная механика. 1983, №10, С. 122-125.
2. Поздеев, А.А. Большие упругопластические деформации: теория, алгоритмы, приложения/ А.А. Поздеев, П.В. Трусов, Ю.И. Няшин. - М.: Наука, 1986. - 231 с.
3. Морев, П. Г. Вариант метода конечных элементов для контактных задач с трением// Известия РАН, сер. Механика твёрдого тела. 2007, №4, С. 168-182.

Морев Павел Геннадьевич

Орловский государственный технический университет, г. Орёл

Кандидат физико-математических наук, ведущий инженер лаборатории новых материалов

Тел. (4862) 41-98-59

E-mail: paulorel@mail.ru

Е.Н. КОРНЕЕВА, В.А. ГОРДОН, Ю.С. КОРНЕЕВ

МЕТОДЫ РУНГЕ И ШТЕРМЕРА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ПЕРВОГО ПОРЯДКА

В работе рассмотрено уточненное решение дифференциальных уравнений разгона привода с пускозащитной муфтой с момента начала движения рабочей машины.

Ключевые слова: машинный агрегат, привод, муфта, дифференциальное уравнение.

This article is considered to specify decision of the differential equations of dispersal of a drive gear from the moment of start of motion of working machine.

Key words: engine unit, drive gear, clutch, differential equation.

Одной из важнейших задач, стоящих в области машиностроения, является повышение производительности и надежности машин и механизмов. В большинстве случаев повышение производительности достигается за счет увеличения скорости движения рабочих органов машин и усилий, приложенных к ним. Это связано с повышением мощности привода, а, следовательно, и с возрастанием нагрузок, действующих на отдельные его узлы и детали. Противоречие между экономической необходимостью уменьшения габаритов и масс высокопроизводительного оборудования, с одной стороны, и необходимостью повышения его надежности, с другой, может быть устранено, если в приводы машин ввести автоматические устройства, защищающие их от любого вида перегрузок. В настоящее время перспективным элементом привода технологической или транспортной машины являются пускозащитные муфты [1], обеспечивающие требуемые параметры разгона машин.

Наиболее ответственным этапом разгона машинного агрегата с пускозащитной муфтой является момент начала срабатывания рабочей машины с места. В этот период момент сил трения во фрикционном узле муфты становится больше момента сил сопротивления со стороны рабочей машины, то есть $T_f > T_c$. Период продолжается до тех пор, пока не наступит установившееся движение.

На этом этапе начинает двигаться ведомая полумуфта 3 вместе с рабочей машиной [2]. Уравнения движения с учетом динамической характеристики электродвигателя при уточненном расчете примут вид:

$$\frac{dT_\partial}{dt} = \frac{1}{vT} - \frac{T_\partial}{T} - \frac{\omega_1}{v\omega_0 T}; \quad (1)$$

$$I_{np1} \frac{d\omega_1}{dt} = T_\partial - T_f; \quad (2)$$

$$I_{np2} \frac{d\omega_2}{dt} = T_f - T_c, \quad (3)$$

$$m_{uu} \ddot{x} - m_{uu} x b_2 \omega_c^2 + T_1 = 0, \quad (4)$$

где I_{np1} – приведенный момент инерции ведущего вала электродвигателя;

I_{np2} – приведенный момент инерции рабочей машины;

T_c – момент сопротивления, создаваемый рабочей машиной;

ω_1 – угловая скорость ведущей полумуфты (совпадает с угловой скоростью вала электродвигателя);

ω_2 – угловая скорость ведомой полумуфты вместе с рабочей машиной.

Приведенный момент инерции I_{np1} определяется по работе [2]:

$$I_{np1} = I_n + z m_{ш} x^2 L^2 + z I_{ш} \frac{x^2 L^2}{r^2 \cos^2 \gamma}. \quad (5)$$

Приведенный момент инерции I_{np2} конкретно не задан и зависит от типа машины.

Пусть I_{np2} задан в общем виде функцией:

$$I_{np2} = I_{np2}(\varphi_2),$$

где φ_2 – угол поворота ведомой полумуфты.

Момент сопротивления T_c определяется технологическим процессом и в общем случае:

$$T_c = T_c(\varphi_2, \dot{\varphi}_2, t).$$

Для определения скоростей элементов нажимного механизма пускозащитной муфты использовалась теорема Виллиса, на основании которой была получена формула для определения угловой скорости сепаратора [3]:

$$\omega_c = \frac{(\omega_1 + \omega_2)x + \omega_1 r \cos \beta}{2x + r \cos \beta}. \quad (6)$$

Момент сил трения во фрикционном узле муфты определяется [4]:

$$T_f = \frac{1}{\omega_1} \left\{ k(F_{a7} + c_2 h_5) \left[\omega_y + \omega_{ш} \frac{\sin(\gamma + \beta)}{\sin \beta} \right] \right\} + T' + \frac{f m_{ш} \varepsilon_1 x r z \omega_{ш}}{\omega_1} + f_{\phi} z_{mp} c_2 h_5 r_{cp} + \frac{f h_5}{\omega_1 r_{шл}} \left\{ k(F_{a7} + c_2 h_5) \frac{\omega_{ш} \sin(\gamma + \beta)}{\omega_1 \sin \beta} + T' \right\} + \frac{f^2 G_5}{\omega_1} \dot{h}_5; \quad (7)$$

$$\text{где } T_1 = b_3 \left\{ (F_{a7} + c_2 h_5) - \frac{f}{r_{шл}} \left[k(F_{a7} + c_2 h_5) \frac{\omega_{ш} \sin(\gamma + \beta)}{\omega_1 \sin \beta} + T' \right] - f^2 G_5 \right\}; \quad (8)$$

$$f_{\phi} = a_{\phi} + \frac{f_{o\phi} - a_{\phi}}{1 + b_{\phi}(\omega_1 - \omega_2)r_{cp}}; \quad (9)$$

$$r_{cp} = \frac{2 r_n^3 - r_e^3}{3 r_n^2 - r_e^2}; \quad (10)$$

$$f = a' + \frac{f'_o - a'}{1 + b'\dot{x}}; \quad (11)$$

$$L = \frac{x + r \cos \beta}{2x + r \cos \beta}; \quad (12)$$

$$b_1 = \frac{\cos\beta + f \sin\beta}{\sin\beta - f \cos\beta}; \quad (13)$$

$$b_2 = \sin\beta + b_1 \cos\beta; \quad (14)$$

$$b_3 = \frac{f + b_1}{z \sin\beta}. \quad (15)$$

Момент T' в зависимости от варианта конструкции муфты[4]:

первый вариант:

$$T' = cd^2 + 0,5 f'd(XVF_r + 2YF_{a_7} + 2Yc_2h_5); \quad (16)$$

второй вариант:

$$T' = fG_5r_2' + (F_{a_7} + c_2h_5) \left[k \frac{D_0}{d_n} + \frac{3}{32} \mu k_3 \sqrt[3]{\frac{F_{a_7} + c_2h_5}{z_1}} \right]; \quad (17)$$

третий вариант:

$$T' = fG_5r_2 + (F_{a_7} + c_2h_5) \left[k \frac{D_0}{d_n} + \frac{3}{32} \mu k_3 \sqrt[3]{\frac{F_{a_7} + c_2h_5}{z_1}} \right]. \quad (18)$$

Для начала расчета используем метод Рунге, для чего систему уравнений (1), (2), (3), (4) приведем к системе дифференциальных уравнений 1-го порядка:

$$\frac{d\omega_1}{dt} = \frac{T_\partial - T_f}{I_{np1}}; \quad (19)$$

$$\frac{d\omega_2}{dt} = \frac{T_f - T_c}{I_{np2}}; \quad (20)$$

$$\frac{d\dot{x}}{dt} = xb_2\omega_c^2 - \frac{T_2}{m_{iu}}; \quad (21)$$

$$\frac{dx}{dt} = \dot{x}. \quad (22)$$

За начало отсчета используем решение в конце 2-го этапа:

$$T_\partial = T'_{\partial 2}; \quad \omega_1 = \omega'_{12}; \quad \omega_2 = 0; \quad \dot{x} = \dot{x}'_2; \quad x = x'_2.$$

Вычисляем числа $m_{i1} = f_i(t_k, T_{\partial k}, \omega_{1k}, \omega_{2k}, \dot{x}_k, x_k)$, или в развернутом виде:

$$m_{11} = \frac{1}{vT} - \frac{T'_{\partial 2}}{T} - \frac{\omega'_{12}}{v\omega_0 T};$$

$$m_{21} = \frac{T'_{\partial 2} - T_{f2}}{I_{np12}};$$

$$m_{31} = \frac{T_{f2} - T_{c2}}{I_{np22}};$$

$$m_{41} = \dot{x}'_2;$$

$$m_{51} = x'_2 b_2 (\omega_{c2})^2 - \frac{T_2}{m_{uu}}.$$

Вычисляем числа:

$$m_{i2} = f_i \left(t_k + \frac{h}{2}; T_{\partial k} + \frac{hm_{11}}{2}; \omega_{1k} + \frac{hm_{21}}{2}; \omega_{2k} + \frac{hm_{31}}{2}; \dot{x}_k + \frac{hm_{41}}{2}; x_k + \frac{hm_{51}}{2} \right);$$

или

$$m_{12} = \frac{1}{vT} - \frac{T'_{\partial 2} + 0,5hm_{11}}{T} - \frac{\omega'_{12} + 0,5hm_{21}}{v\omega_0 T};$$

$$m_{22} = \frac{T'_{\partial 2} + 0,5hm_{11} - T'_{f2}}{I'_{np12}};$$

$$m_{32} = \frac{T'_{f2} - T'_{c2}}{I'_{np22}};$$

$$m_{42} = \dot{x}'_2 + 0,5hm_{41};$$

$$m_{52} = (x'_2 + 0,5hm_{51}) b'_2 (\omega'_{c2})^2 - \frac{T'_2}{m_{uu}}.$$

Величины со штрихом берутся по формулам (5) ... (18), но вместо $T_{\partial 2}$, ω_{12} , $\omega_2 = 0$, \dot{x}_2 ,

x_2 надо поставить величины:

$$T_{\partial 2} + \frac{hm_{11}}{2}; \quad \omega_{12} + \frac{hm_{21}}{2}; \quad \omega_2 + \frac{hm_{31}}{2}; \quad \dot{x}_2 + \frac{hm_{41}}{2}; \quad x_2 + \frac{hm_{51}}{2}.$$

Вычисляем числа:

$$m_{i3} = f_i \left(t_k + \frac{h}{2}; T_{\partial k} + \frac{hm_{12}}{2}; \omega_{1k} + \frac{hm_{22}}{2}; \omega_{2k} + \frac{hm_{32}}{2}; \dot{x}_k + \frac{hm_{42}}{2}; x_k + \frac{hm_{52}}{2} \right).$$

или в развернутом виде:

$$m_{13} = \frac{1}{vT} - \frac{T'_{\partial 2} + 0,5hm_{12}}{T} - \frac{\omega'_{12} + 0,5hm_{22}}{v\omega_0 T};$$

$$m_{23} = \frac{T'_{\partial 2} + 0,5hm_{12} - T''_{f2}}{I''_{np12}};$$

$$m_{33} = \frac{T''_{f2} - T''_{c2}}{I''_{np22}};$$

$$m_{43} = \dot{x}'_2 + 0,5hm_{42};$$

$$m_{53} = (x'_2 + 0,5hm_{52})b''_2(\omega''_{c2})^2 - \frac{T''_2}{m_{uu}}.$$

И, наконец, числа:

$$m_{i4} = f_i(t_k + h; T_{\partial k} + hm_{13}; \omega_{1k} + hm_{23}; \omega_{2k} + hm_{33}; \dot{x}_k + hm_{43}; x_k + hm_{53}),$$

которые определяются по аналогии с числами m_{i1} , m_{i2} , m_{i3} .

Зная эти числа, находим:

$$T_{\partial 2} = T'_{\partial 2} + \frac{h}{6}(m_{11} + 2m_{12} + 2m_{13} + m_{14});$$

$$\omega_{12} = \omega'_{12} + \frac{h}{6}(m_{21} + 2m_{22} + 2m_{23} + m_{24});$$

$$\omega_{22} = 0 + \frac{h}{6}(m_{31} + 2m_{32} + 2m_{33} + m_{34});$$

$$\dot{x}_2 = \dot{x}'_2 + \frac{h}{6}(m_{41} + 2m_{42} + 2m_{43} + m_{44});$$

$$x_2 = x'_2 + \frac{h}{6}(m_{51} + 2m_{52} + 2m_{53} + m_{54}).$$

Далее полученные значения берутся за исходные и процесс повторяется. Процесс Рунге хотя и точный, но сложный. Учитывая, что 3-ий этап длителен, по методу Рунге можно найти лишь несколько первых значений искомых величин (4-5), а далее можно перейти к методу Штермера. По методу Штермера вычисление ведем по следующим формулам, ограничиваясь разностью второго порядка $\Delta^2 q$:

$$T_{\partial i+1} = T_{\partial i} + \left(\frac{dT_{\partial}}{dt}\right)_i h + \frac{1}{2} \Delta T_{\partial i-1} + \frac{5}{12} \Delta^2 T_{\partial i-2} + \dots$$

$$\omega_{1i+1} = \omega_{1i} + \left(\frac{d\omega_1}{dt}\right)_i h + \frac{1}{2} \Delta \omega_{1i-1} + \frac{5}{12} \Delta^2 \omega_{1i-2} + \dots$$

$$\omega_{2i+1} = \omega_{2i} + \left(\frac{d\omega_2}{dt}\right)_i h + \frac{1}{2} \Delta \omega_{2i-1} + \frac{5}{12} \Delta^2 \omega_{2i-2} + \dots$$

$$\dot{x}_{i+1} = \dot{x}_i + \left(\frac{d\dot{x}}{dt} \right)_i h + \frac{1}{2} \Delta \dot{x}_{i-1} + \frac{5}{12} \Delta^2 \dot{x}_{i-2} + \dots$$

$$x_{i+1} = x_i + \left(\frac{dx}{dt} \right)_i h + \frac{1}{2} \Delta x_{i-1} + \frac{5}{12} \Delta^2 x_{i-2} + \dots$$

В этих формулах производные $\left(\frac{dT_\partial}{dt} \right)_i$, $\left(\frac{d\omega_1}{dt} \right)_i$ и так далее находятся по формулам

(1), (19) ... (22) при известных значениях параметров при шаге i

$\Delta T_{\partial i-1}$, $\Delta \omega_{1i-1}$ и так далее – разности 1-го порядка.

$$\Delta T_{\partial i-1} = \left(\frac{dT_\partial}{dt} \right)_i - \left(\frac{dT_\partial}{dt} \right)_{i-1}, \quad \Delta \omega_{1i-1} = \left(\frac{d\omega_1}{dt} \right)_i - \left(\frac{d\omega_1}{dt} \right)_{i-1}.$$

$\Delta^2 T_{\partial i-2}$, $\Delta^2 \omega_{1i-2}$ и так далее – разности 2-го порядка.

$$\Delta^2 T_{\partial i-2} = \Delta T_{\partial i-1} - \Delta T_{\partial i-2}, \quad \Delta^2 \omega_{1i-2} = \Delta \omega_{1i-1} - \Delta \omega_{1i-2}.$$

При уточнении расчетов можно брать разности и 3-го порядка. Записанные нами формулы имеют погрешность не выше h^4 . Рекомендуется вычислить 4-5 значений по методу Рунге с меньшим шагом $h/2$, а затем перейти на метод Штермера с шагом h .

ЛИТЕРАТУРА

1. Авторское свидетельство 418645 (СССР). Центробежная пусковая муфта / Авт. изобрет. Б.Г. Кобцев, В.Н. Коськин. – Заявл. 31.01.72, № 1741625/25 – 27, опубл. 05.03.74.
2. Корнеева Е.Н., Гордон В.А. Динамика безнагрузочного разгона механической пусковой муфты, применяемой в приводах транспортных машин. Орел: Известия ОрелГТУ. Серия «Строительство. Транспорт». - № 1/17 (542) 2008.- С. 75-84.
3. Корнеев Ю.С., Корнеева Е.Н., Кобцев Б.Г. Кинематический расчет фрикционной муфты с центробежным механизмом включения. Орел: Известия ОрелГТУ. Серия «Естественные науки». - № 1-2, 2003.- С. 39-42.
4. Корнеева Е.Н., Кобцев Б.Г., Корнеев Ю.С. Влияние силовых факторов на работу механической пусковой муфты. М.: Вестник машиностроения, № 6, 2008. - С. 11-14.

Корнеева Елена Николаевна

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент
Тел.: 41-98-48

Гордон Владимир Александрович

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Высшая математика»
302020, Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел.: 41-98-48

Корнеев Юрий Степанович

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент
302020, Орел, Наугорское шоссе, 29

УДК 621.99

А.Н. АФОНИН, А.В. КИРИЧЕК

СХЕМЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ НАКАТЫВАНИИ РЕЗЬБ

Обоснована важность выбора рациональной схемы деформирования при резьбонакатывании. Приведена классификация схем деформирования в осевом и радиальном сечении заготовки при накатывании резьб. Даны рекомендации по выбору рациональной схемы деформирования.

Ключевые слова: накатывание, контакт, деформация, инструмент, технология, резьба.

Importance of a choice of the rational scheme of deformation is justified at thread rolling. Classification of schemes of deformation in axial and radial section of preform is resulted at a thread rolling. Recommendations at the choice of the rational scheme of deformation are given.

Key words: rolling, contact, deformation, tool, technology, thread.

Резьбонакатывание является одним из наиболее прогрессивных способов резьбоформообразования, обеспечивающим высокую производительность при высоком качестве получаемой резьбы. Однако, область его применения в настоящее время существенно ограничена механическими свойствами заготовок и размерами накатываемой резьбы. Одним из основных направлений расширения области применения резьбонакатывания является совершенствование схемы деформирования, т.е. последовательности перемещения металла из впадины в выступ при формировании витка резьбы.

При накатывании резьбы заготовку, как правило, устанавливают между двумя или более инструментами, имеющими негативный профиль резьбы по отношению к профилю готовой детали. Вершины витков под действием главного движения внедряются в поверхность заготовки, образуя на ней впадины резьбы, а вытесняемый металл, перемещаемый в радиальном направлении (в зону между витками инструмента), постепенно увеличивает высоту резьбового профиля на заготовке. Напряженно-деформированное состояние заготовки при этом носит сложный, объемный характер.

Реализация различных схем деформирования может производиться конструктивным или технологическим способом [2]. При применении конструктивного способа внедрение инструмента в заготовку происходит за счет его конструкции вследствие наличия у него заборной и калибрующей частей. При применении технологического способа внедрение инструмента в заготовку происходит благодаря движениям подачи, сообщаемых ему рабочими органами станка. Возможна также реализация комбинированных способов внедрения инструмента в заготовку.

Для определения рациональной схемы деформирования при накатывании конкретных резьб необходимо произвести анализ возможных схем деформирования. Несмотря на большое количество работ, посвященных классификации способов накатывания резьб, например [1, 3-5], схемам деформирования при резьбонакатывании не уделялось достаточного внимания. Одновременно исследователями рассматривалось не более двух разных схем деформирования. Недостаток внимания к схемам деформирования, проявленный в научных исследованиях, привел к тому, что практика в данной области опередила теорию. Применяемые в промышленности технологии и конструкции инструментов для накатывания резьбы реализуют несколько различных схем деформирования. Существующие схемы деформирования при накатывании резьб в осевом сечении заготовки приведены на рисунке 1 на примере трапецеидального профиля.

Полнопрофильная схема деформирования (рисунок 1,а) является наиболее распространенной. Она реализуется путем постепенного внедрения в заготовку в радиальном

направлении витков резьбы инструмента, имеющих форму окончательно сформированной впадины резьбы заготовки. По данной схеме происходит формирование резьбы при накатывании цилиндрическими роликами с радиальной подачей и тангенциальными резьбонакатными головками. Данная схема имеет место также при накатывании резьб роликами с осевой подачей, плоскими плашками и бесстружечными метчиками при выполнении у роликов, плашек и метчиков заборной части с конусом резьбы по среднему диаметру. Основными достоинствами данной схемы является простота реализации подачи технологическим методом. Данная схема также рациональна с точки зрения обеспечения наилучших условий для течения металла заготовки и, следовательно, снижения сил деформирования и повышения стойкости резьбонакатного инструмента, при накатывании треугольных резьб [1, 4, 5]. При накатывании трапецеидальных и круглых резьб подобная схема не всегда является рациональной, так как под притупленными вершинами витков инструмента в заготовке образуются застойные зоны, которые не деформируются сами и препятствуют деформации окружающего их металла.

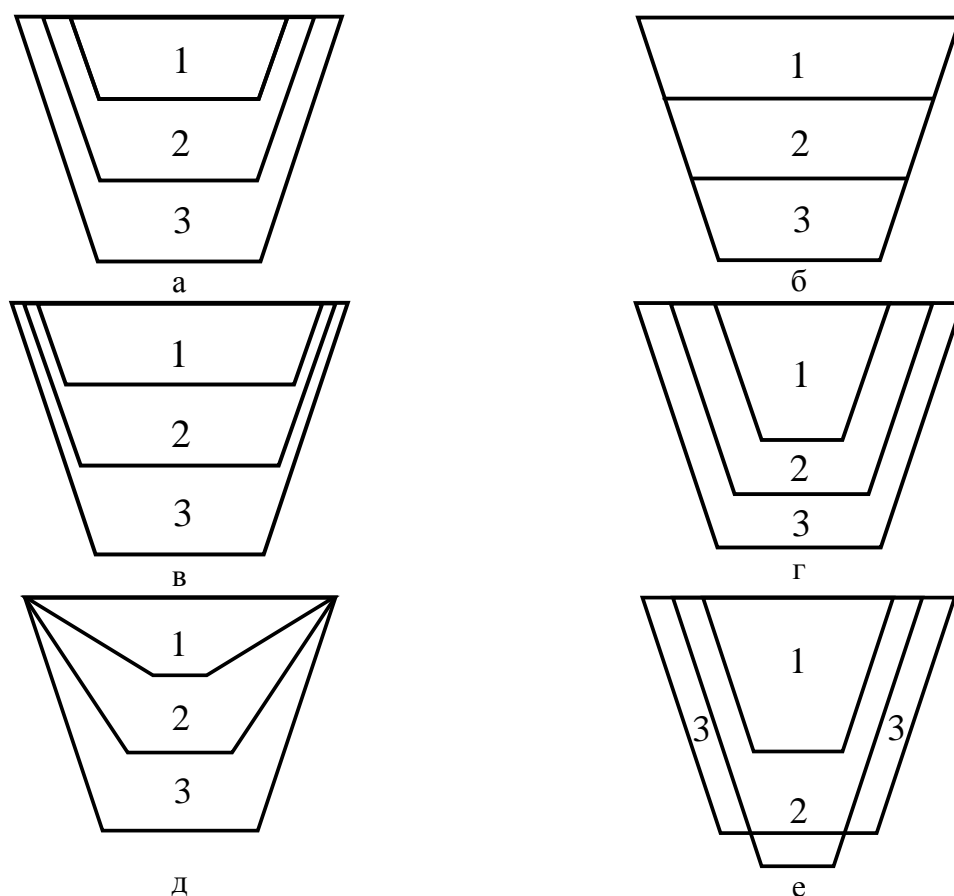


Рисунок 1 – Схемы деформирования при накатывании резьб в осевом сечении

Послойная схема (рисунок 1,б) реализуется путем внедрения в заготовку притупленных витков резьбы инструмента, вытесняющих металл заготовки из впадины слой за слоем. По данной схеме происходит формирование резьбы при накатывании затылованными роликами и радиальными резьбонакатными головками. Послойная схема имеет место также при накатывании резьб роликами с осевой подачей, плоскими плашками и бесстружечными метчиками при выполнении у роликов, плашек и метчиков заборной части с конусом резьбы по наружному диаметру. Данная схема приводит к образованию значительных застойных зон. Достоинством послойной схемы является большее упрочнение витков накатанной резьбы, повышающее ее эксплуатационные характеристики [1, 4, 5]. Заборная часть резьбонакатных инструментов, выполненная по послойной схеме, является более технологичной.

Полнопрофильная и послойная схемы являются частными случаями *профильной* схемы деформирования, при которой витки инструмента геометрически подобны виткам накатываемой резьбы, но отличаются от них размерами. Другими частными случаями профильной схемы являются *притупленная* (рисунок 1,в) [1] и *заостренная* (рисунок 1,г) схемы деформирования. По данным схемам происходит накатывание резьб роликами с осевой подачей, плоскими плашками и бесстружечными метчиками при выполнении у роликов, плашек и метчиков заборной части с конусом резьбы по наружному и среднему диаметрам одновременно. Таким образом, среди профильных схем деформирования послойная является крайним случаем, а полнопрофильная занимает промежуточное положение между притупленной и заостренной профильными схемами.

Схема деформирования, показанная на рисунке 1,д отличается тем, что профиль впадины резьбы на заготовке формируется путем постепенного уменьшения ее угла (радиуса для круглых резьб). В силу сложности ее реализации *угловая* схема пока не нашла широкого применения в промышленности, однако распространение станков с ЧПУ в настоящее время облегчает ее реализацию.

Накатывание крупных трапецеидальных и круглых резьб с использованием приведенных выше схем деформирования является затруднительным. Основной причиной этого является, как было указано выше, образование застойных зон. Для их уменьшения применяется схема деформирования, показанная на рисунке 1,е. Реализация данной схемы предполагает вначале накатывание резьбы, с профилем несколько более глубоким, чем окончательный профиль резьбы, но с меньшей шириной впадины. На окончательных циклах деформации металл закатывается от боковых сторон профиля во впадину. В связи с этим, схему можно назвать *возвратной*. Схема нашла применение при накатывании резьб аксиальными резьбонакатными головками.

Существующие схемы деформирования в радиальном сечении заготовки приведены на рисунке 2. *Сплошная* схема (рисунок 2,а) в настоящее время является доминирующей. При реализации данной схемы во время каждого цикла деформирования инструмент вытесняет из впадины следующие друг за другом объемы металла заготовки. Весьма перспективной представляется не нашедшая пока широкого применения в промышленности *выборочная* схема (рисунок 2,б). При реализации этой схемы объемы металла вытесняются из впадины выборочно, например, в шахматном порядке.

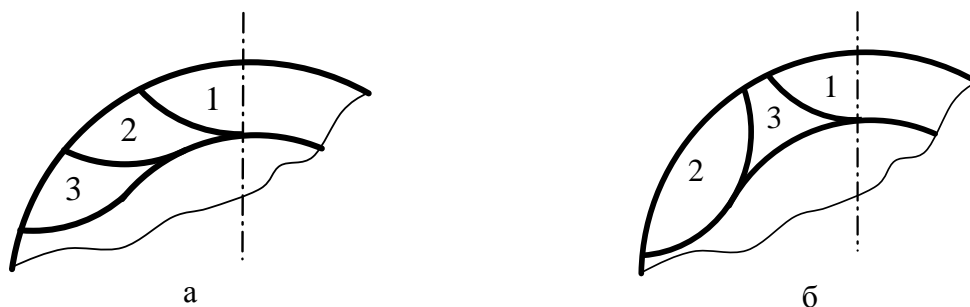


Рисунок 2 – Схемы деформирования при накатывании резьб в радиальном сечении

Обобщая рассмотренные выше схемы деформирования при накатывании резьб, их классификацию на сегодняшний день можно представить в виде, показанном на рисунке 3.

Наиболее просто обеспечить рациональную схему деформирования при использовании конструктивного способа. Форма профиля витков заборной части при изготовлении резьбонакатных инструментов на современных станках с ЧПУ может быть самой разнообразной. При использовании технологического способа легко реализуется лишь полнопрофильная схема. Реализация других схем потребует приложения к инструменту или заготовке помимо одного движения подачи (радиальной или тангенциальной) еще нескольких дополнительных движений.

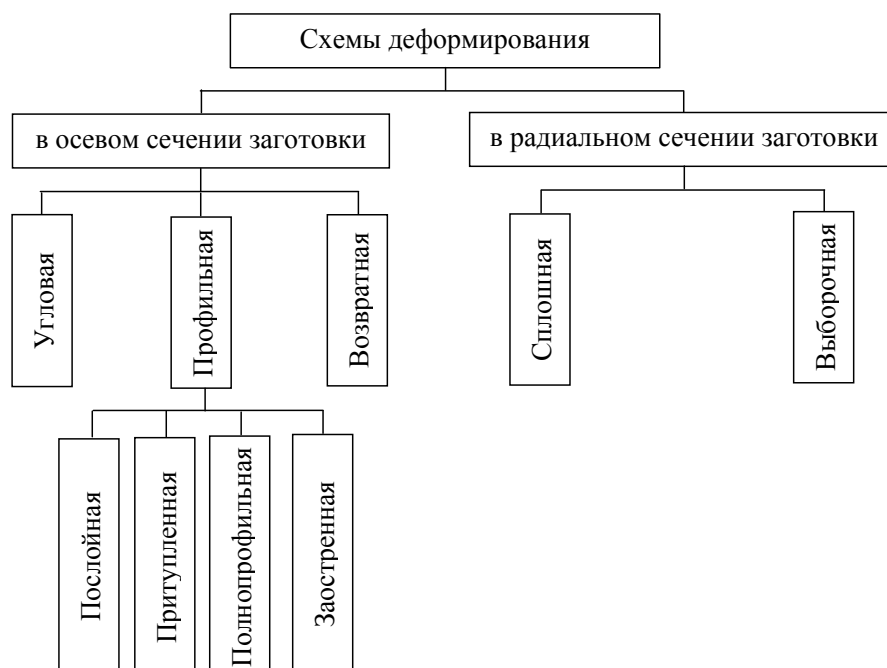


Рисунок 3 - Классификация существующих схем деформирования при резьбонакатывании

Выбор рациональной схемы деформирования для накатывания конкретного профиля резьбы представляет собой весьма сложную задачу. Рекомендации по выбору схемы деформирования пока могут носить лишь самый общий характер: для накатывания мелких резьб целесообразно применение послойной схемы, затем, в порядке возрастания шага резьбы, более целесообразными являются притупленная, полнопрофильная и заостренная схемы. Для накатывания крупных трапецеидальных и круглых резьб предпочтительной является возвратная схема. В связи со слабой изученностью область применения угловой и выборочной схем деформирования пока остается не определенной.

Выбор конкретной схемы деформирования и численных значений радиальных обжатий для каждого этапа деформирования при накатывании резьб в настоящее время можно производить либо на основе результатов экспериментальных исследований, либо путем компьютерного моделирования резьбонакатывания с помощью метода конечных элементов [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Bethlehem, F.W. Criteria for Classification of thread rolling methods [текст] // Wire World International, 1983, vol. 25. – Pp 215-218.
2. Киричек, А.В., Афонин А.Н. Исследование напряженно деформированного состояния резьбонакатного инструмента и заготовки методом конечных элементов [текст] // СТИН, 2007, №7. – С. 21-25.
3. Кузьменко, А.Ф., Абрамова В.А. Классификация способов накатывания резьбы [текст] // Машиностроитель, 2004, №8. – С. 46-49.
4. Лапин, В.В. Накатывание резьб, червяков, шлицев и зубьев [текст] / В.В. Лапин, М.И. Писаревский, В.В. Самсонов, Ю.И. Сизов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. – 228 с.
5. Султанов, Т.А. Резьбонакатные головки [текст] / М.: Машиностроение, 1966. – 136 с.

Киричек Андрей Викторович

Орловский Государственный технический университет, г.Орёл
 Доктор технических наук, профессор
 Тел.(4862)55-55-24
 E-mail: avk@ostu.ru, ti@ostu.ru

Афонин Андрей Николаевич

Орловский Государственный технический университет, г.Орёл
 Кандидат технических наук, доцент
 Тел.(4862)55-55-24
 E-mail: af@au.ru

УКД 539.4:620.179

Ю.В. ВАСИЛЕНКО, Ю.Ю. РУДНЕВА

СПОСОБ ОХЛАЖДЕНИЯ ЗОНЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ ПЕРИФЕРИЕЙ КРУГА

Разработан новый способ охлаждения зоны обработки при плоском шлифовании. Представлена принципиальная схема реализации данного способа.

Ключевые слова: машиностроение, плоское шлифование, способы охлаждения, смазочно-охлаждающие технологические средства.

The new way of cooling of a zone of processing is developed at flat grinding. The basic scheme of realisation of the given way is presented.

Key words: mechanical engineering, flat grinding, the ways cooling which are smazochno-cooling technological means.

В современном отечественном машиностроении все большее внимание уделяется повышению качества и производительности выпускаемой продукции. Качество машиностроительной продукции в значительной степени определяются точностью размеров, формы и взаимного расположения поверхностей деталей, а также состоянием их поверхностного слоя, окончательное формирование которых происходит на финишных операциях механической обработки. К наиболее распространенным из них относится плоское шлифование (ПШ). Объем машинного времени на него составляет в среднем 15÷25%.

Тенденция развития мирового машиностроения, заключающаяся в использовании технологий "near net shape" (получение исходных заготовок с минимальными припусками) также способствует расширению областей использования шлифования, поскольку становится возможным первичная чистовая обработка заготовок, минуя черновую.

Одним из важнейших элементов процесса плоского шлифования является смазочно-охлаждающее технологическое средство (СОТС), так как оно оказывает значительное влияние на качество изделия, производительность и другие технико-экономические показатели процесса обработки. Современные СОТС являются неотъемлемой частью всего комплекса средств, обеспечивающих эффективную эксплуатацию шлифовального оборудования. Поскольку при шлифовании различных материалов условия резания значительно различаются, то соответственно применяется и большое число СОТС, искусственно вводимых в зону резания. Различают следующие виды СОТС:

- смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ);
- пасты и твердые наполнители;
- газы, обеспечивающие воздействие на процесс резания.

Смазочно-охлаждающие жидкости разделяются на минеральные масла с различными присадками (антифрикционные, противозадирные, смачивающие, антипенные, антикоррозионные, бактерицидные), водные эмульсии, получаемые растворением в воде базового масла, эмульгатора, антифрикционных и других присадок, полусинтетические и синтетические СОЖ, не содержащие масел.

Газовые вещества применяют в виде чистых газов (углекислого, азота, кислорода, воздуха) или в смеси с частицами твердых или жидких смазок. Газы могут иметь нормальную или отрицательную температуру. При шлифовании в среде газов снижается трение и засаливание круга.

Твердые и пластичные СОТС применяют при обработке трудно-шлифуемых материалов: твердых сплавов, быстрорежущих сталей. Твердые и пластичные СОТС наносятся на режущую поверхность круга. Применение твердых и пластичных СОТС позволяет снизить температуру в зоне обработки и увеличить срок службы абразивных кругов.

Существует значительное число способов охлаждения зоны обработки (более 1500). В 80-х годах Л. В. Худобин впервые систематизировал данные об этих способах [1]. В основу их классификации были положены четыре группы признаков:

- 1) вид энергетического воздействия и его характер;
- 2) вид подачи СОТЖ от источника к определенной зоне технологической системы;
- 3) зона технологической системы, к которой подводится СОТЖ;
- 4) тракт подвода (способ транспортировки) СОТЖ от зоны подачи к зоне контакта круга с заготовкой.

По отмеченным признакам было выделено девятнадцать основных способов подачи СОТЖ. Однако, в последнее время, в результате проведенных теоретико-экспериментальных исследований отечественными и зарубежными учеными, разработан ряд новых способов. В 2001 году анализ существующих способов позволил выделить уже 28 основных способов подачи СОЖ [2;3].

Наибольшее распространение в промышленности нашли следующие основные способы подачи СОЖ:

- подача СОЖ поливом;
- подача СОЖ напорной струей;
- подача СОЖ через поры круга;
- напорный внезонный способ подачи СОЖ;
- подача СОЖ с наложением ультразвуковых колебаний;
- подача СОЖ контактным способом;
- подача СОЖ в виде напорно-жидкостной смеси;
- подача СОЖ в замороженном виде;
- подача в зону обработки газа.

Подача СОЖ поливом (рисунок 1) - наиболее простой и распространенный способ. Расход СОЖ в процессе плоского шлифования периферией круга, при работе со скоростями до 35 м/с должен быть не менее 3-6 л/мин. Давление СОЖ 0,02-0,03 МПа. Однако при охлаждении, в результате действия воздушных потоков, создаваемых вращающимся шлифовальным кругом, большая часть жидкости, подаваемой поливом, практически никакого участия в процессе шлифования не принимает. Смазочные свойства СОЖ используются в весьма малой степени, и только условия охлаждения шлифуемой заготовки, а также моеющее действие СОЖ по отношению к обрабатываемой заготовке и к инструменту удовлетворительны.

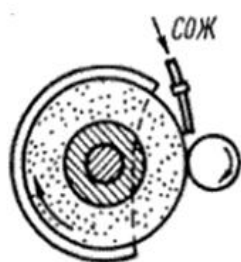


Рисунок 1.

Подача СОЖ напорной струей (рисунок 2) осуществляется при давлении жидкости до 1,5-2 МПа, расходе до 10 л/мин на 1 кВт мощности. Принципиальная схема подачи СОЖ в зону резания такая же, как при подаче СОЖ поливом, возрастание давления приводит к увеличению скорости потока СОЖ, что улучшает отвод тепла от шлифуемой заготовки и ведет к уменьшению опасности появления прижогов и трещин на ее поверхности, повышению физико-механических свойств поверхностного слоя обрабатываемой заготовки.

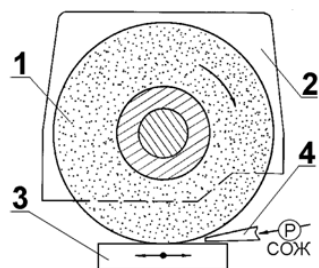


Рисунок 2.

Эффективность охлаждающего действия возрастает в результате преодоления струей сопротивления воздушных потоков и проникновения большего объема СОЖ непосредственно к источнику тепловыделения. Усиливается и смазочное действие жидкости. Недостатком данного способа является усиленное разбрызгивание жидкости, поэтому применение данного способа периферией круга или ленточном шлифовании. Данный способ имеет ряд существенных недостатков: структурный дисбаланс и вероятность появления вибраций вследствие неравномерной прокачки СОТЖ сквозь круг; необходимость тщательной очистки СОТЖ; неудовлетворительные условия охлаждения детали из-за малого расхода СОТЖ (десятки грамм в минуту); непригодность для кругов на металлической, вулканитовой и

бакелитовой связках.

Напорный внезонный способ (рисунок 4) предусматривает подвод СОЖ вне зоны обработки, под кожух. Одна или несколько струй под большим давлением пробивают воздушные потоки, очищают, смачивают поверхность круга и образуют масляную пленку. К недостаткам способа относится то, что он сопровождается интенсивным разбрызгиванием жидкости, что накладывает ограничения на широкое применение данного способа и требует организации дополнительных мер по локализации образующегося аэрозоля.

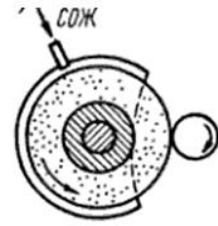


Рисунок 4.

Подача СОЖ с наложением ультразвуковых (рисунок 5) колебаний осуществляется вне зоны обработки. СОЖ подается в зазор размером до 0,15-0,05 мм между магнестрикционным вибратором и кругом. При этом создается промежуточный слой - волновод, который воздействует на поверхность круга, способствует его очистке, а также активизирует процесс обработки (особенно электроалмазной). Недостаток ультразвукового способа – реализуется с помощью дорогостоящего оборудования для генерации высокочастотных колебаний.

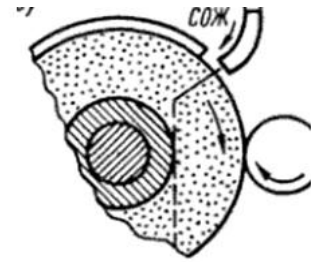


Рисунок 5.

Для подвода СОЖ контактным способом (рисунок 6) на обрабатываемую поверхность заготовки или рабочую поверхность круга, вне зоны резания, непрерывно наносится тонкий слой смазки поджимом к шлифуемой поверхности мягкого пористого материала пропитанного смазкой или твердого ролика с нанесенной на него смазкой. Подача СОЖ контактным способом обеспечивает непрерывное нанесение на поверхность заготовки вне зоны обработки активной смазки. Однако в этом случае возникает проблема последующего разделения этих жидкостей.

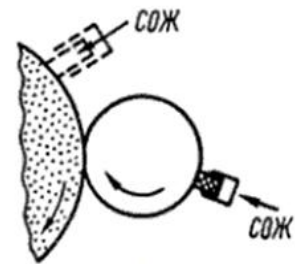


Рисунок 6.

Подача СОЖ гидроаэродинамическим способом (рисунок 7) основана на использовании воздушных потоков, создаваемых вращающимся кругом. Под действием их повышается скорость движения СОЖ, что способствует активизации процессов очистки поверхности круга и отвода тепла из зоны обработки. Зазор между соплом и кругом не более 0,6 мм. Расход СОЖ 5-6 л/мин на 10 мм высоты круга.



Рисунок 7.

Подача СОЖ в замороженном виде осуществляется при помощи дорогостоящего оборудования, эксплуатация которого существенно повышает себестоимость изделия.

Широкое применение находят комбинированные способы подвода СОЖ.

Подача в зону обработки газов осуществляется от имеющихся воздушных магистралей или специальных установок через сопла на станке или отверстия в инструменте. Для повышения эффективности охлаждения зоны резания воздух или газ охлаждают. Сжатый воздух иногда охлаждают в специальных вихревых холодильниках. Углекислый газ применяют в газообразном состоянии при условии тщательной вентиляции, обеспечивающей допустимое содержание его в воздухе.

Все выше перечисленные способы в том или ином виде стремятся обеспечить гарантированное проникновением СОЖ в зону резания, наибольший эффект обеспечивается при шлифовании в среде СОЖ.

Один из вариантов реализации способа шлифования в среде СОЖ, разработан Л. В. Худобиным и М. А. Беловым (рисунке 8).

Суть способа заключается в следующем. На обрабатываемую заготовку 1 устанавливают с небольшим натягом две цилиндрические шайбы 2. Наружный диаметр шайб 2 больше диаметра шлифуемой шейки заготовки 1 на 5 мм и более. При подаче СОЖ через сопло свободно падающей струей в зону резания, в связи с тем, что наружный диаметр шайб 2 больше диаметра шлифуемой шейки заготовки 1, а боковые зазоры между шайбами 2 и торцами круга 3, а также между шайбами 2 и торцами шлифуемой шейки заготовки 1 очень малы (0,5-1,0 мм), в замкнутом резервуаре, ограниченном рабочей периферийной поверхностью круга 3, шлифуемой поверхностью заготовки 1 и торцами шайб 2, создается жидкостная ванна 5. По окончании цикла шлифования одной заготовки шайбы 2 могут быть быстро сняты с заготовки 1.

Наличие жидкостной ванны в клиновидной зоне между периферией круга и шлифуемой поверхностью заготовки способствует более рациональному использованию СОЖ за счет уменьшения торцевых утечек и, в конечном итоге, позволяет увеличить производительность обработки и улучшить качество шлифованных деталей.

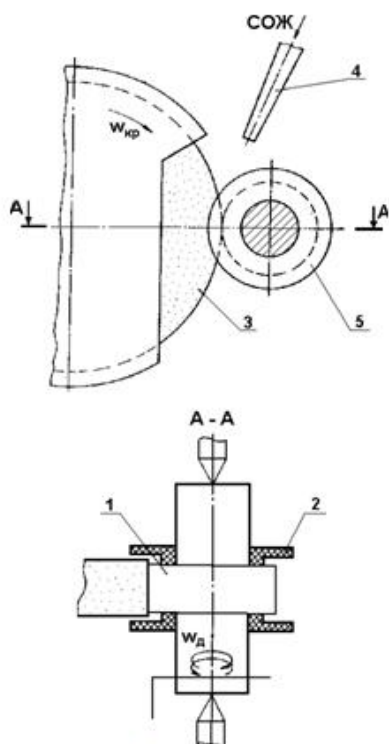


Рисунок 8

Шлифование в среде СОЖ применяют сравнительно редко, главным образом при ленточном и плоском шлифовании и отрезании небольших заготовок. В случае особой опасности появления тепловых дефектов жидкостную ванну делают проточной. Недостатком данного способа является значительное разбрызгивание жидкости.

В настоящее время являются актуальными исследования направленные на разработку способов шлифования в среде СОТС, так как повышается качество поверхностного слоя, значительно уменьшается температура в зоне обработки, снижается вероятность появления прижогов и трещин на обрабатываемой поверхности, увеличивается производительность обработки.

Разработан новый способ подачи СОТС в зону обработки при плоском шлифовании (рисунок 9).

Для повышения эффективности процесса плоского шлифования в зону резания подают смесь жидкого азота с воздухом. Воздух от компрессора поступает в трубопровод, к которому подсоединен резервуар с жидким азотом, двигаясь по трубопроводу, через сопло 2 смесь поступает в зону обработки. Количество подаваемого азота регулируется в зависимости от температуры, которую необходимо получить в зоне обработки. Для обеспечения экологической безопасности рабочего места, зона обработки закрывается огнеупорным материалом, за зоной резания расположено сопло 1 для отсасывания стружки. Использование жидкого азота позволяет заметно снизить температуру в зоне обработки, вследствие чего сократить количество прижогов и трещин, повысить производительность процесса плоского шлифования не менее чем на 20%. Достоинством данного способа является то, что он не требует значительной модернизации существующего оборудования.

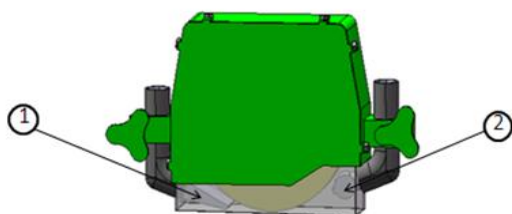


Рисунок 9

ЛИТЕРАТУРА

1. Ефимов В. В. Научные основы техники подачи СОЖ при шлифовании. - Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1985. - 142 с.
2. Степанов Ю. С., Василенко Ю. В. Обзор основных способов подачи СОЖ при шлифовании периферией круга // Орловский государственный технический университет. – Орел, 1999. – 42 с.: ил. – Библиогр.: 32 назв. – Рус. – Деп. в ВИНТИ 15.12.99, № 3701-В99.
3. Степанов Ю. С., Василенко Ю. В. Основные способы подачи СОЖ при шлифовании периферией круга // Интеграция отраслевой и вузовской науки: проблемы современного машиностроения: Сб. докл. междунар. науч.-техн. конф. - Ростов-на-Дону: РГАСХМ, 2000. – С. 143-144.

Василенко Юрий Васильевич

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные станочные и инструментальные системы»

Тел.(4862)54-14-51

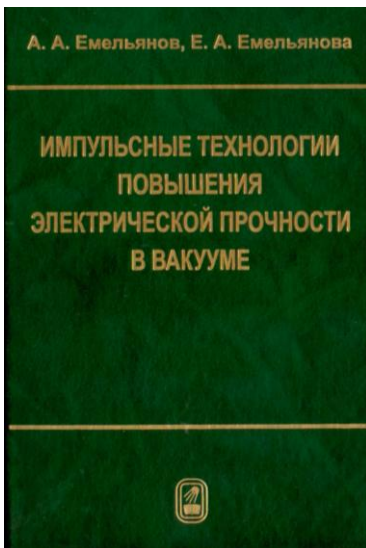
E-mail: vyuv-post@yandex.ru.

Руднева Ю.Ю.

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Магистрант

E-mail: juliya1609.87@mail.ru.



Емельянов А.А., Емельянова Е.А, **Импульсные технологии повышения электрической прочности в вакууме.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. — 160^л. — ISBN'I 978-5-9221-1071-6,

Монография посвящена проблеме повышения электрической прочности вакуумной изоляции. Изложены механизм инициирования импульсного пробоя, критерий оптимальности и методы оценки электрической прочности, достигаемой при реализации оптимальных режимов импульсного кондиционирования, экспериментальные результаты, оставившие основу импульсных технологий повышения электрической прочности вакуумных промежутков с цельнометаллическими и напыленными пленочными электродами, технологии устранения автоэмиссионных явлений в микроканальных усилителях яркости.

Для специалистов в области вакуумных и газовых разрядов, электрофизики, электротехнологий, высоковольтной электротехники, разработчиков высоковольтной электровакуумной и фотоэлектронной аппаратуры. Может быть полезной студентам соответствующих специальностей.

УДК 517.958:536.2

Д.В. АЛЕКСАНДРОВ, В.И. ЖУРАВЛЕВ, А.А. СТРУЧКОВ

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛАСТИНАХ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В статье рассмотрена математическая модель расчета нестационарных температурных полей многослойной пластины методом конечных элементов. В программе MathCAD был реализован алгоритм метода конечных элементов и получены графики изменения температуры во времени.

Ключевые слова: температура, многослойная пластина, метод конечных элементов, нестационарная теплопроводность.

In article the mathematical model of calculation of non-stationary temperature fields of a multilayered plate is considered by a method of final elements. In program MathCAD the algorithm of a method of final elements has been realised and schedules of change of temperature in time are received.

Key words: temperature, a multilayered plate, a method of final elements, non-stationary heat conductivity.

В технике встречаются объекты, которые можно рассматривать как многослойные пластины. При прочностном расчете таких пластин, работающих в нестационарных тепловых режимах, необходимо знать распределение температуры по толщине стенки. Слои таких пластин имеют различные теплофизические свойства, что часто затрудняет определение температурных полей.

Рассмотрим математическую модель расчета температурных полей многослойной пластины. Дана n -слойная пластина (рисунок 1) конечных размеров (L – ширина, B – высота, H – толщина). Слои пластины однородны и изотропны. Внутренние источники теплоты отсутствуют.

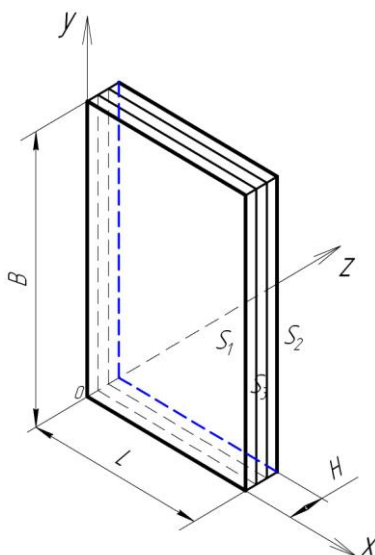


Рисунок 1 – Многослойная пластина

Распределение температуры по толщине многослойной пластины в любой момент времени можно найти с помощью уравнения нестационарной теплопроводности.

Уравнение нестационарной теплопроводности, при условии отсутствия внутренних источников теплоты, применительно к однородным телам ($c = \text{const}$, $\rho = \text{const}$, $\lambda = \text{const}$) имеет вид:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

где T – температура, °С;
 t – время, с;
 c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С);
 ρ – плотность, кг/м³;
 λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С).

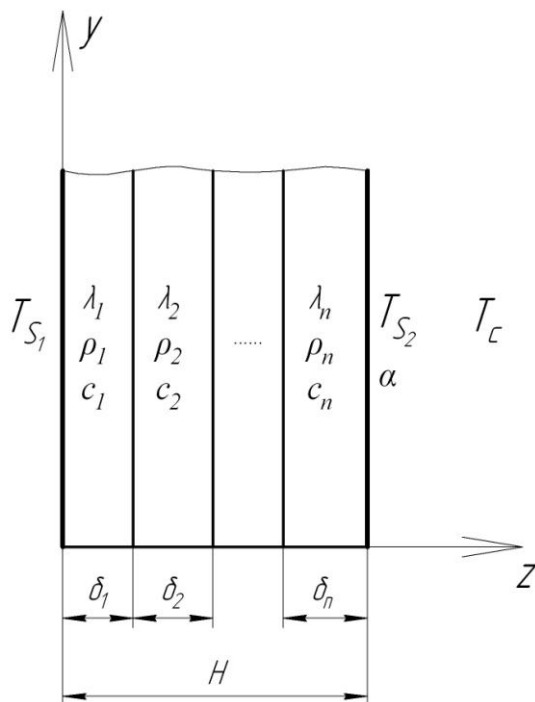


Рисунок 2 – Геометрические и физические параметры

Приняты следующие начальные и граничные условия (рисунок 2):

1) Задано распределением температуры во всей пластине в начальный момент времени t_0 :

$$T(x, y, z, t_0) = T_0 = const.$$

2) На внешней граничной области S_1 ($z = 0$) задано граничное условие 1-го рода, т.е. задано распределение температуры на области S_1 как функция координат и времени:

$$T_{S_1} = \varphi(x, y, z, t) = const, \quad x, y, z \in S_1.$$

3) На внешней граничной области S_2 ($z = H$) задано граничное условие 3-го рода, т.е. задана зависимость плотности теплового потока за счет теплопроводности со стороны тела от температур поверхности тела T_{S_2} и окружающей среды T_c :

$$q_{S_2} = \alpha(T_{S_2} - T_c),$$

где α – коэффициент теплообмена (теплоотдачи), он характеризует интенсивность теплового взаимодействия окружающей среды заданной температуры T_c с поверхностью тела.

Плотность теплового потока, подводимая за счет теплопроводности к области S_2 , определяется по закону Фурье-Кирхгофа:

$$q_{S_2} = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{S_2}.$$

4) На остальной граничной области S_3 ($x = 0, x = L, y = 0, y = B$) задано граничные условия 2-го рода, т.е. задано распределение плотности теплового потока на области S_3 как функция координат и времени:

$$q_{S_3} = \phi(x, y, z, t) = 0, \quad x, y, z \in S_3.$$

Таким образом, на области S_3 отсутствует поток теплоты, что соответствует условию тепловой изоляции.

5) На границах между слоями осуществляется идеальный тепловой контакт (граничные условия 4-го рода), т.е. условие равенства температуры T и плотностей теплового потока q на поверхностях соприкасающихся слоев:

$$T_i = T_j, \quad q_i = q_j.$$

Для реализации поставленной задачи воспользуемся методом конечных элементов (МКЭ). Разобьем нашу геометрическую область на конечные элементы.

Рассмотрим один из конечных элементов подобно тому, как это сделано в [2]. Это параллелепипед с прямолинейными сторонами и восемью узлами, причём нумерация узлов в каждом элементе проводится, как показано на рисунке 3. Узловые значения некой величины ϕ (в нашем случае это температура) обозначаются через $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4, \Phi_5, \Phi_6, \Phi_7, \Phi_8$, а координаты восьми узлов – через $(X_1; Y_1; Z_1), (X_2; Y_2; Z_2), (X_3; Y_3; Z_3), (X_4; Y_4; Z_4), (X_5; Y_5; Z_5), (X_6; Y_6; Z_6), (X_7; Y_7; Z_7), (X_8; Y_8; Z_8)$.

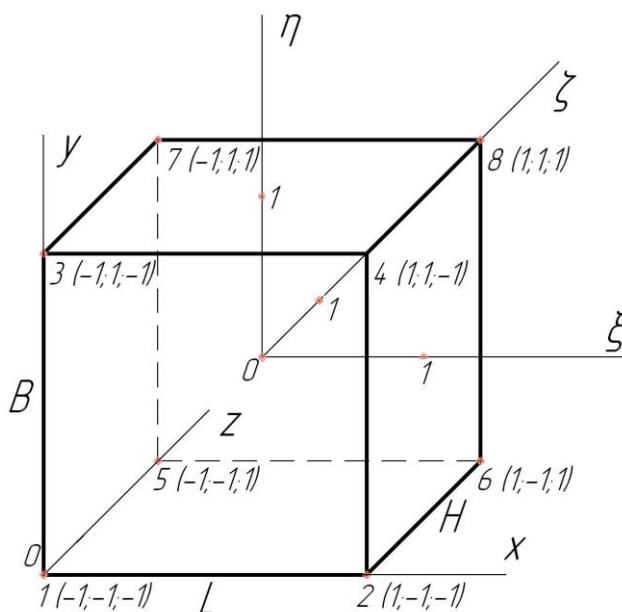


Рисунок 3 – Конечный элемент

В общей форме интерполяционный полином имеет вид:

$$\phi = [N]\{\Phi\} = [N_1^{(e)}, N_2^{(e)}, \dots, N_8^{(e)}] \begin{Bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \dots \\ \Phi_8 \end{Bmatrix},$$

где N_1, N_2, \dots, N_8 - функции формы элемента, (e) означает, что уравнение относится к одному элементу.

Функции формы в локальных координатах (ξ, η, ζ) для данного элемента:

$$N_i = \frac{1}{8}(1 + \xi\xi_i)(1 + \eta\eta_i)(1 + \zeta\zeta_i),$$

где ξ_i, η_i, ζ_i - координаты i -го узла.

Функциональная зависимость между локальными и глобальными координатами:

$$\xi(x) = \frac{2(x - X_c)}{L};$$

$$\eta(x) = \frac{2(y - Y_c)}{B};$$

$$\zeta(x) = \frac{2(z - Z_c)}{H},$$

где $X_c = \frac{L}{2}, Y_c = \frac{B}{2}, Z_c = \frac{H}{2}$ – координаты центра элемента.

Суммируя уравнения для отдельных элементов, получаем:

$$\varphi = \sum_{e=1}^E \varphi^{(e)},$$

где E – число элементов.

Это уравнение определяет область в целом.

В нашем случае рассматривается задача трехмерного переноса тепла в многослойной пластине [1]. Процесс нагрева описывается уравнением (1).

Пусть $T(x, y, z)$ есть точное решение данного уравнения. При его подстановке в это уравнение получим тождество $0 = 0$. Пусть $\varphi(x, y, z)$ – приближенное решение уравнения, при подстановке которого получим не тождество, а некоторую невязку $R(\varphi)$ отличную от нуля. Следуя процедуре МКЭ на основе метода Галеркина в слабой формулировке [2], получим следующее матричное уравнение:

$$[C] \frac{\partial \{\Phi\}}{\partial t} + [K] \{\Phi\} = \{F\},$$

где $[C]$ – матрица демпфирования, которая учитывает изменение температуры во времени;

$[K]$ – матрица теплопроводности, которая учитывает физические свойства материала;

$\{\Phi\}$ – искомый вектор столбец значений в узлах сетки;

$\{F\}$ – вектор столбец нагрузки.

$$[C] = \int_V [N_i]^T [N_i] \rho c dV,$$

$$[K] = \int_V \lambda \left(\left[\frac{\partial N_i}{\partial x} \right]^T \left[\frac{\partial N_i}{\partial x} \right] + \left[\frac{\partial N_i}{\partial y} \right]^T \left[\frac{\partial N_i}{\partial y} \right] + \left[\frac{\partial N_i}{\partial z} \right]^T \left[\frac{\partial N_i}{\partial z} \right] \right) dV,$$

$$\{F\} = \int_S q [N_i]^T dS + \int_S [N_i]^T \alpha \varphi_{cp} dS - \int_S [N_i]^T [N_i] \alpha \varphi dS.$$

Ортогонализация матрицы $[C]$ была выполнена как в [3].

Описанные выше граничные и начальные условия примут вид:

1) Распределением температуры во всей пластине в начальный момент времени t_0 :

$$\varphi(x, y, z, t_0) = T_0 = const,$$

2) Граничное условие 1-го рода, т.е. распределение температуры на области S_1 :

$$T_{S_1} = \varphi(x, y, z, t) = const, \quad x, y, z \in S_1,$$

3) Граничное условие 3-го рода, т.е. зависимость плотности теплового потока за счет теплопроводности со стороны тела от температуры поверхности тела T_{S_2} и окружающей среды T_c :

$$\int_{S_2} [N_i]^T \alpha \varphi_c dS - \int_{S_2} [N_i]^T [N_i] \alpha \varphi dS,$$

4) Граничное условие 2-го рода, т.е. задано распределение плотности теплового потока на области S_3 :

$$\int_{S_3} q [N_i]^T dS = 0,$$

5) Граничные условия 4-го рода выполняются автоматически, ввиду слабой формулировки метода Галеркина.

Описанный алгоритм МКЭ был реализован в программе MathCAD. В результате были получены графики изменения узловых температур во времени. На рисунке 4 показаны такие графики для узлов, находящихся на поверхностях пластины и на стыках слоев.

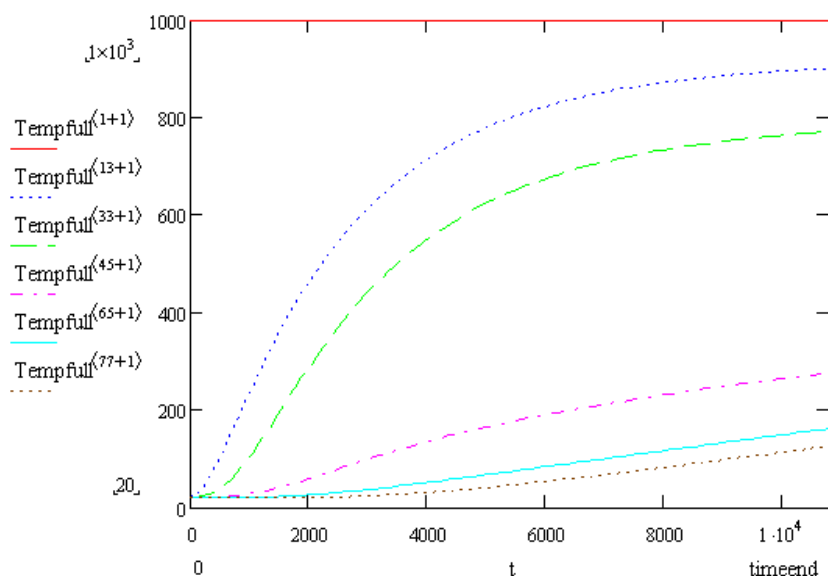


Рисунок 4 – Графики изменения температур во времени

ЛИТЕРАТУРА

1. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача.– М.: Энергоиздат, 1981.– 416 с.
2. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. -М.: Мир, 1975. - 318 с.
3. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. - М.:Мир, 1979. -392 с.

Александров Дмитрий Владимирович

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Аспирант кафедры «Мехатроника и международный инжиниринг»
Тел. +7(920)8096085
E-mail: diman_a@mail.ru

Журавлев Валерий Игоревич

ЗАО «Пулс-эко», г. Орел
Главный конструктор
Тел. +7(4862)433402
E-mail: ziv@puls-eko.orel.ru

Стручков Александр Александрович

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Кандидат технических наук, докторант кафедры «Мехатроника и международный инжиниринг»
Тел. +7(4862)419849
E-mail: orsaa@list.ru

УДК 621.735.32+621.735.9+621.735.34.016.3.002

К.И. КАПЫРИН, Г.П. КОРОТКИЙ, О.В. ДОРОФЕЕВ

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ОБКАТКЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ В ТРЕХРОЛИКОВОЙ МАТРИЦЕ

Исследуется процесс валковой штамповки цилиндрических заготовок на стадии обкатки. Определён параметр осевой утяжки материала и напряженно-деформированное состояние.

Ключевые слова: осевая утяжка материала; напряженно-деформированное состояние при обкатке; пакет прикладных программ "ШТАМП".

The process rolling die stamping of the cylindrical stocking up is researched on stage rolling by rollers. The parameter of axial cavity of a material and stress-strain state condition is defined.

Key words: the axial cavity of a material; the stress-strain state condition at a stage rolling by rollers; package of applied programs "STAMP".

Сведения по существу вопроса

Одним из характерных проявлений обкатки в трехроликовой матрице является развитие осевой утяжки, которая представляет собой процесс образования полости в металлическом теле цилиндрической формы при одновременном осевом и радиальном воздействии на него (рисунок 1). Осевое воздействие создается принудительно вращающимся пуансоном и опорной поверхностью, радиальное – роликами, свободно вращающимися в опорах качения. На практике такой метод получил название *валковая штамповка*. На фото образца достаточно хорошо видно, что геометрия дна искажена: в осевом направлении на величину δ , в радиальном на D_x . Излишек материала устремляется в стенку образца вслед за вытесненным пуансоном металлом. Необходимо уточнить, что пуансон вытесняет металл в основном в радиальном направлении, а переход его в стенку происходит за счет обжатия роликами. При достижении пуансоном дна за счет влияния комплексного воздействия многоциклового обкатки и осевого давления достигается деформационное упрочнение стенки изделия, измельчение и дробление кристаллитов до субмикроструктурных состояний.

Подробнее вопрос образования утяжки освещен в статье [1].

Теоретически утяжку материала удобнее выразить через соотношение R_x/R , где R и R_x радиусы образца и полости, образованной утяжкой. Данный параметр является более важным, чем δ , так как используется для технологических расчетов.

Для определения параметра R_x/R необходимо применить численный метод решения. В частности был использован один из наиболее известных методов решения задач обработки давлением – метод конечных элементов. Можно предположить, что чем больше обжатие заготовки ε_r , тем большее значение приобретает утяжка заготовки по оси δ и меньшее по радиусу – R_x и наоборот. Тогда, от значения ε_r зависит не только контактное напряжение на инструменте, но и величина упрочнения деформируемого тела.

Значение R_x необходимо определить для различных значений радиусов пуансона R_p , роликов R_k и относительной скорости деформирования η , представляющей собой отношение скорости осевого перемещения пуансона к частоте вращения образца. Эти параметры удобнее выразить через отношения R_p/R , R/R_k , η/R .

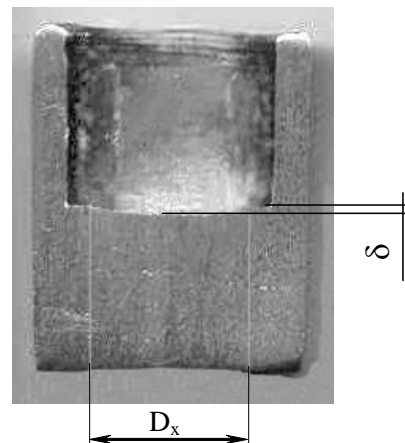


Рисунок 1 – Фотография образца с выраженной осевой утяжкой

Наиболее важным является последнее отношение, т.к. оно фактически определяет величину обжатия и порядок упрочнения заготовки.

Расчет параметра R_x был проведен для схемы с тремя роликами. В качестве инструмента для моделирования была использована одна из рабочих версий пакета прикладных программ "ШТАМП" [2], который хорошо зарекомендовал себя при решении подобных задач.

Исходные данные и расчетная схема для моделирования

Проводилось моделирование процесса обкатки в трехроликовой матрице с приводом вращения деформируемого образца от приводных роликов.

Так как моделирование трехмерной задачи с использованием ППП "ШТАМП" и имеющихся в наличии компьютеров связано большой длительностью расчетов, то для вычисления параметра R_x/R и определения упрочнения стенки был смоделирован процесс поперечной обкатки круглой заготовки тремя роликами. При этом привод вращения заготовки осуществлялся от роликов (в данном случае валков) за счет их синхронного поворота на угол φ . Такой подход к заданию перемещений инструмента связан с тем, что во-первых, с целью обеспечения требуемой точности в расчете была использована целая заготовка (а не часть ее, как принято в подобных случаях), что предполагает отсутствие узловых точек, которым нужно было бы задавать перемещения, а во-вторых – со сложностью определения граничных условий в процессе расчета. В рассматриваемом случае граничные условия определяются вращающимися поверхностями инструмента (валков) и учитываются программой автоматически.

Далее отметим, что при вычислении значения R_x/R учитывалось, что осевые напряжения, создаваемые за счет перемещения пуансона, существенного влияния на образование утяжки не оказывают. Данное утверждение основано на многочисленных экспериментах и исследованиях [3]. Величина утяжки зависит, главным образом, от значения и знака радиальных обжатий [1], связанных с объёмом металла, вытесняемого пуансоном.

При валковой штамповке в интервале $R_n/R = 0,3 \dots 0,9$ и выше, отношение высоты очага деформируемой части заготовки к ее радиусу h_x/R находится в пределах $0,15 \dots 0,25$ [4]. Последнее дает возможность осуществить решение задачи в плоских напряжениях. Таким образом, подменяя радиальное перемещение частиц металла, вызванное перемещением пуансона, на радиальное перемещение роликов с последующей обкаткой можно существенно упростить процесс вычисления.

Расчетная схема процесса (поперечное сечение образца) показана на рисунке 2.

Для математического моделирования процесса валковой штамповки на стадии обкатки использовалась цилиндрическая заготовка диаметром 25 мм и высотой 10 мм. Разбиение конечно-элементной модели проводили на элементы треугольной формы [5]. С целью повышения точности расчета была использована сшитая сетка, состоящая из двух частей, разбитых на шесть областей (суперэлементов) каждая. Диаметр внутренней части D_2 равнялся 17 мм, диаметр внешней D_1 – 25 мм, причем, с целью обеспечения большей точности получаемых результатов при относительно небольших затратах времени, разбиение на элементы во внешней части заготовки было сделано более частым, а во внутренней – редким. Общее число узлов сетки – 1417.

Материалом для исследований служил сплав на основе свинца, сурьмы и висмута со следующими свойствами:

– предел текучести, $\sigma_{0,2}$,	32 МПа;
– предел прочности, σ_b ,	74 МПа;
– относительное удлинение, δ ,	0,2;
– модуль сдвига, G ,	$7,8 \times 10^3$ МПа;
– коэффициент Пуассона, ν ,	0,09.

Порядок расчета сводился к следующим вычислениям. На первом шаге осуществлялось внедрение роликов в заготовку на глубину h , характеризующую собой абсолютную деформацию в радиальном направлении и определяющую относительное обжатие заготовки R_φ/R или ε_r . Вторым шагом расчета проводилось собственно моделирование обкатки как

качение ролика по поверхности заготовки при $\varepsilon_r = 0$. Перемещение роликов задавалось через угол поворота φ относительно собственной оси вращения. Перемещение (вращение) заготовки происходило под действием сил трения по контактной поверхности.

Вычисление значения R_x/R было проведено для различных отношений R/R_k при различных значениях коэффициента внешнего трения μ_1 (в расчете принятого равным 0,1; 0,3 и 0,5), а также ε_r , принятого равным 0,2; 0,4; 0,8; 1,6 и 3,2 %. Значения отношений R/R_k , рассмотренных в расчете, составили 0,155; 0,2; 0,25 и 0,3, причем величина 0,155 представляет собой крайнее значение для трехроликовой схемы деформирования.

Краткое описание программного продукта

В программе (ППП "ШТАМП") реализуется изотропная упругопластическая модель с упрочнением при неизменных упругих свойствах и малых упругих деформациях. Определяющее уравнение представляет собой уравнение течения Прандтля-Рейсса [6] в котором материальная производная заменена коротационной. В качестве последней в программе используется производная Яумана. В данном случае (при изотропной теории и малых упругих деформациях) это является достаточно корректным [7].

Используемое в программе уравнение Прандтля-Рейсса, свернутое по двум параметрам индексов имеет вид:

$$\dot{\sigma} = C \cdot d \tag{1}$$

где $\dot{\sigma}$ – производная по времени тензора напряжений;
 C – тензор упругопластичности;
 d – тензор деформации скорости.

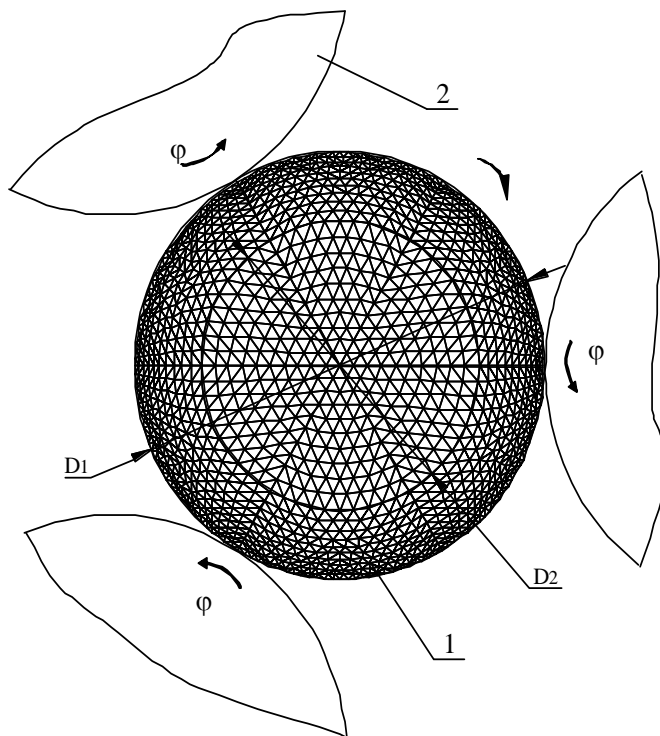


Рисунок 2 –Схема к расчету параметра утяжки R_x/R и НДС
 1 – заготовка; 2 – ролики

Величины C и d определяются следующими выражениями:

$$C_{ijkl} = E_{ijkl} - \frac{3G s_{ij} s_{kl}}{\bar{\sigma}^2 (1 + H' / (3G))} \tag{2}$$

$$d_{kl} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right) \quad (3)$$

где E_{ijkl} – тензор упругости изотропного тела;
 G – модуль упругости;
 S_{ij}, S_{kl} – компоненты девиатора напряжений;
 $\dot{\epsilon}^2$ – квадрат интенсивности напряжений;
 H' – модуль упрочнения;
 x – координата материальной точки;
 u – скорость перемещения материальной точки.

Замена левой части уравнения Прандтля-Рейсса (1) производной Яумана преобразует его к следующему виду:

$$\sigma^J = C \cdot d \quad (4)$$

или

$$\sigma^J = \dot{\sigma} + \sigma \cdot \omega - \omega \cdot \sigma \quad (5)$$

где σ – тензор напряжений;
 ω – скорость вращения окрестности материальной точки.

В математической модели, которая реализуется в программе, эта скорость представляет собой тензор вихря и определяется формулой:

$$\omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_l} - \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right) \quad (6)$$

Использование при моделировании изотропной теории пластичности обусловлено тем, что при обкатке осуществляется циклическое, или близкое к нему, деформирование заготовки, при этом приращение параметра Удквиста на каждом цикле невелико. Таким образом поверхность обратимости скорее всего будет мало отличаться от окружности, и противоречия с реальной картиной деформирования практически не возникнет.

Обработка полученных данных

В результате расчета был проведен анализ процесса качения роликов по боковой поверхности заготовки.

Обработка полученных результатов сводилась к следующим действиям. На первом этапе определялась глубина очага деформации r_x в радиальном направлении для каждого рассмотренного случая (при различных значениях ϵ_r , μ и R/R_k). Затем программными средствами находилось расстояние R_x (или радиус полости, образованной в результате утяжки) от оси прокатки до внутренней границы установленного очага деформации, после чего полученные значения R_x относились к исходному радиусу заготовки R (рисунок 3). В результате был рассчитан искомый параметр утяжки материала R_x/R , также характеризующий и глубину деформированного слоя заготовки в радиальном направлении, величина которой необходима для расчета контактного напряжения на роликах и величины момента.

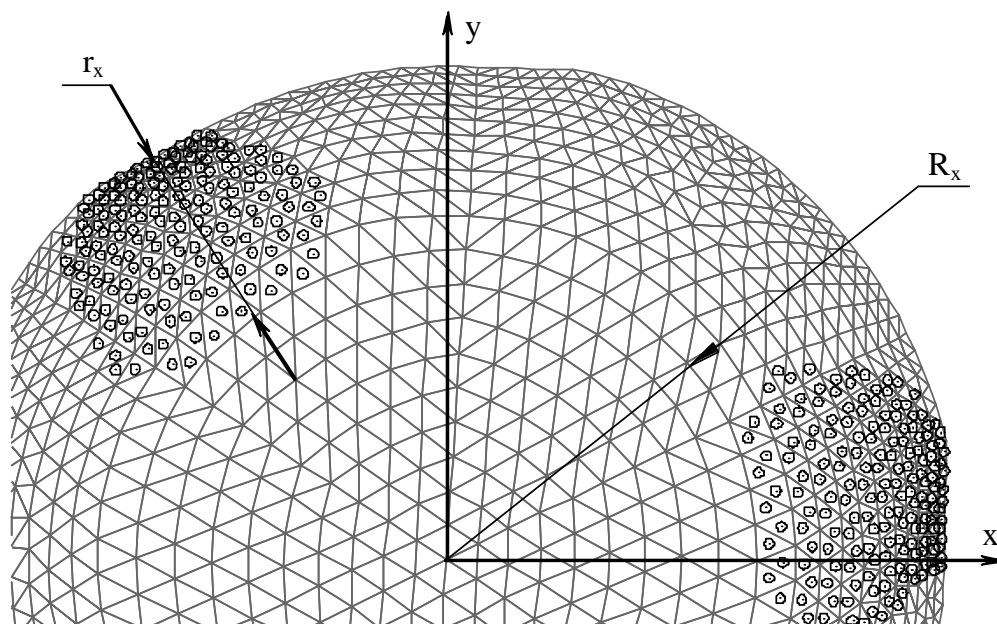


Рисунок 3 – Глубина очага пластической деформации r_x и радиус образованной в результате осевой утяжки полости R_x (показана часть заготовки)

Результаты вычислений значения R_x/R интерполировались в пределах крайних значений для каждого R/R_k и были сведены в таблицу 1. По полученным данным построена диаграмма (рисунок 4), анализ которой показывает, что с уменьшением диаметра роликов, при прочих равных условиях, глубина очага пластической деформации r_x увеличивается (при этом утяжка по радиусу R_x – уменьшается), что полностью согласуется с положениями, изложенными в [1]. Влияние коэффициента внешнего трения μ_1 , на искомый параметр невелико и находится в пределах допустимой погрешности.

На диаграмме, представленной на рисунке 4, кривым 1, 2, 3 и 4 принадлежат значения R/R_k равные 0,155; 0,2; 0,25 и 0,3 соответственно для $\mu_1=0,3$.

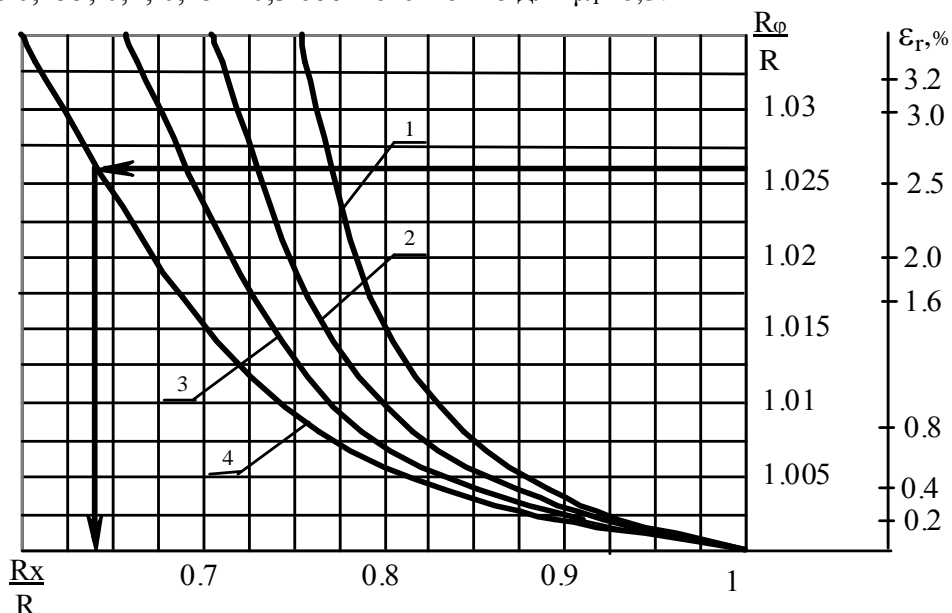


Рисунок 4 – График зависимости параметра утяжки материала R_x/R от радиального обжатия R_ϕ/R при различных значениях R/R_k при $\mu_1=0,3$

Таблица 1 – Значения R_x/R при различных R/R_k для $\mu_1=0,5$ в зависимости от радиального обжатия заготовки

$\varepsilon_r, \%$	Значения R_x/R при различных R/R_k для $\mu_1=0,5$			
	0,155	0,2	0,25	0,3
0	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,2	0,9298	0,9211	0,9100	0,8947
0,4	0,8920	0,8745	0,8519	0,8340
0,8	0,8443	0,8160	0,7877	0,7650
1,6	0,7929	0,7587	0,7280	0,6896
3,2	0,7574	0,7111	0,6650	0,6080
3,5	0,7547	0,7052	0,6585	0,6000

Распределение напряжений и деформаций в поперечном сечении заготовки на стадии обкатки

По результатам математического моделирования процесса обкатки также было проведено исследование распределения полей напряжений и деформаций в поперечном сечении заготовки.

При моделировании процесса на стадии обкатки, помимо определения размеров (глубины в радиальном направлении) очага пластической деформации производилось также вычисление всех компонент деформаций и напряжений ($\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}, \sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$), включая главные напряжения (σ_1 и σ_2), а также расчет интенсивности напряжений и деформаций (σ_i и ε_i), текущего значения предела текучести σ_s , среднего нормального и максимального касательного напряжений (σ_{cp} и τ_{max}), уширения заготовки в направлении оси и перемещений узловых точек конечноэлементной сетки.

Анализ полей напряжений позволил подтвердить ряд теоретических положений, сделанных ранее [1]. В частности отмечалось, что в центральных слоях заготовки действующие в радиальном направлении напряжения являются растягивающими, в том числе и в зонах действия валков (рисунок 5). Кроме того, напряженное состояние в поперечной плоскости заготовки, которое можно характеризовать знаком среднего напряжения σ_{cp} , также способствует всестороннему растяжению центральной части заготовки (рисунок 6) и в дальнейшем образованию в ней полости (рисунок 7), хотя, вследствие совершения при моделировании достаточно небольших перемещений, величина этих напряжений пока не достигает предела текучести материала.

Анализируя представленные диаграммы, можно также заключить, что глубина деформированного слоя заготовки r_x при обкатке является постоянной величиной и отношение R_x/R – не изменяется.

В этом легко убедиться при рассмотрении рисунка 8, на котором показаны изолинии текущего значения предела текучести σ_s , отнесенного к его начальному значению $\sigma_{0,2}$. Эти линии эквидистантны и, следовательно, значение r_x будет оставаться постоянным. Исключение в этом плане может составить случай, когда, например, в процессе деформирования при валковой штамповке происходит изменение относительной скорости перемещения пуансона η (при этом изменяется ε_r), или в случае радиального перемещения роликов к оси заготовки. Увеличение значения r_x также будет наблюдаться с момента перехода процесса валковой штамповки в завершающую стадию, т.е. к моменту касания нижней границы очага пластической деформации под пуансоном опорной поверхности.

Смоделирован процесс валковой штамповки на начальной стадии процесса. В дальнейшем, при повторном прохождении инструмента одних и тех же сечений заготовки будет наблюдаться упрочнение стенки изделия, увеличение осевой утяжки и рост растягивающих напряжений.

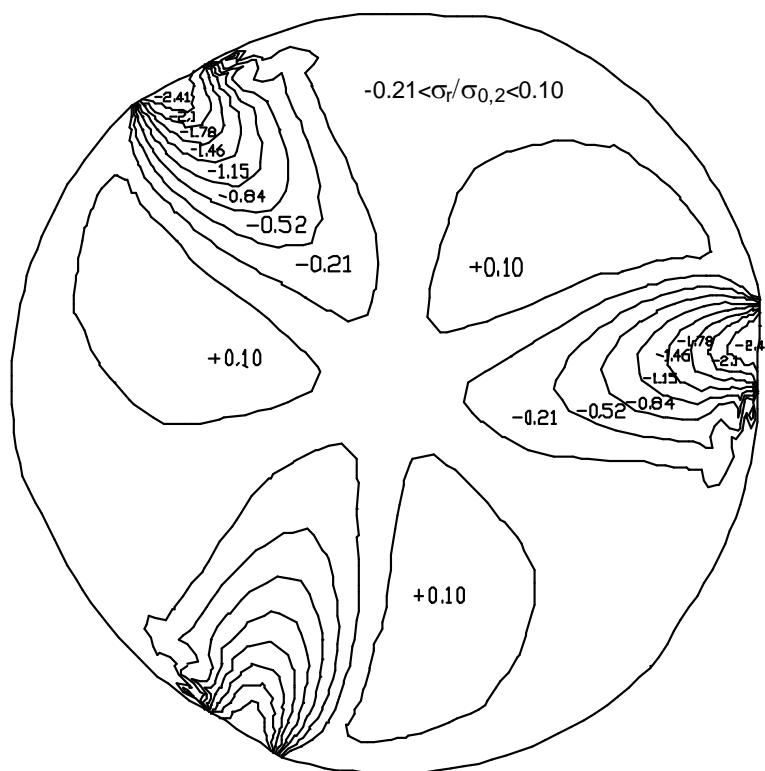


Рисунок 5 – Изолинии напряжений $\sigma_r / \sigma_{0,2}$ при $R/R_k = 0,155$; $\square_r = 3,2\%$ и $\square_I = 0,3$

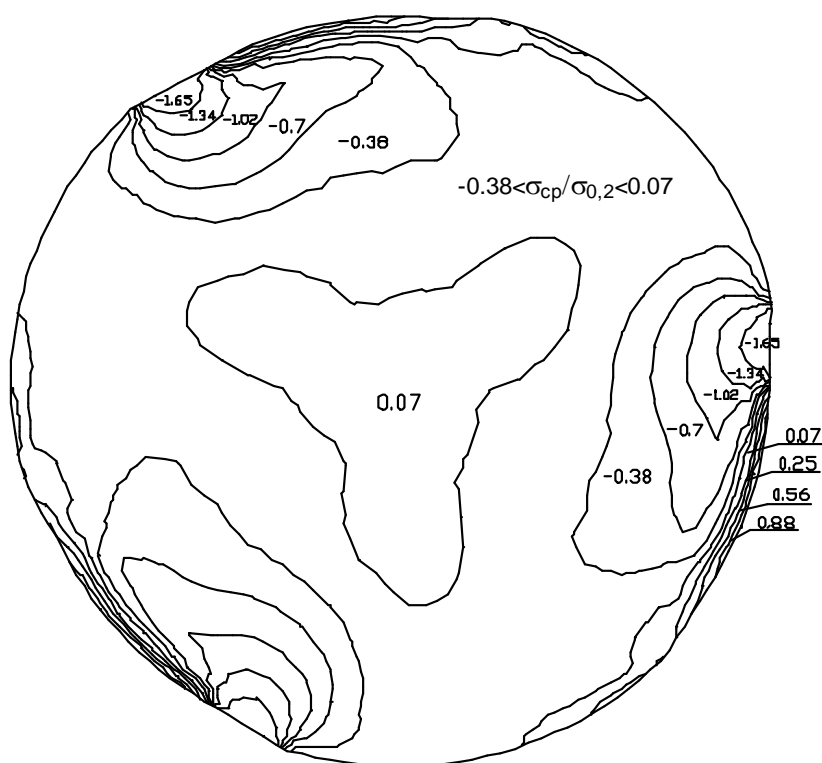


Рисунок 6 – Изолинии напряжений $\sigma_{cp} / \sigma_{0,2}$ при $R/R_k = 0,3$; $\square_r = 3,2\%$ и $\square_I = 0,3$

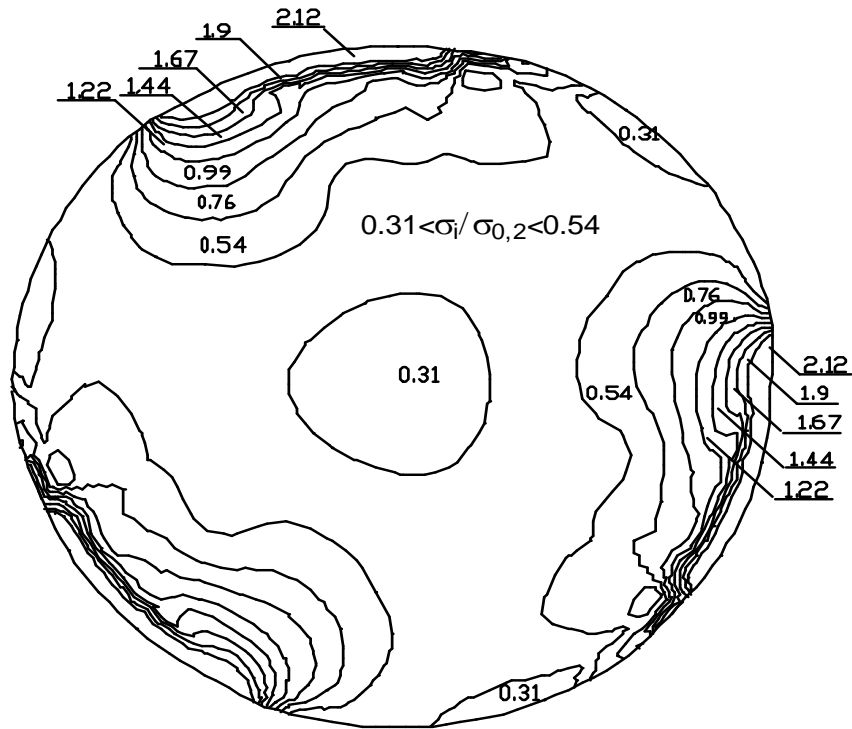


Рисунок 7 – Изолинии напряжений $\sigma_i/\sigma_{0,2}$ при $R/R_k = 0,25$; $\square_r = 1,6\%$ и $\square_I = 0,3$

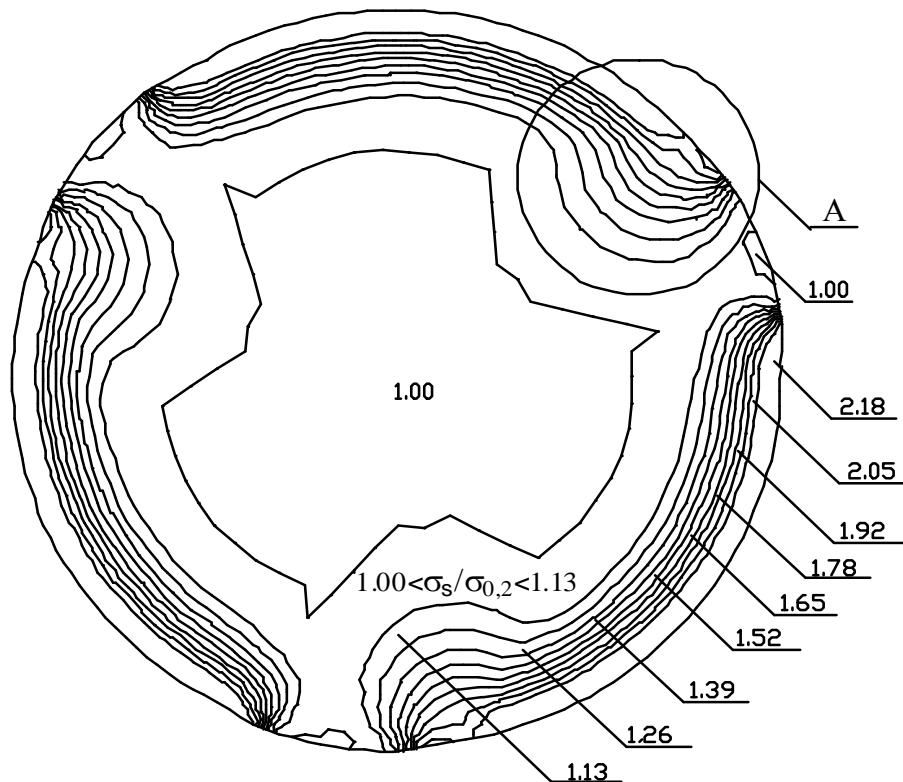


Рисунок 8 – Изолинии напряжений $\sigma_s/\sigma_{0,2}$ при $R/R_k = 0,2$; $\square_r = 1,6\%$ и $\square_I = 0,3$.
Зона А – след от ролика на стадии внедрения в заготовку

ЛИТЕРАТУРА

1. Радченко, С.Ю. К вопросу о механизме образования сквозного осевого отверстия при валковой штамповке [Текст]/ С.Ю. Радченко, К.И. Капырин // Механика деформированного твердого тела и обработка металлов давлением. Ч.2: Сб. науч. трудов, ТулГУ. Тула, 2003. С.96–101.
2. Голенков, В.А. Математическое моделирование процессов обработки материалов давлением [Текст] / В.А. Голенков, В.И. Кондрашов, З.П. Зыкова – М.: Машиностроение, 1994. – 272 с., ил.
3. Капырин, К.И. Кинематика течения металла при валковой штамповке [Текст] / Кузнечно-штамповочное производство, №4, 2003, С.3–8.
4. Голенков, В.А. Технологические процессы обработки металлов давлением с локальным нагружением заготовки [Текст]/ В.А. Голенков, С.Ю. Радченко – М.: Машиностроение, 1997. – 226 с.: ил.
5. Теорияковки и штамповки [Текст]: Учеб. пособие / Под ред. Е.П. Унксова, А.Г. Овчинникова – М.: Машиностроение, 1992. – 720 с., ил.
6. Аркулис, Г.Э. Теория пластичности [Текст]/ Г.Э. Аркулис, В.Г. Дорогобид. – М.: Машиностроение, 1987. – 352 с., ил.
7. Левитас, В.И. Большие упругопластические деформации металлов [Текст].– М.: Машиностроение, 1989.– 85 с., ил.

Капырин Константин Игоревич

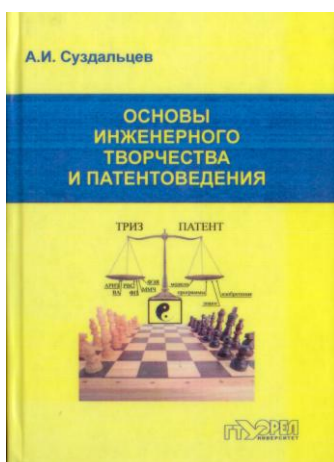
Орловский государственный технический университет, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры "Автопласт"
Тел. (4862) 41-98-35
E-mail: avtopl@ostu.ru

Короткий Геннадий Петрович

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры "Автопласт"
Тел. (4862) 41-98-35
E-mail: avtopl@ostu.ru

Дорофеев Олег Васильевич

Орловский государственный технический университет, г. Орел
Кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой "Автопласт"
Тел. (4862) 41-98-35
E-mail: avtopl@ostu.ru



В данную книгу вошли первые три главы учебного пособия «Основы инженерного творчества и патентования». В этих главах изложены периоды истории изобретений, принципы развития творческих способностей человека, методы решения изобретательских задач и основы интенсивной технологии инженерного творчества - теории решения изобретательских задач (ТРИЗ).

Предназначено студентам по направлению 210200 «Проектирование и технология электронных средств», а также бакалаврам, магистрантам и аспирантам технических вузов.

УДК 621(075.8)

В.В.МОРОЗОВ, А.Н. СТАРИКОВ

РАЗРАБОТКА СТЕНДА ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ХАРАКТЕРИСТИК ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА МЕХАТРОННОГО МОДУЛЯ С ПОМОЩЬЮ ОБОРУДОВАНИЯ NI

На основе современного комплекса сбора и обработки данных фирмы NATIONAL INSTRUMENTS разработана экспресс-методика по определению основных характеристик ролико-винтовых механизмов в составе электромеханического привода. Создан стенд, позволяющий проводить комплексные исследования механизмов. Разработаны и применены программы по сбору, анализу и обработке информации.

Ключевые слова: экспресс-методика, ролико-винтовой механизм, испытательный стенд, мехатронный модуль.

Using the equipment of firm National Instruments, system of strain sensors and kinematics sensors to develop the test bed on reception of an opportunity of conducting researches at a new qualitative level. For achievement of objects in view.

Key words: express-method, rollerscrew mechanisms, research stand, mechatronic modules, electromechanical driver.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Экспериментальные исследования параметров привода и механизмов в частности являются трудоемкой задачей, что объясняется сложностью объекта исследования, объемом методик испытаний и сложностью обработки результатов исследований. В настоящее время существенно расширились возможности по ведению натурного эксперимента. Была поставлена цель: используя оборудование фирмы National Instruments, систему тензодатчиков и кинематических датчиков, разработать испытательный стенд по получению возможности ведения исследований на новом качественном уровне. Для достижения поставленных целей исследования требовалось решить ряд задач:

- Возможность задействования многопоточного способа сбора данных с датчиков разных типов;
- Сбор и запись информации в режиме реального времени, синхронизация потоков данных;
- Возможность введения программной обработки поступающих данных: математическую статистику, фильтрацию сигнала, корректировку входных параметров, и т.д.)
- Наглядность и простота при получении, анализе и обработке информации. Удобство отладки управляющих программ.

Целью создания разработки являлось получение возможности определения основных характеристик механизмов мехатронных модулей, таких как:

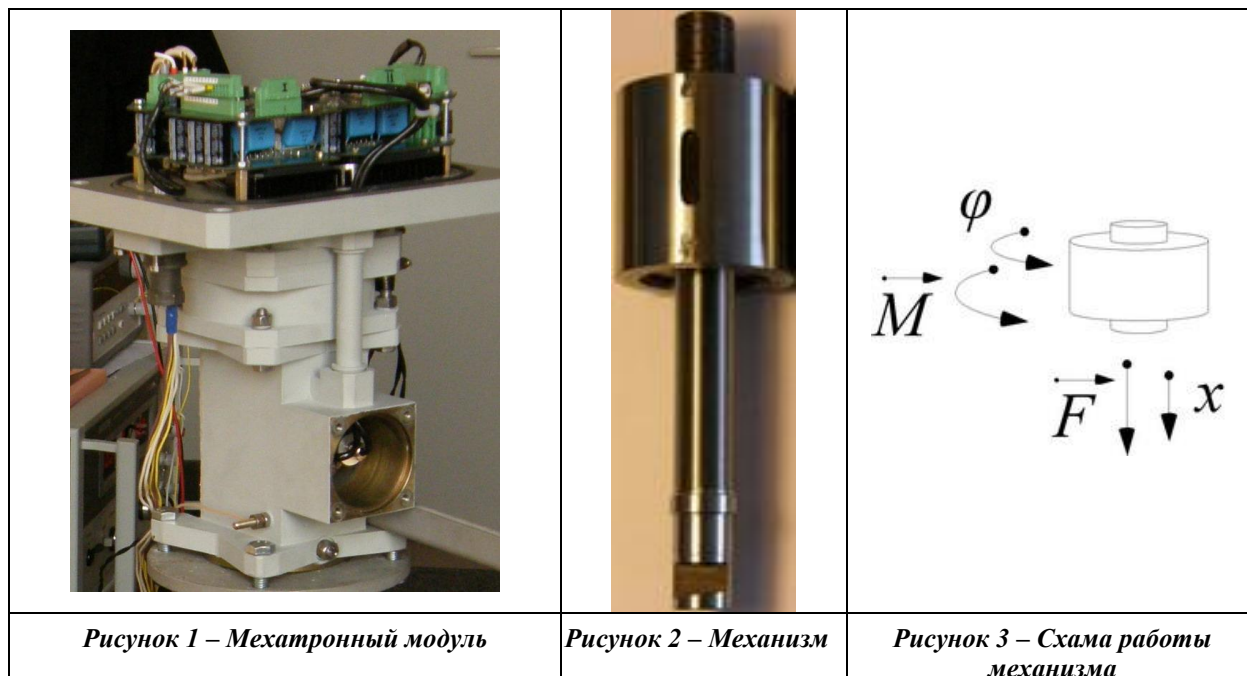
- момент сопротивления вращению механизма на холостом ходу;
- кинематическая передаточная функция (КПФ);
- силовая передаточная функция (СПФ);
- коэффициент полезного действия РВМ;
- коэффициент трения приведенный (КТП);
- коэффициент оттормаживания силовой (КОС);
- коэффициент оттормаживания мощностной (КОМ);
- запас по самоторможению относительный в режиме удержания нагрузки;
- запас по самоторможению абсолютный (четыре параметра);
- осевой люфт при смене направления движения выходного звена привода;

РЕШЕНИЕ

Используя: оборудование фирмы National Instruments, программу LabView-8.5, плату PCI6221, систему кинематических и тензодатчиков, нагрузочный стенд, - была выполнена

разработка стенда по исследованию характеристик механизма в составе электромеханического мехатронного модуля.

Объектом экспериментальных исследований является электромеханический мехатронный модуль на базе двигателя ДБМ 120-1,6-0,5-3-Д25, рисунок 1. В качестве механизма использовалась роliko-винтовая пара, рисунок 2. Принципиальная схема работы механизма представлена на рисунок 3.



Испытательный стенд представляет собой рычажную конструкцию, рисунок 4.

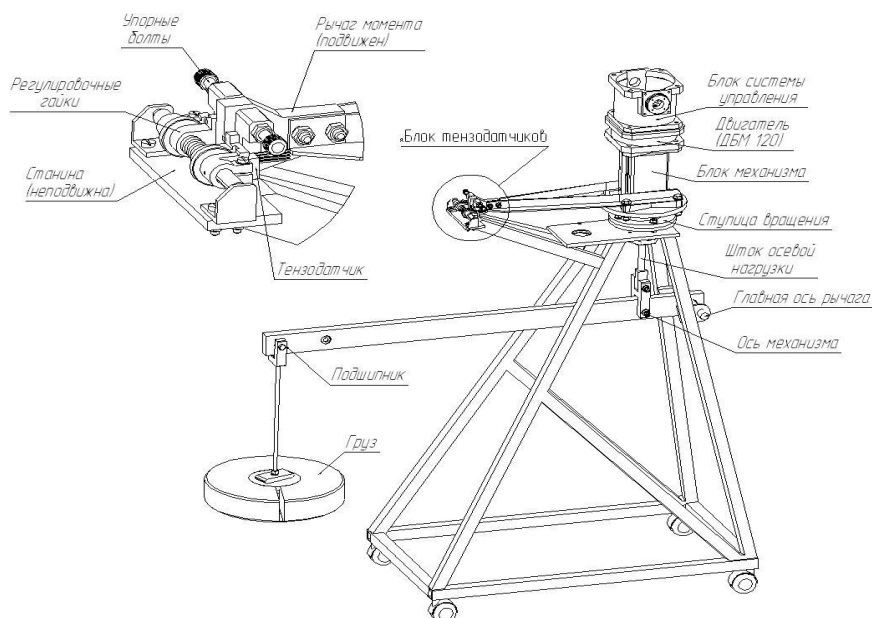


Рисунок 4 – Тронный модуль

Для реализации разработки было использовано оборудование National Instruments.

- LabVIEW-8.5;
- PCI-6221.

В качестве датчиков использовались (рисунки 5, 6, 7, 8):



Рисунок 5 – ЛИР-158А-2-Н-002500-05-ПИ-5 – кинематический датчик углового положения

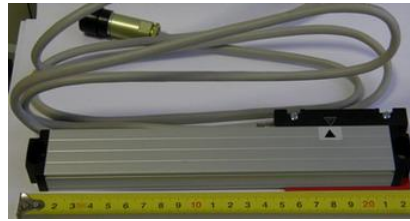


Рисунок 6 – ЛИР-7-1-0120-02(0)-05-ПИ-0.1-3-2.0-В (РС10ТВ) – кинематический датчик линейного положения

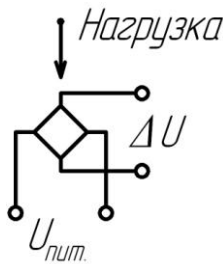


Рисунок 7 – Датчик усилия, 15Н FSG15N1A



Рисунок 8 – Датчик усилия, 35000Н- RLS-3.5t-С3/5, класс С3

Для тарировки датчиков использовался VI, программно корректирующий нестабильность напряжения питания (рисунки 9, 10).



$$U_{датч.} = U_{датч.i} \times \left(1 + \frac{U_{num.опорн} - U_{num.i}}{U_{num.i}} \right)$$

Рисунок 9 – Схема тарировки датчиков

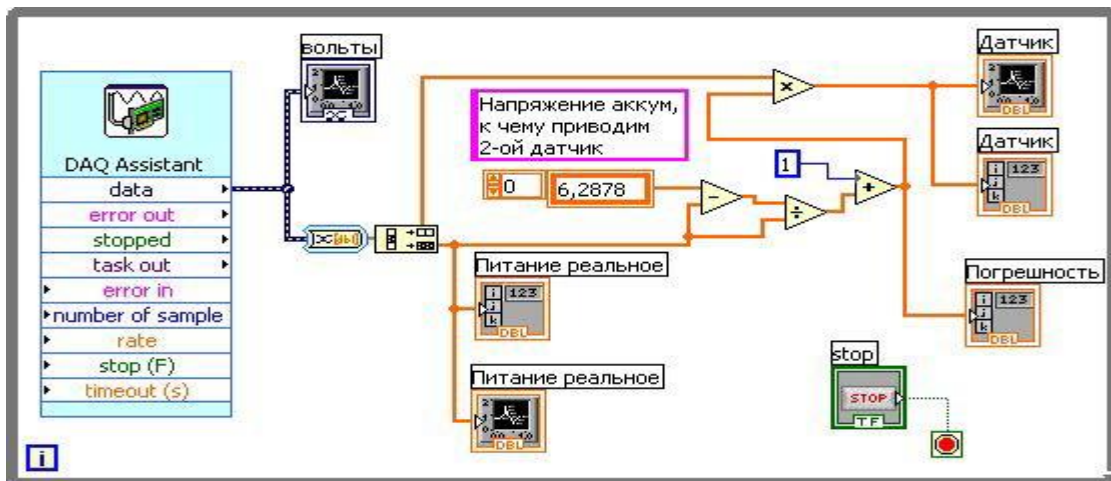


Рисунок 10 – Блок-диаграмма работы платы захвата с корректировкой по питающему напряжению

Для решения задачи математической обработки данных были использованы элементы математической статистики, рисунок 11:

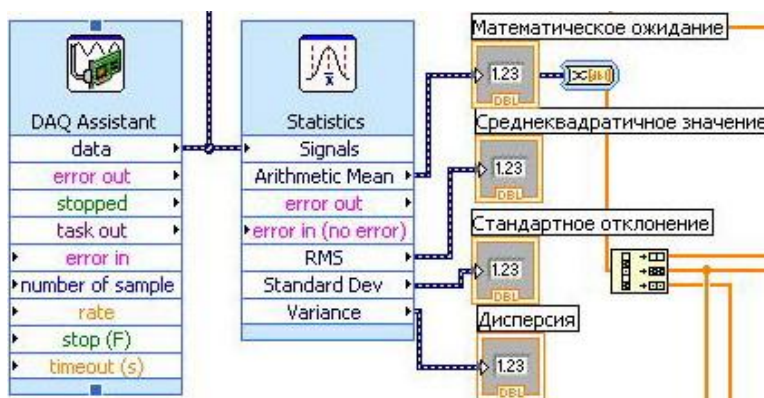


Рисунок 11 – Лицевая панель прибора «Математическая статистика»

Для тарировки 3,5 тонного RLS-3.5t-C3/5 датчика использовался специально разработанный в оболочке LabVIEW, виртуальный прибор. С помощью него были получены следующие результаты, рисунок 12 а, б.

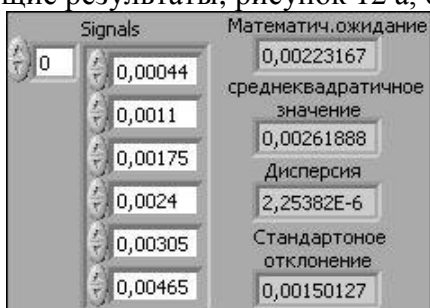


Рисунок 12,а – Данные по вольтажу

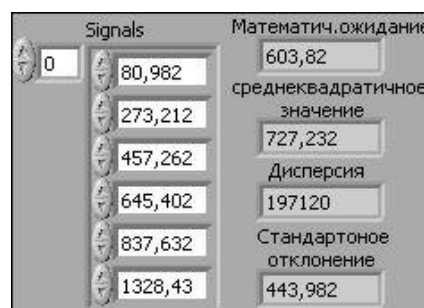


Рисунок 12,б – Данные по нагрузке

Для нахождения коэффициента корреляции использовался соответствующий виртуальный прибор, элемент блок-диаграммы представлен на рисунках 13, 14, 15.

$$r = \frac{\mu(U, F)}{\sigma(U)\sigma(F)}$$

$$\mu(U, F) = M\{[U - M(U)][F - M(F)]\}$$

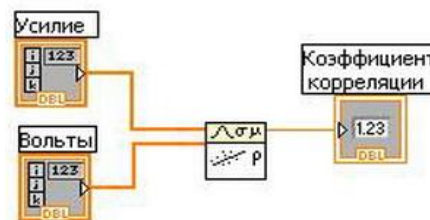


Рисунок 13 – Определение коэффициента корреляции

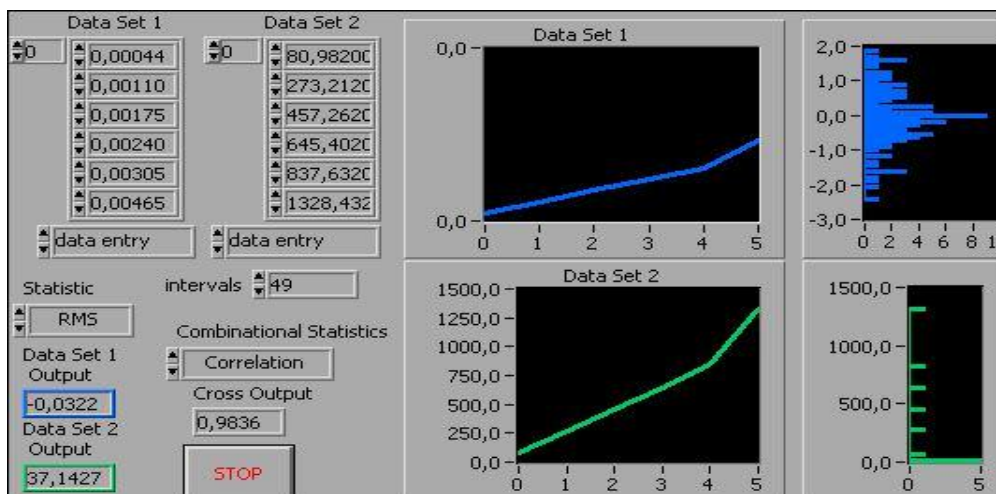


Рисунок 14 – Результаты статистической обработки данных датчика RLS-3.5t-C3/5

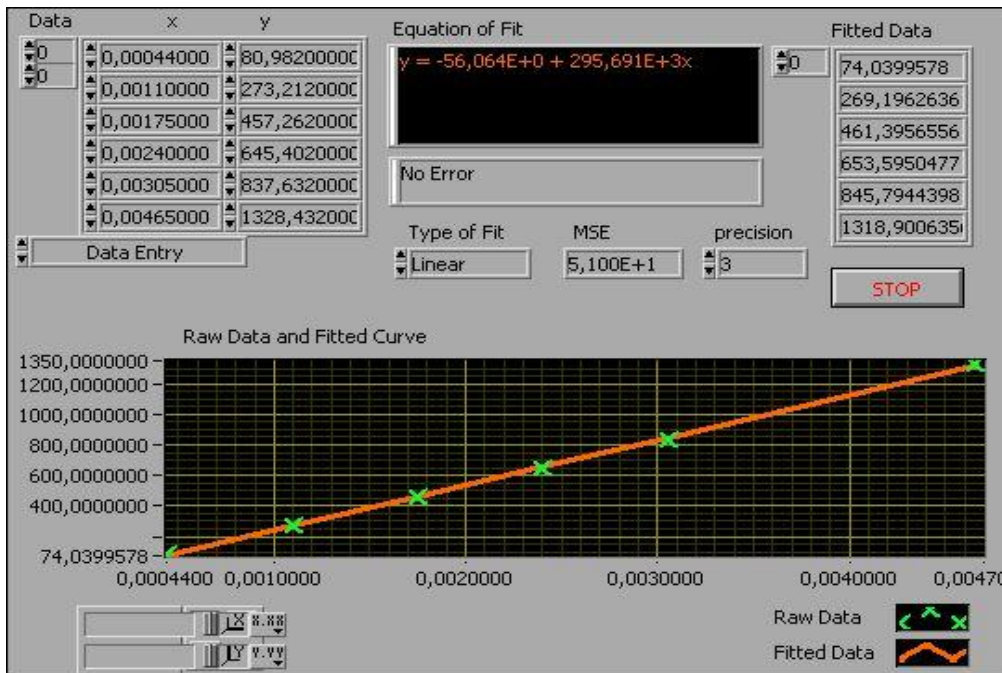


Рисунок 15 – Линейная регрессия тарировки датчика RLS-3.5t-C3/5 (3,5 тонны)

В качестве примера функционирования данной разработки, показан виртуальный прибор, отображающий картину моментов при вращении механизма в прямом и обратном направлении, блок-диаграмма и лицезвая панель, рисунки 16, 17. Исходя из него, удобно и наглядно рассматривать процессы, происходящие в механизме. Видны момент инерции при переключении направления движений, плавность хода, величину момента сопротивления в обоих направлениях, пульсации момента вследствие работы фаз двигателя и многополюсности.

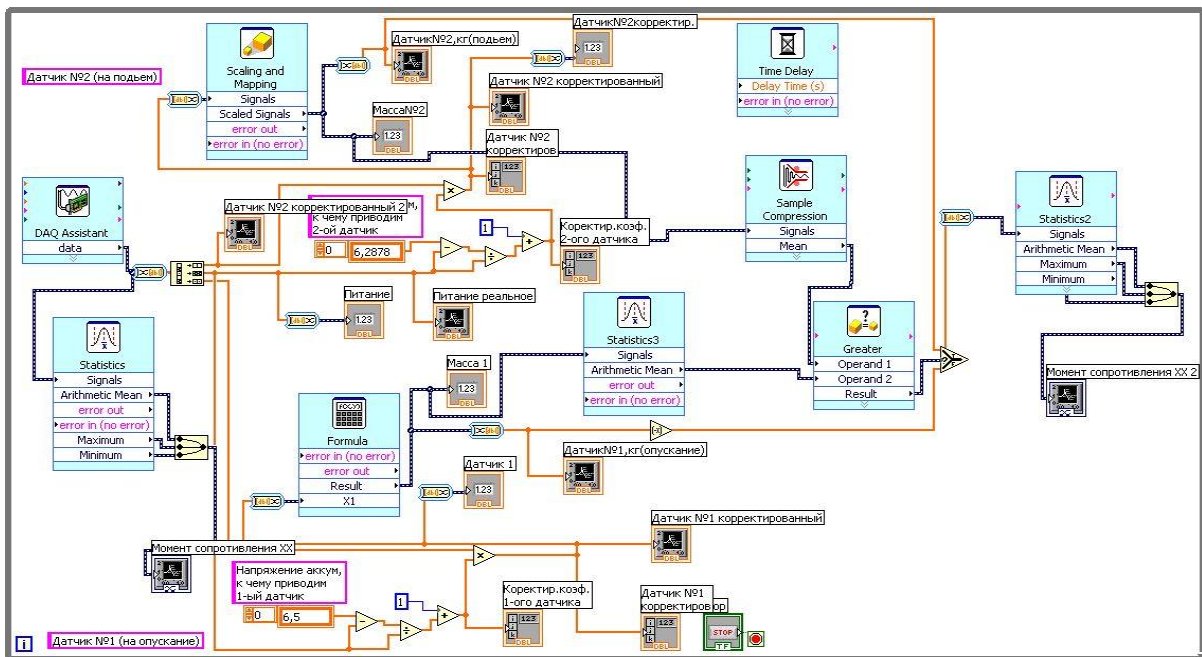


Рисунок 16 – Блок-диаграмма VI: Определение момент холостого хода PBM



Рисунок 17 – Лицевая панель VI: Определение момент холостого хода PBM

Таким образом, использование оборудования NI позволило решить поставленную задачу наиболее эффективным образом.

Перспективой разработки данного стенда является:

- использование более профессионального оборудования NI;
- использование пакета NI Motion для управления двигателем модуля;
- использование пакета NI Vibration для исследования свойств модуля в режиме вибронгрузок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бушенин Д.В. (и др.) Основы проектирования и расчёта несоосных винтовых механизмов, Владимирский гос. университет, 1998г., - 116с.
2. Морозов В.В., Панюхин В.И., Панюхин В.В. Зубчато-винтовые передачи для преобразования вращательного движения в поступательное, Владимирский гос. университет, 2000г., - 160с.
3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров, М.: Лань, 2003. – 832с.
4. А.А. Суранов LabVIEW 8: справочник по функциям. Москва.: ДМК Пресс, 2005. 512 с.
5. Р.Ш. Загидуллин LabVIEW в исследованиях и разработках. Москва.: Горячая Линия – Телеком, 2005. 252 с.

Морозов Валентин Васильевич

Владимирский государственный университет, г. Владимир
 Д.т.н., профессор, заведующий каф. «Технология машиностроения», ректор
 Тел. (4922) 47-99-27
 E-mail: rector@vlsu.ru

Стариков Альберт Николаевич

Владимирский государственный университет, г. Владимир
 Ассистент кафедры «Технология машиностроения»
 Тел. (4922) 47-96-53
 E-mail: albert@vlsu.ru

А.Е. РЕМИЗОВ, О.О. КАРЕЛИН

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ В УСЛОВИЯХ СКОСА ПОТОКА

Предлагается метод определения толщины пограничного слоя, основанный на предположении о постоянстве коэффициентов k и b линейной регрессии и нулевом значении ковариации в ядре потока.

Ключевые слова: кольцевой диффузор, закрутка потока, пограничный слой, линейная регрессия, ковариация.

A method of determining of boundary layer thickness, based on consideration of constancy of k -, b -trend coefficients and zero value of covariation in mainflow is suggested.

Key words: annular diffuser, inlet swirl, boundary-layer, linear trend, covariation.

При исследовании диффузорных течений в качестве исходного опытного материала используются профили скорости в пограничном слое. При этом возникает необходимость определения толщины пограничного слоя δ . Очевидно, что при постоянной скорости в ядре потока не возникает особых затруднений в нахождении толщины пограничного слоя δ . В этом случае профили скорости могут быть представлены универсальной зависимостью [1]:

$$\frac{C}{C_1} = f\left(\frac{y}{\delta}\right), \quad (1)$$

где C_1 – скорость на внешней границе пограничного слоя δ ;

C – скорость на расстоянии y от стенки.

Однако, как показывают экспериментальные исследования кольцевых диффузорных каналов [2–5], при наличии входной закрутки (скоса потока) имеет место изменение величины скорости по всему сечению канала (рисунок 1). В этом случае задача определения внешней границы пограничного слоя значительно усложняется, так как невозможно установить по какой причине уменьшается скорость: то ли под влиянием вязкости, то ли от скоса потока в ядре.

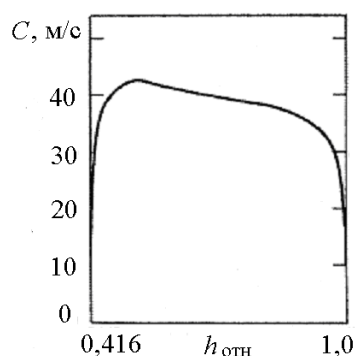


Рисунок 1 – Профиль среднерасходной скорости в кольцевом диффузоре с закруткой [2]

В основе предлагаемого метода определения δ лежит предположение о постоянстве коэффициентов k и b линейной регрессии

$$C = ky + b \quad (2)$$

и нулевом значении коэффициента ковариации распределения скорости в ядре потока

$$Cov(y, C) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \mu_y)(C_i - \mu_C), \quad (3)$$

где n – множество данных;

μ – математическое ожидание.

Отсчет координаты y производился от среднего сечения канала в сторону одной из меридиональных образующих. При определении толщины пограничного слоя δ направление отсчета координаты y изменялось на противоположное (рисунок 2).

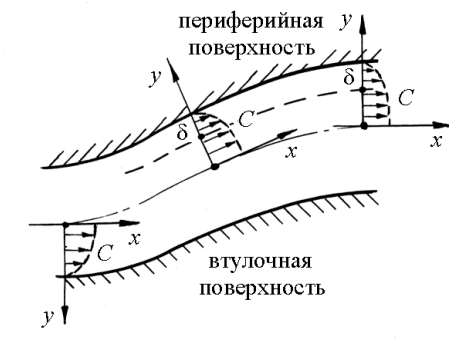


Рисунок 2 – Схема отсчета координат

Данным способом при помощи программы Microsoft Excel были обработаны профили скорости на периферийной поверхности (рисунок 3), полученные при экспериментальном исследовании кольцевого диффузорного канала. Геометрические характеристики канала следующие: высота проточной части на входе в канал $h_1=50$ мм, осевая длина $L=270$ мм; геометрическая диффузорность $n=1,6$; эквивалентный угол раскрытия $\alpha_{\text{ЭКВ}}=7^\circ$. Число Рейнольдса на входе в установку составляло $Re=2,8 \cdot 10^5$, приведенная скорость $\lambda_1=0,13$. Лопаточная решетка создавала закрутку 0° и 6° на входе. Пограничный слой измерялся в трех точках расположенных на 10, 50 и 90% длины канала.

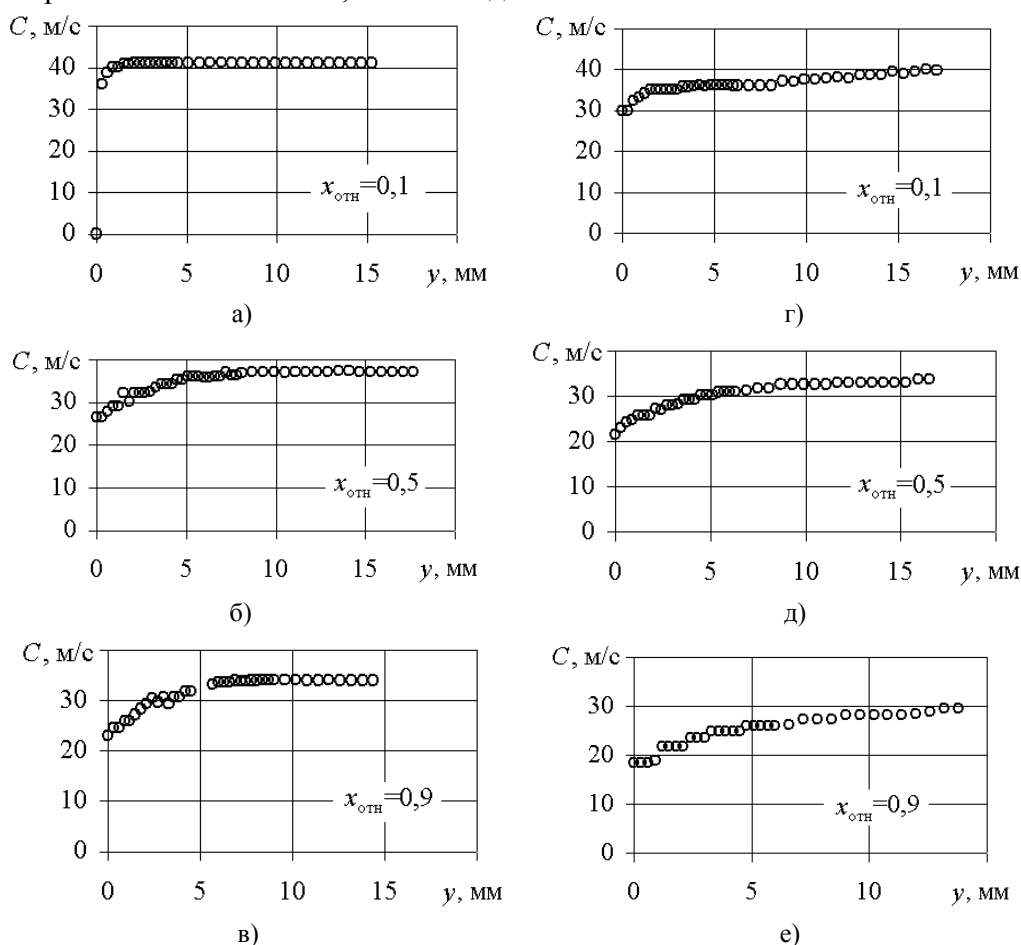


Рисунок 3 – Профили скорости вблизи периферийной образующей канала без закрутки (а-в) и с закруткой 6 град. (г-е)

Определить толщину пограничного слоя традиционным способом

$$\delta = y|_{C=0,99C_{я}} \quad (4)$$

оказалось возможным только при отсутствии входной закрутки потока, так как при наличии закрутки скорость в ядре течения $C_{я}$ изменяется.

Результаты определения толщины пограничного слоя с помощью статистических параметров распределения скорости приведены на рисунке 4 для одного из сечений канала.

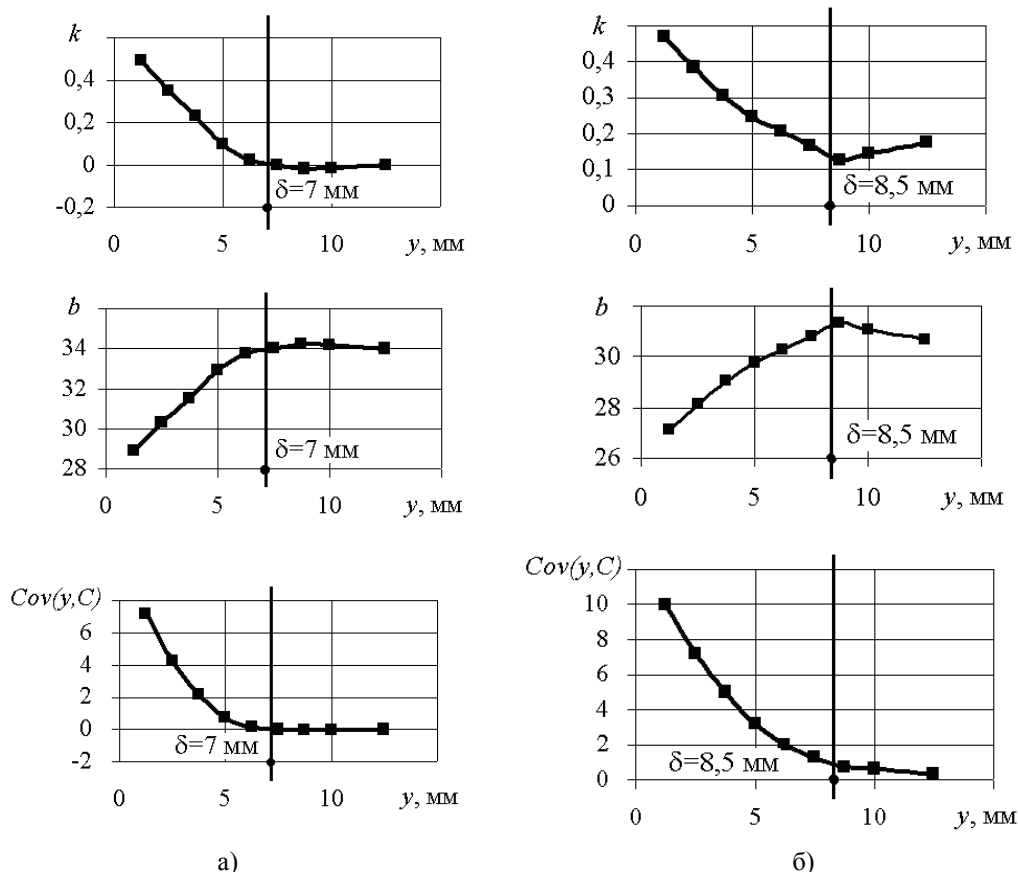


Рисунок 4 – Изменение коэффициентов регрессии и ковариации для профиля периферийной скорости на половине длины канала без закрутки (а) и с закруткой (б)

Изменение толщины пограничного слоя по длине канала, приведенное на рисунке 5 свидетельствует об удовлетворительной сходимости предлагаемого способа определения δ с традиционным (4) и о том, что предлагаемый способ позволяет зафиксировать эффект сдерживания роста пограничного слоя на периферийной образующей канала в условиях входной закрутки потока, который отмечался в работах [2, 4, 5].

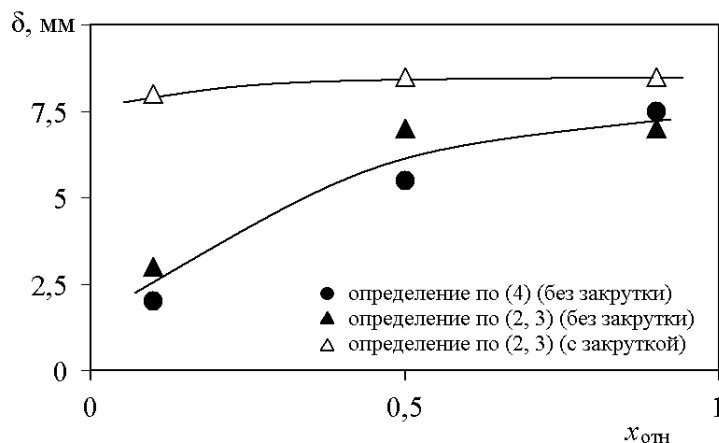


Рисунок 5 – Развитие пограничного слоя на периферийной образующей канала

Таким образом, предлагаемый способ определения δ с помощью статистических параметров распределения скорости в ядре потока применим как для осевых, так и для закрученных течений в диффузорных каналах. Очевидно, что в ядре течения коэффициенты k и b линейной регрессии постоянны, а коэффициент ковариации $Cov(y, C)$ равен нулю.

В случае закрученного течения в диффузоре величина δ определяется по экстремумам в характере изменения k и b , появление которых возможно в условиях скоса потока.

ЛИТЕРАТУРА

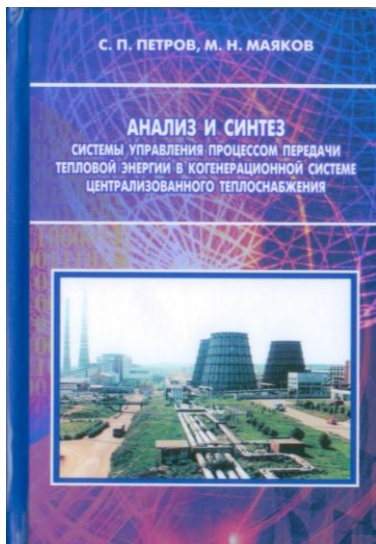
1. Дейч М. Е. Газодинамика диффузоров и выхлопных патрубков турбомашин. М.: Энергия, 1970. – 384 с.
2. Сэно В. Оптимальная конфигурация опоры в кольцевых диффузорах с изменяемой закруткой потока на входе // Теоретические основы инженерных расчетов. – 1981. – № 2. – С. 236–240.
3. Пфайль Х. Измерение параметров турбулентного пограничного слоя в диффузоре за осевым компрессором // Энергетические машины и установки. – 1988. – № 3. – С. 72–81.
4. Коновалов А. Е. Течение в переходных каналах компрессоров // Новости зарубежной науки и техники. Авиационное двигателестроение. – 1990. – № 8. – С. 17-21.
5. Довжик С. А. Исследование кольцевых диффузоров осевых турбомашин // Промышленная аэродинамика. – 1961. – Вып. 20. – С. 168–202.

Ремизов Александр Евгеньевич

Рыбинская государственная авиационная технологическая академия им. П. А. Соловьева, г. Рыбинск
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Авиационные двигатели»
Тел. (4855) 28-04-71

Карелин Олег Олегович

Рыбинская государственная авиационная технологическая академия им. П. А. Соловьева, г. Рыбинск
Аспирант кафедры «Авиационные двигатели»
Тел. (4855) 24-30-04
E-mail: Karelin2008rgata@mail.ru



В монографии дан анализ существующей структуры и методов управления когенерационной системой централизованного теплоснабжения (КСЦТ). Раскрыты особенности функционирования системы управления КСЦТ. Предположено эшелонное представление системы управления КСЦТ как подсистемы когенерационной системы преобразования энергии (КСЦТ). Сформированы общие принципы управления КСЦТ. Раскрыты особенности автоматизации на различных ступенях управления. Приведены современные технические средства управления технологическими процессами.

На основании эшелонного представления с использованием операторного метода сформирована новая структура модели системы управления КСЦТ, в которой за счет введения в локальный контур управления активной пиковой нагрузки уменьшено влияние транспортного запаздывания на систему управления. Дан анализ существующей модели управления. Выполнен синтез модели АСУ КСЦТ по двум взаимосвязанным критериям: интегральной квадратической оценке качества переходного процесса и интегральному показателю минимума энергетических затрат.

По методу Е.П. Стефании проведен синтез и определены параметры корректирующего устройства. Сформирована новая структура модели системы управления КСЦТ. Выполнен анализ устойчивости сформированной модели системы управления КСЦТ. С использованием графо-параметрического метода дана оценка существующей и предлагаемой систем управления по интегральному показателю минимума энергетических затрат. Дана количественная оценка эффективности систем управления АСУ КСЦТ с различной структурой управления по критерию минимума энергетических затрат. Дана количественная оценка эффективности систем управления АСУ КСЦТ с различной структурой управления по критерию минимума энергетических затрат.

Для научных и инженерно-технических работников, преподавателей и аспирантов вузов, изучающих специальность «Автоматизация технологических процессов...», а также специалистов в области автоматизации и управления, теплоэнергетики и энергосбережения.

А.С. ТАРАПАНОВ, И.М. ЧЕПИКОВА

САМОПРИСПОСАБЛИВАЮЩИЕСЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Приводится анализ и классификация самоприспосабливающихся технологических систем. Рассмотрены преимущества применения, примеры возможных аттракторов, бифуркации. Для положительного постбифуркационного периода выделены технологические императивы - запреты на нежелательное поведение системы.

Ключевые слова: самоприспосабливающаяся технологическая система, винтовая поверхность, аттрактор, технологический императив, бифуркация.

The analysis and classification of a self-adapting technological systems is resulted. The advantages of applying, examples of possible attractors, bifurcation are reviewed. For positive after bifurcation period the technological imperatives - prohibitions of a undesirable system behaviour are selected.

Key words: a self-adapting technological system, screw surface, attractor, technological imperative, bifurcation.

Управление параметрами процесса при механической обработке материалов с использованием эффекта самоприспособления [1], [2] может осуществить выбор наиболее производительного метода, сохраняя работоспособность технологической системы при непредвиденных изменениях её параметров, целей управления или окружающей среды путём целенаправленной смены алгоритм функционирования. Развитой способностью к адаптации обладают большинство систем автоматического управления, у которых предусмотрена возможность приспосабливаться (в определённых пределах) к изменяющимся условиям функционирования. По способу адаптации различают самонастраивающиеся (изменяется только значения параметров), самообучающиеся (алгоритм функционирования вырабатывается и совершенствуется в процессе самообучения) и самоорганизующиеся (изменяется структура или состав) системы [1], [2].

В самонастраивающейся системе автоматического управления приспособление к случайно изменяющимся условиям обеспечивается автоматическим изменением параметров настройки. В любой не самонастраивающейся автоматической системе управления имеются параметры, которые влияют на устойчивость и качество процессов управления и могут быть изменены при регулировании состояний системы. Если эти параметры остаются неизменными, а условия функционирования (характеристики управляемого объекта, возмущающие воздействия) существенно изменяются, то процесс управления может стать неэффективным или неустойчивым. Ручная настройка системы часто оказывается крайне трудоёмкой, а иногда и невозможной. Использование в таких случаях самонастраивающихся систем технически и экономически целесообразно и даже может оказаться единственным способом надёжного управления. Самонастраивание технологической системы происходит при вводе исходных данных - физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материала, способа закрепления заготовки и жёсткости технологической системы, размеров заготовки и геометрических параметров винтовой поверхности, а также инструментов, используемых в рассматриваемых методах. Самонастройка технологической системы регистрируется как специальной аппаратурой, так и адаптивными алгоритмами центральных управляющих ЭВМ. Придание алгоритмам управления свойств самонастройки (адаптации) существенно расширяет возможности управления разнообразными процессами и позволяет приблизиться к оптимальным режимам функционирования технологической системы, облегчает задачу унификации систем управления, сокращает время на испытания и наладку [2].

Процесс самообучающейся технологической системы при лезвийной обработке винтовых поверхностей сводится к «пробам» и «ошибкам». Система выполняет пробные

изменения параметров и одновременно контролирует результаты этих изменений [2]. Самообучение технологической системы может быть проиллюстрировано методом Бокс-Уилсона (метод крутого восхождения) и нейросетевыми технологиями. Решение оптимизационной задачи в общем случае заключается в определении таких значений входных переменных исследуемого объекта, которым соответствует наилучшее (минимальное или максимальное) значение целевой функции. Технологические системы, как правило, являются многомерными, с большим количеством входных факторов, на значение которых к тому же накладываются дополнительные ограничения. Это требует использования методов многомерной условной оптимизации. Многие из данных методов, однако, предполагают сведение задачи к безусловной оптимизации путем преобразования целевой функции с дальнейшим применением соответствующих процедур [3].

Самоорганизация технологических систем может заключаться в выборе оптимального метода обработки конкретной поверхности по критерию наибольшей производительности.

После открытия Б.П. Белоусовым периодической химической реакции, протекающей в одной фазе И. Пригожин [2] и его сотрудники предложили одну из наиболее эффективных математических моделей колебательных гомогенных реакций — так называемый брюсселятор, представляющую собой частный случай модели Тьюринга. Брюсселятор стал основой описания диссипативных структур — образований, возникающих в нелинейных неравновесных открытых системах различной природы — биологической (биологические часы), физической (диссипативные структуры в твердых телах), экономической (колебания курса на бирже) и т.д. Так как для возникновения упорядочения в таких системах необходим приток энергии или отток энтропии, её диссипация, И. Пригожин назвал эти системы диссипативными. Вследствие нелинейности, наличия более одного устойчивого состояния в этих системах, в них не выполняется ни второе начало термодинамики, ни теорема И. Пригожина о минимуме скорости производства энтропии. По аналогии описания самоорганизующихся систем с фазовыми переходами диссипативная самоорганизация получила название фазового перехода в неравновесной системе.

Самоприспособление технологической системы при обработке сложных поверхностей заключается в переходе от непредсказуемого поведения системы по алгоритму диссипативной структуры к направленному движению вдоль желаемых инвариантных многообразий - аттракторов, к которым подстраиваются остальные параметры технологической системы.

Аттракторы образно представляются как геометрические структуры, характеризующие поведение в фазовом пространстве в прошествии времени. Аттрактор - это то, к чему система стремится прийти, к чему она притягивается.

В процессе самоприспособления технологической системы можно выделить следующие положения:

- достижение целевых аттракторов – асимптотических пределов в пространстве состояний, отражающих желаемые режимы функционирования;
- целевые аттракторы и инвариантные многообразия отражают физическую сущность процессов, протекающих в соответствующем объекте. Эти многообразия формируются на основе технологических инвариантов;
- введение в процедуру синтеза инвариантных многообразий позволяет построить механизм естественной совокупности отрицательных и положительных обратных связей, которые формируют процессы направленной самоорганизации в технологических системах.

С позиции синергетики процесс самоприспособления технологической системы может протекать в своём канале эволюции - циклическом аттракторе, то есть текущие параметры сравниваются с наиболее приемлемыми и, если это необходимо, цикл системы управления повторяется. Характеристика циклического аттрактора - движение взад-вперед, подобно маятнику или циклическому магниту. Он притягивает, затем отталкивает, затем опять притягивает и т.д. Он функционирует во втором измерении. Этот аттрактор является основной структурой для более сложного поведения. Определённая деятельность

автоматически ведет к другой в повторяющемся порядке. Таким образом, циклический аттрактор возможно выделить при рассмотрении колебаний силы резания, которые вызваны неравномерностью воздействия инструмента на технологическую систему. Если период свободных колебаний мал по сравнению с продолжительностью возрастания силы, то она считается медленно изменяющейся, то есть приложенной статически. Если импульсы возбуждающей силы отделены друг от друга интервалом времени, то возмущения, вызванные предыдущим импульсом, успевают затухнуть и технологическая система к моменту очередного врезания находится в невозмущённом состоянии [2].

Аттрактор Торас отражает изменения технологической системы, повторяющую по мере движения вперед. Образно он представлен трехмерным образованием, которое состоит из бесконечного числа плоскостей. Его можно представить как кольцо или рогалик. Он образует спиралевидные круги на ряде различных плоскостей, и иногда возвращается сам к себе, завершая полный цикл. По сравнению с циклическим, аттрактор Торас вводит большую степень беспорядочности, и его модели более сложны. Он образует спиралевидные круги на ряде различных плоскостей [2].

Аттрактор Торас проявляется в виде автоколебаний технологической системы. Автоколебания или самовозбуждающие колебания возникают при отсутствии видимых внешних причин. При резании возбудителем автоколебаний является неоднозначная сила резания при врезании лезвий инструмента в деталь и отталкивании от неё. Опытные данные подтверждают гипотезу Н.И. Ташлицкого [5] о запаздывании изменения силы резания при изменении толщины срезаемого слоя вследствие сближения и удаления инструмента и детали в процессе резания. С увеличением толщины срезаемого слоя при резании ширина площадки контакта достигает несколько меньшей величины, а при уменьшении толщины срезаемого слоя - несколько большей величины по сравнению с той шириной, которая была бы при резании с постоянной толщиной срезаемого слоя. Поскольку изменения ширины площадки контакта однозначно связано с изменением силы резания и при врезании лезвия инструмента в деталь толщина срезаемого слоя возрастает, а при отталкивании уменьшается, то мгновенная сила резания при врезании будет несколько меньше, а при отталкивании несколько больше величины мгновенной силы, соответствующей мгновенной толщине срезаемого слоя (штрих-пунктирная линия на рисунке 1)

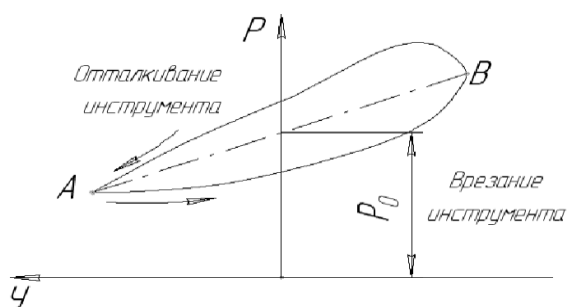


Рисунок 1 - Схема возбуждений автоколебаний при резании

Состояние автоколебательного процесса для самоприспосабливающейся технологической системы можно представить как бифуркацию.

В момент бифуркации технологическая система «лишается памяти», то есть отсекает всю предысторию, всю наследственность. Следовательно, бифуркация есть барьер, способный отсечь негативное (наличие вредных свойств). При бифуркации и постбифуркационный период поведение системы принципиально непредсказуемо и определяется совершенно новыми условиями среды, которые до бифуркации не играли никакой роли [1]. Но можно установить определённые запреты -

технологические императивы на функционирование технологической системы. При рассмотрении процесса механической обработки такими технологическими императивами самоорганизующейся системы может быть мощность станка, максимальная допустимая сила, возможные частоты вращения шпинделя станка, допустимые диаметр и длина заготовки, требуемая шероховатость и точность обработанной поверхности.

Возводя барьеры на пути передачи неблагоприятных для качества изделия свойств, необходимо управлять средой, которая в положительном смысле приведёт к бифуркации.

Таким образом, синергетика позволяет выявить следующие универсальные принципы самоорганизации технологических систем и эволюции сложных систем - аналоги законов сохранения: 1) принцип нелинейности технологических систем, т.е. любое явление, происходящее в ней понимается как момент эволюции; 2) принцип неустойчивости технологических систем, т.е. изменение её состояний в процессе эволюции; 3) принцип открытости технологических систем, т.е. её обмен энергией с окружающей средой; 4) принцип подчинения технологических систем, т.е. её функционирование и поведение определяются внутренними свойствами. Синергетические принципы могут стать основой для принятия обоснованных решений и прогнозирования в условиях неопределённого поведения технологических систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Суслов, А.Г. Научные основы технологии машиностроения [Текст] / А.Г. Суслов, А.М. Дальский. - М.: Машиностроение, 2002. - 684 с.: ил.
2. Исследовано в России [Электронный ресурс]: материал из Википедии - свободной энциклопедии. - Режим доступа к энциклопедии: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Адаптивная_система_\(теория_управления\)](http://ru.wikipedia.org/wiki/Адаптивная_система_(теория_управления)).
3. Суслов, А.Г. Технологическое обеспечение качества обработанных поверхностей деталей машин с использованием самообучающихся технологических систем [Текст] / А.Г. Суслов, Д.И. Петрешин, Д.И. Финатов // Инженерный журнал: справочник. - 2004 №11, с. 14 - 17.
4. Брусов, С.И. Комплексный анализ параметров лезвийной обработки винтовых поверхностей [Текст] / С.И. Брусов, А.С. Тарапанов, Г.А. Харламов; под ред. А.С. Тарапанова. - М.: Машиностроение-1, 2006. - 128 с.: ил.
5. Бобров, В.Ф. Основы теории резания металлов [Текст] / В.Ф. Бобров. - М.: Машиностроение, 1975. - 344 с.: ил.

Тарапанов Александр Сергеевич

Орловский государственный технический университет, г. Орёл

Доктор технических наук, профессор

Тел. раб. (4862) 55-55-24

Тел. дом. (4862) 45-18-84

E-mail: t:@ostu.ru

Чепикова Ирина Михайловна

Орловский государственный технический университет, г. Орёл

Аспирантка

Тел. дом. (48677) 3-11-67

E-mail: irinaangel555@gmail.com



Программирование и работа на станках, оснащенных системой ЧПУ «Электроника НЦ-31»: учебное пособие для вузов / В.И. Сотников. - Орел: ОрелГТУ, 2009. - 77 с.

Программирование и работа на станках, оснащенных системой ЧПУ 2P22: учебное пособие для вузов / В.И. Сотников. - Орел: ОрелГТУ, 2009. - 73 с.

В них рассмотрены вопросы программирования обработки и представлены примеры управляющих программ.

Предназначены для студентов высшего профессионального образования очной и очно-заочной форм обучения специальностей 151001 «Технология

машиностроения», 151002 «Металлообрабатывающие станки и комплексы», 151003 «Инструментальные системы машиностроительных производств», изучающих дисциплины «Технология обработки на

станках с ЧПУ» и «Станки с ЧПУ и ГПС». Могут быть полезны инженерам-программистам и операторам станков с ЧПУ.

УДК687.022

Н.А. ДЕМИДОВА, Е.Л. МОСЬКИНА, Е.В. ЗАЙЦЕВА, Е.В. ВИКТОРОВА

ВЛИЯНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ ВИБРАЦИЙ КОРПУСА РАСКРОЙНОЙ МАШИНЫ НА ТЕХНОЛОГИЮ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ШВЕЙНЫХ ИЗДЕЛИЙ

В Орловском государственном техническом университете ведется научная работа в области раскроя и пошива современных тканей с лайкрой.

Ключевые слова: раскройная машина, движение ножа, вибрация корпуса, амплитуда, точность.

At Oryol State Technical University the research work is being help in the field of uptodate textiles with lycra cut out and sew .

Key words: a cloth-cutting machine, the movement of the cutting tool, the vibration of the case, amplitude, accuracy.

На швейных предприятиях для раскроя текстильных полотен широко применяются передвижные раскройные машины с вертикальным (прямым) ножом, отечественных и зарубежных фирм: «SL» SU LEE (Тайвань), «ZJ» ZOJE (Китай), «HF» (Польша), «KM» (Япония), «MP» (Россия), «GEM» (Венгрия), «CS» (Чехия). Данные машины позволяют разрезать настилы значительной толщины (до 100 мм и более) и вырезать детали сложной формы. Управление ими осуществляется вручную.

Раскройные машины представляют собой сложную нелинейную динамическую систему с инерционным возбуждением. Ее функционирование связано с преобразованием вращательного движения выходного вала электродвигателя в возвратно-поступательное движение ножа, что обеспечивается посредством кривошипно-ползунного механизма. Движение этих элементов сопровождается возникновением сил инерции, которые определяют внешние (по отношению к машине в целом) переменные силы и соответствующие динамические реакции связей, ограничивающих перемещения подвижных элементов.

Неуравновешенность вращающихся частей кривошипно-ползунного механизма является главной причиной повышенной виброактивности работающей раскройной машины. Именно вследствие этого корпус раскройной машины воспринимает дополнительные (не связанные с процессом разрезания материала) динамические реакции.

Горизонтальная составляющая динамических реакций вызывает интенсивную вибрацию корпуса как твердого тела на упругом стержне (стойке) в плоскости его наименьшей жесткости. Данная вибрация является преобладающей по сравнению с другими источниками возмущений и должна в первую очередь учитываться при анализе влияния на технологические параметры раскроя текстильных материалов с содержанием полиуретановых нитей (лайкры).

Широкое использование нитей лайкры объясняется их свойствами. Это, в первую очередь, растяжимость и восстановление размеров нитей, которое повышает качество всех тканей и изделий одежды, придавая удобство и свободу движений, улучшая облегаемость, сохранение формы и устранение морщин.

Конкуренентоспособность швейных изделий из лайкры достигается уже на этапе раскроя изделия. Наличие лайкры в ткани накладывает особенности при раскрое и пошиве. Такие текстильные полотна при взаимодействии с режущим инструментом раскройной машины проявляют упруго эластичные свойства, что сказывается на точности кроя и, тем самым, требует корректировки технологических режимов.

На кафедре «Технология и конструирование швейных изделий» ОрелГТУ проводятся исследования в области технологии раскроя и пошива швейных изделий из материалов, содержащих полиуретановые волокна.

На точность отклонений выкроенных деталей от деталей эталонов влияет амплитуда поперечных колебаний ножа, вызванная его вибрацией.

Для изучения динамики раскройной машины принята модель электродвигатель-привод. Принцип действия, используемых в раскройных машинах асинхронных электродвигателей, основан на воздействии вращающегося магнитного поля обмоток статора на короткозамкнутые витки обмотки ротора. Вращающееся поле индуцирует токи в этих витках и заставляет вращаться их вместе с ротором. Отставание ротора от вращающегося поля статора определяется термином «скольжение». С увеличением механической нагрузки на выходном валу скольжение возрастает. Это вызывает рост ЭДС и силы тока в обмотках ротора. Как следствие увеличивается вращающий момент и восстанавливается динамическое равновесие в системе электродвигатель – нагрузка. В теоретическом плане задача сводится к рассмотрению взаимодействий электродвигателя с колебательной системой «корпус – стойка». Однако если считать, что перепады нагрузки (усилий резания, трения и т.п.) не значительны, то в первом приближении при изучении динамики раскройной машины вращающий момент на роторе и его угловую скорость можно считать постоянными.

При изучении вибрации раскройных машин, была разработана методика расчета вибрации корпуса раскройной машины на основе получения «замкнутых решений» дифференциального уравнения в частных производных, которое описывает изгибные колебания стержня как системы с распределенными параметрами и сосредоточенной массой.

Расчетная схема динамической системы «масса – стержень» представлена на рисунке 1.

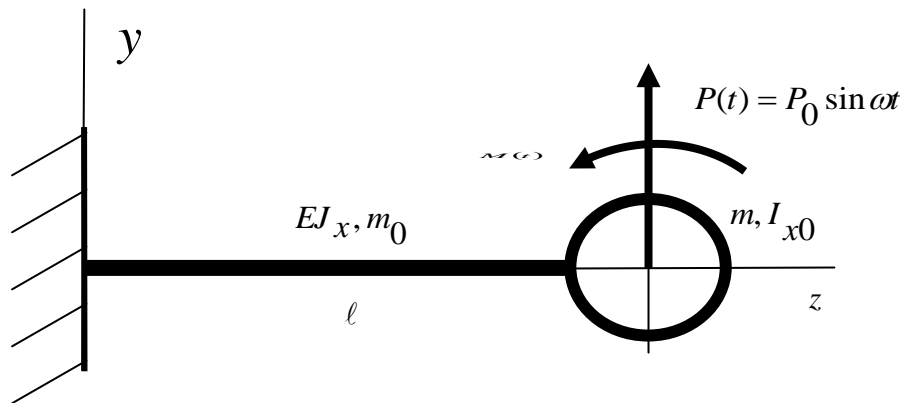


Рисунок 1 – Расчетная схема динамической системы «масса – стержень»

- $P(t)$ – центробежная сила инерции, Н;
- P_0 – амплитудное значение центробежной силы инерции, Н;
- $M(t) = P_0 \ell_1 \sin \omega t$ – изгибающий момент, Нм;
- EJ_x – изгибная жесткость стержня, Нм²;
- m_0 – масса единицы длины стержня, кг/м;
- ℓ – длина стержня, м; m – масса корпуса, кг;
- I_{x0} – осевой момент инерции корпуса, кгм²;
- ω – частота (угловая скорость).

Исходное дифференциальное уравнение в частных производных для расчетной схемы «стержень – масса» запишем в следующем виде:

$$EJ_x \frac{\partial^4 y}{\partial z^4} + m_0 \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -\delta_1(z-\ell)m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - \delta_2(z-\ell)I_{x0} \frac{\partial^3 y}{\partial z \partial t^2} + [\delta_1(z-\ell) + \delta_2(z-\ell) \cdot \ell_1] P_0 \sin \omega t, \quad (1)$$

где $\delta_1(z-\ell)$ и $\delta_2(z-\ell)$ импульсные функции, переводящие сосредоточенные силы и моменты в разряд распределенных нагрузок.

Перейдем от дифференциального уравнения (1) к эквивалентной системе трех дифференциальных уравнений:

$$EJ_x \frac{\partial^4 y}{\partial z^4} + m_0 \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0, \quad (2)$$

$$EJ_x \frac{\partial^3 y}{\partial z^3} \Big|_{z=\ell} - m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \Big|_{z=\ell} - P_0 \sin \omega t = 0, \quad (3)$$

$$EJ_x \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} \Big|_{z=\ell} + I_{x0} \frac{\partial^3 y}{\partial z \partial t^2} \Big|_{z=\ell} + P_0 \ell_1 \sin \omega t = 0 \quad (4)$$

Дифференциальное уравнение (2) описывает свободные колебания стержня, а дифференциальные уравнения (3) и (4) описывают поперечные и угловые колебания сосредоточенной массы.

Общее (совместное) решение дифференциальных уравнений (2) – (4), отображающее установившиеся колебания системы, может быть записано в форме «разделенных переменных»:

$$y(z,t) = u(z) \sin \omega t \quad (5)$$

В уравнении (5) амплитудная функция $u(z)$ для такого рода систем выражается через функции Крылова:

$$u(z) = A \cdot K_1(az) + B \cdot K_2(az) + C \cdot K_3(az) + D \cdot K_4(az), \quad (6)$$

где A, B, C, D – постоянные; $a = \sqrt[4]{\frac{m_0 \omega^2}{EJ_x}}$;

$$\begin{cases} K_1(az) = \frac{1}{2}(chaz + \cos az) \\ K_2(az) = \frac{1}{2}(shaz + \sin az) \\ K_3(az) = \frac{1}{2}(chaz - \cos az) \\ K_4(az) = \frac{1}{2}(shaz - \sin az) \end{cases} \quad \text{– функции Крылова.}$$

Определим постоянные A, B, C, D в уравнении (6) из граничных условий.

На левом конце стержня имеем:

$$u(0) = 0; \quad (7)$$

$$\frac{du}{dz} \Big|_{z=0} = 0$$

Выполнение зависимостей (7) обеспечивается, если в уравнении (6) постоянные A и B равны нулю.

Из дифференциальных уравнений (3) и (4) следует, что на правом конце стержня должны выполняться следующие зависимости:

$$\begin{aligned} EJ_x \frac{d^3 u}{dz^3} \Big|_{z=\ell} + m\omega^2 u(\ell) - P_0 &= 0, \\ EJ_x \frac{d^2 u}{dz^2} \Big|_{z=\ell} - I_{x0} \omega^2 \frac{du}{dz} \Big|_{z=\ell} + P_0 \ell_1 &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Подставляя в дифференциальные уравнения (8) амплитудную функцию (6) получим систему двух алгебраических уравнений, содержащих четыре неизвестные – постоянные C и D , а также амплитудные значения перемещения $u(\ell)$ и угла поворота $\theta(\ell)$ сосредоточенной массы:

$$\begin{aligned} C \cdot K_4(\lambda) + D \cdot K_1(\lambda) &= \frac{1}{a^3 EJ_x} [P_0 - m\omega^2 u(\ell)], \\ C \cdot K_1(\lambda) + D \cdot K_2(\lambda) &= \frac{I_{x0} \omega^2 \theta(\ell)}{a^2 EJ_x} - \frac{P_0 \ell_1}{a^2 EJ_x} \end{aligned} \quad (9)$$

В алгебраических уравнениях (9) приняты следующие сокращения:

$$\lambda = a\ell; \quad \theta(\ell) = \frac{du}{dz} \Big|_{z=\ell}.$$

Определим теперь амплитудные значения перемещения и угла поворота на конце стержня из уравнения (6) при условии, что постоянные интегрирования A и B равны нулю. В результате получим:

$$\begin{aligned} u(\ell) &= C \cdot K_3(\lambda) + D \cdot K_4(\lambda), \\ \theta(\ell) &= C \cdot aK_2(\lambda) + D \cdot aK_3(\lambda) \end{aligned} \quad (10)$$

Теперь вышеозначенные неизвестные C , D , $u(\ell)$, $\theta(\ell)$ можно определить при совместном решении алгебраических уравнений (9) и (10). Данные алгебраические уравнения образуют «полную систему», которую после несложных преобразований запишем в виде:

$$\begin{aligned} K_4(\lambda) \cdot C + K_1(\lambda) \cdot D + \frac{m\omega^2}{\alpha^3 EJ_x} u(\ell) &= \frac{P_0}{\alpha^3 EJ_x}, \\ K_1(\lambda) \cdot C + K_2(\lambda) \cdot D - \frac{I_{x0} \omega^2}{\alpha^2 EJ_x} \theta(\ell) &= -\frac{P_0 \ell_1}{a^2 EJ_x}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$K_2(\lambda) \cdot C + K_3(\lambda) \cdot D - \frac{1}{a} \theta(\ell) = 0,$$

$$K_3(\lambda) \cdot C + K_4(\lambda) \cdot D - u(\ell) = 0$$

Расчеты по определению амплитудных значений перемещения и угла поворота сосредоточенной массы (для реальной конструкции – в точке крепления стойки к корпусу) проводились по программе AMF, написанной в среде Mathcad и представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость амплитудных значений перемещения и угла поворота от сосредоточенной массы

$P_0, \text{Н}$	10	20	30	40	50
$u(\ell), \text{мм}$	0,021	0.041	0,062	0,082	0,103
$Y, \text{мм}$	0,017	0.033	0,050	0,067	0,083

ЛИТЕРАТУРА

1. Бидерман В.Л., Прикладная теория механических колебаний [Текст] / Бидерман В.Л // М.: Высшая школа, 1972. – 416 с.
2. Блехман И.И. Что может вибрация?: О «вибрационной механике» и вибрационной технике [Текст]/ Блехман И.И. // М.: Наука, 1988. – 208 с.
3. Болотин В.В., Случайные колебания упругих систем [Текст] / Болотин В.В.// М.: Наука, 1979. – 335 с.

Демидова Наталья Александровна

Орловский государственный технический университет, г. Орел
 Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и конструирование швейных изделий»
 Тел.: (4862) 55-11-20
 E-mail: tikshi@ostu.ru

Моськина Елена Леонидовна

Орловский государственный технический университет, г. Орел
 Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и конструирование швейных изделий»
 Тел.: (4862) 55-11-20
 E-mail: elenamosk196110@mail.ru

Зайцева Евгения Викторовна

Орловский государственный технический университет, г. Орел
 Аспирант кафедры «Технология и конструирование швейных изделий»
 Тел.: (4862) 55-11-20
 E-mail: tikshi@ostu.ru

Викторова Елена Викторовна

Орловский государственный технический университет, г. Орел
 Магистр кафедры «Технология и конструирование швейных изделий»
 Тел.: (4862) 55-11-20
 E-mail: tikshi@ostu.ru

УДК 687.174:[331.45: 621

Т.В. КВАСКОВА, А.А. ПАВЛОВСКАЯ, Е.В. ПРОКОПОВА

НОВЫЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ СПЕЦИАЛЬНОЙ ОДЕЖДЫ ДЛЯ ТЕПЛИЧНИЦ

Разработана модель одежды для работников теплиц с улучшенными гигиеническими и эксплуатационными свойствами за счет конструктивных элементов из сетчатого полотна.

Ключевые слова: ткань, пестицид, одежда, тепличница, модель, халат.

The model of clothes for greenhouse workers with improved hygienic and operational properties due to constructive elements made of mesh cloth is developed.

Key words: cloth, pesticide, clothes, a greenhouse worker, a model, working clothes.

В период 80-90 - х годов на базе Всероссийского научно – исследовательского института охраны труда в сельском хозяйстве были проведены исследования по гигиеническому нормированию и разработке средств индивидуальной защиты для работ с пестицидами и минеральными удобрениями. Исследования были реализованы в опытно – промышленных партиях специальной одежды и материалов и были закреплены документально в ГОСТ 12.4.101 – 93 и ССБТ « Одежда специальная для ограниченной защиты от токсичных веществ», нормативных актах по охране труда, в ТУ 17– 06 – 214 – 84 «Комплекты специальной одежды для тепличниц».

Предложенный комплект состоял из блузы и сарафана-фартука и изготавливался из хлопчатобумажных тканей с грязеотталкивающими пропитками, тем не менее, по ряду причин не был внедрен в сельскохозяйственное производство. Необходимо отметить, что за последнее десятилетие объемы производства продукции цветоводства, ягодно – овощных культур в закрытом грунте (теплицах) растут опережающими темпами, однако потребности в специальной одежде, адаптированной к специфическим условиям труда в теплицах не удовлетворяются. Материалы информационных источников, а также собственные исследования показывают, что работа в теплицах осуществляется круглогодично в замкнутых помещениях с пониженным воздухообменом: температура воздуха колеблется от 10⁰С в период подготовки к очередному севообороту до 25... 30⁰С в период вегетации и сбора урожая, при этом относительная влажность составляет 70...90%. Поэтому фактору условия труда в теплицах оцениваются как условия с нагревающим микроклиматом. Выполняемые тепличницами технологические операции связаны с различными статическими позами и движениями, оказывающими значительные нагрузки на костно-мышечную систему: это поза – «нагнувшись»; положение – «сидя на корточках»; положение – «поднятые на разную высоту руки» и т.д. Кроме того, тепличницы контактируют с сельскохозяйственной продукцией, которая устойчиво загрязняет кожные покровы и материалы одежды, оказывая пигментирующее и местно-раздражающее действие. При выполнении ряда операций по сбору продукции и уходу за растениями остатки растений могут попадать в пододежное пространство, вызывая негативные ощущения.

Как неблагоприятные факторы рассматриваются возможности контактных загрязнений кожных покровов работающих и средств защиты остаточными количествами пестицидов, что по мнению ряда авторов, вызывает высокий уровень профессионально – обусловленной и общей заболеваемости. Тем не менее, в данной ситуации значительно сократился перечень допустимых к применению пестицидов в сторону уменьшения их общей и кожно-резорбтивной токсичности. Ужесточились регламенты обработок и сроков выхода на обработанные участки, и как результат – сократился риск пестицидных интоксикаций.

Таким образом, специальная защитная одежда тепличниц может быть классифицирована как одежда от общих производственных загрязнений и механических

воздействий, эксплуатируемая в микроклиматических условиях повышенной влажности и температуры.

На сегодня общепринятыми и наиболее приемлемым видом специальной одежды для тепличниц являются халаты по ГОСТ 12.4 – 131 – 83 «Халаты женские. Технические условия». Поскольку стандарт предусматривает возможность постановки на производство модельного ряда изделий, то нами разработана модель, представленная на рисунке 1, отличающаяся силуэтными решениями и конструктивными элементами, направленными на улучшение эксплуатационных и гигиенических свойств.

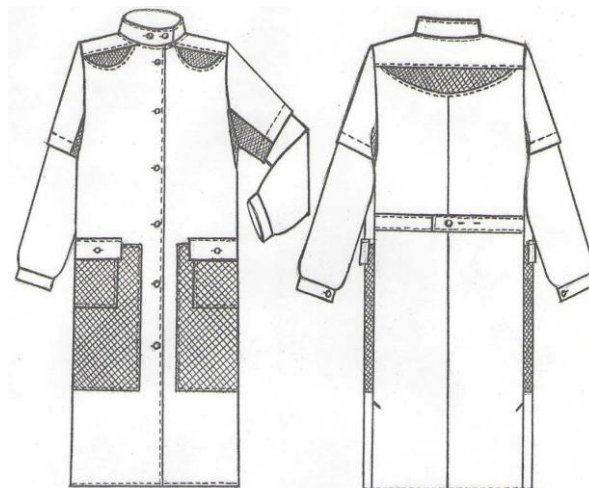


Рисунок 1 – Внешний вид халата для работ в теплицах

Отличительными особенностями предлагаемой модели являются наличие вставок в области кокетки полочки и спинки, подмышечной впадины и накладок в области бедер по полочке, которые закрывают накладные карманы. Накладки в свою очередь закрыты клапаном кармана. Вставки и накладки выполнены из полиэфирной сетки и расположены в местах наибольшего загрязнения одежды и потовыделения. Отстегивающиеся рукава в области плеча, позволяют использовать одежду в различных производственных позах; боковые шлицы обеспечивают свободу движения и придают изделию современный вид. Необходимая степень прилегания создается регулируемым поясом по линии талии на спинке.

В модели использована текстильная сетка из полиэфирных мононитей линейной плотности 3,7 текс; площадь ячейки сетки составила 2,25мм², поверхностное заполнение 32%, общая поверхностная пористость – 68%; полотно не осыпается, закручиваемость и раздвигаемость отсутствуют, что обуславливает достаточную технологичность поузловой обработки деталей и узлов и в целом изделия.

По полученным данным воздухопроницаемость полотна составила 1200 дм³/м²·сек, паропроницаемость 240 мг/ м²·сек, благодаря чему значительно возрастает вентилируемость пододежного пространства, усиливается процесс испарения пота и его выведение в окружающую среду.

Были оценены камуфляжные (маскирующие от загрязнений) свойства сетчатого полотна по отношению к отбеленной и гладкокрашенной в зеленый цвет хлопчатобумажной ткани арт. 3171. При этом эксперимент выполнялся следующим образом: две элементарные пробы размером 6x12мм каждого вида материалов помещали в полиэтиленовый сосуд объемом 1дм³ вместе с загрязняющей смесью по массе составляющей 100% от массы пробы и двадцатью стальными шариками диаметром 3мм. После встряхивания сосуда в течение 10 минут образцы вынимали и определяли коэффициент отражения по методике ГОСТ 18054 – 72 «Материалы текстильные. Методы оценки белизны».

Степень загрязнения (СЗ) рассчитываем по формуле:

$$CЗ = \frac{K_{исх.} - K_{заг.}}{K_{исх.}}$$

$K_{исх.}$ – коэффициент отражения незагрязненного материала;

$K_{заг.}$ – коэффициент белизны загрязненного материала.

Загрязняющая смесь состояла на пятьдесят процентов из производственной почвы и на пять – десять процентов из сухих и влажных процентов остатков овощных культур. Полученные результаты показывают, что степень загрязнения сетки, ткани отбеленной, ткани окрашенной составила соответственно: 0,08; 0,5; 0,47. В пакете «сетка – ткань» степень загрязнения составила соответственно: 0,18; 0,13, что свидетельствует об эффективности предложенного решения.

Таким образом, в предложенной модели реализованы следующие принципы:

удобство пользования достигается за счет регулируемого пояса в области спинки по линии талии (создается необходимая степень прилегания), рукав рубашечного покроя не сдерживает движения рук при характерных технологических операциях, манжета препятствует попаданию загрязнений в пододежное пространство; боковые шлицы обеспечивают удобство в шаговом режиме, воротник стойка обеспечивает защиту в области шеи и в тоже время, не ограничивая диапозона поворота головы;

улучшение гигиенических свойств достигается за счет сетчатых вставок в местах наиболее интенсивного потоотделения;

улучшение эксплуатационных свойств достигается за счет использования сетчатых накладок в местах наибольшего загрязнения и значительного местного износа.

В дальнейшем будет изготовлена малая опытная партия спецодежды данного вида и проведена комплексная оценка свойств в условиях закрытого грунта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глубиш П.А. Протвозагрязняемая отделка текстильных материалов.- М.: Легкая индустрия, 1979.- 152с.
- 2.Эксплуатационные свойства материалов для одежды и методы оценки их качества [Текст]: справочник. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 312с.
- 3.Кубеко А. Функциональные ткани в профессиональной одежде [Текст] / А.Кубеко // Рабочая одежда и средства индивидуальной защиты. – 2004. - №1(24). – С. 10 – 11.
4. ГОСТ 18054 – 72. «Материалы текстильные. Методы оценки белизны». – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1972. - 13 с.
5. ГОСТ 12.4 – 131 – 83 «Халаты женские. Технические условия». – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1983. - 38 с. – (Система стандартов безопасности труда).

Кваскова Тамара Викторовна

Орловский государственный технический университет, г.Орел

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и конструирование швейных изделий»

Тел.: (4862) 55-11-20

E-mail: tikshi@ostu.ru

Павловская Алевтина Александровна

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и конструирование швейных изделий»

Тел.: (4862) 55-11-20

E-mail: tikshi@ostu.ru

Проконова Елена Владимировна

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Технология и конструирование швейных изделий»

Тел.: (4862) 55-11-20

E-mail: tikshi@ostu.ru

УДК 621.3

Б.Р. ИВАНОВ, В.Г. ЛИСИЧКИН, С.Н. ШВЕДОВ

ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ

Для повышения точности цифровых влагомеров, применяемых для измерения влажности различных материалов с повышенной электропроводностью, предлагается использовать двухпараметрический способ контроля, основанный на измерении и сравнении с допустимыми значениями амплитуды и фазы выходного сигнала измерительного преобразователя с емкостным датчиком, возбуждаемым высокочастотным сигналом.

Ключевые слова: влажность материалов, емкостный датчик, измерение фазы.

To increase accuracy of water content measuring devices, used for metering water content of various materials with great electrical conductivity, it is proposed to apply two-parametrical control way, based on the measurement and comparison of amplitude and phase admissible values output signal of measuring converter with capacitance sensor raised by high-frequency signal.

Key words: water content of materials, capacitance sensor, phase measuring.

Исследование вопросов достижения высоких точности и стабильности измерений влажности в условиях повышенной электропроводности контролируемых материалов представляет практический интерес. Наличие активных потерь, величина которых изменяется при различных значениях влажности и минерального состава материала, серьезно усложняет реализацию диэлькометрических методов контроля. Физически связь между электропроводностью и диэлектрической проницаемостью зависит как от изменения влажности, так и от ряда трудно учитываемых факторов. В этих условиях для повышения точности измерений нужно исключить или уменьшать влияние активной проводимости контролируемых материалов на результаты измерения влажности, что может быть достигнуто применением методов многопараметрического контроля, позволяющих компенсировать погрешности измерений различного вида из-за влияния мешающих факторов.

Процесс контроля влажности твердых и сыпучих материалов в условиях повышенной активной проводимости может быть сведен в некоторых случаях к измерению или сравнению с допустимыми значениями двух параметров – амплитуды U_m и частоты f выходного сигнала измерительного преобразователя с емкостным датчиком, возбуждаемым высокочастотным сигналом. Такие способы контроля принято называть двухпараметрическими [1].

Известные способы двухпараметрического контроля характеризуются двумя основными подходами к достижению баланса схем измерительного преобразователя и генераторного устройства. В первом случае автогенератор работает на фиксированной частоте с переменной нагрузкой. Настройка в резонанс осуществляется изменением одного из параметров LC -контур, в состав которого входит первичный преобразователь. Как правило, для этих целей применяется варикап, емкость которого изменяется под воздействием управляющего сигнала.

Во втором случае резонанс достигается за счет автоподстройки частоты генератора при изменении параметров LC -контур, содержащего емкостный датчик. В обоих случаях для определения влажности контролируемых материалов могут использоваться амплитудные, частотные и фазовые параметры измерительной схемы. Второй подход обладает рядом преимуществ, в частности, по ширине диапазона контроля влажности, ослаблению влияния электропроводности на результаты диэлькометрических измерений и

минимальной сложности схемной реализации при сравнимой инструментальной погрешности и поэтому является более предпочтительным.

Оба подхода характеризуются различными вариантами формирования возбуждающего сигнала генераторного устройства. В рамках первого подхода часто применяется способ двухпараметрического контроля, согласно которому на измерительный преобразователь с LC -контуром подается возбуждающий сигнал постоянной частоты $f_B = \text{const}$, после чего измеряют амплитуду U_m и фазу φ выходного сигнала датчика и по результатам их обработки определяют значение контролируемой влажности материала [2].

Применяются также комбинированные способы контроля влажности с формированием возбуждающего сигнала стабильной частоты $f_B = \text{const}$ и с расширением диапазона контроля за счет модуляции параметров резонансного LC -контра при подаче на варикап линейно изменяющегося управляющего сигнала [3] или последовательности прямоугольных управляющих импульсов [4].

При использовании второго подхода для достижения резонанса LC -контра регулируют соответствующим образом частоту генератора, а для повышения точности измерения влажности материала контроль выполняется на разных частотах возбуждающего сигнала.

В частности, применяют способ двухпараметрического контроля, согласно которому варьируют высокочастотный сигнал, подаваемый на измерительный преобразователь. Затем измеряют амплитуду U_m выходного напряжения преобразователя, которая несет в себе информацию об активных потерях в материале, и разность фаз $\Delta\varphi$ между возбуждающим и выходными сигналами, которая зависит от влажности. Для получения окончательного вывода о значении влажности промежуточные результаты измерений умножают на соответствующие коэффициенты преобразования [5].

Общим недостатком всех этих способов является сравнительно низкая точность измерения в широком диапазоне контроля влажности и при значительных активных потерях в исследуемом материале.

Для уменьшения влияния электрической проводимости материала на результаты контроля его влажности можно использовать чисто конструкторское решение – покрывать электроды датчика влажности изолирующей пленкой или лаком, что позволяет повысить добротность LC -контра и фазовую чувствительность прибора. В этом случае целесообразно использовать способ двухпараметрического контроля, согласно которому емкостный датчик включают в параллельный LC -контур и возбуждают его импульсами тока. Амплитуду выходного сигнала преобразователя U_m сравнивают с пороговым уровнем напряжения $U_{\text{пор}}$, усиливают полученный сигнал разбаланса $\Delta U = U_m - U_{\text{пор}}$ в $K_U \gg 1$ раз и используют его для регулирования амплитуды импульсов возбуждающего тока I_B и в качестве второго информативного параметра. Первым параметром является разность фаз $\Delta\varphi$ между выходными и возбуждающими сигналами преобразователя.

Применение изоляционного покрытия электродов приводит к появлению дополнительной емкости C_E . Поэтому эквивалентная емкость контра $C_{\Sigma} = C_{\text{и}} C_X / (C_{\text{и}} + C_X)$ уменьшается по сравнению с начальной емкостью датчика C_X , что приводит к некоторому уменьшению чувствительности прибора к изменениям C_X при измерении влажности контролируемого материала.

Такой способ контроля влажности реализуется устройством, схема которого приведена на рисунке 1.

В составе влагомера применен генератор импульсов ГИ, преобразователь напряжения в ток ПНТ и измерительный преобразователь на основе емкостного датчика C_X и LC -контра с конденсатором переменной емкости $C_{\text{п}}$. К выходу датчика подключены амплитудный детектор АД и формирователь импульсов ФИ, имеющие большие входные сопротивления. Выход формирователя импульсов ФИ подключен к элементу 2И, который применен для выделения знака разности фаз $\Delta\varphi$ между импульсами генератора ГИ и выходным напряжением – ем LC -контра (рисунок 1).

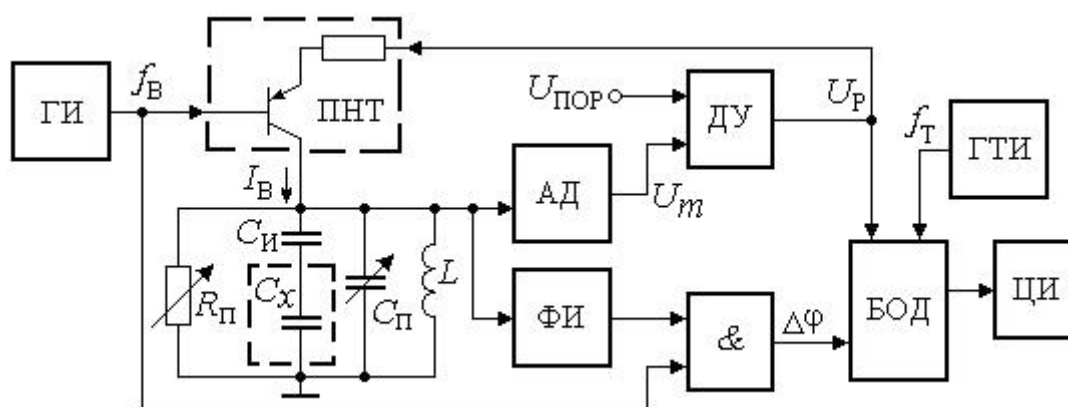


Рисунок 1 – Структурная схема двухпараметрического влагомера

Для регулирования амплитуды импульсов возбуждающего тока выход амплитудного детектора АД через дифференциальный усилитель ДУ соединен с управляющим входом преобразователя ПНТ. Второй вход усилителя ДУ подключен к источнику стабильного порогового напряжения $U_{\text{ПОР}}$, поэтому на выходе ДУ формируется напряжение разбаланса $U_P = \Delta U K_U$, которое подается на микропроцессорный блок обработки данных БОД для последующего кодирования второго информативного параметра влажности.

В процессе работы влагомера от генератора ГИ через преобразователь ПНТ подаются прямоугольные импульсы возбуждающего тока I_B на колебательный LC-контур с емкостным датчиком. При высокой добротности LC-контюра на его выходе формируется напряжение $U_{\text{ВЫХ}}(t)$ гармонической формы, частота которого задается генератором импульсов ГИ.

Амплитудным детектором АД и усилителем ДУ выделяется и усиливается сигнал разбаланса (разность напряжений) $U_P = K_U (U_{\text{ПОР}} - U_m)$ между пороговым значением $U_{\text{ПОР}}$ ($U_{\text{ПОР}} \geq 2 \text{ В}$) и амплитудой U_m выходного сигнала емкостного преобразователя, входящего в состав LC-контюра. Напряжением разбаланса U_P регулируется амплитуда импульсов тока I_B в преобразователе напряжения в ток ПНТ. Кроме того, напряжение разбаланса U_P кодируется с помощью АЦП в блоке обработки данных, и в результате преобразования формируется и запоминается код, пропорциональный этому напряжению: $N_U = K_{\text{ПР1}} U_P$, который используется в качестве одного из параметров при контроле влажности.

Формирователь ФИ преобразует выходной сигнал датчика $U_{\text{ВЫХ}}(t)$ в последовательность прямоугольных импульсов. Данные импульсы сравниваются по фазе логическим элементом 2И с выходными импульсами генератора ГИ. Вследствие этого на выходе элемента 2И формируется последовательность импульсов, длительность каждого из которых прямо пропорциональна разности фаз между выходными сигналами генератора ГИ и датчика:

$$t_{\text{И}} = \Delta\varphi / 360^\circ f_{\text{В}}.$$

Длительность импульсов $t_{\text{И}}$ измеряется цифровым способом в блоке обработки данных БОД посредством их заполнения высокочастотными импульсами тактовой частоты $f_{\text{Т}}$, поступающими от такового генератора ГТИ. При выборе интервала измерения по условию $T_{\text{ИЗМ}} \approx (0,5 \dots 1,0) \text{ с} \gg 1/f_{\text{В}}$ в блоке обработки БОД формируется код, пропорциональный среднему значению разности фаз между возбуждающим и выходными сигналами датчика:

$$N_{\varphi} = 360^\circ n_{\text{И}} t_{\text{И}} f_{\text{Т}} = 360^\circ f_{\text{В}} T_{\text{ИЗМ}} t_{\text{И}} f_{\text{Т}},$$

где $n_{\text{И}} = f_{\text{В}} T_{\text{ИЗМ}}$ – количество импульсов частоты $f_{\text{В}}$, поступающих через элемент 2И на блок обработки данных БОД за время измерения $T_{\text{ИЗМ}}$.

Для расчета влажности контролируемого материала в блоке обработки БОД используются два кода N_U и N_{φ} , которые используются для вычисления влажности

микропроцессором по заданному алгоритму. Результаты контроля влажности выводятся на цифровой индикатор ЦИ прибора (рисунок 1).

Перед началом цикла контроля в емкостной датчик насыпают сухой материал (с нулевой влажностью). Затем регулировкой емкости C_{Π} переменного конденсатора устанавливают резонансную частоту f_{Π} контура примерно равной частоте возбуждающих импульсов $f_{\text{В}}$ генератора ГИ. Выполнение равенства частот $f_{\Pi} \approx f_{\text{В}}$ определяется по нулевому углу фазового сдвига $\Delta\varphi \approx 0$ между возбуждающим и выходным сигналом емкостного датчика. Этим обеспечиваются высокая фазовая чувствительность прибора и линейность его фазочастотной характеристики при контроле влажности.

Затем емкостной датчик заполняется контролируемым материалом и выполняется цифровое измерение его влажности по двум параметрам с выводом результатов преобразования на цифровой индикатор прибора.

Особенностью схемы влагомера (рисунок 1) является применение переменного резистора R_{Π} для регулировки ширины диапазона измерения влажности резонансным способом, увеличение которого позволяет повысить фазовую чувствительность (при сужении диапазона контроля влажности), а уменьшение R_{Π} , наоборот, позволяет расширить диапазон контроля, но одновременно приводит к уменьшению чувствительности прибора.

Для оценки взаимосвязи чувствительности емкостного датчика с диапазоном измерения влажности проведено моделирование устройства (рисунок 1) по программе *Electronics Work Bench*. В результате моделирования построены зависимость фазовой чувствительности прибора к относительному изменению емкости датчика $S = \Delta\varphi / (\Delta C_X / C_X)$ и график относительного изменения емкости датчика от добротности Q измерительного контура при диапазоне изменения фазы в пределах $-45^\circ \leq \Delta\varphi \leq 45^\circ$ (рисунок 2).

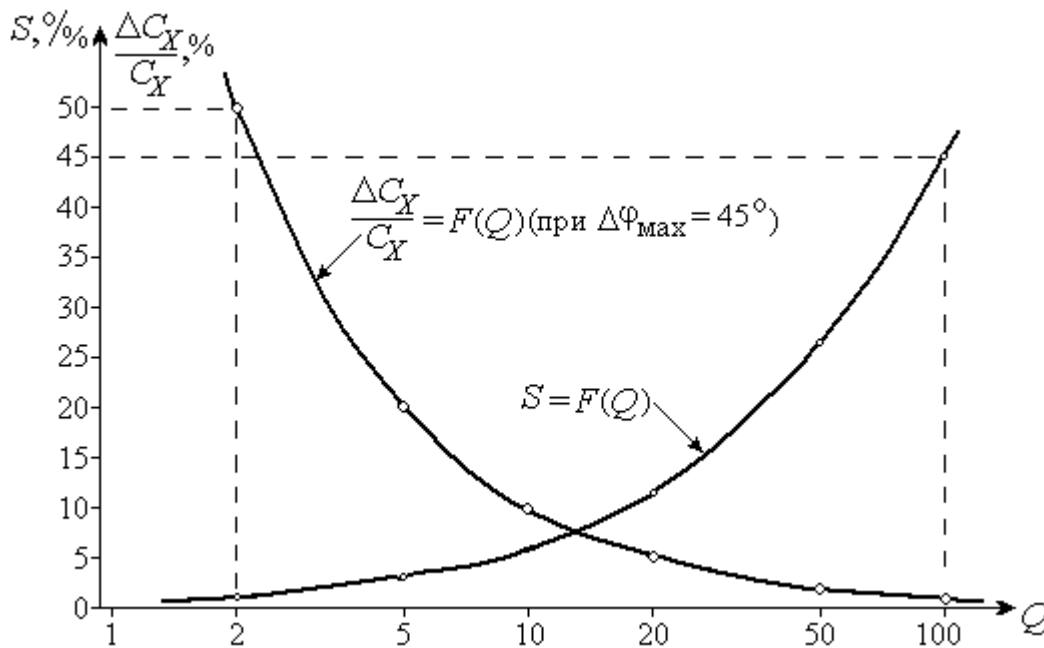


Рисунок 2 – Зависимость фазовой чувствительности и относительного изменения емкости датчика от добротности LC-контура

Согласно полученным результатам моделирования, увеличение добротности резонансного LC-контура от $Q = 2$ до $Q = 100$ приводит к повышению фазовой чувствительности от $S_{\text{min}} = 1,15 \text{ } \text{°} / \text{°}$ до уровня $S_{\text{max}} = 44,95 \text{ } \text{°} / \text{°}$. При этом диапазон контроля влажности в линейном диапазоне изменения фазы $-45^\circ \leq \Delta\varphi \leq 45^\circ$ изменяется обратно пропорционально добротности контура, а допустимое относительное изменение емкости датчика понижается от $\Delta C_X / C_X = 50\%$ (при добротности $Q = 2$) до $\Delta C_X / C_X \approx 1,0\%$ (при $Q = 100$).

Регулировкой переменного резистора R_{Π} (рисунок 1) можно задавать необходимые

значения фазовой чувствительности и диапазона контроля прибора при контроле влажности различных материалов. При большой добротности контура $Q \geq 10$ изменение резистора R_n сравнительно мало влияет на резонансную частоту f_p , поэтому данный резистор можно использовать для калибровки прибора при известной влажности W контролируемого вещества.

Нелинейная зависимость разности фаз от влажности $\Delta\varphi = F(W)$ определяется типовой формой фазочастотной характеристики LC -контура. При увеличении разности фаз ($\Delta\varphi > 45^\circ$) между возбуждающим и выходным сигналами датчика нелинейность фазовой характеристики возрастает, а фазовая чувствительность к влажности контролируемого материала уменьшается.

Вследствие этого схему (рисунок 1) целесообразно использовать только для контроля влажности материалов в относительно узком диапазоне, например, контроля влажности шерсти, хлопка и зерна, а в широкодиапазонных влагомерах для повышения точности измерений необходимо выполнять автоподстройку частоты возбуждающих импульсов и реализовать измерение не фазы, а частоты резонанса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Берлинер М.А. Измерения влажности. М.: Энергия, 1973. – 400 с.
2. А.с. СССР №1774244, кл. G 01 N 27/22. Влагомер / В.С. Ройфе, В. И. Шкутов, Л. М. Португальский, П. А. Максимцов. Оpubл. 07.11.1992.
3. А. с. СССР № 1392478, кл. G 01 N 27/22. Автоматический электронный влагомер / И. Г. Виноградов, Е. П. Шамарин. Оpubл. 30.04.1988.
4. А. с. СССР №1567954, кл. G 01 N 27/22. Диэлькометрический анализатор / Ю. В. Подгорный. Оpubл. 30.05.1990.
5. А. с. СССР № 1539639, кл. G 01 N 27/22. Автоматический измеритель влажности и солесодержания почвы / С. С. Бондаренко, В. К. Сыч, В. В. Хохлачев. Оpubл. 30.01.1990.

Иванов Борис Рудольфович

Академия ФСО России, г. Орел

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Радиотехника и электроника»

Тел. (4862) 42-08-92

Лисичкин Владимир Георгиевич

Академия ФСО России, г. Орел

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Радиотехника и электроника»

Тел. (4862) 47-00-96

E-mail: lisichkin@rekom.ru.

Шведов Сергей Николаевич

Академия ФСО России, г. Орел

Преподаватель кафедры «Радиотехника и электроника»

Тел. (4862) 43-14-00

С.П. ПЕТРОВ, М.Н. МАЯКОВ, Н.А. САФРОНОВА

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В СУ КСЦТ ПО ИНТЕГРАЛЬНОМУ КВАДРАТИЧЕСКОМУ КРИТЕРИЮ

Предложена оценка качества переходного процесса в СУ КСЦТ по интегральному квадратическому критерию в штатном режиме функционирования КСЦТ.

Ключевые слова: оценка, качество, переходный процесс, система управления.

The evaluation of transient process quality in controlling system according to quadratic criteria in standard mode of cogenerated system of centralized heat supply functioning is presented.

Key words: evaluation, quality, transient process, controlling system.

ВЕДЕНИЕ

Анализ временных характеристик переходного процесса на входе и выходе модели системы управления позволяет определить время транспортного запаздывания, условные энергетические затраты на управление и качество поддержания температурного графика.

Интегральная квадратическая оценка качества характеризует качество переходного процесса устойчивых систем в наиболее сжатом виде [1, 3]. Чем меньше значение интегрального квадратического критерия I^2 , тем процесс сходится быстрее и имеет меньшие значения оснований трапеций (при аппроксимации экспериментальных данных).

Цель: разработка методики оценки качества переходного процесса в подающем и обратном трубопроводах обобщенных потребителей и когенерационного источника по интегральному квадратическому критерию.

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА

Временная характеристика переходного процесса управления температурой теплоносителя на входе модели СУ КСЦТ для обобщенного потребителя с обычными теплозащитными свойствами ($\hat{E}_A = 0,8$; $\hat{E}_I = 0,2$) представлена на рисунке 1 [3].

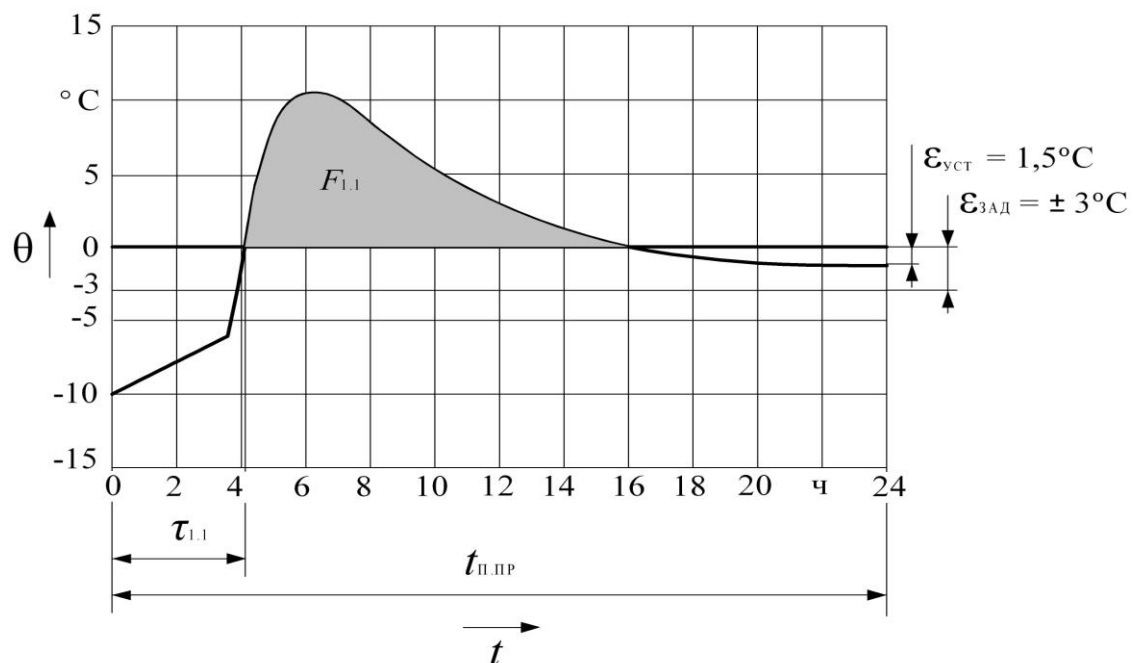


Рисунок 1 – Временная характеристика переходного процесса управления температурой теплоносителя на входе модели обобщенного потребителя с обычными теплозащитными свойствами

Временная характеристика переходного процесса управления температурой теплоносителя на выходе модели СУ КСЦТ для обобщенного потребителя с обычными теплозащитными свойствами ($\hat{E}_{\Delta} = 0,8$; $\hat{E}_{\dot{1}} = 0,2$) представлена на рисунке 2 [3].

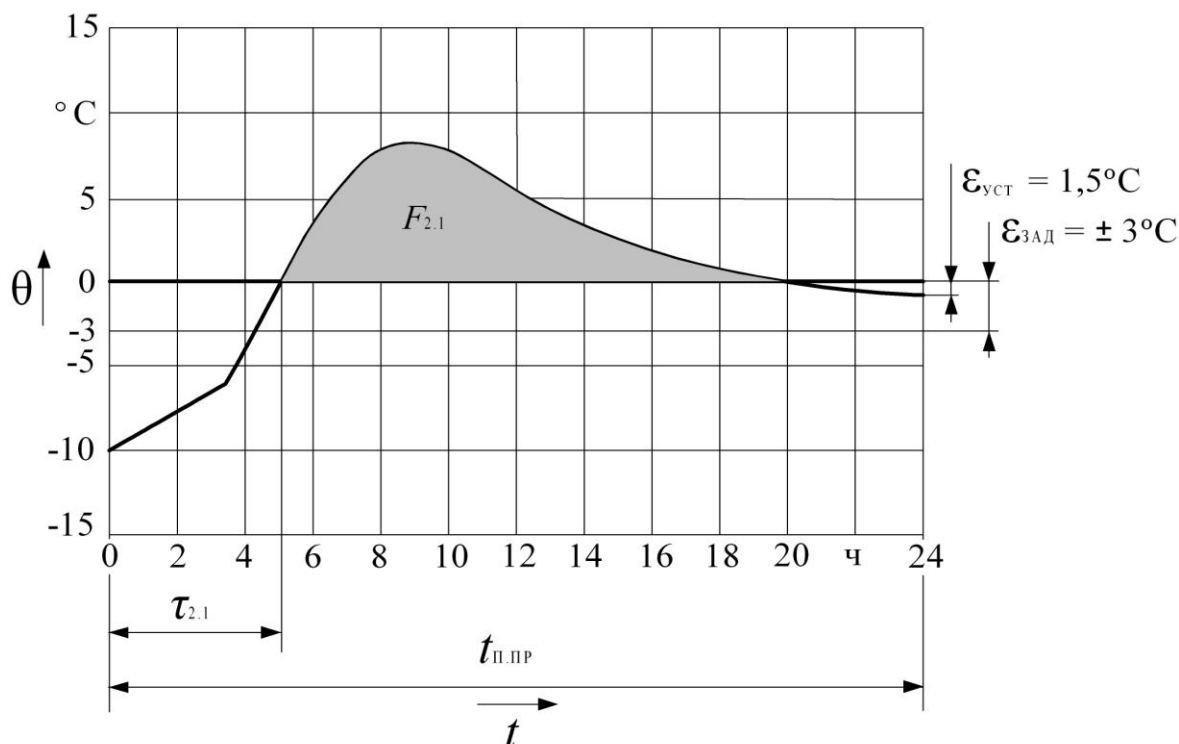


Рисунок 2 – Временная характеристика переходного процесса управления температурой теплоносителя на выходе модели обобщенного потребителя с обычными теплозащитными свойствами

Анализ временных характеристик переходного процесса на входе и выходе модели существующей системы управления с обычными теплозащитными свойствами обобщенного потребителя (рисунки 1 и 2) показал, что при заданной (расчетной) величине отклонения температуры теплоносителя $\varepsilon \leq 3^{\circ}\text{C}$ [3] СУ КСЦТ обеспечивает управление параметрами температуры теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах с отклонением от расчетного значения, не превышающим $1,5^{\circ}\text{Ñ}$.

На рисунке 3 представлена временная характеристика переходного процесса, полученная с помощью вычислительной системы «MathCAD», характеризующая изменение перепада температур теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах модели СУ КСЦТ для обобщенного потребителя с обычными теплозащитными свойствами [3].

Как видно из рисунка 3, при заданной (расчетной) величине отклонения перепада температур теплоносителя $\varepsilon \leq 3^{\circ}\text{C}$ [3] СУ КСЦТ обеспечивает управление перепадом температур теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах с максимальным отклонением от расчетного значения, не превышающим 3°Ñ .

Учитывая, что временная характеристика переходного процесса имеет колебательный характер (рисунок 3) и система управления устойчива, для оценки качества переходного процесса используем интегральную квадратическую оценку.

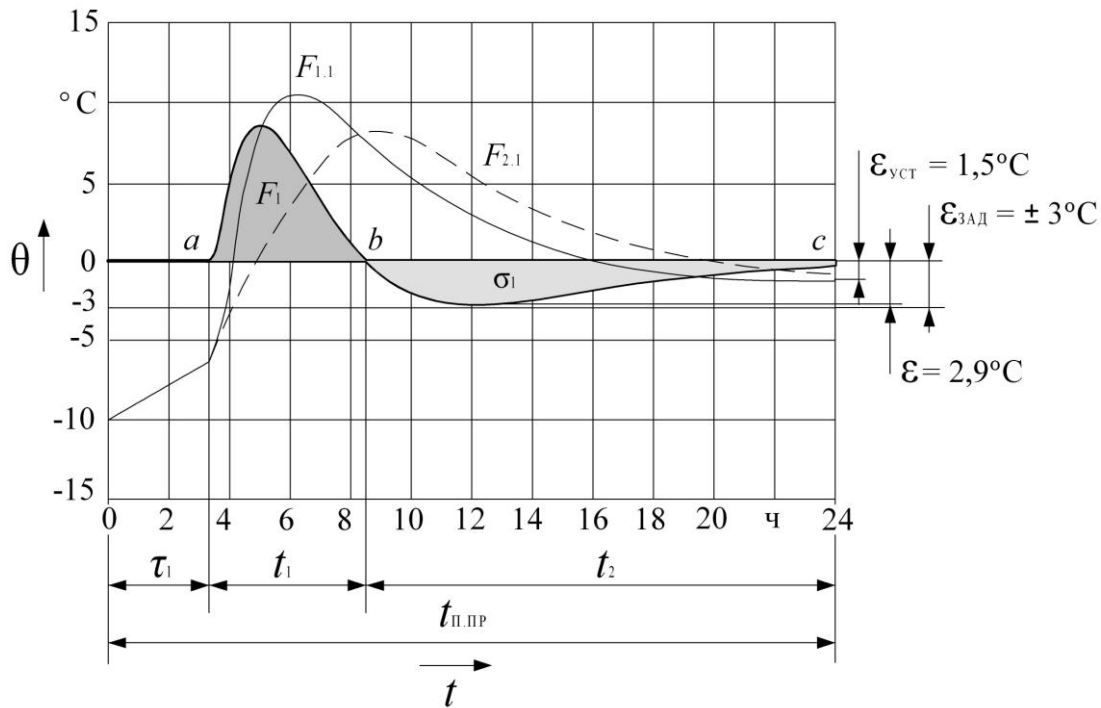


Рисунок 3 – Временная характеристика переходного процесса управления перепадом температур теплоносителя в модели существующей структуры СУ КСЦТ с обычными теплозащитными свойствами обобщенного потребителя
 F_1 – площадь положительной полувольты; t_1 – время положительной полувольты

Интегральная квадратическая оценка качества характеризует устойчивые процессы, меняющие знак, и является функционалом, в котором роль независимой переменной играет функция времени [1, 2]:

$$I^2 = \int_0^t \varepsilon^2 dt, \quad \left[\text{°N}^2 \cdot \text{ч} \right] \quad (1)$$

где $t = 24\text{ч}$ – время в течение которого наблюдалось погрешность отклонения температуры теплоносителя от температурного графика;

ε^2 – квадрат отклонения температуры теплоносителя от температурного графика.

Оценка качества переходного процесса по интегральному квадратическому критерию проведена на входе и выходе обобщенных потребителей без активного пикового подогревателя, с активным пиковым подогревателем и на когенерационном источнике в штатном режиме функционирования КСЦТ по формуле (1). Результаты расчетов приведены в таблицах 1 и 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Обработка экспериментальных данных (определение площади) осуществлялась методом трапеций с использованием базы данных, полученных с 5 объектов, специально оборудованных средствами автоматизации и приборами учета: 2 обобщенных потребителя (без активного пикового подогревателя и с активным пиковым подогревателем) находились в МЛПУ «Детская инфекционная больница; 2 обобщенных потребителя (без активного пикового подогревателя и с активным пиковым подогревателем) находились в ОГУЗ «Орловский онкологический диспансер», пятый объект - ТГК- 4 [3].

Как видно из таблицы 1 и 2 оценка качества переходного процесса у обобщенного потребителя без активной пиковой нагрузки в МЛПУ «Детская инфекционная больница»

($I_{\text{EIO}}^2 = 126,64, I_{\text{EIO}}^2 = 108,68$) выше, чем показатели качества переходного процесса у обобщенного потребителя без активной пиковой нагрузки в ОГУЗ «Орловский онкологический диспансер» ($I_{\text{IE}}^2 = 234,62, I_{\text{IE}}^2 = 189,19$). Это объясняется тем, что транспортное запаздывание в МЛПУ «Детская инфекционная больница» составляет 2 ч, а в ОГУЗ «Орловский онкологический диспансер» – 3 ч, что на 1 ч меньше (рисунок 4, а).

Таблица 1 – Оценка качества переходного процесса по интегральному квадратическому критерию в подающем трубопроводе обобщенного потребителя

Наименование экспериментального объекта	Результаты эксперимента $I^2 = \int_0^t \varepsilon^2 dt$
Обобщенный потребитель без активного пикового подогревателя (ОГУЗ «Орловский онкологический диспансер») ОП-4.1	$I_{\text{IE}}^2 = 234,62$
Обобщенный потребитель без активного пикового подогревателя (МЛПУ «Детская инфекционная больница) ОП-2.1	$I_{\text{EIO}}^2 = 126,64$
Обобщенный потребитель с активным пиковым подогревателем (ОГУЗ «Орловский онкологический диспансер») ОП-3.1	$I_{\text{IE}}^2 = 78,83$
Обобщенный потребитель с активным пиковым подогревателем (МЛПУ «Детская инфекционная больница) ОП-1.1	$I_{\text{EIO}}^2 = 87,22$
ТГК-4	$I_{\text{OA}}^2 = 98,85$

Таблица 2 – Оценка качества переходного процесса по интегральному квадратическому критерию в обратном трубопроводе обобщенного потребителя

Наименование экспериментального объекта	Результаты эксперимента $I^2 = \int_0^t \varepsilon^2 dt$
Обобщенный потребитель без активного пикового подогревателя (ОГУЗ «Орловский онкологический диспансер») ОП-4.2	$I_{\text{IE}}^2 = 189,19$
Обобщенный потребитель без активного пикового подогревателя (МЛПУ «Детская инфекционная больница) ОП-2.2	$I_{\text{EIO}}^2 = 108,68$
Обобщенный потребитель с активным пиковым подогревателем (ОГУЗ «Орловский онкологический диспансер») ОП-3.2	$I_{\text{IE}}^2 = 66,45$
Обобщенный потребитель с активным пиковым подогревателем (МЛПУ «Детская инфекционная больница) ОП-1.2	$I_{\text{EIO}}^2 = 78,43$
ТГК-4	$I_{\text{OA}}^2 = 90,09$

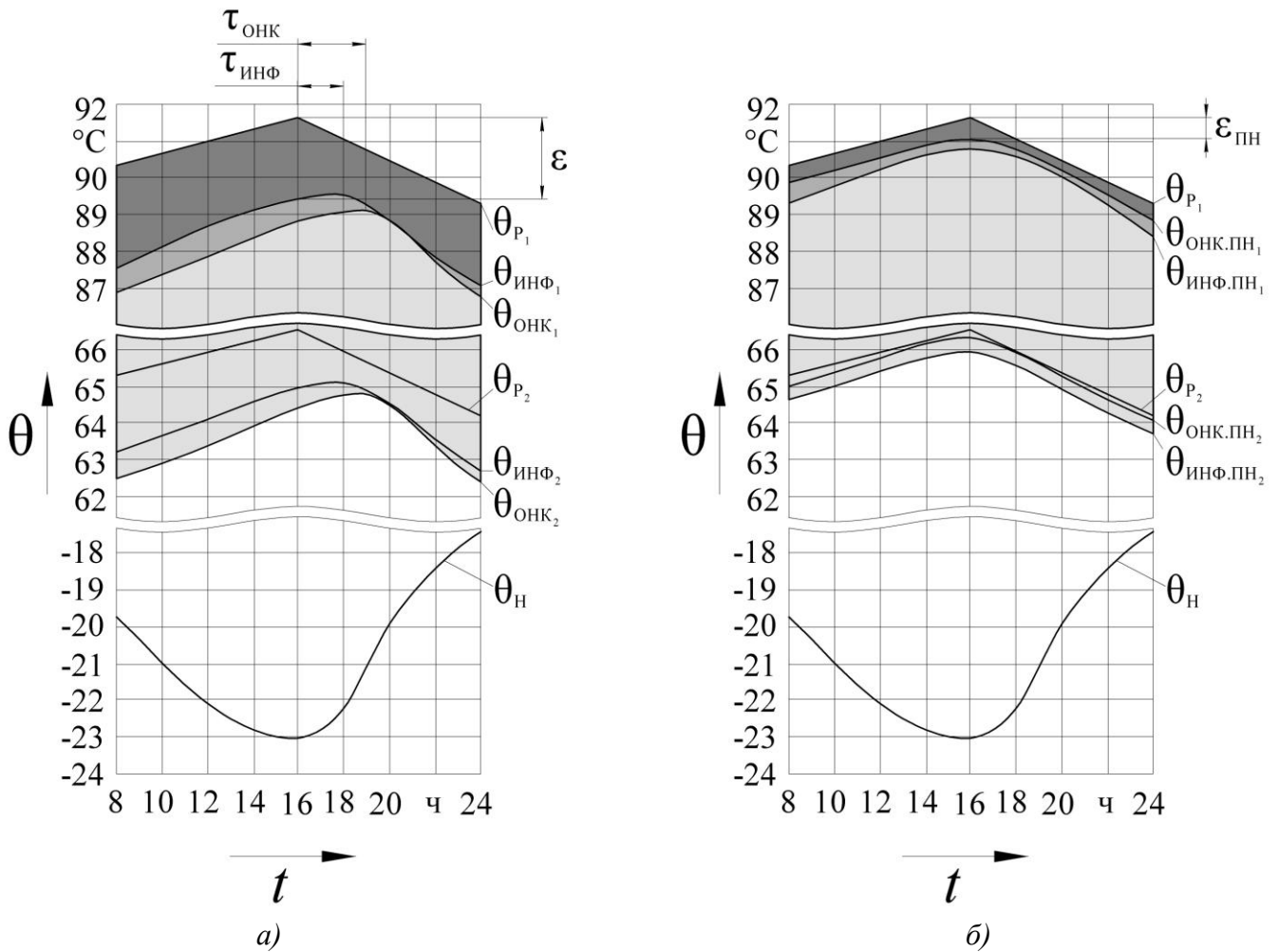


Рисунок 4 – Суточные графики температуры теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах у обобщенного потребителя без пиковой нагрузки (а) и с пиковой нагрузкой (б)

Из рисунка 4, б видно, что транспортное запаздывание в ОГУЗ «Орловский онкологический диспансер» и МЛПУ «Детская инфекционная больница» отсутствует. Это связано с тем, что активная пиковая нагрузка при понижении температуры наружного воздуха осуществляет подогрев теплоносителя в локальном контуре теплоснабжения без запаздывания по заданному алгоритму и независимо от когенерационного источника. Необходимо отметить, что протяженность трубопроводов в локальных контурах теплоснабжения составляет не более 500м.

Как видно из таблицы 1 и 2 оценка качества переходного процесса у обобщенного потребителя с активным пиковым подогревателем в ОГУЗ «Орловский онкологический диспансер» ($I_{\text{П.П.}}^2$ II₁ = 78,83, $I_{\text{П.П.}}^2$ II₂ = 66,45) выше, чем оценка качества переходного процесса у обобщенного потребителя с активной пиковой нагрузкой в МЛПУ «Детская инфекционная больница» ($I_{\text{П.П.}}^2$ II₁ = 87,22, $I_{\text{П.П.}}^2$ II₂ = 78,43) т.к. значение интегральной квадратической оценки качества меньше.

Более высокое качество переходного процесса у обобщенного потребителя с активной пиковой нагрузкой в ОГУ «Орловский онкологический диспансер» связано с применением корректирующего устройства.

Оценка качества переходного процесса у обобщенных потребителей с активной пиковой нагрузкой выше, чем оценка качества переходного процесса на ТГК-4. Это объясняется тем, что активная пиковая нагрузка менее инерционна, чем когенерационный источник.

ВЫВОДЫ

1. Разработана методика оценки качества переходного процесса в системе управления когенерационной системы централизованного теплоснабжения по интегральному квадратическому критерию.

2. Определены значения интегральной квадратической оценки качества отклонения от температурного графика в подающем и обратном трубопроводах обобщенных потребителей и когенерационного источника по интегральному квадратическому критерию.

3. Как видно из результатов расчета интегральная квадратическая оценка качества отклонения от температурного графика в подающем и обратном трубопроводах обобщенных потребителей с активной пиковой нагрузкой значительно выше, чем у обобщенных потребителей без активной пиковой нагрузки, и на когенерационном источнике. Это связано со снижением влияния транспортного запаздывания, вследствие работы активной пиковой нагрузки вблизи обобщенного потребителя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Душин, С.Е. Теория автоматического управления [Текст]: учеб. для вузов / С.Е. Душин, Н.С. Зотов, Д.Х. Имаев и др.; под ред. В.Б. Яковлева – М.: Высшая школа, 2005. – 567 с.

2. Соколов, В.А. Автоматизация технологических процессов пищевой промышленности [Текст]: учебник для вузов / В.А. Соколов. – М.: – Агропромиздат, 1991. – 445 с.

3. Петров С.П., Маяков М.Н. Анализ и синтез системы управления процессом передачи тепловой энергии в когенерационной системе централизованного теплоснабжения [Текст]: монография / С.П. Петров, М.Н. Маяков; под общ. ред. д.т.н., проф. А. И. Суздальцева – Орел.: Орлик и К – 1, 2009. - 315 с.

Петров Сергей Петрович

Орловский Государственный Технический Университет
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрооборудование и энергосбережение»
Адрес: Россия, 302030, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел.: (4862)419830
E-mail: lavanda777@bk.ru

Маяков Михаил Николаевич

Орловский Государственный Технический Университет
Аспирант кафедры «Электрооборудование и энергосбережение»
Адрес: Россия, 302030, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
Тел.: (4862)419830
E-mail: bamper.w@mail.ru

Сафронова Наталья Анатольевна

Орловский государственный технический университет
ст. преподаватель кафедры «Электроника, вычислительная техника и информационная безопасность»
Адрес: : Россия, 302018 г. Орёл ул. 60 лет Октября 9 кв. 117
Тел.: (4862)70-41-24
E-mail: pteivs@ostu.ru

УДК 621.3.084.2

В. Я. ХОРОЛЬСКИЙ, М. С. БОНДАРЬ, А. В. ЕФАНОВ

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД – МЕТОДОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНОВА ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

В статье процесс аналого-цифрового преобразования представлен операциями предварительной обработки сигналов, преобразования аналоговой величины в код и последующей коррекции погрешностей. Показана необходимость применения системного подхода при решении задач повышения точности и метрологической надежности средств аналого-цифрового преобразования.

Ключевые слова: аналого-цифровое преобразование, системный подход, погрешности, коррекция.

In article process of analogue-digital transformation is presented by operations of preliminary processing of signals, transformations of analogue size to a code and the subsequent correction. Necessity to apply the system approach is shown at the solving a problem of increasing of accuracy and metrological reliability of analogue-digital transformation means.

Key words: analogue-digital transformation, the system approach, errors, correction.

Анализ состояния и перспектив развития современных измерительных систем показывает все возрастающую тенденцию к их цифровизации, осуществление которой невозможно без предварительного аналого-цифрового преобразования сигналов. В связи с этим отмечается возрастание роли применяемых в них аналого-цифровых преобразователей (АЦП).

Важность аналого-цифровых преобразователей обусловлена тем, что они являются единственным видом измерительных преобразователей, обеспечивающих непосредственную связь и передачу измерительной аналоговой информации от объекта измерений в вычислительное или управляющее цифровое устройство. При этом достоверность информации о значениях измеряемых величин, а, следовательно, и результативность принимаемых на их основе решений или качество управления процессами определяются свойствами используемых АЦП и, прежде всего, их точностью и быстродействием.

Среди разработчиков прикладных систем существует заблуждение, связанное с тем, что они рассматривают АЦП как "черный ящик" и недооценивают его роль в измерительной системе. Упускается из вида то, что ошибки, допущенные на стадии аналого-цифрового преобразования, в дальнейшем становятся неотличимы от преобразованного сигнала и при последующей цифровой обработке не могут быть полностью устранены. Причина этого в том, что реальный АЦП является нелинейным устройством, и вносимые таким устройством погрешности не аддитивно складываются с реальным сигналом. Поэтому при работе с АЦП с его максимальными возможностями недостаточно правильно включать микросхемы согласно их описанию. Необходимо также исследовать реальные характеристики преобразователей и проанализировать факторы, влияющие на эти характеристики, а также вести целенаправленный поиск по повышению качества работы АЦП.

На практике наиболее часто для решения задач повышения точности аналого-цифрового преобразования используют только высокоточные АЦП. Современные фирмы-разработчики электронных компонентов занимаются совершенствованием и созданием различных видов АЦП, пытаясь достичь компромисса между их высокой разрядностью и быстродействием. Однако только применение высокоточных АЦП полностью не решает указанную задачу по нескольким причинам.

Во-первых, высокие точностные характеристики современных микросхем АЦП еще не являются гарантией того, что в условиях воздействия внешних факторов (температурных, электрических, механических, а также помех и шумов), данный АЦП будет все также точен. Согласно ГОСТ 14014-82, на точность аналого-цифрового преобразования влияют не только изначально присущие такому преобразователю основные погрешности, но и значительные дополнительные погрешности, которые согласно ГОСТ 8.009-84 и РД 50-453-84

суммируются с основными, и тем самым значительно снижают общую точность аналого-цифрового преобразования.

Во-вторых, необходимо учитывать, что традиционно под аналого-цифровым преобразованием подразумевают операцию, выполняемую непосредственно самим АЦП. Однако в современных условиях, характеризующихся усложнением измерительных задач и требований, предъявляемым к метрологическим характеристикам преобразователей, справедливо говорить уже о процессе или системе аналого-цифрового преобразования, так как теперь для качественного выполнения преобразования микросхемы АЦП нуждаются в дополнительных устройствах.

В связи с этим, процесс аналого-цифрового преобразования предусматривает, кроме операции непосредственного аналого-цифрового преобразования, осуществляемой АЦП, выполнение ряда сопутствующих операций: выборки и хранения, формирования абсолютных значений сигналов, а также коррекции погрешностей АЦП (рисунок 1).

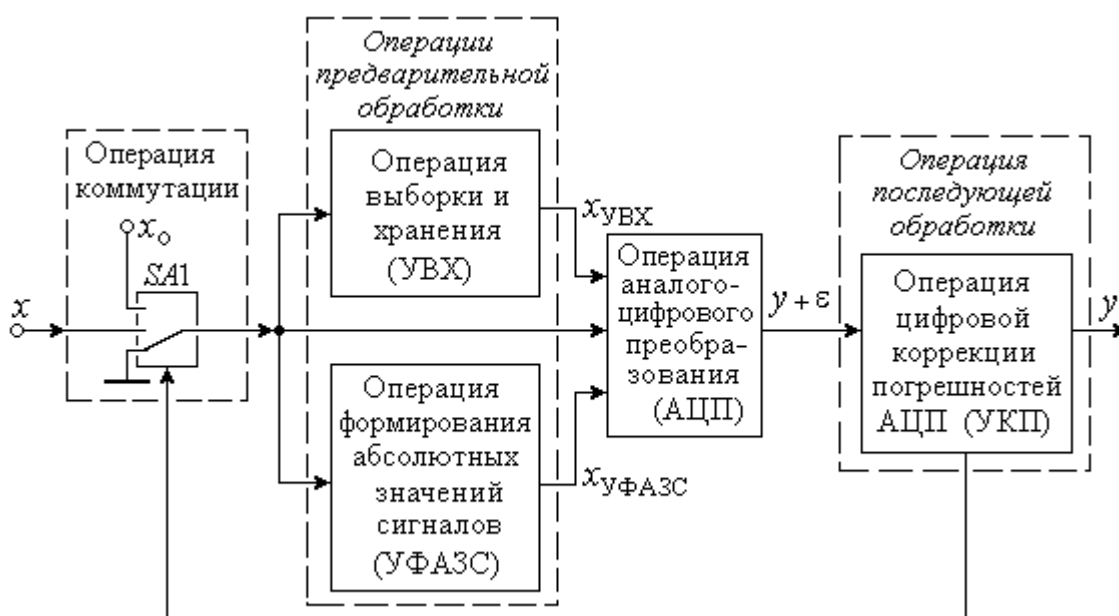


Рисунок 1 – Обобщенный процесс аналого-цифрового преобразования

Следует отметить, что параллельно с совершенствованием микросхем АЦП наибольшее развитие в трудах отечественных и зарубежных ученых получило направление коррекции погрешностей преобразования. Вместе с тем, как видно из рисунка 1, аналого-цифровому преобразованию с последующей возможной коррекцией обычно предшествуют операции выборки и хранения и/или формирования абсолютного значения сигналов (применяемые в зависимости от особенностей и областей применения АЦП), в значительной степени влияющие на общую точность аналого-цифрового преобразования. Следовательно, каким бы точным не был АЦП, пусть даже снабженный устройством коррекции, но если не обеспечивать точность выполнения операций предварительной обработки, то нельзя гарантировать достоверность результатов аналого-цифрового преобразования.

Так, например, известные ученые – основатели направления коррекции погрешностей АЦП – Алиев Т. М., Сейдель Л. Р., Тер-Хачатуров А. А., Шекиханов А. М., Андрианова Л. П. и другие занимались разработкой и совершенствованием итерационных методов коррекции, не учитывая тот факт, что работа по повышению точности только одних АЦП малоэффективна без учета влияния погрешностей устройств предварительной обработки (выборки и хранения, формирования абсолютного значения сигналов) на конечный результат аналого-цифрового преобразования.

Проведенный аналитический обзор показал, что хотя устройствам выборки и хранения, формирования абсолютного значения сигналов и коррекции погрешностей АЦП в

литературе по отдельности уделено должное внимание, нигде не встречается тезис о том, что все эти операции и реализующие их устройства необходимо рассматривать комплексно, в общей системе. Ведь только так можно оценить, в конечном итоге, влияние каждого из них на точность получаемых результатов аналого-цифрового преобразования.

В технической литературе недостаточно освещены вопросы исследования физических процессов, происходящих в таких устройствах, и оценки их влияния на конечную точность аналого-цифрового преобразования. Это свидетельствует о необходимости проведения дополнительных исследований в данной области.

В связи с этим к процессу аналого-цифрового преобразования целесообразно применять системный подход, согласно которому необходимо учитывать взаимодействие и взаимное влияние отдельных частей (подсистем), выполняющих в составе измерительной системы определенные функции, вытекающие из общей цели ее функционирования [1]. Основой системного подхода является принцип иерархичности. Он предполагает декомпозицию системы (или процесса) на ряд подсистем (операций) с тем, чтобы проанализировать причины, снижающие его точность (то есть решить задачу анализа), и затем определить возможные пути уменьшения их влияния (то есть решить задачу синтеза) [2, 3].

Очевидно, что причины снижения точности процесса аналого-цифрового преобразования, учитывая его сложность, связаны с сопутствующими операциями. А именно, они обусловлены методическими погрешностями известных методов, лежащих в основе сопутствующих операций, и инструментальными погрешностями устройств их реализации. В связи с этим задача повышения точности процесса аналого-цифрового преобразования должна решаться комплексно, с учетом входящих в него подсистем.

Одним из путей повышения точности АЦП является применение известных способов компенсации аддитивной и мультипликативной составляющих погрешности.

Для коррекции аддитивной погрешности цикл аналого-цифрового преобразования разделяют на два такта одинаковой длительности. В первом такте кодируется суммарное значение входной величины и начального смещения $X + X_{см}$, и на выходе АЦП формируется первый код $Y_1 = K_{пр}(X + X_{см})$, который запоминается в регистре памяти. Во втором такте вход устройства через аналоговый ключ SA1 подключается к нулевой цепи, и начальное смещение $X_{см}$ преобразуется в цифровую форму. При этом на выходе АЦП получается код поправки $\varepsilon = K_{пр}X_{см}$, который вычитается из первого кода для получения результата преобразования $Y = Y_1 - \varepsilon = K_{пр}X$, не зависящего от начального смещения $X_{см}$.

Для компенсации мультипликативной составляющей инструментальной погрешности аналого-цифрового преобразования используют третий такт. В течение этого такта на вход устройства через переключатель SA1 подается образцовый сигнал X_0 , и с помощью АЦП получается номинальный код $Y_{ном} = K_{пр}(X_0 + X_{см})$. Затем из этого номинального кода вычитается код смещения ε , после чего вычисляется калибровочный коэффициент $K_{клб} = Y_{клб} / (Y_{ном} - \varepsilon)$ по отношению калибровочного кода $Y_{клб}$, соответствующего образцовому сигналу X_0 , к полученной разности номинального кода и кода смещения.

После записи в регистр памяти АЦП цифровых значений кода смещения ε и калибровочного коэффициента $K_{клб}$ можно реализовать автоматическую коррекцию результатов преобразования: вычитать из каждого последующего кода Y_k значение кода поправки ε и умножить эту разность на калибровочный коэффициент: $Y = (Y_k - \varepsilon)K_{клб}$.

Такие сравнительно простые вычислительные операции позволяют скомпенсировать влияние постоянных значений аддитивной и мультипликативной составляющих погрешности аналого-цифрового преобразования.

Также установлено, что основным направлением совершенствования устройств выборки и хранения является улучшение их выходных характеристик, определяемых параметрами элементов, входящих в них (конструктивный подход). При этом в качестве

варьируемых выходных величин устройства выборки и хранения следует рассматривать параметры используемых операционных усилителей и конденсатора хранения, а также учитывать принцип перезаряда емкости конденсатора хранения.

Операция формирования абсолютных значений сигналов обычно основывается на принципах инвертирования отдельных участков сигнала, без учета величин фазовых сдвигов. Это приводит к значительным искажениям формы выходного сигнала, и в связи с этим, к необходимости разработки нового метода формирования абсолютных значений входных биполярных сигналов, подаваемых на вход АЦП.

Наряду с технологическим и конструктивным направлениями улучшения метрологических характеристик АЦП, перспективным является структурный подход. Такой подход направлен на линейризацию функции преобразования АЦП и обеспечение ее стабильности при воздействии разных возмущающих факторов, за счет коррекции возникающих погрешностей преобразования. Совершенствование операции коррекции погрешностей АЦП также выделяется в самостоятельную задачу и требует разработки новых и более эффективных методов, характеризующихся снижением аппаратной сложности и повышением скорости сходимости операции коррекции.

Таким образом, необходимость рассмотрения процесса аналого-цифрового преобразования как сложной технической системы указывает на то, что задача повышения его точности может быть решена на основе применения системного подхода. При этом возможные пути совершенствования отдельных подсистем процесса аналого-цифрового преобразования диктуют важность проведения всесторонних теоретических и практических исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Окунев Ю. Б., Плотников В. Г. Принципы системного подхода к проектированию в технике связи. – М.: Связь, 1976. – 184 с.
2. Борисов Ю. П., Цветнов В. В. Математическое моделирование радиотехнических систем и устройств. – М.: Радио и связь, 1985. – 176 с.
3. Розенберг В. Я. Введение в теорию точности измерительных систем. – М.: Советское радио, 1975. – 304 с.

Хорольский Владимир Яковлевич

Невинномысский технологический институт (филиала) ГОУ ВПО "Северо-Кавказский государственный технический университет"

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных систем электропривода и автоматики

Тел. 8-(8652)-23-25-52

Ефанов Алексей Валерьевич

Невинномысский технологический институт (филиала) ГОУ ВПО "Северо-Кавказский государственный технический университет"

Кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационных систем электропривода и автоматики

Тел. 8-(8654)-7-03-84

E-mail: kea@nti.ncstu.ru

Бондарь Мария Сергеевна

Ставропольский военный институт связи

УДК 621.018

П.Н. ШКАТОВ, Б.И. ВОЛКОВ, В.В. ПРОХОРОВ,
К.М. БОНДАРЬ, М.С. РОДЮКОВ

ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ КОНТРОЛЯ ЛОПАТОК ПАРОВЫХ ТУРБИН ВИХРЕТОКОВЫМ МЕТОДОМ

Лопатки ротора паровой турбины в процессе эксплуатации испытывают значительные знакопеременные динамические нагрузки. Профиль лопаток имеет острые входные и выходные кромки, являющиеся концентраторами напряжений, что наряду с процессами коррозии зачастую приводит к образованию поперечных трещин. Своевременное обнаружение таких трещин позволяет избежать разрушения лопатки и аварийного останова турбины. Одним из методов контроля кромок лопаток на наличие поперечных трещин является вихретоковый метод. В статье приводится методика отстройки выходного сигнала вихретокового накладного преобразователя (ВТНП) от таких мешающих факторов, как изменение рабочего зазора «преобразователь–поверхность контроля» (Z) и расстояния «преобразователь–край лопатки» (L).

Ключевые слова: неразрушающий контроль, трещина, лопатка ротора паровой турбины, вихретоковый метод контроля, методика контроля.

The blades of rotor the steam-turbine in the process of exploitation is receive the considerable value dynamic overloads. The profile of blades has the sharp initial and final edges, which is serve the concentrator of efforts, that is evoke the appearance of diametrical cracks. If in time find such crack, to may avoid destroy of blade and emergency interruption the steam-turbine. The method of electromagnetically currents allows conduct of check availability diametrical cracks on the edges of blades. In this article is conduct the methodic of tuning final signal electromagnetically current overhead device from varies factors, for example, the constructive dimensions blade or device.

Key words: nondestructive control; crack; blades of rotor the steam-turbine; method check of electromagnetically currents; methodic of check.

Экспериментально установлено [1], что воздействие зазора (Z) и расстояния до края (L) сводится к изменению, в основном, реактивной составляющей сопротивления вихретокового накладного преобразователя (ВТНП). Наличие же в области чувствительности преобразователя трещины приводит к изменению как реактивной, так и активной составляющих его сопротивления [2-4]. Из этого следует, что можно выбрать такой режим работы ВТНП, при котором изменения выходного сигнала при вариации Z и L будут незначительны, в то время как реакция преобразователя на трещину не ухудшится. Практически, реализация данного режима осуществляется включением между генератором G и преобразователем конденсатора C некоторой емкости.

На рисунке 1 приведена схема экспериментальной установки, которая позволяет имитировать работу вихретокового дефектоскопа в амплитудном варианте выделения полезной информации.

Схема содержит последовательно соединенные генератор синусоидального напряжения G, конденсатор C, вихретоковый преобразователь с индуктивным (x) и активным (r) сопротивлением, амплитудный детектор D и индикатор И. Найдем аналитическое выражение для определения оптимального значения емкости добавочного конденсатора C.

Выходное напряжение преобразователя U в данном случае определяется по формуле:

$$U(r, x_L) = E \sqrt{\frac{x_L^2 + r^2}{r^2 + (x_C + x_L)^2}}, \quad (1)$$

где E – ЭДС генератора;

r – активное сопротивление преобразователя;
 x_L – реактивное сопротивление преобразователя;
 x_C – реактивное сопротивление конденсатора.

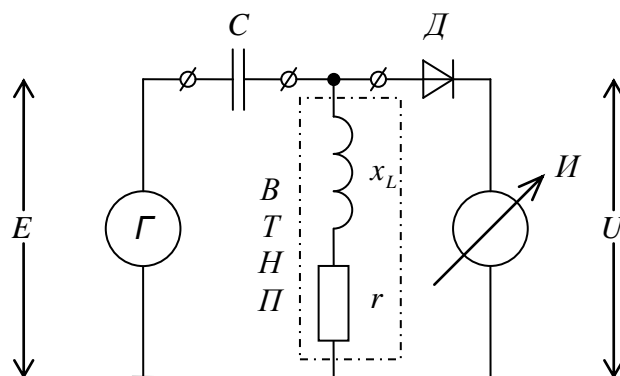


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

Приравняв нулю производную U по x_L , получим уравнение:

$$\frac{dU(r, x_L)}{dx_L} = \frac{x_C \cdot (x_C \cdot x_L + r^2 + x_L^2)}{[\sqrt{x_L^2 + r^2} \cdot (x_C^2 + 2x_C x_L + r^2 + x_L^2)^{\frac{3}{2}}]} = 0. \quad (2)$$

Откуда реактивное сопротивление конденсатора и его емкость:

$$x_C = \frac{|r^2 - x_L^2|}{x_L}, \quad (3a)$$

$$C = \frac{1}{2\pi f x_C}. \quad (3б)$$

Эксперименты проводились на частоте $f = 20 \text{ кГц}$.

В опыте использован накладной параметрический преобразователь с ферромагнитным цилиндрическим сердечником. Диаметр сердечника 1,8 мм, длина 12 мм. Марка феррита НН2000. Обмотка содержит 500 витков провода ПЭЛ-0,09. Намотка велась непосредственно на сердечник, «внавал». Диаметр обмотки и ее длина 6 и 8 мм соответственно. Активное сопротивление обмотки преобразователя $r = 35 \text{ Ом}$, реактивное $x_L = 628 \text{ Ом}$. Рассчитанные по (3) параметры добавочного конденсатора $x_C = 626 \text{ Ом}$ и $C = 13 \text{ нФ}$.

Эксперимент сводился к измерению выходного напряжения преобразователя U в зависимости от наличия дефекта – поверхностной трещины Tr , величины зазора Z и расстояния до края L для различных значений емкости добавочного конденсатора C . Дефект представляет собой поверхностную несплошность типа трещины глубиной – 1 мм, протяженностью – 10 мм и шириной раскрытия 0,01 мм. Зазор Z устанавливался в пределах 0...0,5 мм с шагом 0,1 мм. Расстояние до края L находилось в пределах от 0...5 мм с шагом 1 мм. Измерения проводились при различных значениях емкости добавочного конденсатора C из диапазона $10^{-1} \dots 10^3 \text{ нФ}$.

На рисунке 2 приведена зависимость напряжения U от ёмкости добавочного конденсатора C при установке преобразователя в воздухе (полное сопротивление $Z \rightarrow \infty$, кривая с индексом «В»), на металле ($Z \rightarrow 0$, индекс «М»), на трещине («Tr») и при минимальном расстоянии от края ($L \rightarrow 0$, индекс «Кр»).

Как видно из рисунка 2, все кривые имеют ярко выраженный максимум. В то же время в зависимости от положения ВТНП (зазор, трещина, край) величина емкости, при которой наблюдается резонанс, различна. С практической точки зрения, целесообразно рассмотреть помимо абсолютных значений также приращения полезного и мешающих сигналов относительно сигнала на металле. На рисунке 3 приведены соответствующие

кривые в виде зависимостей $\Delta U_{Tr} = f(C)$, $\Delta U_Z = f(C)$ и $\Delta U_L = f(C)$, индексы «Tr», «Z» и «L» соответственно.

Из рисунка 3 следует, что при значении емкости добавочного конденсатора из интервала 0,009...0,011 мкФ, приращение полезного сигнала ВТНП от трещины существенно превышает приращения от зазора и края.

Для точного выбора емкости конденсатора из этого интервала рассмотрим зависимость вида $k = f(C)$. Где k есть коэффициент, определяемый как отношение сигнал/помеха. В данном случае, полезный сигнал – приращение U на трещине, а помеха – приращение от зазора и расстоянии до края лопатки.

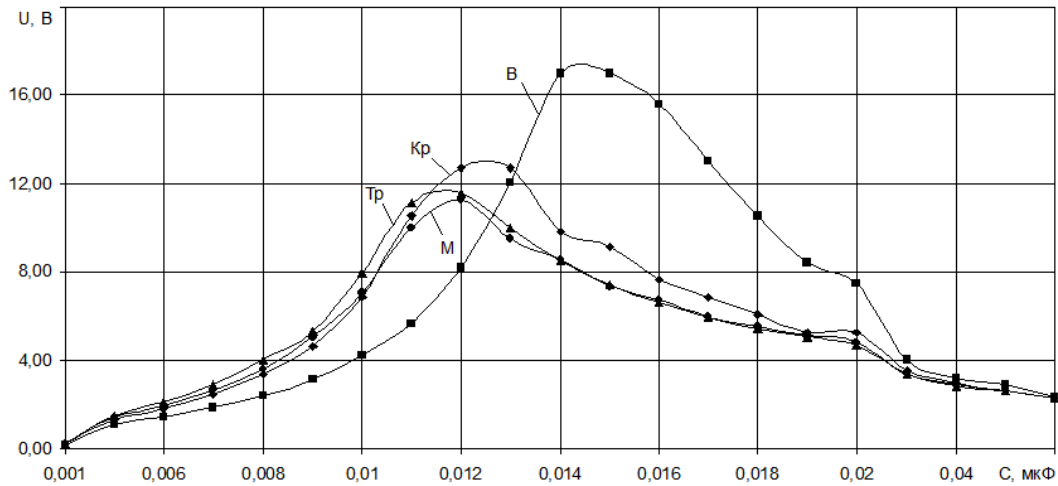


Рисунок 2 – Зависимость напряжения U на преобразователе от добавочной емкости C

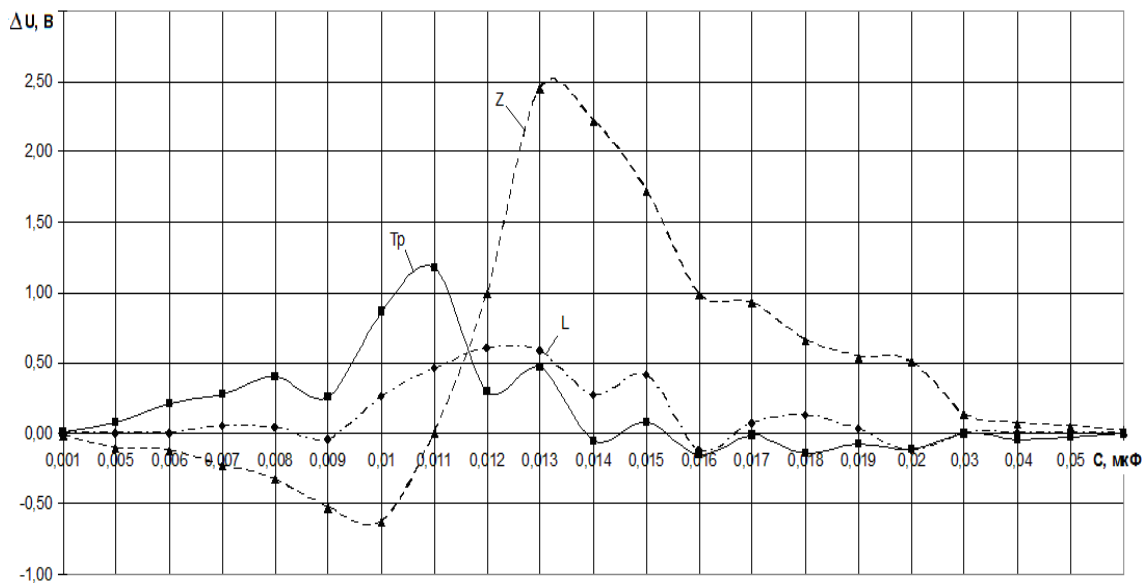


Рисунок 3 – Зависимость приращения напряжения ΔU на преобразователе от величины добавочной емкости C : «Tr», «Z», «L» – преобразователь на трещине глубиной 1 мм, на металле с зазором 0,1 мм, на расстоянии от края 0,1 мм, соответственно

На рисунке 4 показаны соответствующие графики зависимости коэффициента k от величины добавочной емкости C . Из графика видно, что можно подобрать такую емкость добавочного конденсатора, которая действительно повышает отношение сигнал/помеха.

Наибольшее отношение приращения сигнала от трещины к сигналу от зазора $0,25 \pm 0,5$ мм и к сигналу от края (при $L = 0,5...5$ мм) достигается при значении емкости добавочного конденсатора $C = 0,01$ мкФ.

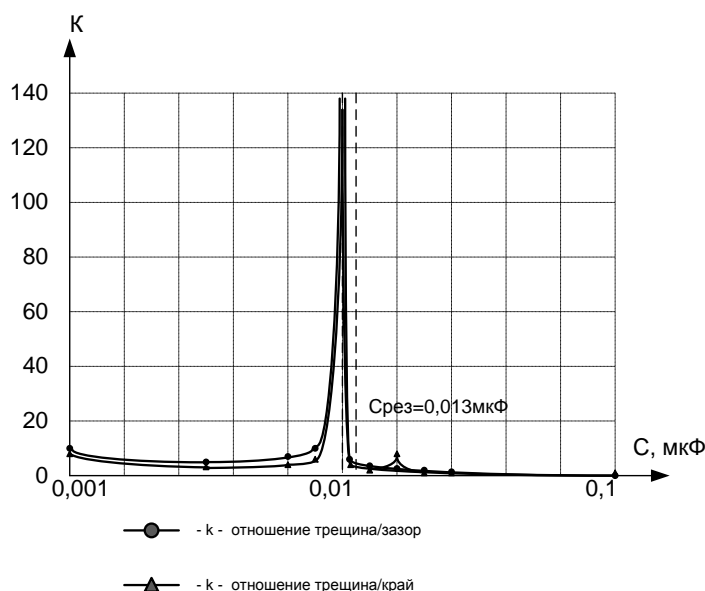


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента сигнал/помеха от добавочной ёмкости C

Практическое опробование макета дефектоскопа показало, что предлагаемая методика может быть использована при разработке вихретоковых дефектоскопов, предназначенных для контроля лопаток паровых турбин со стороны входной и выходной кромок в непосредственной близости от края.

ЛИТЕРАТУРА

1. Неразрушающий контроль: Справочник: в 8 т. Под общей редакцией В.В.Клюева. Т. 2. В 2 кн. – М.: Машиностроение, 2003.
2. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник. Под редакцией В.В.Клюева 3-е изд. – М.: Машиностроение, 2005.
3. Дамаскин, А.Л. Контроль трубной резьбы бурильных труб с внутренней поверхности / А.Л. Дамаскин // Дефектоскопия №3. – Академия наук СССР. 1991.
4. Файн, Г.М. Нефтяные трубы из легких сплавов / Г.М. Файн В.Ф. Штамбург С.М. Данелянц. – М.: «Недра», 1990.

Шкатов Пётр Николаевич

Московский государственный технический университет приборостроения и информатики (МГУПИ), г. Москва
Д.т.н., профессор, директор учебно-научного центра «КАСКАД»
Тел. (499) 268-76-94
E-mail: petr_shkatov@mail.ru

Волков Борис Иванович

Московский государственный университет приборостроения и информатики (МГУПИ), г. Москва
аспирант
Тел. 8 (495) 775-47-12
E-mail: stasso@yandex.ru

Прохоров Владимир Владимирович

Московский государственный университет приборостроения и информатики (МГУПИ), г. Москва
аспирант
Тел. 8 (495) 775-47-12
E-mail: stasso@yandex.ru

Бондарь Константин Михайлович

Московский государственный университет приборостроения и информатики (МГУПИ), г. Москва
аспирант
Тел. 8 (495) 775-47-12
E-mail: stasso@yandex.ru

Родюков Михаил Сергеевич

Московский государственный университет приборостроения и информатики (МГУПИ), г. Москва
аспирант
Тел. 8 (495) 775-47-12
E-mail: stasso@yandex.ru

УДК 544.72

С.Н. СЫЧЕВ, В.А. ГАВРИЛИНА, К.В. ПОДМАСТЕРЬЕВ,
Е.В. ПАХОЛКИН, С.Г. ПУЗЫРЕВ

КРИТЕРИИ ОБРАЗОВАНИЯ УСТОЙЧИВЫХ АДсорбЦИОННЫХ СЛОЕВ НА ПОЛЯРНЫХ И НЕПОЛЯРНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

Главной причиной использования моторных масел в двигателях является замена одного вида трения трущихся частей на другой, более подходящий для условий эксплуатации. Такая замена производится путем образования устойчивого адсорбционно-модифицирующего слоя компонентов моторных масел на поверхности трущихся частей (адгезия). В предлагаемой работе на основе теории адсорбционного модифицирования высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) рассматриваются критерии образования таких слоев присадками на полярных и неполярных поверхностях при испытаниях и диагностике моторных масел.

Ключевые слова: трение, присадки, моторные масла, адсорбционная модификация, критерии, диагностика.

The main reason of use of engine oils in engines is replacement of one kind of a friction of rubbing parts by another, more suitable to service conditions. Such replacement is made by formation of a steady adsorbtsion-modifying layer of components of engine oils on a surface of rubbing parts (adhesion). In offered work on the basis of the theory adsorbtsion modification of a highly effective liquid chromatography (HPLC) are considered criteria of formation of such layers by additives on polar and not polar surfaces at tests and diagnostics of engine oils.

Key words: friction, additives, engine oils, adsorbtsion modification, criteria, diagnostics.

ВВЕДЕНИЕ

Основой теоретического описания образования устойчивого адсорбционно-модифицирующего слоя компонентов моторных масел на поверхности трущихся частей (адгезия) является теория межмолекулярных взаимодействий на границах раздела фаз. Рассмотрение понятия «адгезия» в рамках диполь-полевых взаимодействий приводит к мысли об аналогии, а в отдельных случаях – идентичности явлений адгезии компонентов моторных масел на трущихся поверхностях и адсорбции так называемого модификатора элюента в динамических условиях высокоэффективной жидкостной хроматографии. Эффективность адсорбции модификатора оценивается с помощью удерживания адсорбата, имеющего большую способность к адсорбции на немодифицированной исследуемой поверхности адсорбента. При исследовании полярных поверхностей адсорбат должен иметь, например, постоянный дипольный момент. Параметр «удерживание» в ВЭЖХ, как и термин «адгезия» в физической химии [1], применяется в нескольких значениях [2]. С одной стороны, удерживанием называется результат элюирования адсорбата через хроматографическую колонку (заполненную сорбентом или, в случае определения адгезии – частичками металла, из которого изготовлена трущаяся пара), выраженный в виде величин t'_R (приведенное время удерживания адсорбата, минуты, рис.1) и V'_R (приведенный удерживаемый объем адсорбата, см³); с другой – удерживание рассматривается как процесс, состоящий как минимум из адсорбции (адгезии) и десорбции (аналог когезии [1]). Такой подход существенно упрощает получение и использование количественных критериев устойчивости адгезионных (адсорбционных) слоев на трущихся поверхностях при испытаниях и контроле состояния моторных масел.

КРИТЕРИИ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ

Для получения критерия модификации поверхности рассмотрим зависимость удерживаемого объема адсорбата от концентрации модификатора (модифицирующая присадка).

Известно [3], что энергия адсорбции W_A и фактор емкости K (фактор емкости $K = V'_R/V_M$, где V'_R – приведенный удерживаемый объем адсорбата, V_M – удерживаемый объем несорбируемого вещества [4]) связаны соотношением:

$$W_A = -RT \cdot \ln K \cdot F, \quad (2)$$

где R – универсальная газовая постоянная, T – абсолютная температура, F – постоянная.

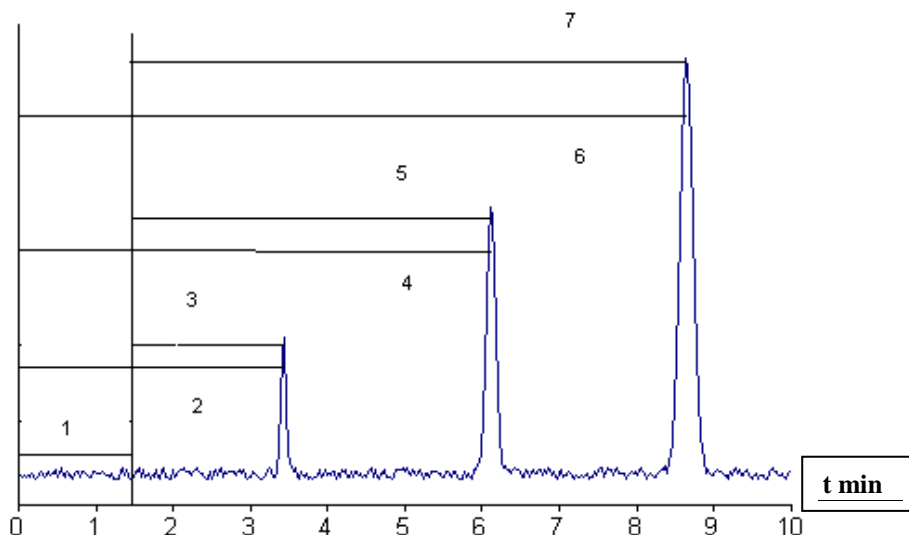
Пусть молекула адсорбата имеет постоянный дипольный момент μ . Тогда молярная электрическая энергия взаимодействия «диполь – однородное электростатическое поле» W_E будет равна:

$$W_E = -\mu \cdot E \cdot N_A \cdot \cos(\alpha), \quad (3)$$

где N_A – число Авогадро, $\cos(\alpha)$ – косинус угла между направлением дипольного момента молекулы сорбата и напряженностью E поля адсорбента.

Приравнявая уравнения (2.1.1) и (2.1.2) и полагая $\cos(\alpha) = 1$ получаем:

$$RT \cdot \ln K \cdot F = \mu \cdot E \cdot N_A \quad (4)$$



*Рисунок 1 – Хроматограмма t – время, мин.;
1 – t_m – время удерживания несорбируемого вещества;
2, 4, 6 – t_{Ri} – времена удерживания хроматографических пиков;
3, 5, 7 – t'_{Ri} – приведенные времена удерживания*

Пусть μ_i – дипольный момент сорбата при отсутствии модифицирующей добавки в элюенте C_{pol} . (аналог модифицирующей присадки в моторном масле); V'_{Ri} – приведенный удерживаемый объем сорбата с дипольным моментом μ_i ; V'_R – приведенный удерживаемый объем сорбата с дипольным моментом μ при концентрации добавки в элюенте C_{pol} . Запишем уравнение (4) для V'_{Ri} и V'_R :

$$RT \cdot \ln [(V'_{Ri} / V_M) \cdot F] = \mu_i \cdot E \cdot N_A \quad (5)$$

$$RT \cdot \ln [(V'_R / V_M) \cdot F] = \mu \cdot E \cdot N_A \quad (6)$$

и вычтем из уравнения (5) уравнение (6):

$$RT \cdot \ln (V'_{Ri} / V'_R) = (\mu_i - \mu) \cdot E \cdot N_A \quad (7)$$

Возможны разные варианты зависимости величины $\Delta \mu = (\mu_i - \mu)$ от C_{pol} [5, 6]. Рассмотрим два варианта:

$$\Delta \mu = A' \cdot (C_{pol})^{am} \quad (8)$$

$$\Delta \mu = A'' \cdot \ln (C_{pol})^{am}, \quad (9)$$

где A' и A'' – постоянные,

m – количество структурных единиц (молекул, ассоциатов) полярной добавки, образующих комплекс с молекулой адсорбата, α – степень ассоциации молекул полярной добавки модифицирующей присадки).

Зависимость (8) применима при изменении дипольного момента адсорбата, обусловленного образованием комплексов с водородной связью «сорбат – полярная добавка в элюенте», а уравнение (9) включает как комплексообразование, так и изменение дипольного момента комплексов с водородной связью «сорбат – полярная добавка в

элюенте» за счет образования лабильной сольватной оболочки из молекул полярной добавки (гашение дипольного момента комплекса за счет неупругих столкновений [7]).

Примечание. Соединения, имеющие постоянный дипольный момент, попадая в электрическое поле, приобретают также и индуцированный дипольный момент. Вклад индуцированного момента во взаимодействии «диполь – поле» как правило, не превышает 5% [8], что вполне сравнимо с ошибкой определения дипольных моментов [6]. Таким образом, влиянием индуцированного дипольного момента сорбата на его удерживание можно пренебречь.

Используя зависимость (8) преобразуем (7) в (10):

$$1/V'_R = 1/V'_{Ri} + [(A' \cdot E \cdot N_A) / (V'_{Ri} \cdot RT)] \cdot (C_{pol.})^{am} \quad (10)$$

Полагая $x = \alpha \cdot m$, $B = (A' \cdot E \cdot N_A) / (V'_{Ri} \cdot RT)$, получаем известное уравнение Скотта [9]

$$1/V'_R = 1/V'_{Ri} + B \cdot C_{pol.}^x \quad (11)$$

при использовании алифатических карбоновых кислот в качестве полярной добавки, например, $x = 1$, а уравнение (11) принимает вид (12)

$$1/V'_R = 1/V'_{Ri} + B \cdot C_{pol.} \quad (12)$$

Согласно работе [10], положительное значение величины $1/V'_{Ri}$ (V'_{Ri} - приведенный удерживаемый объем комплекса «сорбат-полярная добавка» при концентрации добавки равной нулю $C_{пол.} \rightarrow 0$) для пробного адсорбата (например, бензойной кислоты) является критерием получения устойчивого модифицирования поверхности полярного сорбента или металла модификатором в динамических условиях ВЭЖХ или моторных испытаний.

Уравнение Скотта-Кучеры и уравнение (11) представляют классический пример разделения эффектов адсорбции (адгезии) и десорбции (когезии), когда коэффициенты «А» из (13) и $1/V'_{Ri}$ из (11) в явном виде описывает тип и величину межмолекулярных взаимодействий «сорбат - адсорбционно-модифицированный адсорбент» (адгезия), а коэффициент «В» отвечает за образование десорбционного комплекса «сорбат - полярная добавка» (когезия).

Использование зависимости величины $\Delta \mu = (\mu_i - \mu)$ от $C_{pol.}$ в виде

$$\Delta \mu = A'' \cdot \ln (C_{pol.})^{am}, \quad (9)$$

где A'' – постоянная, m – количество структурных единиц (молекул, ассоциатов) полярной добавки, образующих комплекс с молекулой адсорбата, α – степень ассоциации молекул полярной добавки модифицирующей присадки):

приводит к несколько иной форме зависимости величин V'_R от $C_{pol.}$ (уравнение 14).

Уравнение (9) включает как комплексообразование, так и изменение дипольного момента комплексов с водородной связью «сорбат – полярная добавка в элюенте» за счет образования лабильной сольватной оболочки из молекул полярной добавки (гашение дипольного момента комплекса за счет неупругих столкновений [7]). Исходя из зависимости (9) в конечном итоге получаем уравнение (14):

$$\ln (V'_R) = \ln (V''_{Ri}) - b'(C_{pol.})^{am})^{1/2} \quad (14)$$

где V''_{Ri} - удерживаемый объем комплекса «сорбат – полярная добавка» без образования сольватной оболочки, b' – постоянная.

Гипотеза об образовании лабильной сольватной оболочки симметрична гипотезе образования поверхностных адсорбционных слоев, имеющих собственные фазовые переходы [7]. Например, такие переходы характерны для монозамещенных нормальных алифатических соединений с длиной цепи 16 – 18 углеродных атомов. Такая взаимозаменяемость исходных гипотез делает выполнение уравнения (14) критерием перемодификации поверхности от полярной к неполярной, тем более, что удерживание на неполярных поверхностях (обращено-фазовый вариант высокоэффективной жидкостной

хроматографии – ОФ ВЭЖХ) описывается уравнением (15) [9], очень близким по форме к уравнению (14):

$$\lg K = a - m \cdot C, \text{ где} \quad (15)$$

K - фактор емкости адсорбата; a - логарифм фактора емкости, экстраполированного к нулевому содержанию органического модификатора в подвижной фазе; C - концентрация модификатора в элюенте; m - коэффициент. Величина коэффициента « a » связана с гидрофобностью анализируемого соединения; положительное значение величины « a » является критерием получения устойчивого перемодификации поверхности полярного сорбента или металла или модификации неполярного сорбента в динамических условиях ВЭЖХ или моторных испытаний.

ВЫВОД

1. Предложены уравнения, позволяющие экспериментально определить состояние адсорбционного слоя, состоящего из молекул модификатора, для полярных и неполярных поверхностей различных материалов при использовании их в качестве адсорбентов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теоретические основы химмотологии. – Под ред. А.А.Браткова.– М.: Химия, 1985.–320 с.
2. С.Н.Сычев. Методы совершенствования хроматографических систем и механизмы удерживания в ВЭЖХ./ Орел: ОрелГТУ, 2000. – 212 с.
3. Курс физической химии. Под ред. Герасимова Я.И.// М.: Химия, 1964. – 624 с.
4. Хроматография. Основные понятия. Терминология. Сборник научно-нормативной терминологии. Выпуск 114. Под ред. Даванкова В.А.//М.: РАН, 1997. – 48 с.
5. Молекулярные взаимодействия. Под ред. Райтачак Г. // М.: Мир, 1984. – 598 с.
6. Осипов О.А., Минкин В.И., Гарновский А.Д. Справочник по дипольным моментам.// М.: Высшая школа, 1971. – 416 с.
7. С.Н.Сычев. Совершенствование теории нормально-фазовой (НФ ВЭЖХ) и обращенно-фазовой (ОФ ВЭЖХ) высокоэффективной жидкостной хроматографии./ Контроль. Диагностика. – 2005. – № 5. – С. 48 – 57.
8. С.Н.Сычев, К.С.Сычев, К.С.Ланин. Оценка напряженности электростатического поля адсорбционно-модифицированного силикагеля./ Сорбционные и хроматографические процессы. – 2004. – Т.4. – Вып.4. – С.91 - 112.
9. Шатц В.Д., Сахартова О.В. Высокоэффективная жидкостная хроматография.// Рига: Зинатне, 1988. – 388 с.
10. С.Н.Сычев, Н.С. Аксенова, С.С. Криволапов С.С. Адсорбционное модифицирование в жидкостной хроматографии на силикагеле./ Ж. физ. химии, 1986. – Т.59. – № 8 – С. 1996-1998.

Сычев Сергей Николаевич

Орловский государственный технический университет, г. Орёл
Доктор технических наук, профессор кафедры «Химия»
E-mail: chemistry@ostu.ru

Гаврилина Вера Александровна

Орловский государственный технический университет, г. Орёл
Кандидат технических наук, доцент, инженер лаборатории «Жидкостная хроматография»
E-mail: chemistry@ostu.ru

Подмастерьев Константин Валентинович

Орловский государственный технический университет, г. Орёл
Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой "Приборостроение, метрология и сертификация"
Тел. (4862) 419821
E-mail: asms-orel@mail.ru

Пахолкин Евгений Васильевич,

Орловский государственный технический университет, г. Орёл
Кандидат технических наук, доцент кафедры «Приборостроение, метрология и сертификация»
Тел. (4862) 419876,
E-mail: Eugene_P@bk.ru

Пузырев Станислав Алексеевич

Инженер лаборатории «Жидкостная хроматография» Орел ГТУ

Н.Г. БОГДАНОВ, Д.В. КОМОЛОВ

НЕЙРОСЕТЕВОЙ МЕТОД ДИАГНОСТИРОВАНИЯ МУЛЬТИСЕРВИСНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СЕТИ ПРЕДПРИЯТИЯ

Предложен метод использования моделей искусственных нейронных сетей в диагностировании мультисервисных информационных сетей предприятия, с целью обеспечения оперативности определения и прогнозирования их технического состояния.

Ключевые слова: искусственные нейронные сети, диагностирование, прогнозирование.

The artificial neural network applications method in case of enterprise multiservice information network diagnostics is considered in article, purposely to ensure the determination and prediction of technical state efficiency.

Key words: neural network, diagnostics, prediction.

Исследование вопросов диагностирования мультисервисных информационных сетей предприятия (МИСП) с учетом влияния на них условий внешней среды представляет практический интерес.

С точки зрения потребителя наиболее значимой диагностируемой величиной МИСП при заданных требованиях достоверности передаваемых сообщений является скорость передачи битов информации. Именно эта величина определяет не только вид цифровых услуг, предоставляемых МИСП, но и возможность объединять группы различных сообщений в единый цифровой информационный поток (по скоростям). Известно, что передача телефонии по цифровым каналам требует обеспечения скорости передачи без сжатия – 64 кбит/с, а при применении сжатия – 8–32 кбит/с [1]. Для телеконференций требуемая скорость возрастает от 48–64 кбит/с при сжатии до 128 кбит/с для передачи без сжатия. Реализация услуги видеотелефона в формате передачи MPEG-4 (H.320) без сжатия потребует скорости передачи 3,04 Мбит/с. С возрастанием сервиса услуг, предоставляемых МИСП, возрастают и требования к скорости передачи, реализуемой цифровыми сетями.

Степень влияния внешней среды на производительность той или иной линии связи (ЛС) в составе МИСП будет зависеть от рода связи, на котором реализована данная ЛС. В зависимости от конструктивных особенностей построения каналов и систем связи и используемых ими ресурсов (среды распространения волн, частотного диапазона) ЛС можно классифицировать по следующим родам связи [2]: линии спутниковой связи, линии оптоволоконной связи, линии тропосферной связи, линии проводной связи, линии радиосвязи, линии радиорелейной связи. При одних и тех же значениях нежелательных воздействий внешней среды на одно направление МИСП одни ЛС, оставаясь работоспособными в техническом аспекте, значительно снизят свою производительность, а другие сохранят свою производительность на необходимом уровне. В данном случае для обеспечения своевременности предоставляемых услуг абонентам с учетом их приоритета необходимо иметь прогнозную информацию о производительности МИСП как по всем ее направлениям, так и по входящим в них ЛС.

В качестве инструмента, осуществляющего оценку влияния значений внешних воздействий на производительность сети, а также прогнозирующего изменение значений внешних воздействий за время упреждения, предлагается использовать аппарат искусственных нейронных сетей (ИНС).

Возможность использования ИНС для решения данных задач основывается на том, что ИНС, состоящая из двух слоев и имеющая в скрытом слое произвольное большое количество узлов, может аппроксимировать любую функцию действительных чисел с заданной степенью точности [3].

Представим упрощенную модель влияния внешних воздействий на производительность ЛС i -го рода с именами переменных:

E - значение внешнего воздействия в некоторой точке пространства;

R_i - производительность ЛС i -го рода.

Между E и R_i существуют причинные отношения, выраженные функционалом вида:

$$R_i = f_i(E)^{-1},$$

где f_i – функционал для ЛС i -го рода;

значение (-1) означает убывающий характер изменения производительности i -го рода ЛС при возрастании значений внешних воздействий.

В терминах ИНС задача оценки неизвестной функции $f_i(E)^{-1}$ является задачей аппроксимации функции. При этом обучающая выборка представляет собой пары данных входов-выходов ИНС, полученных в единые моменты времени $((E_{it_1}, R_{it_1}), (E_{it_2}, R_{it_2}), \dots, (E_{it_N}, R_{it_N}))$. В результате обучения ИНС на следующем наборе данных искомый функционал будет представлен матрицей синаптических весов ИНС W_{RBF_i} , которую в дальнейшем используют для определения значений производительности ЛС i -го рода, по контролируемым значениям внешних воздействий. В качестве НС, реализующей данную задачу, выбрана ИНС с радиальными базисными элементами RBF (Radial Basis Function Network). Сети RBF имеют возможность моделирования произвольной нелинейной функции с помощью всего лишь одного промежуточного слоя [4].

Физическая природа параметров, применяемых для обучения и дальнейшего использования RBF сетей, в качестве которых выступают измеренные значения величины внешнего воздействия (например: напряженности электромагнитного поля) E и значения пропускной способности отдельной линии связи R_i , показывает, что возможно определить максимальные значения для каждого из этих параметров. Так, для каждой линии одного рода связи пропускная способность определена на интервале значений от 0 до $R_{i_{\max}}$ бит/с. В отношении величины E максимальное граничное значение для ЛС i -го рода определено как значение, при котором пропускная способность ЛС i -го рода принимает нулевое значение, а дальнейшее возможное увеличение E уже не будет влиять на возможность предоставления услуг МИСП, а будет деструктивно воздействовать на технические элементы ЛС. Для каждого рода ЛС с учетом ее технологических аспектов определяется максимальная пропускная способность $R_{i_{\max}}$, а также опытным путем определяется максимальное граничное значение $E_{i_{\max}}$. При помощи данных значений масштабируются текущие пары значений $((E_{it_1}, R_{it_1}), (E_{it_2}, R_{it_2}), \dots, (E_{it_N}, R_{it_N}))$ для каждого i -го рода ЛС к масштабированным значениям $((E_{it_k}^*, R_{it_k}^*), \dots, (E_{it_N}^*, R_{it_N}^*))$ для $k \in [1..N]$.

Для прогнозирования предлагается обучающую выборку задавать дискретными отсчетами, предварительно масштабированными $\{E^*(t), E^*(t-1), \dots, E^*(t-k)\}$ в соответствующие моменты времени, а выходным значением в некоторый будущий момент времени $(t+1)$ будет масштабированное значение $E^*(t+1)$. В качестве прогнозирующей сети используем фокусированную сеть прямого распространения с задержкой по времени (Focused time Lagged Feedforward Network – TLFN) [5], представленную на рисунке 1.

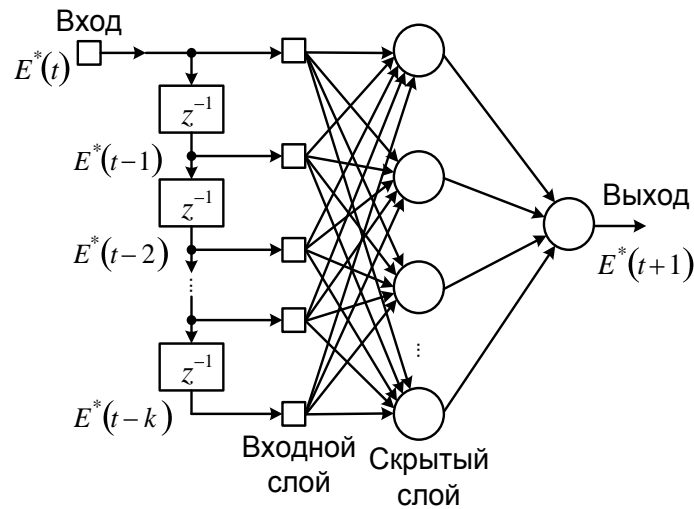


Рисунок 1 – Модель фокусированной сети прямого распространения с задержкой по времени

ИНС TLFN является одношаговой системой прогнозирования, в которой $E^*(t+1)$ содержит желаемый отклик на входной сигнал, состоящий из множества $\{E^*(t-k)\}_{k=0}^k$.

Масштабирование контролируемых значений внешних воздействий $E_i(t)$, необходимо для достижения согласованности в совместной работе обученных ранее НС RBF и TLFN.

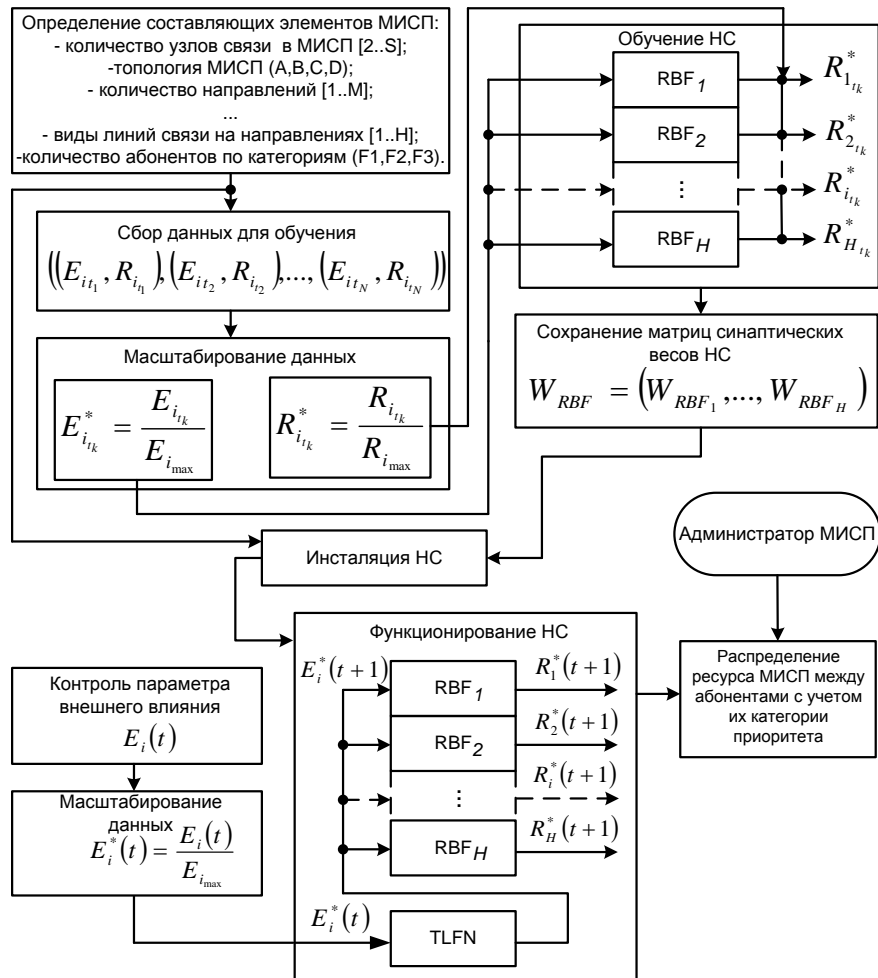


Рисунок 2 – Схема диагностирования МИСП

Предлагаемый метод, схема которого представлена на рисунке 2, позволяет не только оценивать влияние внешних воздействий на техническое состояние и производительность разнородных ЛС в рамках МИСП, но и предоставлять администратору МИСП необходимую прогнозную информацию об имеющемся резерве производительности ко времени прогноза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Убайдуллаев Р. Р. Волоконно-оптические сети. – М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 2000. – 267 с.
2. ГОСТ РВ 52216-2004. Связь военная. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 2004. – 11 с.
3. Комашинский В. И., Смирнов Д. А., Нейронные сети и их применение в системах управления и связи. – М.: Горячая линия - Телеком, 2002. – 94 с.
4. Каллан Роберт. Основные концепции нейронных сетей: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 288 с.
5. Хайкин Саймон. Нейронные сет: полный курс, 2-е издание.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с

Богданов Николай Григорьевич

Академия ФСО России, г. Орел

Кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника кафедры № 7

Тел. (4862) 419947

Комолов Дмитрий Викторович

Орловский государственный технический университет, г. Орел

Соискатель кафедры «Информационные системы»

Тел. (4862) 466713

E-mail: dimkomolov@mail.ru



Станочное оборудование машиностроительного производства: учебник для вузов / А.М. Гаврилин, В.И. Сотников, А.Г. Схиртладзе, Г.А. Харламов. - Орел: Орел ГТУ, 2009. -694 с.: ил.

В учебнике приведена классификация станочного оборудования и его основные технико-экономические показатели. Изложены особенности формообразования поверхностей, кинематической структуры и компоновки станков, их основных узлов и механизмов. Рассмотрены устройство, кинематика и настройка металлорежущих станков всех групп, включая многооперационные станки, станочные модули и станочные системы, а также вопросы эксплуатации станочного оборудования.

Для студентов, магистров, бакалавров машиностроительных специальностей вузов. Может использоваться инженерно-техническими работниками промышленных предприятий.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ УПРОЧНЕНИЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТОВ ПАМЯТИ НАВЕДЕННОЙ МАГНИТНОЙ АНИЗОТРОПИИ

Исследована возможность определения степени упрочнения плоских образцов из стали 65Г на основе эффектов памяти наведенной магнитной анизотропии с помощью аппаратно-программного комплекса для контроля качества ферро- и ферромагнитных материалов.

Ключевые слова: наведенная магнитная анизотропия, степень упрочнения, режимы упрочнения, поверхностное пластическое деформирование.

Investigated the possibility definition of hardening degree flat samples from a steel 65G on the basis of the memory effects induced magnetic anisotropy by means of a hardware-software complex for quality assurance the ferromagnetic materials.

Key words: the induced magnetic anisotropy, hardening degree, hardening modes, superficial plastic deformation.

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшей задачей в авиационной промышленности является контроль степени упрочнения деталей, изготовленных из конструкционных сталей. Изучению возможности неразрушающего контроля степени поверхностного упрочнения электромагнитными и магнитными методами посвящен ряд экспериментальных работ, в частности [1]. В настоящее время в современной промышленности степень упрочнения определяют преимущественно на основе разрушающего метода с использованием алмазной иглы, с помощью которой под определенным усилием измеряют микротвердость (μ) контролируемого образца детали. Подобный метод контроля часто приводит к развитию усталостных трещин в материале, что отрицательно сказывается на качестве производимой продукции.

В этой связи является актуальной проблема поиска объективных неразрушающих методов контроля степени упрочнения металлов. Целью настоящих исследований является экспериментальное исследование возможности неразрушающего экспресс контроля степени наклепа ξ ферромагнитных материалов на основе эффектов памяти наведенной магнитной анизотропии.

ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В работе исследованы образцы из марки конструкционной стали 65Г, химический состав которой следующий: углерод (С) - 0,67 %, кремний (Si) – 0,25 %, медь (Cu) – 0,15 %, марганец (Mn) – 1 %, никель (Ni) – 0,2 %, фосфор (P) – 0,025 %.

Упрочнение плоских образцов из стали 65Г с размерами рабочей части $l \times b \times c = 75 \times 8 \times 1$ мм осуществляли дробеструйным способом стальными и стеклянными микрошариками при давлении P от 0,3 до 0,6 МПа в течение времени $t = 60$ с. Таким образом, были получены образцы с различной степенью упрочнения.

Перед проведением экспериментов образцы приводились в исходное размагниченное состояние переменным синусоидальным магнитным полем с амплитудой 40 кА/м. Измерение эффектов памяти наведенной магнитной анизотропии осуществляли при воздействии переменного синусоидального магнитного поля с амплитудой до 120 А/м и частотой 80 Гц. Измеряемой величиной является сигнал ЭДС $f(h)$, поступающий от образца при его намагничивании переменным полем.

Ранее проведенные исследования показали, что наиболее четко на эффекты памяти наведенной магнитной анизотропии реагируют третья и особенно пятая гармоники сигнала вторичной ЭДС [3], поэтому в качестве исследуемого параметра было выбрано отношение $f(h) = A_3 / A_5$ [4].

Измерение степени наклепа ξ исследуемых образцов выполнено разрушающим методом на установке ПМТ-3 при нагрузке 0,5 Н. Результаты измерений представлены на рисунке 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты зависимости отношения $f(h) = A_3 / A_5$ сигнала вторичной ЭДС от напряженности h , переменного магнитного поля для одного из плоских образцов из марки стали 65Г в исходном состоянии и после упрочнения при давлении $P = 0,3$ МПа были получены с помощью аппаратно-программного комплекса для контроля качества ферро- и ферромагнитных материалов [5] и представлены на рисунках 2 и 3 соответственно.

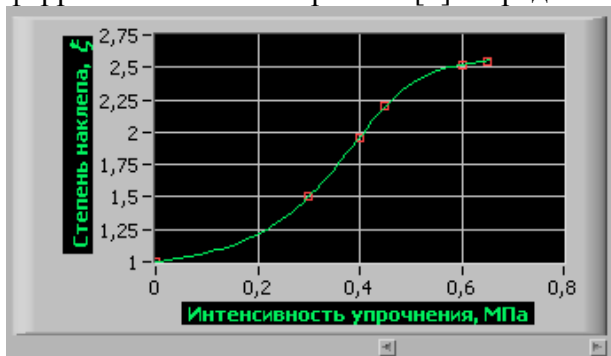


Рисунок 1 – Зависимость степени наклепа образцов из стали 65Г (ξ) от режимов упрочнения после обработки дробеструйным методом ППД

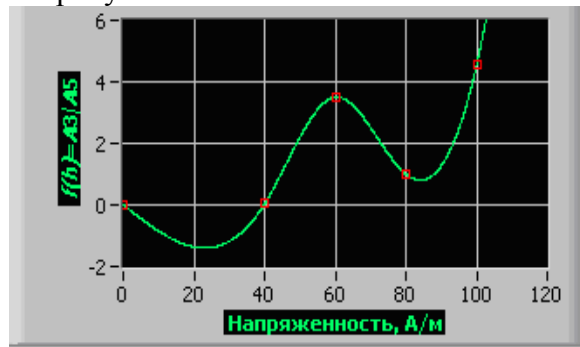


Рисунок 2 – График зависимости отношения $f(h) = A_3 / A_5$ от напряженности переменного поля до упрочнения

На графиках отчетливо видно, что амплитуда локального максимума, наблюдаемого в области 60 А/м, характерная для исходного не упрочненного состояния образца, существенно уменьшается после его упрочнения. При увеличении интенсивности упрочнения материала до $P = 0,6$ МПа этот локальный максимум становится минимумом, что отображает рисунок 4. Это объясняется тем, что гармоника A_3 практически не изменилась в исходном и упрочненном состоянии, а A_5 после упрочнения материала возросла.

На каждом образце измерения проводились не менее 10 раз, полученные экспериментальные данные усреднялись. По усредненным результатам получена общая зависимость величины отношения $f(h) = A_3 / A_5$ от различных режимов упрочнения, которая приведена на рисунке 5. Все графики строились путем компьютерной интерполяции результатов.

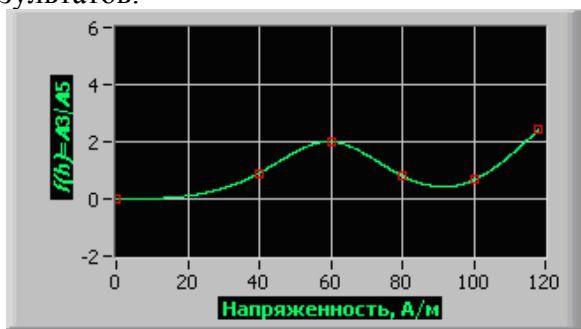


Рисунок 3 – График зависимости отношения $f(h) = A_3 / A_5$ от напряженности переменного поля после упрочнения при давлении 0,3 МПа

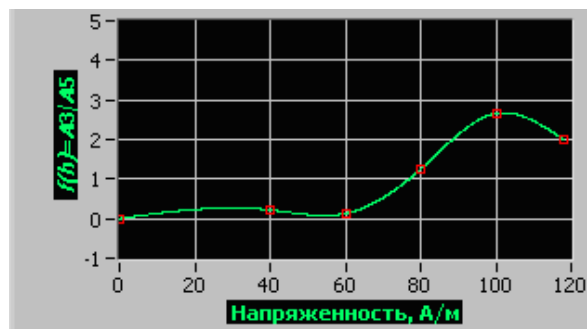


Рисунок 4 – График зависимости отношения $f(h) = A_3 / A_5$ от напряженности переменного поля после упрочнения при давлении 0,6 МПа

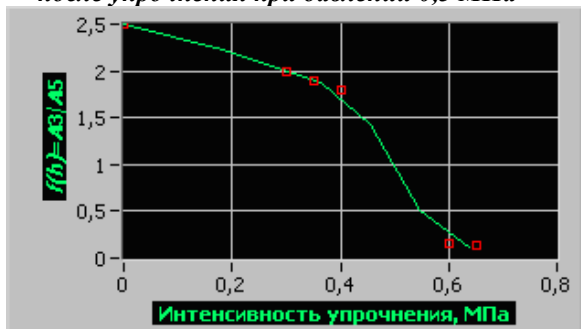


Рисунок 5 – График усредненной зависимости $f(h) = A_3 / A_5$ после упрочнения микрошариками

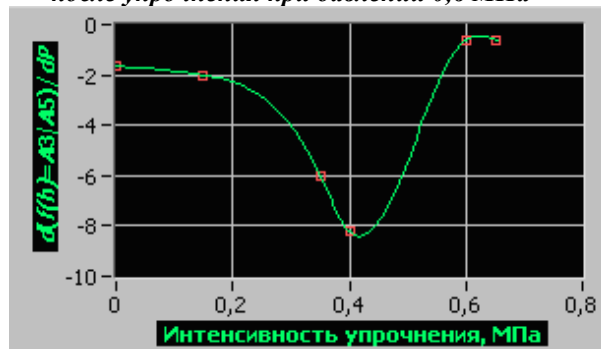


Рисунок 6 – График дифференциальной зависимости $f(h) = A_3 / A_5$ после упрочнения микрошариками

Нормальный наклеп получается при режиме упрочнения 0,4 – 0,55 МПа. При режиме до 0,4 МПа происходит недонаклеп, а выше – перенаклеп образцов. Чтобы выделить область, соответствующую норме, продифференцируем отношение $f(h) = A_3 / A_5$ по давлению P . Результат дифференцирования представлен на рис. 6. Из этого графика видно, что нормальному наклепу соответствует область резкого падения (изменения) производной $d(f(h) = A_3 / A_5) / dP$.

На рисунке 7 представлен итоговый график зависимости измеряемого параметра $f(h) = A_3 / A_5$ от степени упрочнения.

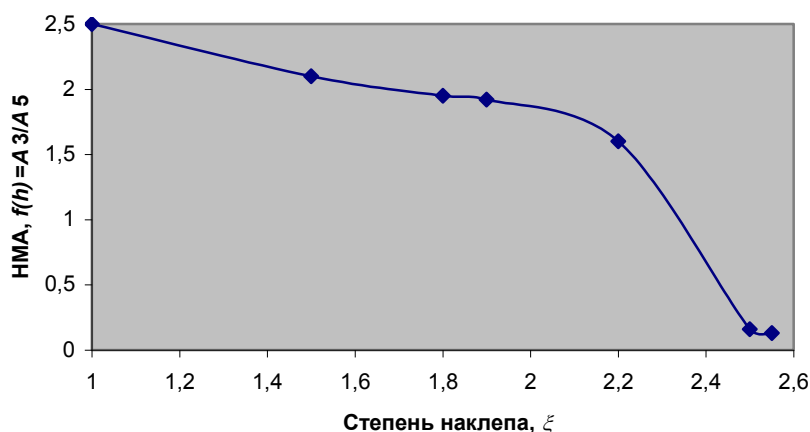


Рисунок 7 – Итоговый график зависимости величины $f(h) = A_3 / A_5$ от степени упрочнения ξ

ВЫВОДЫ

1. Эффекты памяти НМА могут быть использованы для неразрушающего экспресс контроля степени наклепа при упрочнении методом поверхностного пластического деформирования путем анализа отношения $f(h) = A_3 / A_5$.
2. Зависимость отношения высших гармоник сигнала ЭДС упрочненного образца $f(h) = A_3 / A_5$ от степени наклепа имеет ярко выраженный нисходящий характер.
3. При увеличении степени упрочнения материала величина эффектов памяти наведенной магнитной анизотропии уменьшается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gardner C.G., Matzkanion G.A., Davidson D.L. The influence of mechanical stress on magnetisation process and Barkhausen jumps in ferromagnetic materials. Int. J. NDT. – 1971. – vol. 3, – № 2. – P. 131 – 135.
2. Ломаев Г.В. Эффект Баркгаузена и его использование в технике контроля и измерения. Ижевск: ИМИ, 1984. – 88 с.
3. Вечфинский В.С., Соловьева С.С., Федин В.В. Эффекты памяти наведенной магнитной анизотропии. М: Изв. вузов. Физика, 2007. – № 3. – С. 41 – 46.
4. Вечфинский В.С., Филин С.И. Исследование наведенной магнитной анизотропии многодоменных титаномagnetитов по высшим гармоникам частных петель магнитного гистерезиса. – М.: ИФЗ АН СССР, 1986. – С. 136 – 144.
5. Федин В.В. Аппаратно-программный комплекс для автоматизации контроля качества ферромагнитных материалов. Тверь: Программные продукты и системы, 2009. – №(85). – С. 96 – 98.

Федин Виктор Викторович
 ОАО «НПО «Сатурн», г. Рыбинск
 Ведущий инженер ОАСУТП
 Тел. (4855) 29-65-71
 E-mail:Fedin.Viktor@mail.ru

УДК 621.1

Г.И. УТКИН, В.В. ЧКАН, В.В. МАРКОВ

ПОКАЗАТЕЛИ НАЗНАЧЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЕДИНИТЕЛЕЙ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ КОНТАКТОВ

Сформулирована актуальность проблемы повышения качества разъёмных электрических соединителей. Сделан обзор стандартных показателей назначения соединителей, среди которых отмечены и проанализированы показатели, характеризующие техническое состояние контактов. Выводы содержат информацию о направлениях улучшения методов контроля состояния контактов соединителя во всех режимах работы.

Ключевые слова: электрический соединитель; коммутация; контакт; трение; износ; электрическая цепь; методы неразрушающего контроля; показатель назначения; качество.

The actual problem of increase the quality of electrical connections is formulated. Is make the survey of standard indexes of fixing the connections, among which is marked and is study the indexes, is characterizing the technical condition of contacts. The conclusion is containing the information about the directions of improvement the method of control the technical condition of contacts the connection in the all regimes of working this technical objects.

Key words: electrical connection; commutation; contact; friction; wear; electrical chain; methods of non-destruction control; index of fixing; quality.

Актуальность проблемы и цель работы

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 проблемой.

В соответствии с современной терминологией, электрический соединитель – это электромеханическое устройство, обеспечивающее электрическое и механическое соединение двух блоков электрической или электронной аппаратуры [1, 2].

Основными элементами электрического соединителя являются: контакты-детали, изоляторы, корпусные детали, зажимные элементы и некоторые дополнительные детали для защиты контактов от воздействия окружающей среды. Изоляторы предназначены для электрического изолирования контактов, для закрепления контактов и передачи им механической силы при сочленении или расчленении. *По конструктивным особенностям и форме изолятора соединители подразделяются на цилиндрические и прямоугольные.* Корпус соединителя обеспечивает установку изоляторов, защиту контактов и изоляторов от повреждений, крепление проводника (жгута или кабеля) к соединителю и взаимную ориентацию ответных частей соединителя. *Основным функциональным элементом соединителя является контактная пара, которая обычно состоит из гнезда и штыря.* Электрическая коммутация в соединителе осуществляется соприкосновением поверхностей штыря и гнезда при заданной силе нажатия, создаваемой упругим элементом, которым может быть и штырь, и гнездо [1].

В настоящее время известно, что электрические контакты в процессе работы могут находиться в одном из четырёх возможных режимов: разомкнутое состояние, момент замыкания, замкнутое состояние, момент размыкания. При более подробном изучении

особенностей работы контактов можно выделить большее количество режимов: разомкнутое состояние перед замыканием, момент замыкания, переходной процесс от момента замыкания до полного замкнутого состояния, замкнутое состояние, переходной процесс от полного замкнутого состояния до момента размыкания, момент размыкания, разомкнутое состояние после размыкания. Каждый из перечисленных режимов работы имеет свои особенности, учёт которых позволяет получить полное представление об изменении показателей назначения контактов и соединителя целом в процессе эксплуатации. *Целью данной работы* является анализ стандартных показателей назначения разъёмного электрического соединителя для выяснения вопроса о том, насколько полно они учитывают возможные режимы работы контактов.

Обзор стандартных показателей назначения электрических соединителей

Приступая к обзору показателей назначения электрических соединителей, необходимо ввести *ограничения*. В работе сделан обзор показателей назначения низкочастотных низковольтных соединителей, показатели качества которых установлены ГОСТ 23784-98. На основании этого межгосударственного стандарта выполнена классификация показателей назначения низкочастотных низковольтных соединителей, показанная на рисунке 1.

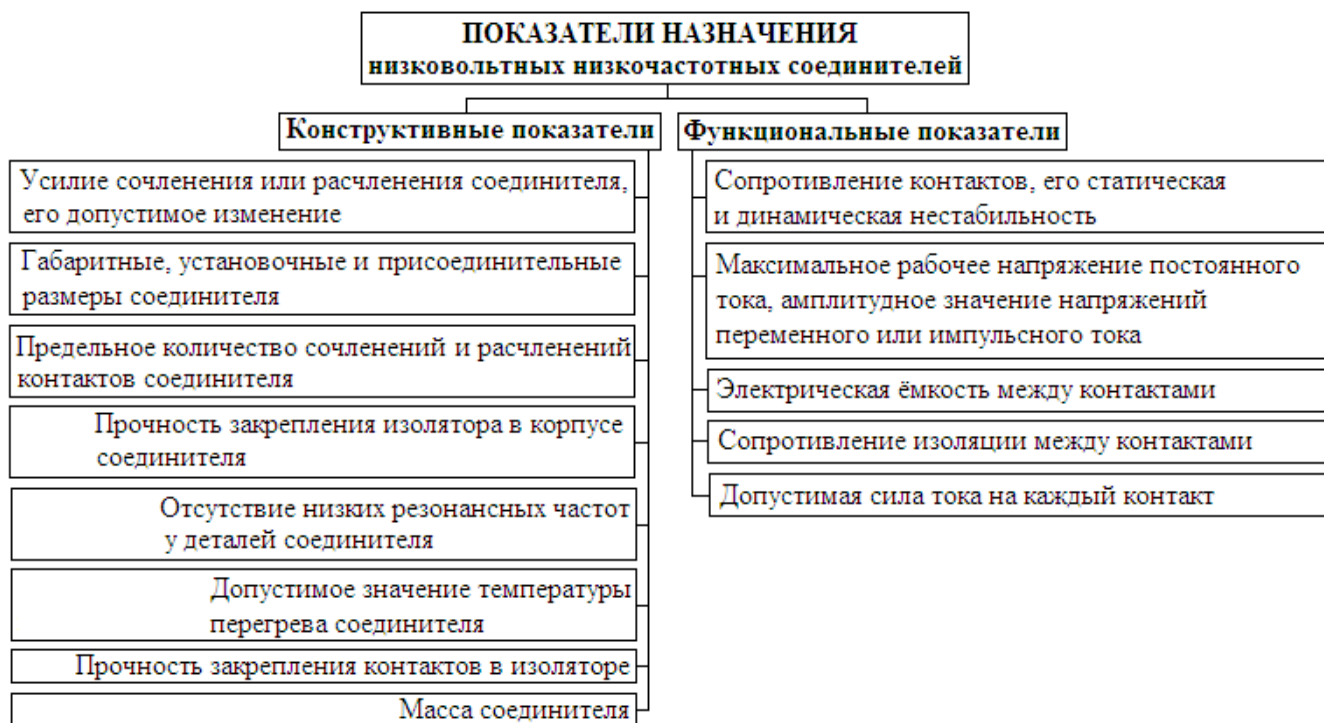


Рисунок 1 – Классификация показателей назначения соединителей

В группе конструктивных показателей назначения соединителей техническое состояние контактов характеризует силу сочленения или расчленения контактов, а также допустимое значение температуры их перегрева. Особенно важным показателем является сила сочленения или расчленения, так как её надо знать для определения других конструктивных показателей соединителя, таких, как прочность закрепления контактов в изоляторе и прочность закрепления изолятора в корпусе соединителя. Крепление контакта в изоляторе должно выдерживать силу не меньшую десятикратной минимальной силы расчленения контактов; крепление изолятора в корпусе соединителя должно выдерживать силу в осевом направлении не меньшую десятикратной максимальной силы расчленения [3]. Важным показателем назначения контактов является также отсутствие у них низких резонансных частот.

В группе функциональных показателей назначения соединителей техническое состояние контактов характеризует сопротивление контактов и допустимая сила тока на каждый контакт. Максимальное рабочее напряжение также является важным показателем, но

обычно напряжение в коммутируемой электрической цепи известно и относительно стабильно, а сила тока в значительной степени зависит от сопротивления контактов. Особенно важным показателем является сопротивление контактов; стандарт [3] содержит требования не только к значению сопротивления, но также к его нестабильности и неизменности во времени.

Анализ показателей назначения контактов соединителей

Техническое состояние разъёмных электрических соединителей характеризуется многими показателями (ГОСТ 23784-98), среди которых необходимо отметить показатели, характеризующие техническое состояние контактов: сопротивление контакта, его статическая и динамическая нестабильность; допустимое значение силы тока; температура перегрева контактов; сила сочленения и расчленения контактов. Рассмотрим известные стандартные методы определения указанных показателей [1-4].

Переходное сопротивление контакта. По теории электрического контактирования, переходное сопротивление контакта $R_{пер}$ складывается из сопротивления стягивания $R_{ст}$ линий электрического тока к проводящим участкам контактирующих поверхностей, сопротивления поверхностных плёнок $R_{пл}$, и сопротивления токоведущих материалов $R_{м}$, находящихся между точками соединения хвостовиков электрических контактов с проводниками [1]:

$$R_{пер} = R_{ст} + R_{пл} + R_{м}. \quad (1)$$

Не углубляясь в теорию электрического контактирования, отметим, что известны эмпирические формулы для подсчёта значения переходного сопротивления контакта в электрических соединителях [1]. Приближённая формула для $R_{пер}$ имеет следующий вид:

$$R_{пер} = \frac{c \cdot \rho \cdot \sqrt{H_B}}{P_k^b}, \quad (2)$$

где c – коэффициент, зависящий от чистоты и состояния поверхности (для относительно чистых поверхностей, с наибольшей высотой микронеровностей $h_m = 3,2 \dots 0,8$ мкм коэффициент $c = 1$; для грубо обработанных поверхностей с $h_m = 10 \dots 20$ мкм коэффициент $c = 2$);

ρ – удельное электрическое сопротивление поверхности контактов, Ом·см;

H_B – твёрдость поверхности контактов по Бринеллю, НВ или кгс/мм²;

P_k – сила контактного нажатия, кгс (для перевода в ньютоны надо умножить на 9,81);

b – показатель степени, зависящий от характера деформации, вида и формы зоны контактирования (при нагрузке ниже предела упругости $b = 0,33$; при нагрузке выше предела упругости $b = 0,5$; при контактировании по плоскости $b = 2$).

Кроме зависимости (2) справочник [1] содержит эмпирическую формулу, позволяющую произвести наиболее точный расчёт переходного сопротивления чистых контактов:

$$R_{пер} = \frac{c \cdot \rho}{2} \cdot \left(\frac{r \cdot h_m}{A_k^2} \right)^{\left[\frac{1}{2 \cdot v} + 1 \right]} \cdot \left(\frac{E}{P_k} \right)^{[4 \cdot v^2 - 1]}, \quad (3)$$

где A_k – кажущаяся (номинальная) площадь контакта, мм²;

r – радиус выступов микронеровностей поверхностей контактов, мм;

h_m – наибольшая высота микронеровностей поверхностей контактов, мм;

v и E – соответственно, коэффициент Пуассона и модуль упругости растяжения, кгс/мм².

В формулах (2) и (3) силу контактного нажатия P_k определяют по формуле:

$$P_k = F_{рс} / f, \quad (4)$$

где $F_{рс}$ – сила расчленения контактной пары, Н;

f – коэффициент трения.

Учитывая заданные начальные условия (серебряное покрытие поверхностей контактов), укажем значения справочных данных, необходимых для подсчёта $R_{пер}$ по обеим формулам: $\rho = 16 \text{ мкОм} \cdot \text{мм}$ ($16 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{см}$); $H_B = 25 \text{ кгс/мм}^2$ (0,25 ГПа); $E = 7700 \text{ кгс/мм}^2$ (77 ГПа).

Переходное сопротивление контакта в соединителях зависит от шероховатости контактирующих поверхностей. После каждого сочленения и расчленения контактной пары шероховатость обеих контактирующих поверхностей изменяется. Показатель, который характеризует разброс значений переходного сопротивления контактной пары при многократных замыканиях, называется *статической нестабильностью* переходного сопротивления электрического контакта, определяемой как среднеквадратическое отклонение значения $R_{пер}$.

Динамическая нестабильность переходного сопротивления контакта – это показатель, характеризующий относительное изменение $R_{пер}$ в процессе эксплуатации электрического соединителя, возникающее при колебаниях контактов относительно друг друга из-за различных механических воздействий (вибрация, удары, резонансы частей аппаратуры). Динамическую нестабильность нормируют в процентах от номинального значения $R_{пер}$ [1].

Измерение переходного сопротивления контакта в электрических соединителях, его статической и динамической нестабильности осуществляется по стандартной методике, изложенной в ГОСТ 24606.3-82. Измерения всех указанных параметров выполняется в статическом режиме, причём в стандарте отмечено, что «во время измерения не допускается размыкание контактов и перемещение присоединительных проводов» [2].

Анализ методики выполнения измерений $R_{пер}$ и его нестабильности показывает, что стандартные методы определения этих показателей не учитывают возможность значительного изменения сопротивления контактной пары при сочленении или расчленении контактов.

Допустимое значение силы тока. Наибольшее значение силы тока, приходящееся на одну контактную пару, или «рабочий ток на контакт», также является важным показателем соединителя. Согласно работе [1], значение рабочего тока определяется по формуле:

$$I_p = J \cdot A_c \cdot k_{п} \cdot k_3 \cdot k_d, \quad (5)$$

где J – максимальная допустимая плотность постоянного тока, проходящего по контакту, А/мм^2 ;

A_c – площадь наименьшего сечения в контактной паре, мм^2 ;

$k_{п}$ – коэффициент, учитывающий влияние частоты электрического тока (для постоянного тока $k_{п} = 10$);

k_3 – коэффициент запаса, определяемый влиянием температуры, токовой перегрузкой и режимами охлаждения (устанавливается для каждой конструкции соединителя);

k_d – коэффициент, учитывающий влияние допусков на поперечные размеры наименьшего сечения контактной пары ($k_d = 1 \dots 1,3$)

При эксплуатации электрических соединителей, содержащих много контактных пар, часто не все контакты равномерно нагружены рабочим током. Электрическая нагрузка на отдельные контактные пары может превосходить наибольшее значение рабочего тока, а другие контакты могут функционировать при меньшей нагрузке. Поэтому в технических условиях на конкретный соединитель обычно указывается максимальный ток I_{max} на одиночный контакт при 10%-ной нагрузке остальных контактов и при температуре перегрева контактов, равной 323 К (50 °С) [1]. Например, для цилиндрического контакта, изготовленного из медных сплавов, с диаметром штыря 3,5 мм и площадью поперечного сечения 14 мм^2 $I_{max} = 69 \text{ А}$. Для подобного контакта с диаметром штыря 3,0 мм и площадью сечения 8,0 мм^2 $I_{max} = 56 \text{ А}$.

Если температура перегрева контактов отличается от 323 К (50 °С), то для определения I_{max} используют следующую формулу:

$$I_{max} = I_{max0} \cdot \sqrt{\Delta t_2 / \Delta t_1}, \quad (6)$$

где I_{max0} – значение тока при $\Delta t_1 = 323$ К, А;

Δt_2 – значение температуры перегрева контактов, установленное в технических характеристиках на данный тип соединителя, К.

Анализ формул (5) и (6) показывает, что, задавшись типом и размерами контактов, можно определить для них максимальную допускаемую плотность тока, а затем сопоставить с ним реальное значение плотности тока в процессе сочленения и расчленения контактной пары. Информация о существовании каких-либо норм превышения плотности электрического тока при коммутации контактов над допустимой плотностью тока пока неизвестна.

Температура перегрева контактов. Температурой перегрева контактов называется разность температур Δt , определяемая по следующей формуле [1, 4]:

$$\Delta t = t - t_{окр}, \quad (7)$$

где t – суммарное значение температуры при работе контактов, К;

$t_{окр}$ – значение температуры среды, окружающей работающий соединитель, К.

При работе соединителя суммарная температура t не должна превышать допускаемую рабочую температуру применяемых материалов [1]. На основании проведённых исследований Международная электротехническая комиссия (МЭК) установила, что для серебряных и серебросодержащих покрытий контактов в воздухе допускаемая рабочая температура ограничивается только теплостойкостью изоляционных и пружинных частей соединителя. Основанием для этого решения послужило явление разрушения окислов серебра с увеличением температуры, приводящее к уменьшению переходного сопротивления контакта [5]. Однако рабочую температуру контактов с серебряным покрытием необходимо ограничивать температурой размягчения серебра (423 К или 150 °С [6]), так как при большей температуре резко возрастает коэффициент трения и ускоряется износ контактов при их коммутации.

Стандартную методику выполнения измерений Δt устанавливает ГОСТ 24606.4-83 [4]. Для измерения температуры перегрева контактов от проходящего через них тока необходимо определить разность температуры окружающей среды и температуры поверхности контакта соединителя в наиболее нагретой точке при непрерывном пропускании через контакты тока, установленного для данного типа соединителя [4].

Измерения параметра Δt проводят следующим образом. В соединителе выбирают контакты, работающие в наиболее тяжёлых условиях с точки зрения теплового режима. К хвостовикам выбранных контактов припаивают термодпары «медь – константан» диаметром не более 0,6 мм, а сами контакты соединяют с проводами с площадью сечения не менее площади сечения контакта в отдельную последовательную цепь. Через каждый контакт соединителя в течение 3 ч пропускают ток установленного значения. При достижении теплового равновесия измеряют температуру контакта в наиболее нагретой точке. Измеряют температуру окружающей среды до и после нагружения соединителя электрическим током. Температуру перегрева контактов подсчитывают по формуле (7), в которую в качестве параметра $t_{окр}$ подставляют значение температуры окружающей среды после испытания, а в качестве параметра t – среднее арифметическое значение температуры соединителя, подсчитанное по результатам трёх измерений, проведённых с интервалом 5 мин.

Анализируя стандартную методику измерения температуры перегрева контактов соединителя, отметим, что с помощью данной методики не представляется возможным определить температуру при коммутации контактной пары.

Сила сочленения и расчленения контактов. Этот показатель назначения контактов является одним из основных конструктивных показателей электрического соединителя. Допустимое значение силы сочленения и расчленения контактов зависит от типа соединителя; например, для низковольтных прямоугольных электрических соединителей оно принято равным 0,3 Н (30 гс). Метод определения фактического значения этого показателя заключается в сочленении гнезда соединителя с контрольным штырём-калибром, оснащённым грузом, создающим силу тяжести, соответствующую формуле (4). Гнездо

соединителя должно удерживать контрольный штырь-калибр с грузом заданной массы. Измерение переходного сопротивления контактов при определении силы сочленения и расчленения контактов не проводится, поэтому его фактическое значение в период испытания остаётся неизвестным.

Отсутствие нижних резонансных частот. Важным показателем назначения контактов электрического соединителя является отсутствие у них низких резонансных частот. По ГОСТ 23784-98 нижнее значение резонансной частоты контакта должно быть более 40 Гц.

Выводы

К показателям назначения разъёмных электрических соединителей, характеризующих техническое состояние контактов, относятся: сила сочленения и расчленения контактов, отсутствие у контактов низких резонансных частот (до 40 Гц), температура перегрева контактов, допустимое значение силы тока, сопротивление контакта и его нестабильность.

Стандартные методы определения показателей назначения разъёмных электрических соединителей, характеризующих техническое состояние контактов, позволяют оценить значения данных показателей только в одном режиме работы соединителей – при полностью замкнутых и электрически нагруженных контактах. Техническое состояние контактов в других режимах работы электрических соединителей, которые могут оказаться более жёсткими, не подвергается оценке при стандартных функциональных испытаниях этих объектов.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Лярский, В.Ф. Электрические соединители [Текст]: Справочник / В.Ф. Лярский, О.Б. Мурадян. – М.: Радио и связь, 1988. – 272 с.
- 2 ГОСТ 24606.3-82. Изделия коммутационные, установочные и соединители электрические. Методы измерения сопротивления контакта и динамической и статической нестабильности переходного сопротивления контакта. – М.: Издательство стандартов, 1982. – 10 с.
- 3 ГОСТ 23784-98. Соединители низкочастотные низковольтные и комбинированные. Общие технические условия. – Минск: Издательство стандартов, 1998. – 37 с.
- 4 ГОСТ 24606.4-83. Изделия коммутационные, установочные и соединители электрические. Методы определения допустимой токовой нагрузки. – М.: Издательство стандартов, 1983. – 15 с.
- 5 Сафонов, Л.А. Электрические прямоугольные соединители. Оптимизация тепловых режимов соединителей [Текст] / Л.А. Сафонов, А.Н. Сафонов // Компоненты и технологии. – 2008. – № 2. – С. 41-46.
- 6 Мышкин, Н.К. Электрические контакты [Текст] / Н.К. Мышкин, В.В. Кончиц, М. Браунович. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2008. – 560 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

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

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

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) выравнивают 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.

Плата с аспирантов за опубликование статей не взимается.

Адрес учредителя:

Орловский государственный технический университет
302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29
(4862) 43-48-90
www.ostu.ru
E-mail: nmu@ostu.ru

Технический редактор О.Ю. Григорьева
Компьютерная верстка О.Ю. Григорьева

Подписано в печать 21.12.2009 г.
Формат 60x88 1/8. Усл. печ. л. 7,5.
Тираж 600 экз.
Заказ № _____

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе ОрелГТУ
302030, г. Орел, ул. Московская, 65.