

70-ЛЕТИЮ ВЕЛИКОЙ ПОБЕДЫ ПОСВЯЩАЕТСЯ



ИВАНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

**ЭЛЕКТРОМЕХАНОТРОНИКА  
И УПРАВЛЕНИЕ**

**ЭНЕРГИЯ-2015**

**ДЕСЯТАЯ  
МЕЖДУНАРОДНАЯ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ  
И МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ**

**21-23 апреля 2015 г.  
г. Иваново**

**ТОМ 4**

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Ивановский государственный энергетический  
университет имени В.И. Ленина»  
Объединенный институт высоких температур Российской Академии Наук  
Российский национальный комитет СИГРЭ (Молодежная секция)  
Академия электротехнических наук РФ

---

**ЭЛЕКТРОМЕХАНОТРОНИКА  
И УПРАВЛЕНИЕ  
«ЭНЕРГИЯ-2015»**

**ДЕСЯТАЯ  
МЕЖДУНАРОДНАЯ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ  
И МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ**

**г. Иваново, 21-23 апреля 2015 года**

**МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ**

**ТОМ 4**

---

ИВАНОВО

ИГЭУ

2015

УДК 62-1; 62-5; 621

ББК 30.1; 30.2-5-05; 34.5

**ЭЛЕКТРОМЕХАНОТРОНИКА И УПРАВЛЕНИЕ** // Десятая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2015»: Материалы конференции. В 7 т. Т. 4 – Иваново: ФГБОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2015. – 300 с.

**ISBN 978-5-00062-071-7**

**ISBN 978-5-00062-074-8 (Т. 4)**

Доклады студентов, аспирантов и молодых учёных, помещенные в сборник материалов конференции, отражают основные направления научной деятельности в области электромеханотроники и управления.

Сборник предназначен для студентов, аспирантов и преподавателей вузов, интересующихся вопросами математического моделирования и информационных технологий.

Тексты докладов представлены авторами в виде файлов, сверстаны и при необходимости сокращены. Авторская редакция сохранена, за исключением наиболее грубых ошибок оформления.

## **ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ**

**Председатель оргкомитета: ТЮТИКОВ В.В.**, проректор по научной работе.

**Зам. председателя:** Макаров А.В., начальник управления НИРС и ТМ.

**Члены научного комитета:** Плетников С.Б. – декан ТЭФ; Андрианов С.Г. – декан ИФФ; Сорокин А.Ф. – декан ЭЭФ; Егоров В.Н. – декан ЭМФ; Кокин В.М. – декан ИВТФ; Карякин А.М. – декан ФЭУ; Гофман А.В. – рук. МС РНК СИГРЭ; Попель О.С. – заведующий лабораторией ОИВТ РАН.

**Ответственный секретарь:** Ведерникова И.И. – отв. за НИРС ЭМФ.

**Секретарь:** Вольман М.А. – ассистент кафедры АЭС.

**Координационная группа:** Смирнов Н.Н., Иванова О.Е., Ильченко А.Г., Маршалов Е.Д., Филатова Г.А.

# ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

## СЕКЦИЯ 20

### АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Председатель – к.т.н., доцент **Чистосердов В.Л.**

Секретарь – старший преподаватель **Репин А.А.**

*Я. А. Шмарин, аспирант; рук. В. Л. Кодкин, д.т.н., проф.  
ЮУрГУ, г. Челябинск*

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНОГО УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) по ряду показателей [1, 2] – объем на единицу мощности, КПД, динамические характеристики - имеют преимущества перед асинхронными двигателями и коллекторными двигателями постоянного тока. Кроме этого, современная мировая конъюнктура рынка редкоземельных металлов способствует снижению себестоимости производства постоянных магнитов и, соответственно, себестоимости СДПМ, что повышает экономическую целесообразность их применения в промышленности. Стоит отметить, что диапазон мощностей СДПМ (от 1 до 700 кВт [3]) охватывает практически все сферы народного хозяйства – от космической отрасли до электротранспорта.

Наиболее распространенным среди отечественных производителей структурой управления СДПМ является система электропривода с электронным коммутатором и датчиком положения ротора. Надежность указанных систем электропривода относительно асинхронных электроприводов характеризуется не лучшим образом. С одной стороны, это связано с наличием датчика угла положения ротора, а с другой – низким количеством выпускаемых партий электронных коммутаторов, что, к тому же, повышает их себестоимость. Отрицательной стороной применения электронных коммутаторов можно отметить и

наличие значительных пульсаций на низких скоростях, что вызывает дополнительные потери и нивелирует преимущество СДПМ в КПД.

Описанные выше недостатки систем электропривода с электронным коммутатором, а также принцип действия СДПМ [4], вызывают особый интерес к построению систем электропривода с применением преобразователя частоты (ПЧ). Несмотря на возможные преимущества, система электропривода с ПЧ имеет ряд особенностей:

- возможное выпадение из синхронизма при высоких нагрузках;
- стандартные алгоритмы управления СДПМ рассчитаны на синусоидальную ЭДС ротора.

С целью изучения описанных выше особенностей были проведены экспериментальные исследования особенностей работы электропривода, включающего синхронный электродвигатель с возбуждением от постоянных магнитов установленный на роторе ЭДБН-25 (600 В, 25 кВт, 6000 об/мин), разработанный ОАО «НПО «Электромашина» г. Челябинск, питаемый от стандартного промышленного ПЧН *Schneider Electric ATV71*.

В программе испытаний изучались статические и динамические режимы работы. При исследовании статических режимов снимались характеристики работы электропривода (ток, напряжение двигателя, уровень пульсаций, скорость вращения ротора) при различных нагрузках на валу двигателя и различных заданиях частоты вращения. Динамические режимы работы исследовались путем наброса и сброса нагрузки. Выходные координаты электропривода регистрировались с помощью системы прямого измерения скорости и механического момента.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- электропривод СДПМ с ПЧ, несмотря на несинусоидальный магнитный поток, создаваемый ротором, качественно управляется стандартным преобразователем частоты, обеспечивая диапазон регулирования скорости от 100 до 3000 об/мин;
- наблюдается возможность оптимизация базовых параметров частоты и амплитуды напряжения, подаваемого на статор двигателя, позволяющая существенно улучшить перегрузочную способность, уменьшая статорные токи в 2-3 раза;
- при набросе нагрузки (до номинального момента электродвигателя) не происходит выпадения из синхронизма, а динамическая ошибка по скорости составляет не более одного - двух процентов при скорости вращения от 100 до 3000 об/мин, что существенно лучше, двигателей постоянного тока или вентильного двигателя с позиционным электронным коммутатором;

- КПД в приводе с ПЧ на 1-2% выше, чем при работе электродвигателя с позиционным коммутатором.

#### Библиографический список

1. **Зиннер Л.Я.**, Скороспешкин А.И. Вентильные двигатели постоянного и переменного тока. – М.: Энергоиздат, 1981. 136 с.;
2. <http://www.controleng.com/>;
3. <http://www.orionmotor.narod.ru/privod2.htm>;
4. **Вольдек А.И.** Электрические машины переменного тока: Учебник для вузов / А.И. Вольдек, В.В. Попов – СПб: Питер, 2008. – 350 с.: ил.

*В. А. Замков, И. Ю. Баганов, студенты;  
рук. С. К. Лебедев, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## АСТАТИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ ПОЛОЖЕНИЯ СИСТЕМ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАТРОННЫХ МОДУЛЕЙ

Обеспечить технологическое оборудование конкурентоспособными характеристиками позволяют электромехатронные модули с асинхронными, синхронными двигателями переменного тока и преобразователями частоты.

Системы позиционирования реализуют изменение пространственного положения исполнительных органов технологических установок, перемещения из одного фиксированного положения в другое заданное положение. Применение электромехатронных модулей позиционирования: от запорных, дозирующих и регулирующих аппаратов трубопроводных систем в энергетике, нефтегазовой отрасли, жилищно-коммунальном хозяйстве до космических и оборонных технологий.

В одних случаях модули позиционирования применяют в составе оборудования в качестве единичных экземпляров, в других – оборудование содержит большое количество однотипных модулей. При этом различают случаи:

- модули позиционирования работают в составе оборудования автономно;
- работа модулей позиционирования взаимосвязана.

Наиболее широко используют электромехатронные модули позиционирования в станкостроении и робототехнике, то есть в отраслях, являющихся ключевыми. как в Российской Федерации, так и во всем

мире. Здесь основное влияние на характеристики каждого электрометрического модуля позиционирования оси станка или звена манипулятора оказывают кинематические и динамические связи в виде переменных нагрузок сложной формы, поэтому тематика, связанная с разработкой и исследованием систем позиционирования, является востребованной и актуальной.

Рассматриваются варианты построения регулятора положения, реализующие астатические системы позиционирования:

- пропорционально-интегрально-дифференциальные регуляторы положения;
- пропорционально-интегрально-дифференциальные регуляторы положения с реальным дифференцированием;
- пропорционально-интегрально-дифференциальные регуляторы положения с двойным интегрированием;
- пропорционально-интегрально-дифференциальные регуляторы положения с двойным интегрированием и реальным дифференцированием.

Такие системы применяют в составе систем комбинированного управления с компенсацией возмущений, но могут они работать и самостоятельно в силу высокой эффективности снижения ошибки регулирования при действии возмущения.

Для вариантов регуляторов с астатизмом 1-го и 2-го порядка, получены соотношения, позволяющие выполнить инженерный расчет основных элементов системы позиционирования со статическими регуляторами положения при настройке динамики на стандартное распределение корней характеристического уравнения по Бесселю. Выполнен теоретический анализ характеристик по управлению и возмущению для каждого регулятора.

Теоретические положения, принятые за основу при построении систем, прошли проверку средствами имитационного моделирования в среде *Simulink* программного комплекса *Matlab*.

В процессе экспериментов:

- показана эффективность применения входных фильтров;
- оценен учет динамических свойств у контура момента электропривода инерционными звеньями 1-го и 2-го порядка;
- средствами линейного анализа *Simulink* выполнен анализ частотных свойств по каналам управления и возмущения;
- произведена проверка достижения системой заданной полосы пропускания;
- опробованы средства ограничения скорости;

– обоснована фиксированная настройка регуляторов.

Результаты моделирования подтверждают обоснованность принятых при синтезе астатических системы технических решений. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании электромехатронных систем в промышленной робототехнике и станкостроении. При этом наилучшие результаты будут достигнуты при использовании астатической системы с регулятором положения в составе системы комбинированного управления.

Результаты работы предполагается использовать в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению 140400, профиль «Электропривод и автоматика». Дальнейшая работа планируется в направлении микропроцессорного моделирования систем в *DSP* контроллерах.

*А. С. Короткевич, Д. М. Зенкин, студенты;  
рук. С. К. Лебедев, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **СТАТИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ ПОЛОЖЕНИЯ СИСТЕМ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАТРОННЫХ МОДУЛЕЙ**

Электромехатронные модули с двигателями переменного тока (асинхронными и синхронными), преобразователями частоты и микропроцессорным управлением позволяют задать высокое качество статики и динамики процессов, повысить полосу пропускания сигналов управления, обеспечивая тем самым технологическое оборудование конкурентоспособными характеристиками.

Определенной спецификой обладают электромехатронные модули, решающие в технологических процессах различной природы задачи позиционирования. Задачи позиционирования подразумевают изменение пространственного положения исполнительных органов технологических установок, перемещения из одного фиксированного положения в другое заданное положение. Диапазон применения электромехатронных модулей позиционирования необычайно широк: от запорных, дозирующих и регулирующих аппаратов трубопроводных систем в энергетике, нефтегазовой отрасли, жилищно-коммунальном хозяйстве до космических и оборонных технологий.

Часть областей применения модулей позиционирования в составе оборудования характеризуется использованием единичными экземплярами (например, приводы задвижек трубопроводов, приводы дозаторов), часть – наличием достаточно большого количества модулей, в том числе, и однотипных. В последнем случае необходимо рассматривать обособленно две группы областей применения:

- модули позиционирования работают в составе оборудования автономно, не оказывая друг на друга ни силового, ни сигнального воздействия;
- работа модулей позиционирования в составе оборудования взаимосвязана.

Характерными представителями являются электромехатронные модули позиционирования для станкостроения и робототехники, активно и динамично в настоящее время развивающихся отраслей в Российской Федерации и во всем мире.

В станках и промышленных роботах характерным фактором влияния на характеристики каждого электромехатронного модуля позиционирования (оси станка, звена манипулятора) является кинематические и динамические связи между осями в виде переменных нагрузок сложной формы, поэтому актуальной является тематика, связанная с разработкой и исследованием систем позиционирования. В настоящей работе рассматриваются варианты построения регулятора положения, реализующие статические системы позиционирования:

- пропорционально-дифференциальные регуляторы положения;
- модальный регулятор положения;
- пропорционально-дифференциальные регуляторы с реальным дифференцированием.

Такие системы применяют преимущественно в составе систем комбинированного управления с компенсацией возмущений.

Получены соотношения, позволяющие выполнить инженерный расчет основных элементов системы позиционирования со статическими регуляторами положения при настройке динамики на стандартное распределение корней характеристического уравнения по Бесселю. Выполнен теоретический анализ статических и динамических характеристик по управлению и возмущению для каждого варианта статического регулятора положения.

Теоретические положения, принятые за основу при построении систем, прошли проверку средствами имитационного моделирования в среде *Simulink* программного комплекса *Matlab*.

В процессе экспериментов:

- показана эффективность применения входных фильтров для ряда регуляторов;
- произведена оценка учета динамических свойств у контура момента электропривода инерционными звеньями 1-го и 2-го порядка;
- показаны средства ограничения скорости при позиционировании;
- обоснована правомерность применения при вариации параметров модуля фиксированной настройки регуляторов.

Полученные результаты моделирования подтверждают обоснованность принятых при синтезе системы решений. В ряде случаев сравнение результатов моделирования и расчета процессов по формулам в *Mathcad* позволило избежать погрешностей, связанных с «человеческим фактором».

Основные результаты предполагается использовать в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению 140400, профиль «Электропривод и автоматика». В дальнейшем планируется работа по реализации предложенных вариантов систем в *DSP* контроллерах.

*Р. А. Дерезков, студент, рук. А. Р. Колганов, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС УДАЛЕННОГО ВЫПОЛНЕНИЯ НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

Современные тенденции обязывают разработчиков применять самые передовые технологии, использовать современное оборудование. системы сбора, хранения и обработки данных экспериментов.

Целью исследования является разработка комплекса программно-технических и методических средств выполнения натуральных экспериментов в режиме удаленного доступа при изучении электромеханических систем.

Основой для разработки комплекса послужил стенд для проведения лабораторных работ по дисциплинам «Электропривод» и «Системы управления электроприводов», снабженный всем необходимым для экспериментов оборудованием. Было принято решение о создании программно-аппаратного комплекса, позволяющего полностью авто-

матерализовать проведение экспериментов с использованием персонального компьютера.

Для реализации комплекса была применена программная среда LabVIEW компании National Instruments, позволяющая создавать сложные, специализированные контрольно-измерительные системы облегчающая процесс создания программного кода и включающая в себя средства сбора и обработки данных.

Основными задачами исследования являются:

- разработка программных средств для сбора и хранения информации при измерениях и испытаниях;
- разработка и реализация единой структуры набора виртуальных приборов;
- организация выполнения лабораторных работ в режиме удаленного доступа;
- формирование лабораторного практикума по дисциплине «Теория электропривода».

Для организации работ в режиме удаленного доступа используется встроенный сервер LabVIEW. Для упрощения процесса размещения информации о виртуальных приборах (ВП) в сети интернет в LabVIEW предусмотрен инструмент WebPublishing. Он включается в опциях программной среды LabVIEW. Этот инструмент использует шаблон, который позволяет построить несложный документ HTML.

С помощью шаблона можно разместить на странице ВП с заголовком и пояснениями к нему.

Предметом исследования был выбран ПИД-регулятор. В разработанной лабораторной работе студенты могут наблюдать за изменениями переходных процессов электропривода, посредством изменения коэффициентов.

Разработанный программно-технический комплекс, прежде всего, направлен на облегчение работы со сложным оборудованием в лаборатории автоматизированного электропривода. Его применение в учебном процессе позволяет автоматизировать сбор, хранение и обработку больших объемов получаемой во время экспериментов информации. Следствием этого становится ускорение процесса проведения лабораторных работ, что в перспективе позволит уменьшить состав бригад, проводящих эксперименты. Это позволит студентам лучше усваивать изучаемый материал.

Разработанный комплекс построен по модульному принципу, что позволяет с его помощью конструировать сложные системы для облегчения научных исследований.

С другой стороны разработанный комплекс не является полностью виртуальным, так как для проведения эксперимента сначала нужно собрать электрическую схему будущей лабораторной работы, что позволяет студентам работать с реальным оборудованием. Дополнительно при обращении с данным комплексом приобретаются навыки работы с платами сбора данных, что создает у учащихся дополнительные компетенции.

В результате проведенной работы бала разработана технологическая схема применения разработанного автоматизированного комплекса для формирования лабораторного практикума. Сформирован и описан лабораторный практикум по дисциплине «Теория электропривода». Разработанные виртуальные приборы легко изменяемы, что позволяет в дальнейшем расширять количество проводимых с их помощью экспериментов.

*С. Н. Абрамов, студент; рук. В. Ф. Глазунов, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМАЦИИ ТКАНИ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДВУХМАШИННОГО АГРЕГАТА**

Современные отечественные и зарубежные достижения в разработке текстильных технологий позволяют существенно сократить время обработки ткани и уменьшить габариты технологического оборудования. Однако это приводит к росту возмущений в виде сил трения, действующих на обрабатываемое в многовалковых машинах полотно, увеличению его натяжения, росту колебательности и неустойчивости всей системы взаимосвязанного электропривода.

Один из возможных способов компенсации действующих на ткань сил распределенного и сосредоточенного трения в обрабатывающей среде может быть реализован на базе электропривода направляющих роликов, обеспечивающего автоматическое регулирование их моментов в функции натяжения на выходе роликовой зоны.

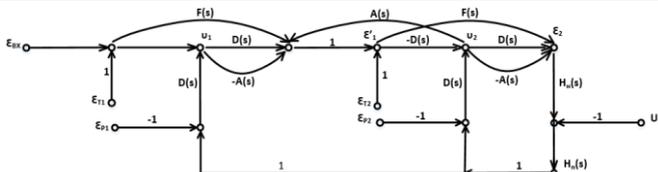


Рис. 1. Направленный граф устройства компенсации технологических возмущений

На рис. 1 представлен направленный граф двухроликковой зоны обработки с электроприводом компенсации технологических возмущений. Здесь  $v_1$  и  $v_2$  – скорости роликов, м/с;  $\epsilon_{B1}, \epsilon_{T1}, \epsilon_{P1}$  – относительные удлинения ткани на входе роликовой зоны, между соседними роликами и на выходе зоны;  $\epsilon_{B2}, \epsilon_{T2}, \epsilon_{P2}$  – пересчитанные на относительные удлинения силы распределенного и сосредоточенного трения;  $F(s), A(s), D(s)$  – передаточные функции полотнам [1].  $H_M(s), H_P(s)$  – передаточные функции датчика натяжения и асинхронного электропривода, выполненного на базе моментных асинхронных электродвигателей роликов типа МЭД-1, получающих питание от тиристорного преобразователя.

Рассматриваемый двухмашинный агрегат представлен трехфазной плюсовкой ПЛТ-120, установкой ванны УВ-120-3 и отжимом УО-120-5. Электроприводы плюсовки и отжима асинхронные, с питанием электродвигателей от преобразователей частоты ЭПВ. Система электропривода плюсовки трехконтурная с регуляторами тока, скорости и натяжения, измеряемого датчиком натяжения с параметрами, определенными в соответствии с [3].

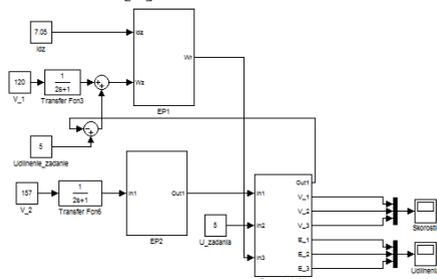
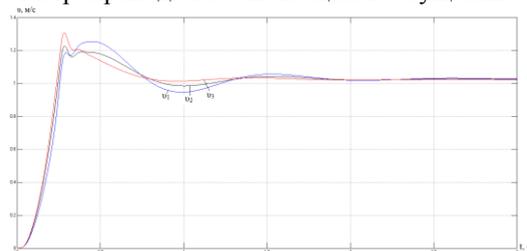
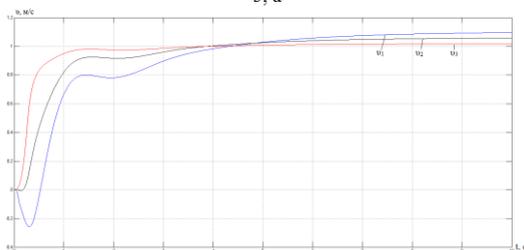


Рис. 2. Математическая модель системы асинхронного электропривода двухмашинного агрегата для обработки ткани

На рис. 2 представлена математическая модель системы электропривода двухмашинного агрегата, где EP1, EP2, Zona\_obrabotki – соответственно макроблоки электроприводов плюсовки, отжима и зоны обработки с электроприводом компенсации возмущений.



3, а



3, б

Рис. 3. Переходные процессы скоростей направляющих роликов

Результаты моделирования иллюстрируются представленными на рис. 3 переходными процессами скоростей направляющих роликов в системе электропривода с включенным (рис. 3,а) и отключенным (рис. 3,б) устройством компенсации технологических возмущений, обеспечивающим выравнивание скоростей роликов и уменьшение действия сосредоточенных и распределенных сил трения.

#### Библиографический список

1. Глазунов В.Ф., Прокушев С.В. Автоматизация оборудования для непрерывной обработки текстильных материалов. ИГЭУ, 2012, 343 с.
2. Самсонов В.С. Исследование и проектирование транспортирующих систем отделочных машин. МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2006, 275 с.
3. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. ИГЭУ, 2008, 320 с.

*О. М. Морозов, И. С. Титов, студенты;  
рук. С. К. Лебедев, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ LEGO MINDSTORMS NXT 2.0 В ЛАБОРАТОРНОМ ПРАКТИКУМЕ ПО РОБОТОТЕХНИКЕ**

Специалисты в области мехатроники и робототехники входят в десятку наиболее востребованных обществом выпускников. Организация и совершенствование подготовки таких специалистов является актуальной задачей.

В рамках современного уровня финансирования использование интеллектуального конструктора *LEGO Mindstorms NTX* позволяет формировать компетенции в части навыков изучения, конструирования, программирования, монтажа и наладки элементов робототехники.

Лабораторный практикум начинается с общего знакомства с составом и функционированием конструктора: аппаратной частью и программированием.

Отдельным этапом лабораторного практикума является изучение модулей датчиков, входящих в комплект конструктора:

- тактильный датчик;
- датчик освещенности и цвета;
- ультразвуковой сенсор расстояния.

В процессе изучения работы датчиков проводятся эксперименты с программированием опроса датчиков и оценкой их характеристик.

Основным этапом лабораторного практикума для студентов профиля подготовки «Электропривод и автоматика» является исследование интерактивных электромехатронных модулей движения робота (сервоприводов) который включает:

- исследование датчика положения выходного вала сервопривода;
- автономная работа сервопривода;
- синхронизация работы сервоприводов.

Лабораторный практикум в рамках бакалавриата завершается разработкой «типовых» и оригинальных подвижных объектов. Построение «типовых» объектов имеет подробное описание, а для реализации оригинальных робототехнических объектов необходимы нестандартные технические и алгоритмические решения.

Для лабораторного практикума в рамках магистратуры планируется при разработке алгоритмов управления роботами использовать *Embedded Coder Robot NXT* для *Simulink* и *Microsoft Robotics Developer Studio*.

*Д. С. Зайцев, студент; рук. М. С. Куленко к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ НА ОСНОВЕ НЕЧЁТКОГО РЕГУЛЯТОРА

Использование классических ПИД-регуляторов в системах управления при недостаточной информации об объектах и действующих на него возмущений затруднительно. В таком случае использование альтернативных вариантов на основе нечётких регуляторов

Предположим, что объект регулирования содержит одно инерционное звено первого порядка и интегрирующее звено. Структурная схема модели такого объекта с ПИД-регулятором, настроенным в соответствии с методом Циглера-Никольса [1], и ПИД-подобным fuzzy-регулятором, смоделированная в программном комплексе MatLab/Simulink, представлена на рис. 1. Была поставлена задача снижения времени переходного процесса.

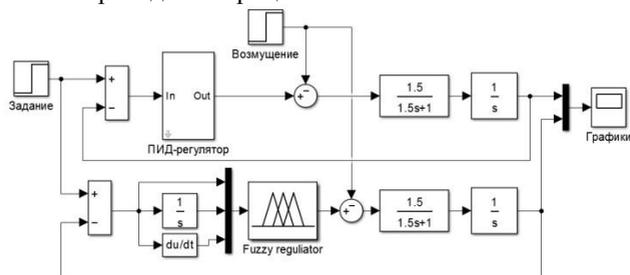


Рис. 1. Модель исследуемого объекта регулирования

Отличие ПИД-подобного fuzzy-регулятора от традиционного состоит в том, что коэффициенты усиления в пропорциональной и интегрирующей цепях регулятора зависят от состояния системы в данный момент времени. Это позволяет повысить качество системы управления и сделать её менее чувствительной к вариациям параметров объекта.

Каждой входной и выходной переменной задаются функции принадлежности для реализации процедур фазификации и дефазификации.

Определение функции принадлежности в значительной степени производится опытным путём, позволяющим отладить работу системы.

В основу формирования базы правил fuzzy-регулятора положен способ, описанный Л. Заде [2]. Лингвистические правила для такого ПИД-подобного fuzzy-регулятора приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Лингвистические правила для переменных  $x_1$  и  $x_2$

|       |          | $X_1$    |          |          |
|-------|----------|----------|----------|----------|
|       |          | <b>N</b> | <b>Z</b> | <b>P</b> |
| $X_2$ | <b>N</b> | N        | NB       | NM       |
|       | <b>Z</b> | Z        | NM       | ZE       |
|       | <b>P</b> | P        | ZE       | PM       |

Дополняем эти правила правилами для переменной  $x_3$ :

IF ( $x_3 = N$ ) THEN ( $y = N$ );

IF ( $x_3 = ZE$ ) THEN ( $y = ZE$ );

IF ( $x_3 = P$ ) THEN ( $y = P$ ).

При помощи инструментов графического интерфейса пользователя пакета "Fuzzy Logic Toolbox" в программном комплексе MatLab создадим нечёткую систему, реализующую типовой аналоговый ПИД-регулятор. При построении используем систему типа Мамдани. Задаём три входа – для пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих. Далее формируем термы входных и выходных переменных, особое внимание уделив пределам изменения координат и отдельных значений каждой лингвистической переменной [3].

Результаты моделирования представлены на рис. 2.

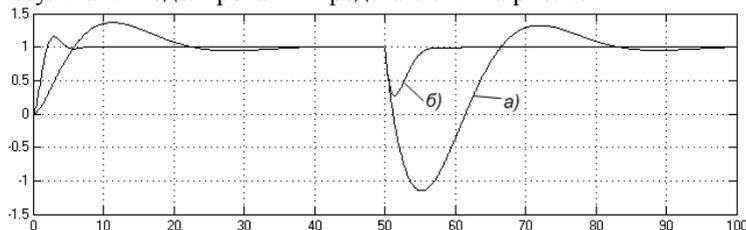


Рис. 2. Переходные процессы объекта с ПИД-регулятором (а) и с ПИД-подобным fuzzy-регулятором (б)

Из результатов видно, что время регулирования значительно уменьшилось, также уменьшились и колебания. Это позволяет судить о возможности использования регуляторов на основе нечеткой логики в системах управления в условиях неопределенности параметров объекта и действующих возмущений.

**Библиографический список**

1. **Фрер Ф., Орттенбургер Ф.** Введение в электронную технику регулирования. Пер. с нем. М., «Энергия», 1973. – 192 с. с ил.
2. **Заде Л.** Понятие лингвистической переменной и его применение для принятия приближенных решений. Москва, Мир, 1976, 168 с.
3. **Кудинов Ю.И.** Нечеткие системы управления. Известия Академии наук. Техническая кибернетика, 1990, № 5, с. 196–206.

*Н. А. Глебов, соискатель; рук. А. Б. Виноградов д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

**СИСТЕМА БЕСПОИСКОВОГО АДАПТИВНОГО  
ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВОГО  
ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

Рассматриваемый асинхронный тяговый электропривод входит в состав электромеханической трансмиссии колесного трактора «Беларус-3023» (220 кВт) и является существенно нелинейным элементом, к которому предъявляются высокие требования по коэффициенту полезного действия и диапазону регулирования скорости выше номинальной. Для достижения указанных целей в широких пределах регулируется реактивная составляющая тока, что приводит к существенным вариациям параметров, особенно взаимной индуктивности и постоянной времени ротора. Конструктивная особенность электрических машин - изоляция класса Н (до 180<sup>0</sup>С), применяемая в обмотках машин, тоже приводит к дополнительным температурным вариациям активных сопротивлений. Указанные факторы обуславливают работу в области существенных нелинейностей, не учитываемых стандартной моделью Парка-Горева. В режимах с малым током намагничивания и вблизи холостого хода велико расхождение расчетных и реальных характеристик привода, вызванное влиянием процессов в стали на взаимную ориентацию векторных переменных.

Особенностями организации системы управления являются:

- использование зависимости взаимоиндукции в функции тока намагничивания, определяемой по опыту холостого хода;
- учет текущей температуры электродвигателя;
- учет угла потерь.

Учет указанных нелинейностей при расчете управления позволяет уточнить взаимную ориентацию обобщенных векторов электромагнитных переменных (потокосцепления, тока, напряжения), повысить точность динамической обработки задания по моменту, и, как следствие, уточнить расчет момента машины. Момент может быть использован как интегральный критерий точности настройки системы управления: численным критерием выступает точность вычисленного электромагнитного момента относительно суммы фактического момента, механических и дополнительных потерь. Момент вала двигателя измеряется муфтой, методика определения потерь соответствует ГОСТ Р 53472-2009.

Исследования проводились на математической модели и на стенде. Достигнута относительная погрешность расчета момента менее 2% от фактического значения (для момента от 0,5 до 1,0 от максимального значения) для всего ряда скоростей. Повышена нечувствительность системы управления к параметрическим возмущениям, улучшены статические и динамические характеристики векторного асинхронного электропривода.

*А. С. Ушков, соискатель; рук. А. Р. Колганов д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **СРАВНЕНИЕ ОДНОФАЗНЫХ И МНОГОФАЗНЫХ КОРРЕКТОРОВ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ**

Входной каскад цепи электропривода без корректора коэффициента мощности (ККМ) очень похож на импульсный источник питания с диодным мостом и конденсатором большой емкости, сглаживающим выпрямленный постоянный ток из электросети.

Источники питания (ИП) без ККМ создают мощные импульсные помехи по электросети для параллельно включенных электроприборов. Международная электротехническая комиссия (МЭК) или ИЕС (International Electrotechnical Commission) и международная организация по стандартизации или ISO (International Organization for Standardization) устанавливают ограничения на содержание и уровни гармоник во входном токе вторичных источников электропитания.

Типовой ИП имеет на входе сетевой выпрямитель и сглаживающий конденсатор, являющийся реактивной нагрузкой для диодного моста и питающей сети. Такой ИП потребляет мощность от сети только в то

время, когда напряжение, подаваемое с выпрямителя на сглаживающий конденсатор, превышает напряжение на этой емкости. На практике это время составляет примерно 25% от периода сетевого напряжения. В оставшиеся три четверти периода мощность от сети не потребляется, так как нагрузка питается от сглаживающего конденсатора. Это приводит к тому, что мощность подается в нагрузку только на пиках напряжения, а потребляемый ток имеет форму короткого импульса и содержит много мощных гармоник.

ККМ уменьшает среднеквадратичное значение потребляемого от сети тока и обеспечивает равномерное потребление мощности практически в течение всего периода сетевого напряжения при резком уменьшении гармонических составляющих тока во входной цепи. Таким образом, применение ККМ в структуре асинхронного электропривода (АЭП) является одним из наиболее простых и дешёвых способов улучшения гармонического состава потребляемого из сети тока, а также повышения энергосбережения.

Все ИП передают некоторую часть энергии коммутации на линию электропитания через пульсирующую компоненту тока. Она может различаться в зависимости от того, в каком режиме работает ККМ. Например, в случае ККМ с переходным режимом величина пульсирующей компоненты составляет 200%, а в случае ККМ с режимом непрерывного тока величина пульсирующей компоненты 50%. Хотя при этом происходит улучшение на 10 дБ, такой результат достигается за счет вольтодобавочного индуктора большей величины. Независимо от выбранного подхода необходим фильтр электромагнитных помех в той или иной форме.

Если мы соберем две идентичные схемы ККМ, каждая из которых будет работать со сдвигом по фазе  $180^\circ$ , то комбинированная пульсирующая двухступенчатая компонента тока окажется значительно меньше, чем пульсирующая компонента для единственного каскада при той же полной мощности. Таким образом, можно будет использовать существенно меньший входной фильтр электромагнитных помех. При работе двух каскадов с продолжительностью рабочего цикла в точности 50% пульсирующая компонента уменьшается до нуля! При различной продолжительности рабочих циклов ослабление пульсирующей компоненты будет меньше, но все же останется весьма существенным.

Работа двух идентичных каскадов со сдвигом по фазе  $180^\circ$  называется чередованием фаз, что на практике обеспечивается либо благодаря современным специализированным микросхемам, либо с помощью

микроконтроллеров, на которых реализованы алгоритмы системы управления ККМ.

Преимущество многофазности состоит в уменьшении пульсирующей компоненты выходного тока. Это позволяет использовать меньший выходной конденсатор или иметь меньшую токовую нагрузку при прежнем выборе конденсатора, что приводит к увеличению срока эксплуатации и более высокой надежности. Другое преимущество состоит в том, что можно использовать два меньших компонента вместо одного большого. К таким компонентам относятся вольтодобавочный индуктор, мощный полевой МОП-транзистор и силовой диод. Меньшие размеры этих компонентов позволяют получить более распределенную топологию печатной платы, что обеспечивает лучшее рассеяние тепла различными мощными компонентами и более низкий профиль систем питания.

Многофазность также позволяет получить более высокую мощность, чем это практически достижимо при однофазной архитектуре. Для двух уже существующих однофазных схем ККМ мощностью 250 Вт можно легко реализовать чередование фаз, быстро разработав на основе тех же компонентов схему ККМ мощностью 500 Вт.

#### Библиографический список

1. **Нейдорф. Б.** Многофазность позволяет покорить новые высоты / Б. Нейдорф, Т. Льюис // Электроника Инфо. — 2009. — № 4.

*М. А. Сибирцев, студент; рук. А. Б. Виноградов д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИЕЙ ГУСЕНИЧНОГО ТРАКТОРА

Данная работа является составной частью работ по реализации электрической трансмиссии гусеничного трактора.

Электромеханическая трансмиссия представляет собой бесступенчатую автоматическую трансмиссию, позволяющую получить произвольное соотношение скоростей вращения двигателя внутреннего сгорания, являющегося источником мощности транспортного средства, и ведущих колес этого транспортного средства. Двигатель внутреннего сгорания не имеет механической связи с ведущими колесами транспортного средства, вся мощность передается на ведущие колеса через электромеханическую трансмиссию.

Использование электрической трансмиссии последовательного типа для промышленного трактора взамен механической трансмиссии позволяет получить следующие преимущества:

- Реализуется автоматическая бесступенчатая трансмиссия, позволяющая получить максимальное использование мощности дизельного двигателя трактора во всем диапазоне скоростей его движения. При этом управление трактором существенно упрощается.
- Дизельный двигатель трактора используется в режимах максимальной топливной эффективности.
- Снижается вес трансмиссии и упрощается ее размещение.

В качестве базовой модели трактора для реализации электрической трансмиссии используется промышленный трактор Беларусь 1502, имеющий дизельный двигатель мощностью 160 л.с. и стандартную механическую трансмиссию. Данная механическая трансмиссия заменяется на электрическую, состоящую из асинхронного генератора, жестко соединенного с валом дизельного двигателя, и бортовые асинхронные тяговые двигатели. При этом сохраняется механическая коробка отбора мощности, также соединенная с валом дизельного двигателя и передающая вращательный момент от него на задний вал отбора мощности.

Система управления электрической трансмиссией в данном случае решает следующие основные задачи:

- Реализацию общей логики управления электрической трансмиссией и дизельным двигателем (реализация различных режимов работы, реакция на ошибки, обслуживание органов управления и индикации).
- Реализацию управления электрической трансмиссией (определение суммарного значения и распределение по бортам трактора тягового момента, реализуемого асинхронными тяговыми двигателями, в зависимости от положения органов управления для реализации различных режимов движения; согласование динамических характеристик всех электрических машин, входящих в состав трансмиссии).
- Реализацию управления дизельным двигателем в зависимости от мощности, требуемой для реализации управляющих сигналов (определение задающего сигнала дизельного двигателя в зависимости от требуемой мощности с целью получения максимальной топливной эффективности; ограничение мощности, потребляемой трансмиссией, по текущему состоянию дизельного

двигателя и имеющейся дополнительной нагрузки, создаваемой механическим валом отбора мощности).

Данные задачи программно реализуются с помощью микроконтроллера, входящего в состав системы управления.

Система управления асинхронного генератора реализует векторный контур управления электромагнитным моментом и контур регулирования напряжения статора в качестве внешнего контура управления. Системы управления асинхронными тяговыми двигателями реализуют векторный контур управления электромагнитным моментом.

Структура управления двигателем внутреннего сгорания зависит от вариантов управления, реализованных в самом двигателе внутреннего сгорания (в настоящее время это, как правило, контроллер управления двигателем).

В рамках работы были разработаны алгоритмы определения суммарного значения и распределение по бортам трактора тягового момента в зависимости от положения органов управления для реализации различных режимов движения, определения задающего сигнала дизельного двигателя в зависимости от требуемой мощности с целью получения максимальной топливной эффективности, ограничения мощности, потребляемой трансмиссией, по текущему состоянию дизельного двигателя и имеющейся дополнительной нагрузке.

*С. А. Мамин студент; рук. В. Ф. Глазунов, д. т. н., проф.  
(ИГЭУ, г.Иваново)*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ОСНОВЫ И НИТИ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА СНОВАЛЬНОЙ МАШИНЫ**

Качество формирования сновальных валов, обрывность нити в процессе намотки, производительность сновальной машины во многом зависит от работы системы электропривода в переходных процессах. Здесь рассмотрим математическую модель процесса намотки основы, как объекта управления.

На рис. 1 представлена технологическая схема намотки нити [1]. С целью упрощения задачи действующие на нить силы трения приведены к нитенатяжному прибору (ННП).

В переходном процессе, например, при пуске системы электропривода 5 сновальный 4 и мерильный 3 валы совершают движения, влияющие на натяжение основы, представляемое как сумма натяжений ни-

тей. Это натяжение создает составляющую статического момента электродвигателя  $5 M_F = F_{20} \frac{R_c}{i_p}$ , где  $i_p$ -передаточное отношение редуктора. При этом натяжение каждой нити  $F_H$  отклоняется от некоторого среднего значения  $F_{H\text{cp}} = F_0/N$ , где  $F_0$ - натяжение основы, N-число нитей. Это отклонение зависит от настройки ННП и действующих на нить сил трения.

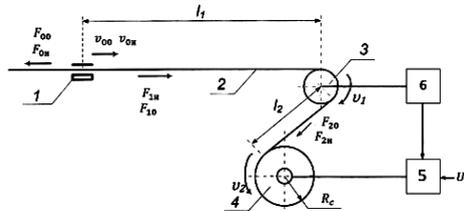


Рис. 1. Технологическая схема намотки нити.

1. нитенатяжной прибор. 2. Нить. 3. Мерильный вал. 4. Сновальный вал.
5. Электропривод. 6. Датчик скорости.

Процессы изменения натяжений основы  $F_{10}, F_{20}$  и нити  $F_{1н}, F_{2н}$  на участках «ННП-мерильный вал» и «мерильный вал-сновальный вал» могут быть представлены передаточными функциями в виде апериодических звеньев с коэффициентами усиления соответственно  $E_0 k_v$  и  $E_H k_v$ , где  $E_{0,н}$  – модули упругости основы и нити,  $k_v = 1/v$ , и постоянные времени  $T_{c1} = l_1/v_1$  и  $T_{c2} = l_2/v_1$ .

Входными координатами при этом являются соотношения скоростей нити  $v_{0н}$  и основы  $v_{00}$  на выходах ННП, мерильного и сновального валов  $v_1$  и  $v_2$ , а выходными - натяжение нити  $F_{1н}, F_{2н}$  и основы  $F_{10}, F_{20}$ , причем скорость на выходе ННП основы принимается как средняя скорость на выходе всех ННП.

В процессе моделирования средняя скорость нити на выходе ННП определяется параметрами его настройки [1], а натяжение основы  $F_{00}$  как сумма натяжений на выходе всех ННП.

На рис.2 представлена блок-схема системы электропривода сновального вала с учетом взаимодействия основы и нити.

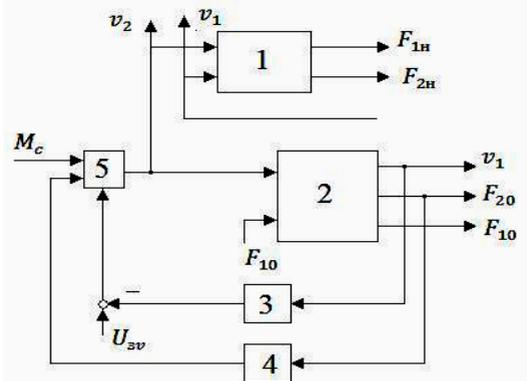


Рис.2. Блок-схема математической модели системы электропривода сновального вала. 1,2. Макроблоки деформации нити и основы. 3. Датчик скорости. 4. Коэффициент передачи  $R_c/i_p$ . 5. Макроблок электропривода

Учитывая существенное влияние места установки бобин в шпулярике [2] на неравномерность натяжения нитей при их намотке моделировались переходные процессы при пуске электропривода сновального вала и разных значениях длины  $l_1$  и параметрах ННП.

Результаты моделирования иллюстрируются переходными процессами натяжений основы и нити. Параметры объекта и системы электропривода постоянного тока с широтно-импульсным преобразователем: электродвигатель 2ПБ200Л 11 кВт; 157 рад/с;  $v_{ср}=10$  м/с;  $F_{0н}=50$  Н;  $R_c=0.3$  м;  $R_m=0,053$  м;  $\tau_m=0,02$  м<sup>2</sup>;  $F_{2о}=80$  Н;  $N=518$ .

#### Библиографический список

1. Глазунов В. Ф., Шишков К. С. Математическое моделирование процессов деформации основы и нити в системе электропривода механизма сновального вала. – Изв. Вузов. Технология текстильной промышленности, 2012, №6, с. 143-147.
2. Е. Д. Ефремов, Г. К. Попов. Экспериментальное определение неравномерности натяжения нитей основы при наматывании на сновальный вал. – Изв. Вузов. Технология текстильной промышленности, 1970, №3, с. 48-51.

*М. Ш. Абакаров, А. И. Герасимов, студенты;  
рук. А. Н. Ширяев, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ЭЛЕКТРОПРИВОД И АВТОМАТИКА РАЗРЫВНОЙ МАШИНЫ**

Рассматривается электропривод и автоматика модернизированной разрывной машины модели Р-5 с предельной нагрузкой 5 кН.

В качестве силового преобразователя электропривода выбран преобразователь частоты КЕВ СОМВІVERT (Германия), а в качестве исполнительного электродвигателя – отечественный трехфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором и импульсным датчиком положения производства ОАО «Ярославский электромашиностроительный завод» (ОАО «ELDIN»).

Система автоматика и программно-технический комплекс реализованы на базе микропроцессорного блока управления МБУ-016 ООО «Точприбор-КБ», г. Иваново.

Преобразователь частоты фирмы КЕВ 07.F5.G0A – 0110 выполнен в виде блока, устанавливаемого в шкаф управления. Внешний вид преобразователя и лицевая панель с элементами индикации и разъемами связи с внешними устройствами приведены на рис. 1.

Силовая часть преобразователя выполнена по бестрансформаторной схеме с промежуточным звеном постоянного тока. Питание осуществляется от промышленной однофазной сети. Связь микропроцессорного блока управления МБУ-016 с преобразователем осуществляется по аналоговому входу (задание скорости) и цифровым входам и выходам (выполнение функций системы автоматика).

Микропроцессорный блок управления обеспечивает сбор информации от силоизмерительного датчика (СИД) тензорезистивного типа, измерителя деформации (ИД) растрового типа, измерителя перемещения (ИП) подвижной траверсы растрового типа и конечных выключателей. Обработанная информация в цифровой форме передается в персональный компьютер (ПК). Главное окно программы приведено на рис. 2.

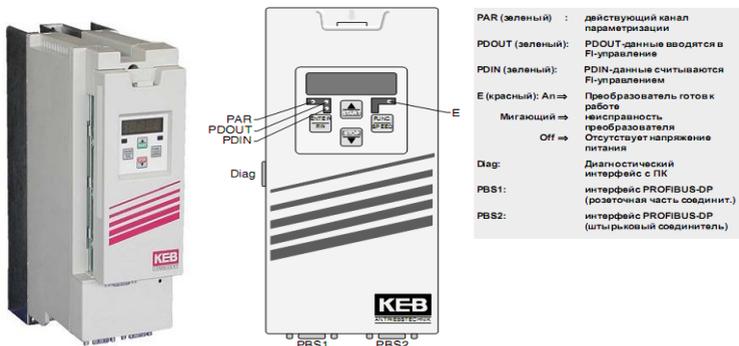


Рис. 1. Внешний вид и лицевая панель преобразователя

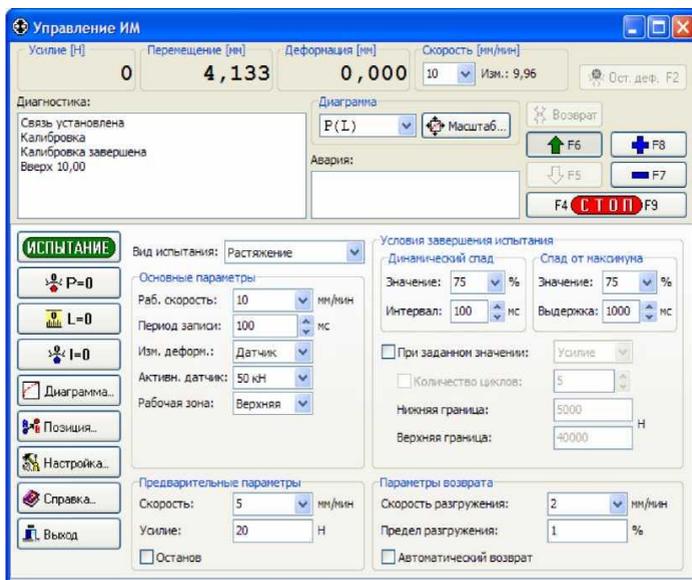


Рис. 2. Главное окно программы

В верхней части главного окна программы отображаются текущие значения усилия, перемещения подвижной траверсы и деформации образца. Показания деформации отображаются только при выборе ИД в параметрах испытания.

Двухсторонняя связь МБУ-016 с ПК осуществляется через последовательный интерфейс (СОМ-порт). Подключение к СОМ-порту выполнено гальванически развязанным.

*Л. Е. Малинин, студент; рук. С. К. Лебедев, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **РАЗРАБОТКА ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАНИЙ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА ПО ОСНОВАМ MATHCAD И MATLAB**

Лабораторный практикум входит в состав УМКД дисциплины «Компьютерные технологии в математике и технических расчетах», которая является частью математического и естественнонаучного цикла дисциплин бакалавриата по направлению «Электроэнергетика и электротехника», профиль «Электропривод и автоматика».

Лабораторный практикум по дисциплине состоит из трех основных частей.

*Mathcad – общий курс (3 лабораторные работы):*

- основные функции и компоненты;
- дифференцирование, интегрирование и решение дифференциальных уравнений;
- символика и программирование.

*Matlab – общий курс (3 лабораторные работы):*

- структура и основы функционирования;
- библиотеки *Simulink*;
- подсистемы и маскирование параметров подсистем.

*Matlab – инструменты (2 лабораторные работы):*

- применение *Linear Analysis Tool*;
- моделирование электрических цепей в *Foundation Library* и *SimPowerSystems*.

Студенческие подгруппы для выполнения лабораторных работ разбиваются на бригады по числу компьютеров, работы выполняются бригадами параллельно по одинаковым заданиям. Для контроля освоения материала и проверки формирования навыков работы каждой бригаде после выполнения «обязательной» части задания выдается индивидуальное творческое задание в соответствии с образовательной тех-

нологией «*case-study*», подразумевающей анализ реальных проблемных ситуаций, имевших место в профессиональной деятельности, и поиск вариантов лучших решений.

Разработан пакет *case*-заданий по лабораторным работам практикума с рациональными алгоритмами решения средствами *Mathcad* и *Matlab*.

*А. Д. Винокуров, А. А. Фурсал, студенты;  
рук. А. Н. Ширяев, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАГРУЖАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА РАЗРЫВНОЙ МАШИНЫ

Исполнительные механизмы нагружающих устройств разрывных машин, предназначенных для определения физико-механических свойств различных материалов в результате их деформирования, содержат электропривод и передаточное устройство, преобразующее вращательное движение в поступательное. Для испытаний образцов с разрывными усилиями от 1000-2500 Н используется, как правило, одновинтовая безредукторная кинематическая схема (рис. 1).

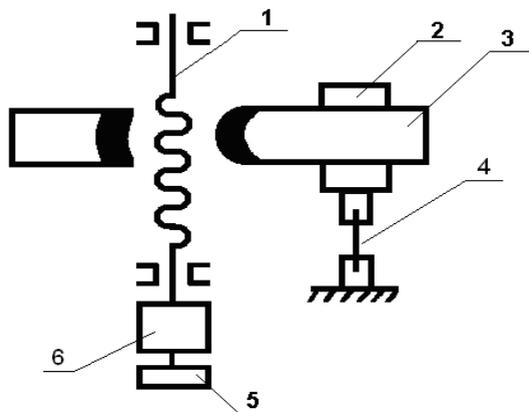


Рис. 1. Кинематическая схема нагружающего устройства разрывной машины:  
1 – винт ходовой; 2 – силоизмеритель; 3 – траверса; 4 – испытуемый образец;  
5 – датчик положения ротора; 6 – исполнительный электродвигатель

В соответствии с кинематической схемой рис. 1 угол поворота вала двигателя  $\varphi$ , перемещение траверсы  $L_{TP}$ , деформация образца  $\Delta\varepsilon_0$  и нагружающего устройства  $\Delta\varepsilon_{HY}$  связаны соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} L_{TP} &= \varphi * \rho, \\ \Delta\varepsilon_0 &= L_{TP} - \Delta\varepsilon_{HY}, \\ \Delta\varepsilon_{HY} &= F_C * \frac{1}{C_{HY}}, \\ F_C &= \Delta\varepsilon_0 * C_0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $F_C$  – сила сопротивления системы «образец - нагружающее устройство»,  $C_0$  и  $C_{HY}$  – жесткость образца и элементов нагружающего устройства (датчика силы, ходового винта и др.),  $\rho$  – радиус приведения.

На основании уравнений (1) в среде Matlab разработана модель нагружающего устройства (рис. 2) с импульсно-фазовым приводом на базе вентильного двигателя серии ДБМ, который представлен двигателем постоянного тока.

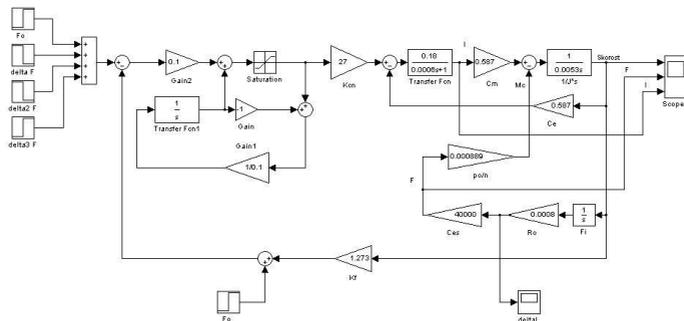


Рис. 2. Математическая модель нагружающего устройства

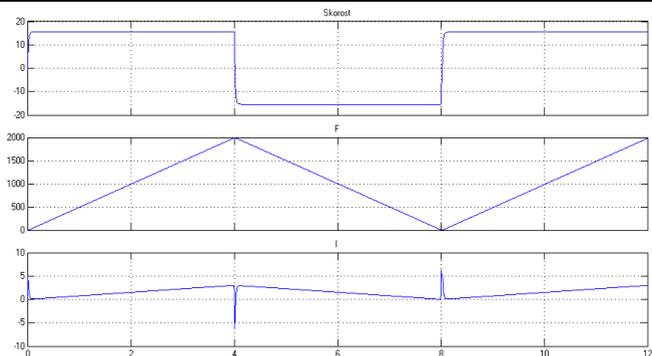


Рис. 3. Испытания образца по треугольному закону

Результаты исследования процессов испытаний образца по треугольному закону с помощью модели приведены на рис. 3.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о целесообразности использования разработанной модели для исследования процессов испытаний, проводимых на разрывных машинах.

*А. Х. Хангулиев, студент; Б. С. Курнышев, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

С развитием технологий разрывного управления электроприводами переменного тока [1] и с применением быстродействующих силовых коммутирующих приборов в преобразователях частоты (ПЧ) возникла проблема защиты от электромагнитных помех [2].

Целью данной работы является исследование механизма возникновения помех и выработка рекомендаций по их устранению.

Для этого определены основные электромагнитные эффекты в силовых цепях ПЧ, рассмотрены основные технические решения в этой области и требования к устройствам подобного типа. В этих целях проведен анализ информации в Internet, периодической и иной научно-технической литературе, а также рассмотрены разработки ведущих фирм в области электропривода переменного тока с ПЧ. Показано, что решение указанной задачи в ряде случаев возможно путём применения фильтров пассивного типа.

Назначение указанных фильтров – это подавление высокочастотных помех, возникающих на выходе и входе работающих ПЧ и снижение скорости нарастания напряжения и тока на фазах нагрузки (двигателей), защита изоляции двигателей от пробоя, предотвращение преждевременного износа подшипников.

Поставленная цель достигается методом математического моделирования на основе теории электрических цепей с распределенными параметрами.

Основными решёнными задачами являются:

- обоснование и разработка математической модели электрического кабеля, соединяющего ПЧ и двигатель переменного тока;
- разработка программы расчета переходных процессов в кабеле;
- исследование электромагнитных процессов в кабеле.

В результате была построена математическая модель электрического кабеля, были разработаны программы для моделирования и проанализированы различные варианты фильтров.

#### Библиографический список

1. **Ключев В.И.** Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. **ГОСТ Р 51317.3.2-99** (МЭК 61000-3-2-95) «Совместимость технических средств электромагнитная».

*П. В. Гаак, студент; рук. А. В. Пруднов, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## АНАЛИЗ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИМИ СТАНКАМИ

В процессе обработки изделий на металлорежущих станках, влияет ряд возмущающих факторов. Таких как: износ инструмента, твердость материала заготовок, температурные и упругие деформации, вибрации самого станка и др. При этом, это влияет на качество обработки и производительность оборудования, происходит отклонение от оптимальных режимов резания. В настоящее время, находят широкое применение различные автоматические системы. Системы для токарных станков:

- Системы стабилизации скорости резания при торцевой обработке.
- Системы стабилизации мощности.

- Системы стабилизации температуры резания.
- Системы управления упругими деформациями при резании.
- Системы оптимизации управления токарной обработки.
- Системы для шлифовальных станков:
- Системы стабилизации скорости шлифования.
- Системы стабилизации окружной скорости.
- Системы стабилизации усилия и мощности шлифования.
- Системы адаптивного управления шлифованием.
- Системы автоматизации управления шлифованием.
- Для фрезерных станков:
- Системы стабилизации мощности фрезерования.
- Системы стабилизации силы (момента) фрезерования.
- Системы стабилизации силы резания с применением адаптивного наблюдателя.
- Системы оптимизации управления фрезерованием.

Анализ существующих систем автоматизации и систем числового программного управления (ЧПУ) показывает, что можно объединить систему управления приводами с системами ЧПУ. Особенно это отмечается в изделиях фирмы «Siemens» ряде других.

Планируется, в результате изучения систем управления универсальными металлорежущими станками, рассмотреть возможности их модернизации для многооперационных станков

#### Библиографический список

1. **Корытин А.М.**, Петров Н.К., Радимов С.Н., Шапарев Н.К. Автоматизация типовых технологических процессов и установок. Москва « Энергоатомиздат » 1988.
2. **Шапарев Н.К.** Автоматизация типовых технологических процессов металлообработки. Москва 1979.

*В. В. Павлухин, студент; рук. А. М. Захаров, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОУРОВНЕВОГО ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ**

На кафедре ЭП и АПУ Ивановского государственного энергетического университета им. В.И. Ленина установлен высоковольтный преобразователь частоты ВЧРП 0,38/020-А-УХЛ4.

ВЧРП - это универсальный частотно- регулируемый электропривод переменного тока для промышленных нагрузок мощностью до 10 МВт с номинальным выходным напряжением 3/3,3 кВ, 6/6.6 кВ и 10/11 кВ. ВЧРП работает с асинхронными и синхронными двигателями. Силовая схема преобразователя состоит из многообмоточного трансформатора, ячеек с силовыми IGBT модулями, ячейки управления с промышленным компьютером и сенсорной панели управления.

Выходы соседних силовых модулей подключаются последовательно, разные фазы соединяются звездой, что позволяет получить на выходе высокое напряжение. Каждый силовой модуль вырабатывает  $j$  – ое значение фазного напряжения.

В основу принципа работы ВЧРП заложен принцип многоуровневого сложения напряжения. Каждый силовой модуль является источником напряжения с преобразованием переменное – постоянное - переменное, с 3-фазным входным напряжением и с однофазным выходом низкого напряжения.

Принцип многоуровневого управления с ШИМ состоит в сложении напряжения отдельных последовательно соединенных по выходу силовых ячеек - элементарных инверторов напряжения. Напряжение на каждой ячейке позволяет работать с силовой полупроводниковой элементной базой, что было бы невозможно при подаче полного фазного напряжения на ячейку. Многоуровневая ШИМ технология позволяет получить синусоидальную форму выходного тока.

В программном комплексе SimPowerSystem / Simulink Matlab разработана математическая модель высоковольтного преобразователя частоты ВЧРП. Адекватность модели проверена натурным экспериментом на комплексном учебном стенде.

*В. Е. Сахарова, студентка; рук. М.А. Захаров, асс.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **АППАРАТУРА ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА КОМПРЕССОРНОЙ СТАНЦИИ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА**

Компримирование газа на КС приводит к повышению его температуры на выходе станции. Численное значение этой температуры определяется ее начальным значением на входе КС и степенью сжатия газа.

Излишне высокая температура газа на выходе станции, с одной стороны, может привести к разрушению изоляционного покрытия трубопровода, а с другой стороны - к снижению подачи технологического газа и увеличению энергозатрат на его компримирование (из-за увеличения его объемного расхода).

Охлаждение технологического газа можно осуществить в холодильниках различных систем и конструкций; кожухотрубных (типа "труба в трубе"), воздушных компрессионных и абсорбирующих холодильных машинах, различного типа градирнях, воздушных холодильниках и т.д.

Наибольшее распространение на КС получили схемы с использованием аппаратов воздушного охлаждения АВО. Следует однако отметить, что глубина охлаждения технологического газа здесь ограничена температурой наружного воздуха, что особенно сказывается в летний период эксплуатации.

АВО работает следующим образом: на опорных металлоконструкциях закреплены трубчатые теплообменные секции (рис. 2.23-2.24). По трубам теплообменной секции пропускают транспортируемый газ, а через межтрубное пространство теплообменной секции с помощью вентиляторов, приводимых во вращение от электромоторов, прокачивают наружный воздух. За счет теплообмена между нагретым при компримировании газом, движущимся в трубах, и наружным воздухом, движущимся по межтрубному пространству, и происходит охлаждение технологического газа на КС.

Существует необходимость и экономическая целесообразность наиболее полного использования установок охлаждения газа на КС в годовом цикле эксплуатации, за исключением тех месяцев года с весьма низкими температурами наружного воздуха, когда включение всех аппаратов на предыдущей КС приводит к охлаждению транспортиру-

емого газа до температуры, которая может привести к выпадению гидратов. Обычно это относится к зимнему времени года.

При проектировании компрессорной станции количество аппаратов воздушного охлаждения выбирается в соответствии с отраслевыми нормами ОНТП51-1-85. На основании этих норм температура технологического газа на выходе из АВО должна быть не выше 15-20°C средней температуры наружного воздуха.

Уменьшение температуры технологического газа, поступающего в газопровод после его охлаждения в АВО, приводит к уменьшению средней температуры газа на линейном участке трубопровода и, как следствие, к снижению температуры и увеличению давления газа на входе в последующую КС. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению степени сжатия на последующей станции (при сохранении давления на выходе из нее) и энергозатрат на компремирование газа по станции.

Очевидно также, что оптимизация режимов работы АВО должна соответствовать условию минимальных суммарных энергозатрат на охлаждение и компремирование газа на рассматриваемом участке работы газопровода.

Следует также отметить, что аппараты воздушного охлаждения газа являются экологически чистыми устройствами для охлаждения газа, не требуют расхода воды, относительно просты в эксплуатации. В эксплуатации применяются следующие типы АВО газа: 2АВГ-75, АВЗД, фирм "Нуово Пиньоне" и "Креззо Луар".

В настоящее время установки охлаждения транспортируемого газа являются одним из основных видов технологического оборудования КС.

*Е. С. Шарапанов, А. В. Якубенко, студенты;  
рук. Б. С. Курнышев, д.т.н, проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

При построении систем векторного управления асинхронным электроприводом наиболее широко в настоящее время используется математическая модель в виде уравнений Парка-Горева, которые описывают процессы не в реальном асинхронном двигателе (АД), а в абстрактной, упрощенной его физической модели, которой является двухфаз-

ная обобщённая электрическая машина. При этом считается, что данная физическая модель эквивалентна реальному АД с учётом ряда принятых упрощающих допущений [1]. Модель Парка-Горева оказывается проще по сравнению с математическим описанием реального АД, как по числу уравнений, так и по их структуре. Однако она продолжает оставаться довольно громоздкой с точки зрения практической реализации на её основе алгоритмов управления даже при использовании микропроцессорных средств. Минимизация структуры математической модели станет ключом к созданию более простых и совершенных систем регулируемого асинхронного электропривода.

Минимизация структуры математической модели электромеханического преобразования энергии в АД возможна при переходе от обобщённой электрической машины к другой, более простой его физической модели. Такой моделью является система, состоящая из двух прямоугольных витков, оси которых смещены в пространстве на угол, равный углу между пространственными векторами токов статора и ротора реальной машины. Переход к данной физической модели, что важно, не сопровождается принятием никаких новых упрощающих допущений.

Соотношения между параметрами и переменными реального АД и его физической модели были получены из условия их эквивалентности по величине мгновенной потребляемой мощности, по величине тепловых потерь в активных сопротивлениях, а также по величине энергии, накапливаемой в магнитном поле.

Взаимодействие тока, протекающего в одном витке, с полем другого витка обуславливает наличие действующих на продольные проводники витков механических сил, создающих вращающий момент, который может быть найден в виде частной производной энергии магнитного поля системы двух витков по пространственной координате (по углу между осями витков). Величина вращающего момента соответствует электромагнитному моменту реального АД.

Математическое исследование процессов в модели удобно производить с помощью метода пространства состояний с кривизной, где в качестве переменных состояния (координат точки пространства) принимаются токи в витках, а также переменная, характеризующая состояние механической части электропривода. При этом вводится трёхмерное дифференциально-геометрическое многообразие со свойствами риманова пространства [2]. Каждой точке такого многообразия, то есть каждому состоянию электропривода, ставится в соответствие фундаментальный метрический тензор. Его компоненты определяют

инвариантную квадратичную форму, которой является квадрат расстояния между двумя соседними бесконечно близкими точками, определяя тем самым всю внутреннюю геометрию пространства. С другой стороны, каждое состояние электропривода характеризуется другой инвариантной квадратичной формой, а именно величиной энергии, накапливаемой в магнитном поле и в его механической части, то есть можно говорить о скалярном поле этой величины. Исходя из этого, устанавливается соотношение между компонентами фундаментального метрического тензора, переменными состояниями (координатами точки) и величиной энергии, запасённой в системе. Данное соотношение позволяет найти динамические параметры системы, которыми являются коэффициенты связности пространства (символы Кристоффеля), что, в свою очередь, даёт возможность определения её поведения при переходе из одного состояния в другое.

Анализ данной модели показывает, что в её терминах могут быть интерпретированы все возможные режимы работы электропривода.

Данная работа выполнена с учётом требований к электромагнитной совместимости [3, 4].

#### Библиографический список

1. **Ключев В.И.** Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1973.
3. **ГОСТ Р 51317.3.2-99** (МЭК 61000-3-2-95) «Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе). Нормы и методы испытаний».
4. **ГОСТ Р 51317.3.3-99** (МЭК 61000-3-3-94) «Совместимость технических средств электромагнитная. Колебания напряжения и фликер, вызываемые техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе), подключаемыми к низковольтным системам электроснабжения. Нормы и методы испытаний».

*Р. А. Серов, студент; рук. А. М. Захаров, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ СИЛОВОЙ ЯЧЕЙКИ МНОГОУРОВНЕВОГО ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ**

На кафедре ЭП и АПУ Ивановского государственного энергетического университета им. В.И. Ленина установлен высоковольтный преобразователь частоты ВЧРП 0,38/020-А-УХЛ4.

ВЧРП - это универсальный частотно-регулируемый электропривод переменного тока для промышленных нагрузок мощностью до 10 МВт с номинальным выходным напряжением 3/3,3 кВ, 6/6.6 кВ и 10/11 кВ. Благодаря высокому качеству разработки и производства, ВЧРП работает и с ранее установленными и с новыми асинхронными или синхронными двигателями. Силовая схема преобразователя состоит из многообмоточного трансформатора, ячеек с силовыми IGBT модулями, ячейки управления с промышленным компьютером и сенсорной панели управления.

**Силовая ячейка** выполнена по схеме: неуправляемый трехфазный выпрямитель, фильтр с электролитическими конденсаторами, однофазный инвертор на IGBT модулях, тиристор байпаса ячейки. Выпрямитель силового модуля собран на основе диодного трехфазного неуправляемого выпрямителя. Электролитический конденсатор сглаживает выпрямленное напряжение. Регулирование частоты и выходного напряжения осуществляется широтно – импульсной модуляцией, выполненной на 4 – х IGBT модулях, соединенных по схеме полного моста. Частота выходного напряжения силового модуля регулируется за счет изменения периода циклов с положительным и отрицательным напряжениям меандра ШИМ. Величина базового переменного выходного напряжения силового модуля регулируется за счет изменения скважности импульсов ШИМ. Диоды на входе выполняют неуправляемое выпрямление, коэффициент мощности одного силового модуля достигает 0.97. Конденсатор позволяет компенсировать низкое качество входного электропитания. Оборудование может продолжать работать в случае недостаточного входного напряжения и даже его кратковременного пропадания.

В программном комплексе SimPowerSystem / Simulink Matlab разработана математическая модель силовой ячейки высоковольтного

преобразователя частоты ВЧРП. Адекватность модели проверена натурным экспериментом на комплексном учебном стенде.

*И. А. Старшов; А. Е. Шаров; студенты;  
рук. А.В. Пруднов, к.т.н., доц. (ИГЭУ, г. Иваново)*

## **РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПОДГОТОВКИ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ**

В настоящее время станки с числовым программным управлением (ЧПУ) находят широкое применение. По мере развития элементной базы наряду с совершенствованием самих устройств ЧПУ и систем электроприводов подач и главного движения станков первостепенное значение приобрело создание систем автоматизированной подготовки управляющих программ. Поскольку многие выпускники кафедры ЭП и АПУ, работающие на машиностроительных предприятиях, обслуживают не только системы электропривода станков с ЧПУ, но и сами устройства ЧПУ, им необходимо иметь представление как о ручной, так и об автоматизированной подготовке управляющих программ.

В данной работе рассматривается вариант САП, не требующей знания какого-либо входного языка, так как в диалоговом режиме по запросу системы требуется выбор элемента обрабатываемого контура из каталога и введение численного значения параметров элемента контура. На экране отображается графическое изображение введенного контура. Система автоматизированного программирования реализована в программе HNCcreat. Блок-схема программы HNCcreat представлена на рис. 1.

В первых 4-х блоках производится знакомство с клавишами управления и ввод параметров детали необходимых для определения параметров рабочего окна программы. В блоках 5-11 осуществляется выбор продолжения программирования. Пользователь может начать ввод нового кадра, исправить предыдущий или закончить ввод программы. В блоках 12-25 пользователь выбирает элемент обрабатываемого контура и вводит его. Далее в блоках 26 и 27 производится отображение введенной части контура и координат положения инструмента на экране. Блок 28 предлагает возможность изменения коррекции на размер инструмента. При необходимости изменить коррекцию в блоках 29-33 пользователь может выбрать правую или левую коррекцию и вывести ее значение или сменить введенную ранее. В блоках 34 и 35 производится ввод скорости подачи инструмента.

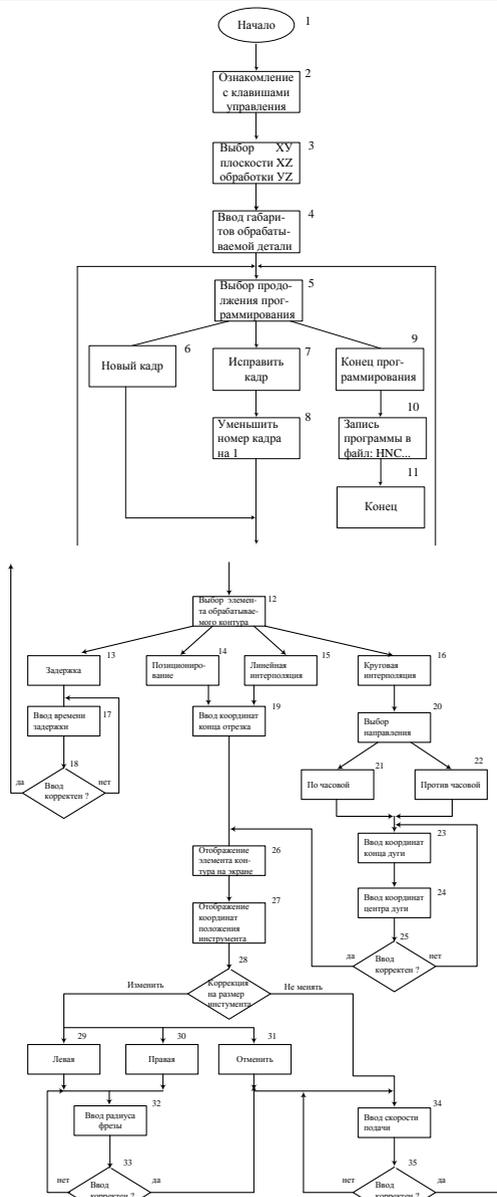


Рис.1 Блок-схема программы HNCreat

*И. А. Старшов; А. Е. Шаров; студенты;  
рук. А.В. Пруднов, к.т.н., доц. (ИГЭУ, г. Иваново)*

## **РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ МОДЕЛИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СТАНКА С ЧПУ**

Ускорить процесс подготовки и отладки управляющих программ и обеспечить повышение их качества можно достигнуть за счет возможности оперативного контроля ее на компьютере и внесения изменений. Именно на решение этой задачи и направлена данная работа.

Модель перемещения рабочих органов станка с ЧПУ реализована в программе HNC contra. Она позволяет визуально контролировать перемещения рабочего органа станка в соответствии с управляющей программой, составленной в кодах ИСО 7 бит с помощью компьютера. Блок-схема программы HNC contr представлена на рис.

В первых 3-х блоках производится ввод названия файла в записанной в нем программой на языке СЧПУ «Славутич-HNC». Программа HNC contr производит преобразование информации из языка СЧПУ в массив данных.

Блоком 4 производится ввод габаритных размеров обрабатываемой детали. Выбор способа просмотра имитации перемещения рабочих органов станка осуществляется блоком 5, пользователь получает возможность просмотреть цикл обработки в целом (блок 6) или кадровый режим просмотра (блоки 9-12).

При этом пользователь в любое время может остановить выполнение программы и затем продолжить просмотр (блоки 7 и 8). Блок 13 предлагает возможность закончить работу или перезагрузить программу HNC contr.

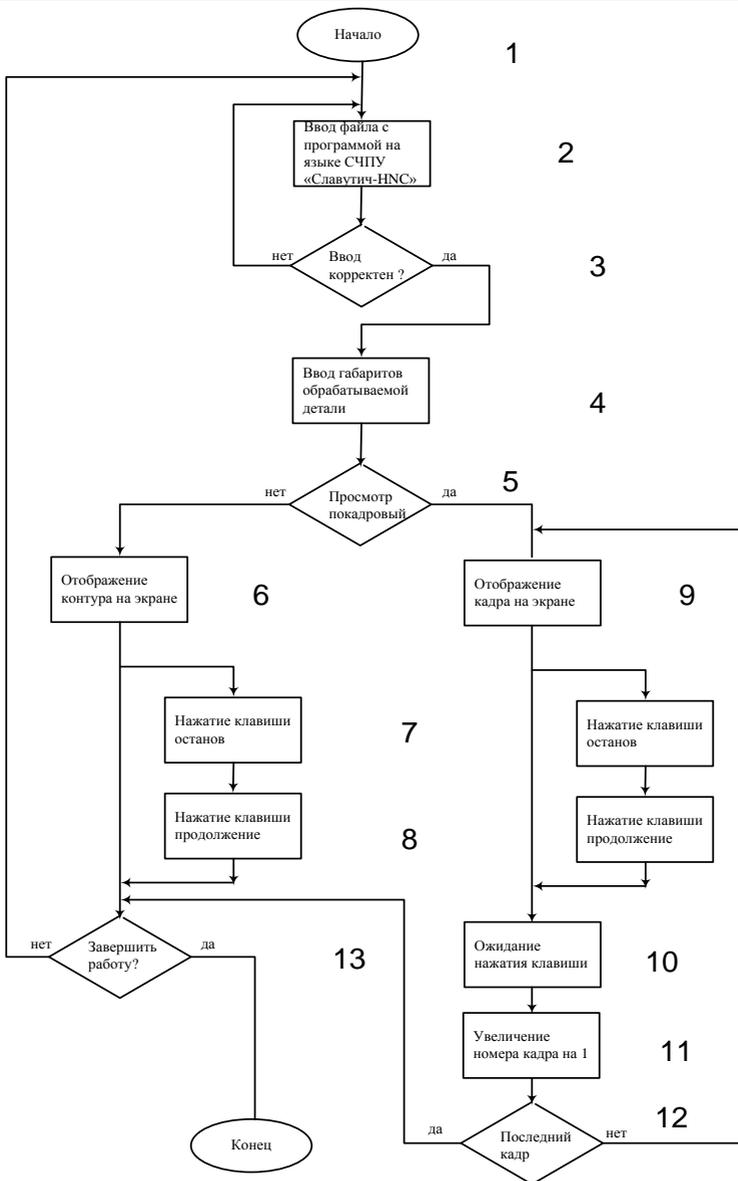


Рис.1 Блок-схема программы HNC contr

*А. Ю. Румянцев, студент; рук. Ю. П. Спичков, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НАТЯЖЕНИЕМ ТРАНСПОРТИРУЕМОГО ТРИКОТАЖА В ПОТОЧНОЙ ЛИНИИ**

В настоящее время приобретает особо актуальное значение задача регулирования натяжения транспортируемого материала отделочного оборудования в текстиле в связи с интенсификацией технологических процессов и связанной с ней тенденцией к повышению скоростей обработки материала и качеству, выпускаемой продукции.

Повышение качества текстильных материалов непосредственно связано с уменьшением их бытовой усадки, которая зависит от степени вытягивания материала на всех стадиях обработки. Это связано с необходимостью снижения натяжения транспортируемого материала при обработке в расправку, как в стадии его формирования, так и в стадии его заключительной обработки.

Система автоматического регулирования натяжения легкодеформируемого трикотажа транспортируемого в линии ЛРП-220 строится на базе отдельных систем электропривода и грузовых петлеобразователей (компенсаторов натяжения), зон обработки, включающих как элемент транспортируемый материал.

Электропривода непосредственно осуществляют синхронизацию движения рабочих машин во всех технологических режимах, производят стабилизацию заданных скоростей и их соотношения, создают условия для управления важнейшими физико-механическими параметрами ткани (натяжением, вытяжкой и т.п.).

Стремление к существенному снижению уровня натяжения транспортируемого трикотажа в рассматриваемой поточной линии, а также ведению процессов управления с минимальными потерями энергии вызывают необходимость совершенствования ее электропривода, зон транспортирования, а также устройств задания, регулирования и измерения натяжения.

На современном этапе развития промышленных электроприводов значительно расширилась область применения регулируемого электропривода переменного тока на основе частотных преобразователей, который обеспечивает работу электродвигателя в режиме оптимального к.п.д. во всем диапазоне регулирования скорости линии. Наиболее

подходящим для решения поставленной задачи является векторно-управляемый электропривод с асинхронными двигателями [1], и в частности отечественные электропривода ЭПВ. Целесообразность замены электропривода постоянного тока на частотно-регулируемый привод ЭПВ с асинхронными двигателями подтверждают и технико-экономические расчеты.

Использование в таких электроприводах наблюдателей состояния для восстановления не измеряемых координат объекта регулирования позволяет строить системы автоматического управления без непосредственных измерителей скорости и отказаться от малонадежных тахогенераторов в контуре регулирования скорости.

Применение векторно-управляемых электроприводов в поточных линиях текстильной отрасли позволяет создать новую технологию энергосбережения и позволяет не только экономить электроэнергию, но и улучшить условия работы электродвигателей и всего технологического оборудования в целом. Регулируемый реверсивный асинхронный электропривод позволяет решить также вопрос плавного и аварийного останова линии, что создает условия для дальнейшего упрощения зон транспортирования обрабатываемого материала.

Существенное значение на работу АСР натяжения транспортируемого материала оказывает конструкция и параметры устройств задания и измерения натяжения. Обеспечение основного фактора качественной обработки ткани - малого натяжения во многом зависит от рационального выбора конструкции тканеведущих узлов технологического оборудования, а также структуры взаимосвязанного электропривода.

В работе показано, что обеспечение малого натяжения и уменьшение чувствительность АСР натяжения транспортируемого материала к вариации физико-механических свойств транспортируемого материала можно за счет придания петлеобразователю свойств датчика натяжения. Последнее достигается подпружиниванием измерительного ролика петлеобразователя. Приведены условия выбора параметров конструкции такого датчика натяжения и показаны пути их достижения.

Применение таких систем управления натяжением легкодеформируемых материалов, как показали проведенные исследования, позволяет улучшить процесс обработки транспортируемого материала (трикотажа), обеспечить устойчивую работу всего взаимосвязанного электропривода линии на минимальных скоростях и малых нагрузках. При этом в сочетании с рациональным выбором параметров зоны обработки и датчиков натяжения, используемых для согласованности работы смежных машин, возможно существенное снижение натяжения транспортируемого материала в зонах обработка.

## СЕКЦИЯ 21

### ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И МАГНИТОЖИДКОСТНЫЕ УСТРОЙСТВА

Председатель – д.т.н., профессор **Казаков Ю.Б.**

Секретарь – к.т.н., доцент **Караулов В.Н.**

*А.А. Ачитаев, аспирант; С.Н. Удалов, рук., к.т.н., доц.  
(НГТУ, г. Новосибирск)*

### ПОВЫШЕНИЕ ЗАПАСА ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ С МАЛОЙ ПОСТОЯННОЙ ВРЕМЕНИ

Современное развитие распределенных источников электрической энергии в России невозможно без развития средств, позволяющих повысить её динамическую устойчивость при резких изменениях режима. Актуальность исследования связана с тем, что в настоящее время в России распределенные источники энергии в изолированных энергосистемах имеют небольшую мощность (до 5 МВт). К сожалению, в таких энергосистемах существуют недостатки в виде проблем с электропитанием, связанных с потерей динамической устойчивости при коротких замыканиях. Статистика нарушений при однофазных коротких замыканиях в данных энергосистемах составляет до 80% случаев всего нарушения электроснабжения. Источники распределенной генерации, выполненные на базе синхронных генераторов, обладают особенностью, а именно, малая инерционность и малый запас динамической устойчивости при резких изменениях режима.

Современная энергетическая установка распределенной генерацией состоит из трех основных компонентов: турбина, статический редуктор или мультипликатор и синхронный генератор. При возникновении резких изменений режимов выделяют следующие проблемы:

- при возможных возмущениях, связанных с замыканиями или резкими изменениями режимами в условиях энергосистемы ограни-

ченной мощности меняется угол нагрузки, и, тем самым, нарушается динамическая устойчивость;

- трансмиссия с постоянным передаточным отношением не позволяет управлять электромагнитным моментом на валу генератора.

В данной работе предлагается решение, которое состоит в использовании псевдо-прямого привода [1]. Суть разработки заключается в применении электромагнитной трансмиссии, где передача механической энергии от тихоходного звена к быстроходному осуществляется благодаря электромагнитному преобразованию, которое возникает между быстроходным и тихоходным звеном с разным числом полюсов из постоянных магнитов. Переменное передаточное отношение осуществляется путем добавления обмотки управления и изменения скольжения.

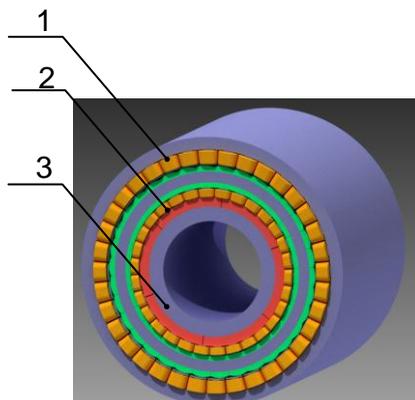


Рисунок 1. – эскиз электромагнитной трансмиссии с переменным передаточным отношением: 1 – обмотка управления; 2 – тихоходное звено; 3 – быстроходное звено

Анализ магнитного поля позволил рассчитать параметры схемы замещения исходя из моделирования различных режимов работы электрической машины, а также позволил оценить скорость и величину влияния на электромагнитный момент и угол нагрузки генератора электромагнитной трансмиссии в момент изменения передаточного отношения машины [2]. Для доказательства данной концепции создается опытный образец машины.

#### Библиографический список

1. Патент US 2012/0094555 A1.
2. The Maxwell Capacitance Matrix [http://www.fastfieldsolvers.com/Papers/The\\_Maxwell\\_Capacitance\\_Matrix\\_WP110301\\_R01.pdf](http://www.fastfieldsolvers.com/Papers/The_Maxwell_Capacitance_Matrix_WP110301_R01.pdf) (дата обращения 08.02.15).

*А.Б. Котов студ.;  
рук. Н.А. Морозов, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАНИЯ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

В практике эксплуатации асинхронных двигателей часто возникают случаи их работы при ненормальных значениях питающего напряжения. Согласно нормам напряжение сети должно отличаться от номинального не более 5 % в сторону уменьшения и не более 10 % в сторону увеличения. Однако на практике напряжение часто отличается от номинального, особенно в сторону уменьшения. Это связано с удалённой установкой двигателя от основной сети и падением напряжения в подводимой электрической энергии кабеле. Возможна также перегрузка такой кабельной линии другими потребителями и снижение напряжения ниже допустимого.

Качественно влияние напряжения при постоянной частоте на параметры асинхронного двигателя можно оценить следующим образом. Известно, пропорционально изменению напряжения питания  $U_1$  меняется значение магнитного потока  $\Phi$  в двигателе. В результате изменяется ток в роторе и статоре, потери в обмотках и стали, частота вращения, индуктивные сопротивления, коэффициент мощности и КПД двигателя.

Уменьшение напряжения и магнитного потока при неизменном моменте на валу двигателя вызовет рост скольжения и тока ротора, что в свою очередь приведёт к увеличению тока статора. При этом следует иметь в виду, что уменьшается и ток холостого хода, как его реактивная, так и активная составляющие. В результате ток статора увеличивается в меньшей мере, чем ток ротора. В некоторых машинах, у которых ток холостого хода относительно велик, ток статора может даже снизиться по мере снижения напряжения. Но в любом случае ток статора увеличивается в меньшей степени, чем ток ротора, который вызывает заметный рост потерь в обмотке ротора и его перегрев. Поэтому снижение напряжения ведёт к опасному перегреву машины.

Увеличение напряжения выше номинального вызывает рост магнитного потока и при постоянном моменте на валу уменьшение тока

ротора и нагрузочного тока статора. Ток намагничивания при этом растёт, что замедляет снижение потребляемого из сети тока. Электрические потери в обмотках машины уменьшаются, но растут потери в стали. Общее соотношение потерь, полезной и потребляемой мощности зависит от конструктивных соотношений, в частности величины воздушного зазора, относительного значения тока холостого хода и электромагнитных нагрузок машины.

Для выявления количественных изменений эксплуатационных параметров машины был просчитан асинхронный двигатель мощностью 22 кВт, шестиполосный, с фазным напряжением 220 В. Результаты расчётов показали, что при общем известном ходе изменения параметров

машины каждый конкретный двигатель имеет свои особенности.

На рис. 1 показано изменение тока статора при изменении напряжения питания двигателя. Его значение определяется в первую очередь нагрузкой двигателя, активной составляющей. Однако, в рассматриваемом диапазоне больше

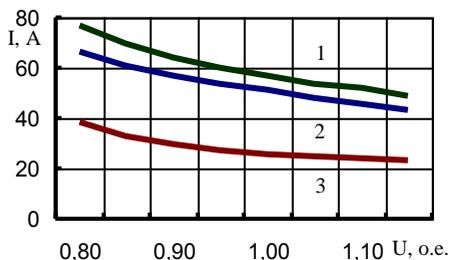


Рис. 1. Зависимость тока статора от напряжения: 1 – полный; 2 – активный; 3 – реактивный токи

всего изменяется реактивная составляющая, растёт на 62 %, а ток полный на 55 %. Ток ротора при этом растёт по мере уменьшения напряжения на 65 %. Индуктивное сопротивление ротора возрастает в 2 раза, скольжение в 2,6 раза. Уменьшение напряжения и магнитного потока вызывает значительный рост скольжения, в 2 раза, и тока ротора, в 1,64 раза, при практически неизменной частоте вращения вала которая

уменьшается по сравнению с номинальным режимом всего на 2 %. На рис.2 показаны кривые изменения электрических потерь в обмотках машины и потери в стали.

По мере снижения напряжения потери в стали уменьшаются, а потери

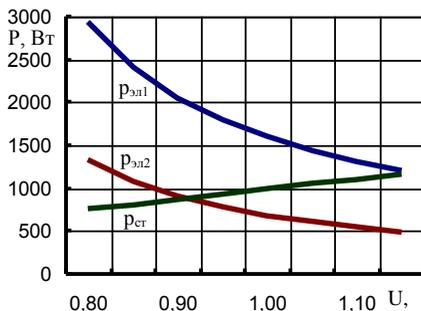


Рис.2. Зависимости потерь в обмотке статора  $P_{эл1}$ , ротора  $P_{эл2}$  и в стали  $P_{ст}$  от напряжения

электрические растут. При этом потери в обмотке ротора растут в большей степени, чем в статоре. В рассматриваемой машине воздушный зазор не велик и равен 0,5 мм. Ток холостого хода составляет 26,4 % от номинального тока, что очень мало для асинхронной машины. Поэтому влияние изменения тока холостого хода на ток статора и параметры двигателя сравнительно невелико. Из приведённых кривых видно, что по мере снижения напряжения потери в двигателе растут, нагрев может превысить допустимые пределы.

Уменьшение напряжения от номинального значения до  $0,8 U_H$  ведёт к уменьшению КПД от 90,1 до 85,5 % и коэффициента мощности  $\cos \varphi$  от 0,89 до 0,866. Однако и увеличение напряжения негативно влияет на параметры асинхронного двигателя. При росте напряжения до  $1,15 U_H$  КПД возрастает только на 1,3 %, а коэффициент мощности уменьшается до 0,878, т.е. на 1,4 %. Это говорит о росте тока намагничивания, который в дальнейшем приведёт к снижению КПД и  $\cos \varphi$ , увеличению потерь в стали и перегреву статора, особенно лобовых частей обмотки, которые плохо охлаждаются.

*Ю.И. Бондаренко, магистрант; рук. Ю.Б. Казаков, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **РАСЧЕТ ШУМОВ ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ РАБОТЕ ОТ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ С ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ**

Преобразование энергии в электрических машинах сопровождается возникновением распределённых и периодически изменяющихся во времени электромагнитных сил, действующих на конструкцию машин. Величины магнитных сил и их частоты зависят от типа электрической машины, частоты и формы питающего напряжения, частоты вращения и электромагнитных нагрузок, распределения магнитной индукции, конструкции активной части и других факторов. Электромагнитные силы вызывают деформацию и колебания ярма статора, вибрации и магнитные шумы. Виброакустические расчёты сводятся к исследованиям колебаний ярма машины и создаваемых шумов от взаимодействия пространственных гармонических полей статора  $v=6k_p/d+p$  и зубцовых ротора  $\mu_{z2}=k_z Z_2+p$ ,  $Z_2$  – число пазов ротора, для

порядков вибрации  $g = \mu \pm \nu \leq 6$ ,  $k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$  [1,2,3]. Пространственные гармоники поля статора  $\nu$  определяются зубчатостью статора и схемой обмотки при  $p$  - числе пар полюсов и  $d$  – знаменателе дробности обмотки. Число порядков вибрации не превышает 13. Угловая частота вращения радиальной вибрационной силы порядка  $g$  -  $\omega_r = 2\pi f_r$ , ее частота

$$\begin{aligned} f_r &= f_1 k \cdot Z_2 (1-s) / p \text{ для } g = \mu - \nu \text{ и} \\ f_r &= f_1 [k \cdot Z_2 (1-s) / p + 2] \text{ для } g = \mu + \nu; \end{aligned} \quad (1)$$

где  $f_1$  – частота питающего напряжения,  $s$  – скольжение.

Скорость колебаний (вибраций) на поверхности сердечника статора  $y_c = P_r / \sqrt{2} \cdot Z_c$ , где  $m_c$  – приведенная масса спинки статора,  $Z_c = |\omega_r| m_c 10^{-2} - 1 / |\omega_r| \lambda_c$  – полное механическое сопротивление статора. Приведенная деформация (податливость) статора определяется как  $\lambda_c = R_c^2 / (E h_c)$  при  $g=0$  и как  $\lambda_c = (12 R_c / E) (R_c / h_c)^3 (g^2 + 1) / g^2 (g^2 - 1)^2$  при  $g \geq 2$ ,  $E$  – модуль упругости,  $R_c$  - средний радиус ярма,  $h_c$  - высота сердечника. Уровень магнитной вибрации для порядка вибрации  $g$  -  $L_r = 20 \cdot \lg(\omega_r |y_c| 10^2 / 3)$ , дБ. При определении результирующего уровня вибрации ( $L_\Sigma$ ) исходят из соображений, что если одновременно действуют два акустических источника, уровни громкости которых в рассматриваемой точке акустического поля равны  $L_1$  и  $L_2$  ( $L_1 > L_2$ ), то результирующий уровень в той же точке равен  $L_\Sigma = L_1 + \Delta L$ , где зависимость  $\Delta L = \psi(L_1 - L_2)$  определяется в соответствии с [1]. В случае нескольких  $g$  акустических источников с разными уровнями шума результирующий уровень  $L_\Sigma$  определяется по тому же соотношению при поэтапной попарной группировке уровней  $L_i$  и  $L_j$  ( $i, j = 1, \dots, r$ ) в порядке их возрастания, начиная с наименьшего уровня, и осуществляется очередная добавка  $\Delta L$  к максимальному уровню. После определения результирующего уровня шума от двух источников, он принимается за новый источник, и расчет продолжается далее с учетом этого шума нового источника. Расчет виброшумовых характеристик тягового асинхронного двигателя (ТАД) 250 мощностью 120 кВт при синусоидальном напряжении по подобному алгоритму [4] дал уровень шума 82 дБ при второй по значимости влиянии пятой пространственной гармонической поля статора (после первой гармоники).

При работе АД от источника с несинусоидальной формой питающего напряжения появляются высшие временные гармоники напряжения и тока. В зависимости от номера гармоники вращающий момент в двигателе будет направлен или по направлению вращения основного поля (происходит сложение колебаний) или против (вычитание). Присутствие высших гармоник в напряжении сети с суммарной амплитудой 20 % увеличивает амплитуду биения до 40 % [5].

В настоящее время АД часто работают от преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) напряжения. При работе АД от ШИМ напряжение имеет разряженную импульсную форму и содержит широкий спектр временных гармоник.

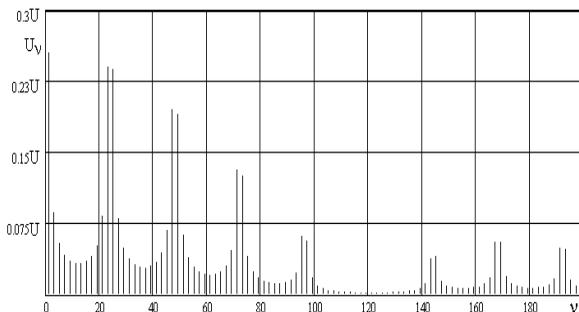


Рис. 1. Амплитуды гармоник ШИМ напряжения при  $N=24$  и  $\gamma=0,2$

На рисунке 1 представлен гармонический состав напряжения при числе импульсов ШИМ на периоде  $N=24$  и скважности импульсов  $\gamma=0,2$  [6]. Амплитуда напряжения 1 гармоники составляет 0,26 опорного напряжения, принимаемого за 100 %. Наибольшие амплитуды наблюдаются для гармоник, близких к кратности  $N$ , но нечетных, и их амплитуды соизмеримы с амплитудой первой (основной) гармоники. Так, для данных параметров ШИМ ( $N=24$  и  $\gamma=0,2$ ) наибольшие амплитуды напряжений наблюдаются для  $v=23$  —  $U_{23}/U_1=0,94$  и для  $v=47$  —  $U_{47}/U_1=0,77$ .

Каждая временная гармоника напряжения будет создавать свои электромагнитные поля, электромагнитные силы, деформации, вибрации ядра статора и магнитные шумы. Для оценки влияния высших временных гармоник напряжения проводим расчет виброшумовых характеристик ТАД для каждой временной гармоники. Частота возбуж-

дающих сил пропорциональна номеру временной гармоники и вместо  $f_1$  в (1) подставляем  $f_{1v} = v f_1$ , скольжение при высоких номерах гармоник  $s_v = 1$ .

Проведены расчеты виброшумовых характеристик ТАД при питании от преобразователя с ШИМ напряжения с учетом влияния пространственных первой и пятой, как наиболее выраженной после первой, и 179 временных гармоник электромагнитных полей (см. таблицу).

**Таблица. Уровни шумов (L) для пространственных и временных гармоник электромагнитных полей при работе ТАД от преобразователя с ШИМ напряжения**

| v (временная гармоника)              | 1    | 3    | 5    | 7    | 9    | 11   | 13   | 15   | 17   |
|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| L (1 пространственная гармоника), дБ | 82   | 64.4 | 56.2 | 51.6 | 48.9 | 47.6 | 47.5 | 48.7 | 51.0 |
| L (5 пространственная гармоника), дБ | 54   | 35.4 | 27.3 | 22.6 | 19.9 | 18.6 | 18.5 | 19.7 | 22.0 |
| v (временная гармоника)              | 19   | 21   | 23   | 25   | 27   | 29   | 31   | ...  | 173  |
| L (1 пространственная гармоника), дБ | 55.6 | 63.5 | 81.9 | 81.8 | 62.9 | 54.6 | 49.9 | ...  | 29.8 |
| L (5 пространственная гармоника), дБ | 26.6 | 34.5 | 53.0 | 52.8 | 33.9 | 25.6 | 20.9 | ...  | 0.87 |

Результирующий уровень шума ТАД при питании от преобразователя с ШИМ напряжения и несинусоидальной формой напряжения составляет 87,7 дБ, что соответствует нормам на допустимые уровни шума для данного типа двигателя (94 дБ для двигателей со степенью защиты IP44-IP55). Увеличение уровня шума по сравнению с питанием напряжением синусоидальной формы составляет 5,7 дБ или 6,7 %.

Таким образом, разработан подход к определению виброшумовых характеристик тягового асинхронного двигателя при работе от преобразователя частоты с ШИМ напряжения. Показано, что из-за резко несинусоидальности формы напряжения происходит возрастание шума АД на 5-6 дБ или на 7 %.

#### Библиографический список

1. Лазарюу Д.Ф., Бикир Н. Магнитный шум электрических машин и трансформаторов / Пер. с рум. – М.: Энергия, 1973.
2. Шубов И.Г. Шум и вибрация электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 208 с.
3. Попов В.И., Тихонов С.И. Магнитный шум трехфазных многополюсных асин-

хронных двигателей с короткозамкнутым ротором серии RA // Электричество. 2008. №4, С.66-73.

4. **Бондаренко Ю.И.** Расчетные исследования виброшумовых характеристик асинхронного двигателя // «Энергия-2014»: Материалы конференции. В 7 . Т.4 – Иваново: ФГБОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2014. –С. 99-103.

5. **Немцев А.Г., Федоров О.В., Шестакова Л.А.** О вибрации электродвигателей при наличии высших гармонических составляющих в напряжении источника питания // Труды VIII Международной конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. - Т 1. - С. 330-331.

6. **Казаков Ю.Б.** Энергоэффективность работы электродвигателей и трансформаторов при режимных и конструктивных вариациях: учебное пособие для вузов / Ю.Б. Казакова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013.– 152 с.: ил.

*С.А. Нестеров, аспирант каф. ЭМ  
ИГЭУ, г. Иваново*

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В МАГНИТОЖИДКОСТНОМ ДЕМПИРУЮЩЕМ УСТРОЙСТВЕ**

Математическое моделирование – один из лучших способов по поиску новых технических решений и оценке свойств вновь создаваемых устройств. При исследовании магнитожидкостных устройств наиболее соответствующие реальности результаты можно получить только при взаимосвязанном моделировании нескольких физических полей. [1]

Комплексная модель магнитожидкостного демпфера (МЖД) с размещённой в поршне магнитной системой включает в себя электромагнитную, гидродинамическую, термодинамическую составляющие при использовании перестраивающихся в процессе моделирования сеток.

Сложность при моделировании магнитожидкостных устройств заключается в описании нелинейной реологической кривой магнитореологической суспензии (МРС) и учёте влияния на неё приложенного магнитного поля. В данной модели эффективная вязкость жидкости описывается уравнением Carreau

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) \cdot \left[ 1 + (K_1 \cdot \dot{\gamma})^2 \right]^{(n-1)/2},$$

где  $\eta_{\infty}$  – динамическая вязкость жидкости при бесконечно большой скорости сдвиговой деформации, т.е. минимальная динамическая вяз-

кость,  $\eta_0$  – динамическая вязкость жидкости при нулевой скорости сдвиговой деформации, т.е. максимальная динамическая вязкость,  $K_1$  – временная постоянная,  $n$  – коэффициент степенного закона.

Для учёта влияния на свойства МРС приложенного магнитного поля динамическая вязкость жидкости при бесконечно большой и при нулевой скорости сдвиговой деформации принимались зависящими от индукции магнитного поля и задавались в виде зависимости  $\eta=f(B)$ , приведённой на рисунке 1.

Полученное по результатам моделирования распределение эффективной вязкости МРС по длине поршня представлено на рисунке 2. Наблюдается значительный рост эффективной вязкости МРС в зависимости от величины магнитного поля. Таким образом, показано влияние магнитной на гидродинамическую составляющую модели.

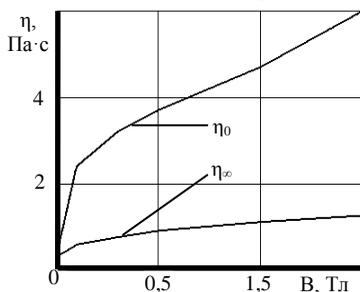


Рисунок 1 – Зависимости  $\eta_0$  и  $\eta_\infty$  от величины действующей на МРС магнитной индукции.

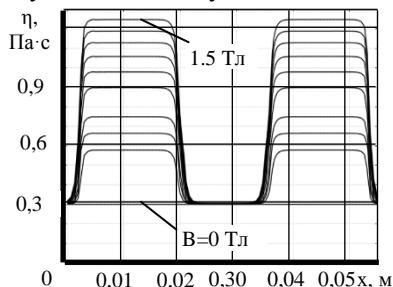


Рисунок 2 – Зависимость вязкости МРС по высоте поршня при разных значениях магнитной индукции

На рисунке 3 показаны зависимости перепада давления по длине поршня в зависимости от создаваемого в зазоре магнитного поля. При отсутствии магнитного поля ( $B_n=0$ ) распределение давления по длине поршня, линейное. Для всех зависимостей с магнитным полем в зазоре кривую перепада давления можно разбить на 3 участка. Большой наклон имеют участки, соответствующие перепаду давления под полюсами, по сравнению с перепадом давления в межполюсном пространстве. На рисунке 4 представлена зависимость силы сопротивления демпфера от величины магнитной индукции. Показано заметное влияние, оказываемое приложенным магнитным полем, на силовую характеристику демпфера.

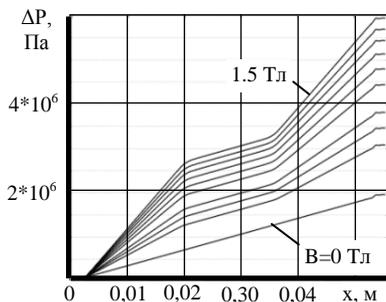


Рисунок 3 – Зависимость перепада давления по длине поршня при разных значениях магнитной индукции

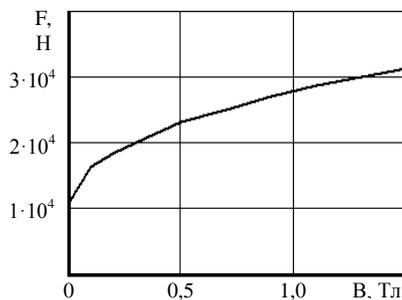


Рисунок 4 – Силовая характеристика демфера при разных значениях магнитной индукции

#### Библиографический список

1. Казаков Ю.Б., Морозов Н.А., Нестеров С.А. Исследование взаимосвязанных процессов в магнитоожидкостном демпфирующем устройстве // Вестник ИГЭУ. – 2014. – Вып. 6. – С.44-48.

*Зверев Я.А., студ.; рук. Ю.Б. Казаков, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## АНАЛИЗ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ГИБРИДНОГО ТРАНСПОРТА

Асинхронные тяговые электродвигатели (ТЭД) – основной тип двигателей переменного тока, используемых на транспорте. Поэтому прогнозирование ресурса ТЭД является актуальной задачей в транспортном электромашиностроении, решение которой позволяет определить срок восстановления ТЭД в зависимости от условий эксплуатации. Ресурс ТЭД количественно определяется совокупностью вероятностных характеристик и параметров, отражающих закономерности возникновения отказов в конкретных условиях эксплуатации. Тяговые электродвигатели относятся к наиболее нагруженному оборудованию с точки зрения комплексного воздействия на них тепловых, электрических, механических и климатических факторов. Поэтому, несмотря на постоянно проводимые мероприятия конструктивно-технологического характера

при изготовлении и ремонте, уровень повреждаемости ТЭД в эксплуатации хотя и снижается, но остается довольно высоким.

Отдельно необходимо выделить тепловые перегревы ТЭД, так как согласно статистике отказов на них приходится 40% повреждений тяговых асинхронных электродвигателей, поэтому анализ теплового состояния ТЭД – актуальная задача. Как известно, превышение температуры на  $6^{\circ}\text{C}$  снижает срок службы изоляции в два раза. Исходя из этого, система прогнозирования ресурса тягового электродвигателя представляется как совокупность вычислительно-программных средств, в числе которых важное место занимает тепловая математическая модель, позволяющая определить температуру всех частей тягового электродвигателя. Также важное место занимает модель, описывающая закономерность изменения свойств изоляции от температуры, представляющая информацию о температурном поле во всем его объеме.

Подробную информацию о температурном поле машины можно получить теоретическим путем на основе уравнения теплопроводности. Действительно, корректная математическая модель обеспечивает полную картину поля, если имеются надежные сведения о распределении потерь, свойствах материалов и течении охлаждающих агентов. В задачи теплового расчета входит определение средней температуры активных частей машины, вычисление тепловых потоков между смежными элементами конструкции, т.е. расчет поля температуры в машине для номинального режима работы. Для ТЭД номинальным является продолжительный режим работы. Многочисленные теоретические разработки, применяемый математический аппарат и большое число экспериментальных исследований позволяют производить тепловой расчет с большой точностью. В настоящее время тепловые расчеты производят в программных комплексах, таких как Ansys Thermal, SolidWorks Flow Simulation.

Современные тяговые АД питаются от преобразователя частоты (ПЧ) с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) напряжения. Такой способ питания вызывает дополнительные потери в двигателе и как следствие этому больший нагрев частей машины [1]. Результаты изменения температуры двигателя АИРМ132S8 показаны в таблице 1.

Таблица 1. Результаты измерения температур АД АИРМ132S8 с ШИМ напряжения

|                     | Синусоидальное питающее напряжение | Несущая частота ШИМ $f_{on}, \kappa Гц$ |       |
|---------------------|------------------------------------|---|-------|
|                     |                                    | 4000                                    | 12000 |
| $f_1, Гц$           | 50                                 | 66,7                                    | 66,7  |
| $k_{U_1}$           | 1                                  | 0,897                                   | 0,879 |
| $\Theta_{м1}$       | 73,9                               | 103,7                                   | 90,9  |
| $T_{кор}, ^\circ C$ | 62,8                               | 87,2                                    | 68,0  |
| $T_{окр}, ^\circ C$ | 18,5                               | 18,7                                    | 14,2  |

Из таблицы видно, что при работе АД от источника синусоидального напряжения температура обмотки статора  $\Theta_{м1}$  и температура корпуса  $T_{кор}$  существенно меньше, чем при работе от ПЧ, что подтверждает важность анализа теплового состояния ТЭД. Для анализа, моделирования и расчета тепловых потерь используются различные программные комплексы. Одним из них является Solid Works Flow Simulation. Анализ теплового состояния проведен для тягового асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, номинальной мощностью 182 кВт. Результаты моделирования представлены на рисунках 1,2. Необходимым для моделирования теплового процесса являются : граничные условия, геометрия объекта, источники тепла и пути прохождения тепловых потоков. Результаты довольно наглядны и позволяют определить реальные значения температур, скорость и направление теплового потока. Исходя из результатов расчета, можно принимать конструктивные меры позволяющие улучшить тепловое состояние ТЭД, в частности установку дополнительного вентилятора-наездника, выбор хладагента или изменение формы лопаток вентилятора, с целью увеличения аэродинамического КПД.

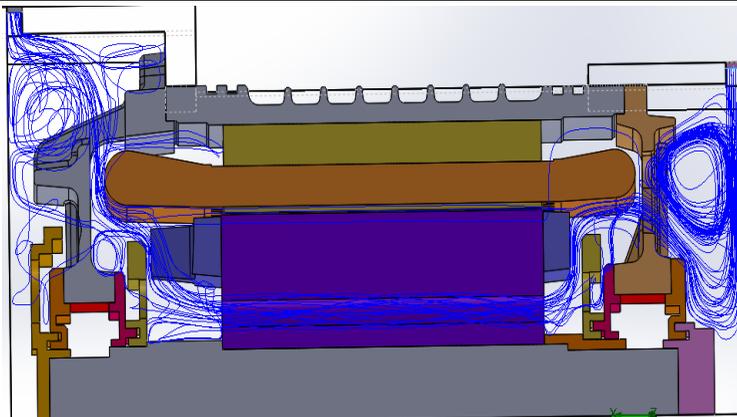


Рисунок 1 - Картина прохождения воздуха сквозь машину

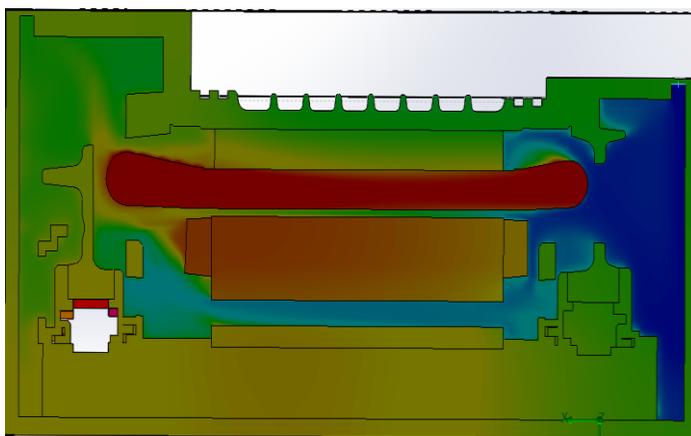


Рисунок 2 - Картина теплового состояния двигателя

Таким образом, анализ теплового состояния – актуальная задача при проектировании тяговых АД. Поскольку современные тяговые АД питаются от ПЧ с ШИМ напряжения, что вызывает дополнительные потери в двигателе и как следствие этому больший нагрев частей машины. В связи с этим ухудшается тепловое состояние двигателя, поэтому важность тепловых расчетов возрастает. Для анализа, моделирования и расчета тепловых потерь используются программные комплек-

сы, такие как SolidWorks Flow Simulation. Программа позволяет показать тепловые потоки внутри двигателя, а также нагрев отдельных частей машины и действительные величины температур. Программа имеет доступный интерфейс, высокое быстродействие, что позволяет использовать этот программный пакет в научно-исследовательской деятельности.

#### Библиографический список

1. **Казаков Ю.Б.** Энергоэффективность работы электродвигателей и трансформаторов при конструктивных и режимных вариациях : учебное пособие для вузов / Ю.Б.Казаков. – М.:Издательский дом МЭИ, 2013. – 152 м.: ил.

*Р.М. Rogozin, магистрант; рук. А.Н. Лапин к.т.н, доцент  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ОБЗОР МЕТОДОВ И ПРОБЛЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ РАСЧЁТОВ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ. СОВРЕМЕННЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ РЕШЕНИЯ.**

С развитием энергетики и других отраслей народного хозяйства, в современном обществе возрастает потребность в силовых трансформаторах самого различного назначения и конструктивного исполнения. Растут единичные мощности и токи трансформаторов, предъявляются новые требования к их характеристикам, усложняются схемы и конструкции отдельных узлов. Всё это выдвигает новые сложные задачи проектирования, в том числе задачи электромагнитных расчётов, т.е. расчётов местных и интегральных параметров магнитного поля.

Результатами электромагнитных расчётов являются токи и напряжения обмоток и их частей при различных режимах, индуктивности, потери и электродинамические усилия. В качестве промежуточных результатов для расчёта усилий, потерь, магнитострикции и для сопоставления результатов с результатами экспериментальных исследований необходимо определить напряжённость магнитного поля или его вектор магнитной индукции. Исходными данными для электромагнитного расчёта обычно бывают устройство и геометрические размеры

трансформатора, свойства материалов и сведения о режимах и условиях работы.

Задача поиска наилучшего варианта трансформатора, в частности распределения витков по сечению обмоток, т.е. задача синтеза оптимального электромагнитного поля, решается аналитически лишь в очень упрощённых случаях. Практически невозможно искать аналитическую функцию четырёх независимых аргументов (три координаты и время) или трёх (если рассматривать статическую или квазистационарную задачу). Поэтому всегда приходится принимать такие допущения, при которых магнитное поле в каждой из рассматриваемых областей зависит от одной или двух координат, а иногда вовсе не зависит от них.

Методы электромагнитных расчётов. Физическое моделирование представляет собой изучение таких же по своей физической природе процессов, что и исследуемые, но не в оригинале, а в похожих на него специально изготовленных моделях. Результаты измерений пересчитываются для оригинала. Физическое моделирование даёт возможность учесть очень сложные формы границ, сред и законы изменения возбуждающей силы, реальные свойства материалов и другие факторы. Однако оно требует много времени и средств на проектирование, изготовление и испытание модели, за счёт чего данный метод не нашёл широкого распространения.

*Математическое моделирование полей токов проводимости* применяют для исследования магнитного поля рассеяния трансформаторов. С помощью электрической ванны или моделирования на электропроводящей бумаге можно учесть сложные двухмерные формы границ сред и распределение возбуждающих сил. Однако широко распространено моделирование только плоскопараллельного поля, моделирование других типов полей связано с существенными техническими ограничениями.

*Аналитическое решение* – поиск функции, удовлетворяющей уравнениям Максвелла при заданных граничных условиях и возбуждающих силах, удаётся лишь в простейших случаях плоскопараллельных и осесимметричных полей при плоских круговых цилиндрических границах сред. С учётом вышесказанного данный метод для расчёта реальных электромеханических объектов не применяется.

*Численное решение дифференциальных уравнений Максвелла* наиболее популярный метод электромагнитных расчётов на сегодняшний день. Численные методы могут быть основаны на конечно-разностной модели или же на конечно-элементной. Последний полу-

чил наибольшее распространение за счёт ряда преимуществ: Метод является проекционным, то есть устойчив; позволяет работать с геометрически более сложными объектами. Решение сразу представляет собой функцию и значения в любой точке могут быть вычислены сразу.

На основе этого метода работают наиболее популярные системы автоматизированных инженерных расчётов (ANSYS, Multiphysics и т.д.), но они являются довольно дорогими, что делает их приобретение для некоторых предприятий затруднительным. Так же стоит отметить, что метод конечных разностей более прост в реализации. Так как он имеет прямоугольную сетку, её можно легко адаптировать к трансформаторам, без потери точности вычислений. Данный метод отошёл на второй план с популяризацией метода конечных элементов. Но с появлением современных компьютерных технологий, имеет практический смысл использовать данный метод, для разработки подсистемы уточненного расчета холостого хода трансформаторов.

#### Библиографический список

1. **Лейтес Л. В.** Электромагнитные расчёты трансформаторов и реакторов. – М.: Энергия, 1981.
2. **Васютинский С. Б.** Вопросы теории и расчета трансформаторов Л., «Энергия», 1970.

*Д.С. Корнилов, асс., рук. Ю.Б. Казаков д.т.н., профессор  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТОРЦЕВОГО ГЕНЕРАТОРА С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Исследуемый генератор предназначен для работы в автономных ветроэлектрических установках малой мощности (до 10 кВт). Потребности в таких установках велики – это метеостанции, геологоразведка, мобильные пункты радиосвязи.

В настоящее время в свободном доступе отсутствуют проверенные методики проектирования торцевых генераторов с постоянными магнитами (ТГПМ). Известны примеры создания элементов методики проектирования ТГПМ на основе имеющихся методик проектирования цилиндрических машин, однако в торцевых машинах осевые и ради-

альные размеры имеют принципиально иную взаимосвязь, что необходимо учитывать. Следовательно, порядок определения основных размеров торцевого генератора должен быть другим.

Предлагается новый порядок определения основных размеров ТГПМ, позволяющий проще и быстрее (с минимальным числом итераций) определять геометрию активной части генератора – размеры сердечников статора и ротора, магнитов, обмоток.

На первом этапе проектирования задаются плотностью тока  $J$  в обмотке якоря, индукциями в нейтральном сечении магнита  $B_{M0}$ , в сердечнике якоря  $B_a$  и в сердечнике индуктора  $B_j$ , коэффициентами  $k_e$ ,  $k_{\phi}$  и  $k_{\sigma}$  (коэффициенты эдс, формы поля возбуждения и рассеяния соответственно). Далее определяются размеры лобовой части катушки фазы статора, внутренние диаметры сердечников статора и ротора, площадь магнита, его радиальный и тангенциальные размеры. Третий этап проектирования – расчет магнитной цепи, результатом которого является высота (аксиальный размер) магнита. Полученные размеры передаются в параметрическую трехмерную модель генератора, реализованную в конечно-элементном пакете ANSYS Maxwell. С ее помощью осуществляется поверочный расчет, позволяющий уточнить плотности тока в обмотках, индукции в сечениях сердечников, а также коэффициенты  $k_e$ ,  $k_{\phi}$ ,  $k_{\sigma}$ . Далее проводится ряд расчетов, результатом которых являются зависимости  $k_e$ ,  $k_{\phi}$ ,  $k_{\sigma}$  от исходных данных генератора и размеров его активной части. В таком виде методика проектирования может использоваться для совершенствования конструкции и характеристики ТГПМ.

*А. Д. Лапин, магистрант; рук. В.П. Шишкин, к.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **РАСЧЕТ ТОКОВ СТАТОРА И РОТОРА С УЧЕТОМ НАСЫЩЕНИЯ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ И КОРОНОК ЗУБЦОВ В ОДНОФАЗНОМ АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ С ПУСКОВЫМ КОНДЕНСАТОРОМ**

При проведении компьютерного моделирования очень часто сталкиваются с необходимостью упрощения рассматриваемого объекта, что реализуется посредством введения разнообразных допущений. К примеру, для исследования динамики асинхронного двигателя часто используют математические модели, которые не учитывают потери в стали, вытеснение тока в обмотке ротора и насыщения магнитной це-

пи. В некоторых режимах это приводит к существенным количественным и качественным отклонениям расчетных динамических и статических характеристик электрической машины от реальных характеристик. Учет каждого из этих эффектов в отдельности и, тем более, их совместное рассмотрение приводит к существенному усложнению системы уравнений и способов расчета [1].

В данной статье приведен пример математической модели ОАД с пусковым конденсатором, в которой произведен учет насыщения магнитной цепи и коронок зубцов, выполненной в программной среде Mathcad.

В основе модели лежит электрическая схема замещения с переменными параметрами, зависящими от величины тока, протекающего в ветвях схемы (индуктивные сопротивления рассеяния обмоток, главные индуктивные сопротивления фаз), и величины скольжения (приведенное активное сопротивление обмотки ротора). Математическая модель имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \left[ \frac{di}{dt} \right] &= [L(i)]^{-1} \cdot ([u] - [R] \cdot [i] - [L(i)] \cdot [i]); \\ \frac{d\Omega}{dt} &= \frac{M(t) - M_B(t)}{J}; \\ \frac{d\gamma}{dt} &= \Omega. \end{aligned}$$

При нахождении главного индуктивного сопротивления фаз производится расчет намагничивающего тока из схемы замещения с учетом характеристик материала в ярме и зубцах магнитопровода. При нахождении индуктивных сопротивлений рассеяния обмоток была использована последовательность расчета, предложенная в [2].

В итоге была создана математическая модель, описывающая электромеханические процессы с учетом насыщения магнитной цепи и коронок зубцов. Данная модель позволяет проследить протекание переходных процессов в двигателе с момента пуска до установившегося номинального режима работы. Учет насыщения магнитной цепи и коронок зубцов играет немаловажную роль в расчете токов обмоток статора и ротора.

#### Литература

1. **Лавренов Е.О.** Способы учета насыщения магнитопровода в имитационном моделировании асинхронного двигателя с использованием численных методов / Е.О. Лавренов // Сборник научных трудов НГТУ. – 2014. - №2(76). – с. 58 – 63.
2. **Проектирование** электрических машин / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2005. – 767 с.

*С.В. Жуков, магистрант; рук. В.Н. Караулов, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ПОЛЕВЫЕ РАСЧЁТЫ ГИБРИДНОГО ШАГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ANSYS MAXWELL**

Шаговые двигатели (ШД) – широко распространённый вид электрических машин. Они используются в графопостроительной технике, в станках с ЧПУ, в устройстве координатных столов, в робототехнике, при автоматизации технологических процессов (в устройствах подачи и дозирования), в сварочных автоматах, в устройствах медицинских исследований и диагностики, в прочих устройствах, требующих точного позиционирования и высоких моментов при низких скоростях вращения.

Различают три основных вида шаговых двигателей: шаговый двигатель с постоянными магнитами, реактивный шаговый двигатель и гибридный шаговый двигатель, сочетающий в себе преимущества первых двух видов данных машин.

Гибридный шаговый двигатель (ГШД) – наиболее распространённый в настоящее время тип ШД. За счёт использования намагничивающей силы постоянного магнита (ПМ) повышается устойчивость к перегрузкам. Ротор такого двигателя имеет два зубчатых венца, надетых на намагниченный вдоль оси вращения ПМ. Венцы смещены друг относительно друга на половину зубцового деления. Это позволяет уменьшить величину шага в два раза и повысить точность позиционирования привода, использующего ГШД.

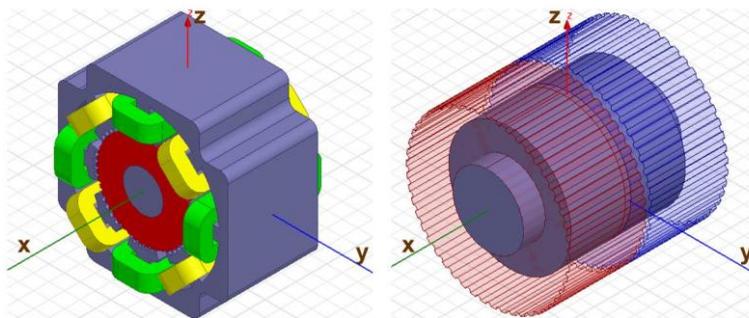


Рисунок 1 – Трёхмерная модель ГШД в ANSYS Maxwell

Данная конструкция приводит к особой конфигурации магнитного поля в двигателе (рисунок 2). Когда под одним венцом ротора и полюсом статора зазор минимален, поля, созданные обмоткой статора и ПМ, усиливают друг друга. В это же время под второй половиной полюса статора и вторым венцом ротора зазор максимален, и поля обмотки и ПМ направлены встречно, уменьшая результирующее поле и паразитный момент [1].

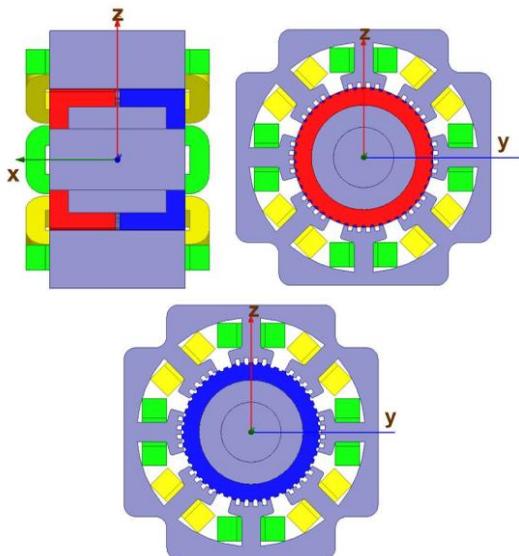


Рисунок 2 – Продольный и поперечные разрезы ГШД

Для расчёта электромагнитных процессов в ГШД был использован программный пакет ANSYS Maxwell, позволяющий осуществить расчёт модели ГШД методом конечных элементов. Сложная конфигурация магнитного поля требует расчёта модели ГШД в трёхмерной постановке.

На первом этапе был выполнен магнитоэстатический полевой расчёт ГШД, в результате которого были получены картины магнитной индукции в различных участках магнитной цепи двигателя (рисунок 3) и определена сложная трёхмерная конфигурация магнитного поля ГШД.

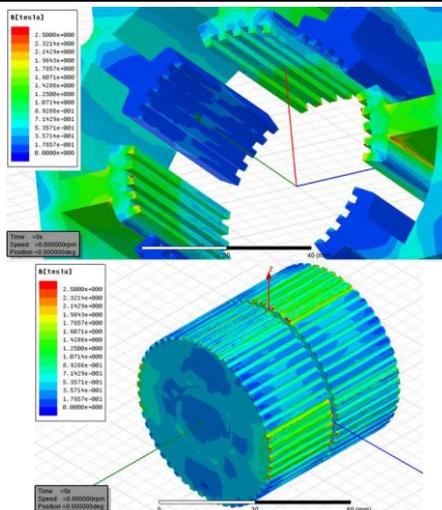


Рисунок 3 – Картина магнитной индукции в различных участках магнитной цепи ГЩД

Из рисунка 3 видно, что под одной половиной полюса магнитное поле постоянного магнита усиливает поле, созданное катушками с током. Во второй половине полюса поля от ПМ и катушек с токами действуют встречно; результирующее поле ослаблено. Поля первой половины полюса создают полезный момент. Результирующее поле во второй половине полюса близко к нулю, что обеспечивает малую величину паразитного момента.

Вторым этапом расчёта ГЩД в ANSYS Maxwell стал динамический расчёт работы ГЩД в режиме холостого хода и нагрузки для определения механических характеристик: момента, частоты вращения и т.д. (рисунок 5), и энергетических показателей: потерь в стали и меди, КПД. Токи в обмотках двигателя изменялись по закону, представленному на рисунке 4.

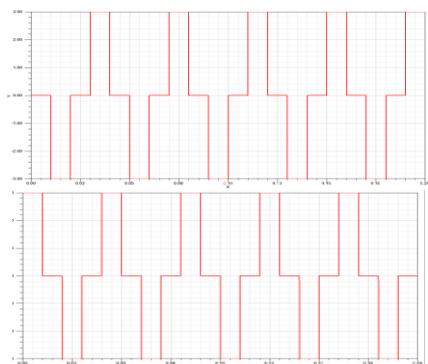


Рисунок 4 – Законы изменения тока в фазе 1 и 2 соответственно

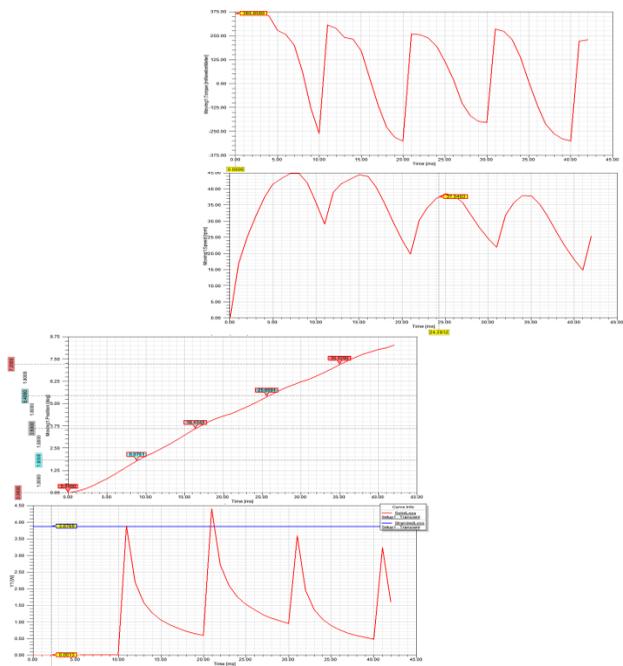


Рисунок 5 – Зависимости момента, частоты вращения, угла поворота ротора и потерь, выделяемых в ГШД соответственно

Цель расчёта ГШД методом конечных элементов заключается в определении размеров зубчатой зоны машины и свойств постоянного

магнита, которые способны обеспечить наибольшую устойчивость двигателя к перегрузкам при оптимальной материалоёмкости и простоте конструкции.

Достоинствами ANSYS Maxwell являются возможность расчёта трёхмерного магнитного поля и электромеханических процессов в ГШД с учётом нелинейности характеристик намагничивания магнитов и магнитопроводов, с учётом вихревых токов и шихтовки магнитопроводов [2].

#### Библиографический список

1. Карпенко Б.К., Ларченко В.И. Прокофьев Ю.А. Шаговые электродвигатели. Киев: Техника, 1972.
2. Вебинары ANSYS на русском языке. Электромеханика. Интернет-сайт. Режим доступа: <http://www.cae-club.ru/forum/elektromagnetizm/elektromekhanika>

*С.Н. Зайкин, студ.;  
рук. В.Н. Караулов, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## РАЗРАБОТКА ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ ТРАКТОРА

Современные тенденции развития автомобильного транспорта в мире направлены на применение гибридных силовых установок, что можно считать главным путём развития этой отрасли. Основным фактором, обуславливающим актуальность этих работ, является постоянно возрастающие требования по снижению токсичности и повышению экономичности транспортных средств. Одной из таких технологий, которая обеспечит значительное сокращение себестоимости конечного продукта, является применение тяжёлых тракторов и машин с автоматической электромеханической трансмиссией.

В процессе создания тяговых электрических машин с высокими удельными показателями (до 0,34 кВт/кг) часто возникает необходимость интенсификации их охлаждения в целях снижения температуры обмотки в наиболее нагруженных режимах работы, и увеличения, таким образом, срока службы изоляции. Выполнение расчета теплового состояния электрической машины требуется для оценки эффективно-

сти применения тех или иных мер на этапе проектирования.

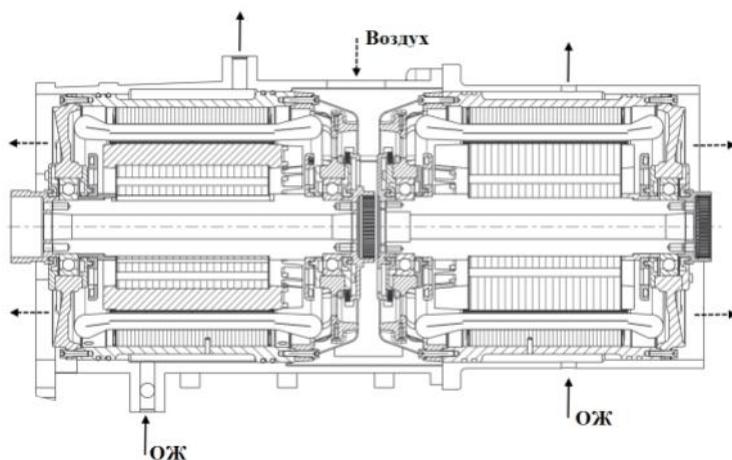


Рис. 1. Общая схема компоновки электрических машин

Разрабатываемые ОАО «НИПТИЭМ» машины (асинхронные мотор-генератор и тяговый двигатель с короткозамкнутым алюминиевым ротором) входят в состав электромеханической трансмиссии трактора мощностью 300 л.с. Машины установлены соосно в едином корпусе (рис. 1). Оребрѐнная часть внешней поверхности станины и внутренняя часть корпуса трактора образуют рубашку охлаждения, в которой циркулирует охлаждающая жидкость (ОЖ). Охлаждающий воздух подается внутрь электрических машин через окно в корпусе трактора, расположенном между двигателем и генератором в центральном отсеке. Пройдя через отверстия в роторе, воздух выбрасывается в атмосферу через окна в крайних отсеках.

При разработке тяговых двигателей предпочтение отводится асинхронным низковольтным трёхфазным двигателям благодаря их надежности и сравнительно малой стоимости. Следует отметить и широкий диапазон частот вращения, который может обеспечить двигатель, что очень важно для этой области.

Техническое задание тягового асинхронного двигателя представлено в таблице 1. В процессе выполнения исследовательской задачи по разработке оптимальных активных частей тягового асинхронного двигателя в среде проектирования «СПРУТ-Технология» был произведѐн исследовательский расчѐт более 20 вариантов электродвигателей в но-

минальном режиме работы. Также требовалось обеспечить на максимальной скорости ( $n=3600$  об/мин) при заданном уровне питающего напряжения (не более 320 В) кратность максимального момента не менее 1,3.

Таблица 1. Техническое задание тягового асинхронного двигателя

|   |                  |
|---|------------------|
| Максимальная мощность на валу ТАД, кВт  | 90               |
| Длительный момент на валу ТАД, Нм (0 – 1783 об/мин, далее гиперболоа мощности 90 кВт)                 | 482              |
| Диапазон скоростей ТАД с максимальным КПД, об/мин   | 1500- 2100       |
| Максимальная скорость вращения ТАД, об/мин  | 3600             |
| КПД, не менее   | 0,935            |
| Габариты блока электрических машин (МГ и ТАД), мм, не более диаметр (по уплотнению);<br>длина (общая) | 475 / 470<br>650 |
| Вес двух электрических машин, кг, не более  | 500              |

Показатели двигателей в различных зонах регулирования представлены в таблице 2.

Таблица 2. Показатели двигателей ( $h=180$  мм,  $2r=6$ ,  $D_a=437$  мм,  $l=200$  мм)

| Рдлит | Uf  | f     | n    | КПД  | Cos  | Идлит  | Km   | Мдлит | Bz1  | М <sub>Е</sub> |
|-------|-----|-------|------|------|------|--------|------|-------|------|----------------|
| 10,1  | 50  | 10,5  | 200  | 80.8 | 0.84 | 99.56  | 2,28 | 481.8 | 1,94 | 186,5          |
| 25,24 | 100 | 25,7  | 500  | 89   | 0.90 | 104.8  | 2,32 | 481.6 | 1,68 |                |
| 50,48 | 185 | 50.8  | 1000 | 92.3 | 0.90 | 108.9  | 2,39 | 481.6 | 1,61 |                |
| 60,57 | 220 | 60.75 | 1200 | 93.3 | 0.90 | 109.3  | 2,43 | 482   | 1,61 |                |
| 75,72 | 280 | 75.75 | 1500 | 94   | 0.90 | 106.2  | 2,61 | 481.8 | 1,65 |                |
| 90    | 320 | 90    | 1784 | 94.2 | 0.90 | 109.2  | 2,45 | 481.6 | 1,6  |                |
| 90    | 320 | 111   | 2200 | 93.9 | 0.90 | 110.2  | 1,95 | 390.5 | 1,33 |                |
| 90    | 320 | 126.2 | 2500 | 93.6 | 0.89 | 111.73 | 1,7  | 343.6 | 1,2  |                |
| 90    | 320 | 156.8 | 3100 | 92.9 | 0.86 | 117    | 1,35 | 277   | 0,96 |                |
| 84    | 320 | 171,8 | 3400 | 92.5 | 0.85 | 110.5  | 1,32 | 235   | 0,88 |                |
| 79    | 320 | 181.9 | 3600 | 92.3 | 0.85 | 104.26 | 1,31 | 209   | 0,83 |                |

Зависимости моментов и полезной мощности от скорости вращения приведены на рисунке 2.

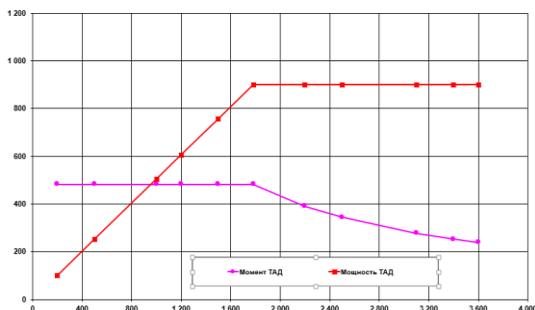


Рис.2. Зависимости моментов и полезной мощности от скорости вращения ТАД

### Библиографический список

1. Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы / Драгомиров М.С., Зайцев А.М. // Сборник научных трудов IV Международной научно-практической конференции. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. -С. 98-102.
2. Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы/ Драгомиров М.С., Зайцев А.М. // Сборник научных трудов IV Международной научно-практической конференции. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. -С.358-363.

*К. А. Коростелев, студ.; А.И. Тихонов, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, Иваново)*

## АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ЦЕПНЫХ ТЕПЛОВЫХ МОДЕЛЕЙ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА

Основной задачей данной работы является решение задач теплового расчета распределительных трансформаторов в стационарных режимах. Как известно, существуют два подхода к решению задач сложного теплообмена в электротехнических устройствах: методы решения задач в полевой постановке и методы решения задач на основе цепных моделей. Полевые модели обладают высокой точностью, но большим временем расчета. Цепные модели имеют меньшее время расчета, но обладают меньшей точностью.

В связи с этим необходима разработка метода, позволяющего производить тепловые расчеты электротехнических устройств с требуемой точностью и высоким быстродействием. В качестве решения предлагается метод разветвленных тепловых цепей на основе электри-

ческих схем замещения. Тепловая модель распределительного трансформатора на основе электрических схем замещения основывается на методах формализации электрической цепи.

Среди методов формализации электрической цепи одним из самых эффективных является *метод переменных состояния (смешанных величин)*, [1]. Данный метод совмещает в себе возможности *метода контурных токов* и *метода сечений* и наиболее удобен для расчета переходных процессов.

Метод переменных состояния позволяет формировать матрицы системы дифференциальных уравнений первого порядка, записанных в канонической форме (в форме Коши), удобной для численного интегрирования.

Особенностью обмоток, выполненных из ленты, является сильное вытеснение тока на края обмотки, [2]. Неравномерное распределение тока по высоте ленты приводит к неравномерному распределению потерь по высоте обмотки и, следовательно, к неравномерным перегревам.

Математическая модель теплового состояния обмотки из ленты представляет собой разветвленную тепловую цепь, состоящую из следующих элементов:

- источников тепловых потерь – потерь в расчетных секциях;
- тепловых сопротивлений теплопроводности и теплоотдачи с поверхности (вследствие свободной конвекции и излучения);
- тепловых сопротивлений воздушного канала.

Фрагмент разветвленной электрической схемы замещения тепловых процессов в обмотке, состоящей из трех концентроров, выполненный в среде Simulink, [3], представлен на рисунке 1.

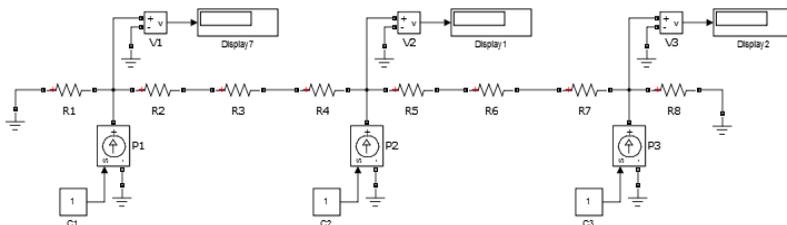


Рисунок 1 - Фрагмент электрической схемы замещения расчетной секции

Анализ результатов расчета позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Рассматриваемая цепная модель позволяет осуществить более точный расчет тепла в обмотке трансформатора;

2. Использование электрических схем замещения тепловых цепей позволяет рассчитывать достаточно сложные схемы, а, следовательно, и более точные без значительного увеличения трудоемкости расчетов, так как расчет осуществляется автоматически без участия пользователя, систем же расчета тепловых схем замещения на современном рынке программных продуктов практически нет.

3. К недостаткам следует отнести то, что электрические схемы замещения для расчета тепловых процессов являются менее наглядными по сравнению с тепловыми расчетными схемами.

#### Библиографический список

1. **Демирчян К.С.** Теоретические основы электротехники – Изд. 4-е. – СПб.: Питер, 2003. – Т.1. – 424 с.
2. **Тихонов А.И.** Проектирование и производство токоограничивающих реакторов из алюминиевой ленты / А.И. Тихонов, А.В. Иванов; Федеральное агентство образования РФ ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2010. – 116 с.
3. **Новгородцев А.Б.** Расчет электрических цепей в MATLAB: учебный курс / А.Б. Новгородцев. – СПб.: Питер, 2004. – 250 с.

*А.В. Стулов, асп.; рук. Тихонов А.И., д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **МНОГОУРОВНЕВЫЙ ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В ПРОЦЕССЕ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОГО РЕШЕНИЯ**

Современные требования к процессам проектирования трансформаторного оборудования характеризуются необходимостью повышения точности расчетов при высоком быстродействии, и, как следствие, снижением затрат на процесс проектирования и проведение типовых испытаний опытных образцов трансформаторов.

Одной из наиболее актуальных является задача разработки уточненных тепловых моделей трансформатора [2]. Разработанные математические модели легли в основу создания многоуровневой подсистемы тепловых расчетов САПР распределительных трансформаторов [1].

Особенностями данной подсистемы являются:

- 1) наличие моделей различного уровня точности и быстродействия;

- 2) возможность интеграции в подсистемы оптимизации САПР распределительных трансформаторов [3];
- 3) параметрическая генерация расчетных моделей;
- 4) возможность имитации тепловых испытаний трансформатора.

Основой структуры подсистемы является трехуровневая математическая модель теплового состояния трансформатора:

1) модели 1 уровня основываются на инженерных методиках, изложенных в РД 16452-88 «Трансформаторы силовые масляные с системами охлаждения М и Д. Тепловой расчет обмоток»;

2) модели 2 уровня основаны на разветвленных электрических схемах замещения;

3) модели 3 уровня основываются на решении задачи теплового расчета в полевой постановке.

Структура подсистемы теплового расчета масляных трансформаторов и связь ее с другими подсистемами САПР представлена на рис. 1 [1]. На первом уровне подсистемы теплового расчета (ПТР) на основе инженерных методик проводится предварительный расчет превышений температур обмоток над температурой масла. Рассчитанные превышения температур передаются в подсистему расчета системы охлаждения (ПРСО). После предварительного теплового расчета данные передаются в подсистему оптимизации [3] конструкции (ПОК). При оптимизации используется тепловая модель на основе электрических схем замещения.

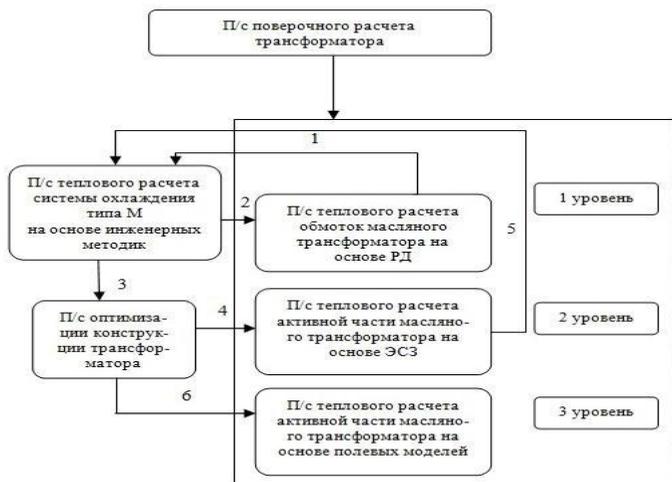


Рис.1. Структура подсистемы теплового расчета масляного трансформатора

**Таблица 1. Результаты многоуровневого теплового расчета и результаты тепловых испытаний масляных трансформаторов (обмотки низшего напряжения (НН))**

| Тип         | Среднее превышение температуры обмоток НН над температурой окружающей среды, °С |           |           |       |
|-------------|---|-----------|-----------|-------|
|             | 1 уровень   | 2 уровень | 3 уровень | ТЕСТ  |
| ТМГ-250/10  | 71,54   | 58,14     | 55,78     | 53,92 |
| ТМГ-400/10  | 70,48   | 57,83     | 53,97     | 52,04 |
| ТМГ-630/10  | 68,16   | 52,71     | 51,52     | 50,84 |
| ТМГ-1000/10 | 76,57   | 62,02     | 59,02     | 57,28 |

**Таблица 2. Результаты многоуровневого теплового расчета и результаты тепловых испытаний масляных трансформаторов (обмотки высшего напряжения (ВН))**

| Тип         | Среднее превышение температуры обмоток ВН над температурой окружающей среды, °С |           |           |       |
|-------------|---|-----------|-----------|-------|
|             | 1 уровень   | 2 уровень | 3 уровень | ТЕСТ  |
| ТМГ-250/10  | 69,48   | 65,51     | 62,13     | 61,71 |
| ТМГ-400/10  | 70,12   | 65,04     | 63,01     | 61,01 |
| ТМГ-630/10  | 67,64   | 62,71     | 59,53     | 58,67 |
| ТМГ-1000/10 | 73,37   | 68,38     | 66,74     | 64,99 |

После нахождения оптимального решения строится тепловая модель активной части трансформатора в полевой постановке и проводится тепловой расчет средствами Solidworks Flow simulation, что имитирует проведение тепловых испытаний в виртуальной среде. В таблице 1 и 2 представлены результаты расчета масляных трансформаторов и реальных испытаний трансформатора в лаборатории ЗАО «Трансформер» (г. Подольск)

На рис. 2. представлена модель 3 уровня активной части трансформатора ТМГ-630/10/0,4 D/Y-11. Гофробак трансформатора моделируется с помощью эквивалентной поверхности с той же поверхностной плотностью теплового потока  $q$ , что и реальный бак. Как было сказано выше система охлаждения рас-

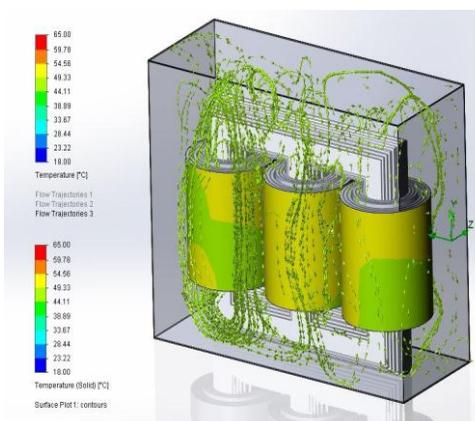


Рис.2. Тепловой расчет активной части масляного трансформатора в полевой постановке Flow Simulation

считывается с помощью инженерных методик.

Модели 3 уровня основаны на решении системы уравнений Навье–Стокса [4], и позволяют исследовать течение трансформаторного масла, в каналах охлаждения и в остальном объеме бака.

Использование тепловых моделей различного уровня точности и быстродействия позволяет решать весь спектр тепловых задач, стоящих перед проектировщиками трансформаторного оборудования: от исследования принципиально новых конструкций трансформаторов до оптимизации существующих проектов.

#### Библиографический список

1. **Стулов, А.В.** Разработка многоуровневой подсистемы тепловых расчетов САПР активной части распределительных трансформаторов // А.В. Стулов, А.И. Тихонов, И.А. Корнев / ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2014. – 96 с.
2. **Стулов, А.В.** Разработка уточненных математических моделей для создания подсистем САПР распределительных трансформаторов с обмотками из ленты / А.В. Стулов, А.С. Зайцев, И.А. Трофимович, В.И. Печенкин // Вестник ИГЭУ. – 2014. Вып.5. – С. 37 – 41.
3. **Тихонов, А.И.** Разработка подсистемы оптимизации САПР распределительных трансформаторов / А.И. Тихонов, А.С. Зайцев, А.В. Стулов, И.А. Трофимович // Вестник ИГЭУ. - 2014. Вып. 6. - С. 87-91.
4. **Solidworks.** Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский [и др.]. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005 – 800 с.

*И.В. Еремин, соиск.;рук. А.И. Тихонов, д.т.н., проф.;  
Г.В. Попов, д.т.н., проф. (ИГЭУ, Иваново)*

## ОБОСНОВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С СЕРДЕЧНИКОМ ИЗ АМОРФНОЙ СТАЛИ

Одним из актуальных направлений энергосбережения и повышения экономической и энергетической эффективности в трансформаторосторонении является использование трансформаторов с сердечником из аморфной стали. Экономия электроэнергии достигается за счет значительного уменьшения потерь холостого хода. В связи с малой толщиной аморфной ленты материал наиболее пригоден для витой конструкции сердечника. Наибольший экономический эффект достигается в трансформаторах малой мощности, то есть при их установке в осветительных сетях. В то же время не существует апробированных инженерных методик расчета данных трансформаторов [1].

Несмотря на то, что плотность аморфных сплавов на 1-2 % ниже плотности кристаллических аналогов, прочность их выше в 7-10 раз. Их удельное электрическое сопротивление в 3-5 раз выше, чем у кристаллических аналогов. Практически все электромагнитные, механические и потребительские свойства аморфной стали превосходят аналогичные свойства анизотропной электротехнической стали, применяемой в современных трансформаторах, за исключением индукции, составляющей 1,4 Тл и коэффициента заполнения. К техническим преимуществам трансформаторов с сердечником из аморфной стали можно отнести следующие:

- низкие потери холостого хода,
- высокая магнитная проницаемость,
- прямоугольная форма кривой намагничивания,
- высокая коррозионная стойкость,
- отсутствие межлистовой изоляции,
- стоимость аморфной стали с годами понижается.

Технологический процесс изготовления трансформатора с сердечником из аморфной стали существенно отличается по сравнению с традиционным производством, но требования к технологии и сборке остаются прежними как и для электротехнической стали. Внедрение подобных технологий требует использования высокоточных роботизированных линий сборки. Эти сердечники являются технологической альтернативой, в вопросе создания идеального трансформатора.

Производство трансформаторов с сердечником из аморфной стали в России пока еще не налажено, однако в настоящее время многие заводы планируют перейти на их выпуск, несмотря на недостатки:

- допустимая рабочая индукция  $< 1,5$  Тл;
- коэффициент заполнения сечения сталью 0,8-0,85;
- аморфная сталь имеет толщину 25-30 мкм и большую твердость, что усложняет сборку сердечника;
- высокая стоимость аморфной стали;
- себестоимость изготовления трансформаторов с применением аморфной стали выше примерно на 20-25 % стоимости трансформаторов с традиционной электротехнической сталью;
- сложность выпуска аморфной стали в виде широкой ленты и большая стоимость определяют ее использование только для распределительных трансформаторов малой мощности.

Экономический эффект можно оценить исходя из годовых затрат на трансформатор [2]. В соответствии с упрощенной формулой (не учитывается человеческий труд, при 40-часовой продолжительности рабочей недели годовая норма рабочего времени определяется:  $8 \times 244 + 7 \times 7 = 2001$  час/год)

$$Z_g = Z_{mp} + Z_x P_x + Z_k P_k + Z_p Q_p,$$

где  $Z_g$  – годовые затраты, руб;  $Z_{mp} = 0,185 \cdot X$  – стоимость трансформатора в год, руб;  $X$  – оптовая цена, руб;  $P_x$  – потери холостого хода (ХХ), квт;  $P_k$  – потери короткого замыкания (КЗ), квт;  $Q_p$  – реактивная мощность, квар.

Принимается:

$Z_x = 5$  руб./квт – стоимость 1 квт потерь ХХ в год;

$Z_k = 4$  руб./квт – стоимость 1 квт потерь КЗ в год.

Затраты на компенсацию реактивной мощности  $Z_p = 1,5$  руб./квар – стоимость 1 квар реактивных потерь в год.

Реактивная мощность

$$Q_p = \frac{S}{100} \left( I_0 \frac{8700}{8760} + U_p \frac{4000}{8760} \right),$$

где  $S$  – номинальная мощность, ква;  $I_0$  – ток ХХ, %;  $U_p$  – реактивная составляющая напряжения КЗ, %; 8760 – число часов в году; 8700 – число часов, в течение которых имеют место потери ХХ в году; 4000 – число часов, в течение которых имеют место потери КЗ.

Таким образом, расчетная формула годовых затрат имеет вид

$$Z_g = 0,185 \times \text{оптовую цену} + 5P_x + 4P_k + 1,5 \frac{S}{100} \left( I_0 \frac{8700}{8760} + U_p \frac{4000}{8760} \right) \text{ руб/год}$$

При выборе наилучшего варианта проектируемого трансформатора наиболее экономичным будет тот, у которого значение  $Z_g$  будет наименьшим. Средняя цена трансформатора с сердечником из аморфной стали с заданными параметрами составляет 320 000 рублей, а трансформатора классического исполнения 280 000 рублей. Получаем для трансформатора АТМГ  $Z_g = 64350$  руб/год, для трансформатора ТМГ  $Z_g = 57925$  руб/год.

Удорожание годовых затрат исходя из данного расчета определяется более высокой оптовой ценой начального нового изделия но годовая экономия очевидна за счет суммарных потерь энергии за год в трансформаторе расчет параметров которых приведен в табл. 1.

**Таблица 1. Основные расчетные параметры трансформатора с аморфной сталью (АТМГ) и трансформатора классического исполнения (ТМГ)**

| ПАРАМЕТРЫ                            | АТМГ      | ТМГ       |
|--------------------------------------|-----------|-----------|
| Номинальная мощность, Sn(КВа)        | 63        | 63        |
| Потери короткого замыкания,(Вт)      | 1210      | 1280      |
| Потери холостого хода,(Вт)           | 62        | 200       |
| Номинальный ток холостого хода, %    | 0,32      | 1,0       |
| Коэффициент заполнения, Кз(%)        | 0,85      | 0,95      |
| Высота обм. высшего напряжения,(м)   | 0,021     | 0,020     |
| Масса обмотки ВН,(кг)                | 11,55     | 11,37     |
| Масса обмотки НН,(кг)                | 17,60     | 20,04     |
| Масса отводов,(кг)                   | 0,19/0,09 | 0,19/0,03 |
| Масса магнитопровода,(кг)            | 225,6     | 207,6     |
| Индукция в магнитопроводе,(Тл)       | 1,32      | 1,58      |
| Ширина бака,(м)                      | 0,332     | 0,349     |
| Длина бака,(м)                       | 1,092     | 0,910     |
| Глубина бака,(м)                     | 0,611     | 0,246     |
| Объём масла в баке,(м <sup>3</sup> ) | 0,219     | 0,081     |

Период окупаемости трансформатора по предварительным расчетным данным 3,5 года, принимая общую суммарную массу  $m=260$  кг для АТМГ, и  $m=240$  кг для ТМГ. Как видно из расчета массы распределительных трансформаторов одинаковой мощности с сердечниками из аморфной стали на 15-20 % больше массы трансформаторов с традиционной электротехнической сталью из-за более плотной навивки сердечника и как следствие более высокой ценой на затраты по железу. При стоимости потерь электрической энергии 5 руб/кВтч увеличение затрат на 20 % для трансформатора мощностью 63 кВА окупается за 3,5 года.

Следует отметить перспективность использования сердечников из аморфной стали в столбовых трансформаторах, используемых в сельской местности. В настоящее время по всему миру широко внедряется новая схема энергосбережения удаленных потребителей в сельской местности, в частности коттеджных поселков. Особенность данной схемы состоит в использовании столбовых трансформаторов для питания нескольких (3-4-х) сельских домов. При этом трансформатор устанавливается вблизи этих домов, так что длина линии электропередач 0,4 кВ не превышает 100 м. К трансформатору при этом подводится напряжение 10,5 кВ. Это позволяет существенно снизить потери электроэнергии в сети 0,4 кВ. По предварительным расчетам использование таких трансформаторов с сердечником из аморфной стали позволяет экономить за счет снижения потерь холостого хода от 250 до 500 руб в месяц.

**Библиографический список**

4. **Еремин И. В., Попов Г. В., Тихонов А. И.** К вопросу о проектировании распределительных трансформаторов из аморфной стали // 2-я Всероссийская науч.-практич. конф. «Новые технологии в промышленности, науке и образовании» / под общей ред. И.П. Белова. – Оренбург: Изд-во ООО «Золотой кардинал», 2011. – с. 111-112.
5. **Битеряков Ю.Ф.** Экономика предприятия - Методические указания к курсовой работе-Редактор Н.С. Работаетва / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2010.

*И.В.Трофимович, асп.; рук. Тихонов А.И., д.т.н., проф.  
ИГЭУ, г.Иваново*

## РАЗРАБОТКА САПР РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

САПР распределительных трансформаторов создана на базе табличного процессора MSExcel и математического пакета MatLab. Внешний вид САПР трансформаторов представлен на рис. 1.

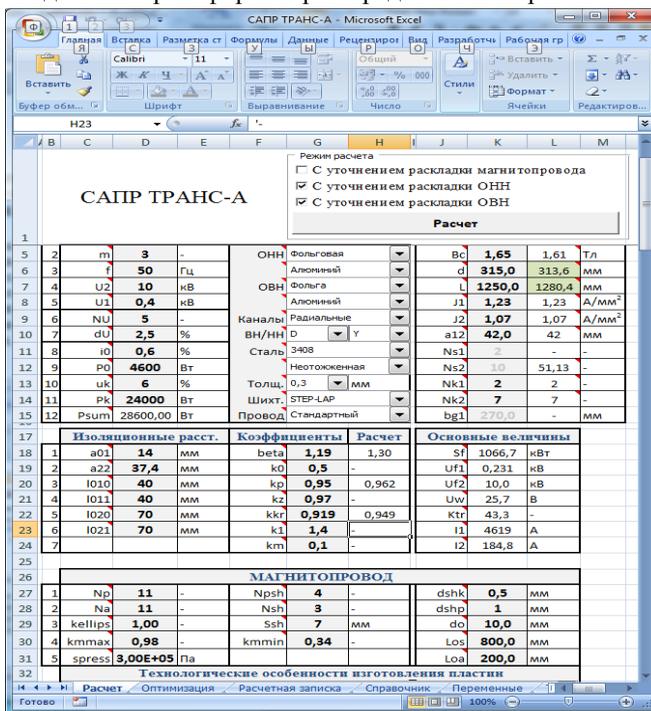


Рис. 1. Внешний вид САПР трансформаторов

Система позволяет рассчитывать и оптимизировать сухие и масляные 3-х фазные 2-х обмоточные трансформаторы мощностью до 10000 кВА, класса напряжения до 35 кВ. Масляные трансформаторы выполняются в гофробаке. Сухие трансформаторы выполняются с литой обмоткой высшего напряжения (ВН). Обмотки низшего напряжения (НН) могут быть выполнены из алюминиевого или медного прямоугольного провода (слоевые или винтовые) или фольги. Обмотки ВН могут быть выполнены из круглого или алюминиевого или медного прямоугольного провода (слоевые) или фольги с осевыми или радиальными каналами. Магнитная система выполняется из электротехнической стали (ЭТС) толщиной 0,23; 0,27; 0,3; 0,35 мм. Схемы шихтовки – прямой стык; комбинированный стык; косой стык в “Г” углах; комбинированный стык в “Г” углах; полный косой стык в 2-х исполнениях, Stap-Lap. Система предусматривает возможность выполнения сечения стержня и ярма овальными.

Система позволяет осуществлять предварительный расчет трансформатора, в процессе которого система сама выбирает параметры магнитной системы и обмоток, а также уточненный расчет по заданным пользователем значениям данных параметров. Кроме того есть возможность выполнения оптимизации проекта. Список варьируемых переменных зависит от выбранной конструкции обмоток. Выбор проводников осуществляется из списка проводников на складе. Оптимизация осуществляется с использованием генетических алгоритмов в среде MatLab по заданию, сформированному в Excel. Поверочный расчет осуществляется по методикам, изложенным в соответствующих руководящих документах (РД), реализованным программными средствами MatLab. Связь между Excel и MatLab осуществляется посредством интерфейса ExcelLink.

Комплект чертежей и спецификации строятся автоматически в среде SolidWorks. Для этого в SolidWorks созданы 3D-модели нескольких типовых трансформаторов и шаблоны чертежей, которые могут быть сформированы по этим моделям. 3D-модель автоматически перестраивается по размерам готового проекта, экспортируемым из рабочей книги Excel. Для этого была организована взаимосвязь между расчет-

ной запиской в Excel и пакетом SolidWorks. Все необходимые размеры выбираются из соответствующих ячеек расчетной записки и передаются в таблицы SolidWorks, организованные в формате Excel. Эти размеры проверяются при сборке различных деталей.

*С.Е. Рассолов, студент; рук. Ю.И. Страдомский к.т.н. доцент  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДЫ ОТ НЕФТЕПРОДУКТОВ**

Устройство относится к оборудованию очистки воды от нефтепродуктов и может быть использовано на предприятиях нефтехимической промышленности, а так же для очистки промышленных стоков инженерных сооружений, очистки сточных вод в городах.

Известны следующие способы очистки воды:

- 1) с помощью активированного угля и фильтров тонкой очистки,
- 2) с помощью адсорбирующих элементов,
- 3) с помощью использования явления коалесценции.

При этом разделение водомасляных эмульсий из несмешивающихся жидкостей заключается в коалесценции эмульгированных нефтепродуктов на олеофильных частицах коалесцирующего материала. Далее скоалесцированная дисперсная фаза собирается в верхней части объема разделяемой эмульсии и затем выводится.

Первый и второй способы обеспечивают качественную очистку воды, пригодную для использования в промышленности и в быту, но свойства этих фильтров непостоянны, требуется замена. Срок их службы можно существенно продлить, если на фильтры будет поступать вода с пониженным содержанием нефтепродуктов. Для этого можно использовать явление коалесценции.

Указанный технический результат достигается тем, что:

- 1) в качестве коалесцентного материала используется магнитная жидкость, приготовленная на основе какого-либо нефтепродукта, например, керосина, покрывающая тонким слоем стружку ферромагнетика в присутствии внешнего магнитного поля, имеющая родственную химико-физическую природу с нефтепродуктом, что способствует

повышению активности процесса коалесценции (соединения) капель нефтепродукта с магнитной жидкостью с образованием, в конечном итоге, слоя омагниченного нефтепродукта на поверхности стружки ферромагнетика;

2) за счет придания нефтепродукту магнитных свойств и создания в коалесцентном фильтре неоднородного магнитного поля с соответствующим направлением градиента магнитной напряженности для отвода нефтяных капель из воды используются не только гравитационные силы, но и магнитные силы, что способствует повышению производительности процесса очистки;

3) в процессе очистки происходит унос магнитной жидкости омагниченным нефтепродуктом и требуется периодически заливать в коалесцентный фильтр магнитную жидкость, но прерывание технологического цикла для выгрузки использованного и загрузки свежего фильтрующего материала исключается, что способствует удешевлению и повышению производительности процесса очистки.

Устройство очистки воды от нефтепродуктов работает следующим образом.

До начала процесса очистки сточной воды в коалесцентный фильтр через патрубок подается магнитная жидкость (МЖ), приготовленная на нефтеорганической основе, например, на керосине. В объеме коалесцентного фильтра существует неоднородное магнитное поле, созданное постоянными магнитами. Магнитные силовые линии проходят от одной боковой стенки к другой. Ферромагнитная стружка, находясь в намагниченном состоянии, притягивает к себе МЖ и покрывается ее тонким слоем.

Исходные сточные воды подаются в приемный патрубок и поступают в отстойную камеру, где происходит отделение от исходных сточных вод (СВ) механических примесей в виде осадка, который периодически отводится через патрубок. Нефтепродукты (НП), всплывшие на поверхность воды в отстойной камере, собираются известным образом, например, с помощью скребков, или вращающихся щелевых труб, или другим способом. Далее через патрубок освобожденные от механических примесей сточные воды поступают в коалесцентный фильтр, заполняя свободное пространство между элементами фильтрующего материала. При протекании сточных вод под действием перепада давлений через материал в направлении выходного патрубка, происходит соприкосновение содержащихся в воде капель НП с пленкой МЖ на поверхности ферромагнитных элементов фильтрующего

материала. Ввиду родственности химикофизических свойств НП и МЖ происходит их активное взаимодействие, и капли НП коалесцируют с магнитной жидкостью, растворяясь в ней. В результате на поверхности ферромагнитных элементов фильтрующего материала образуется слой омагниченного нефтепродукта. По сравнению с исходной магнитной жидкостью его намагниченность уменьшается вследствие уменьшения объемной концентрации присутствующих в нем магнитных наночастиц. По мере продвижения СВ через материал в направлении выходного патрубка содержание НП в СВ снижается, и на выходе из нее мы имеем очищенную воду.

С целью увеличения производительности процесса очистки конструкция устройства и коалесцентного фильтра может быть выполнена симметричной.

*М.Н.Волков, студ. гр. 4-37; рук. Ю.И.Страдомский к.т.н., доцент  
(ИГЭУ, г.Иваново)*

## **НАСТРОЙКА КОММУТАЦИИ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Как известно, особенностью работы машин постоянного тока является искрение под сбегаящими краями щеток. При сильном искрении встает вопрос о коммутационной надежности. Чтобы эта надежность соответствовала ГОСТам, необходимо правильно установить коммутацию. При этом следует учитывать многие факторы, такие как: правильность выбора данных для добавочных полюсов и компенсационной обмотки, если она имеется; соответствие примененных щеток (марки и размеров) условиям работы машины; удовлетворительность состояния машины в механическом отношении.

Существует немало способов исследования коммутации, но ни один из них не дает такого полного и ясного представления как способ определения области безыскровой коммутации, разработанный В.Т. Касьяновым. Достоинствами этого способа являются: простота, доступность применения в обстановке промышленного испытания и ясность даваемых им результатов. Сущность метода состоит в том, что при различных нагрузках, начиная от холостого хода и до номинальной, а если возможно, то и выше номинальной, определяются верхний и нижний пределы намагничивающей силы добавочных полюсов.

Изменение намагничивающей силы добавочных полюсов может производиться следующими способами: 1) независимое питание добавочных полюсов от самостоятельного источника постоянного тока; 2) дополнительное питание обмотки добавочных полюсов; 3) питание временной обмотки, наложенной на добавочные полюса помимо постоянной обмотки.

После определения области темной коммутации получают линию, соединяющую точки для различных значений тока нагрузки, получившую название средняя линия области безыскровой коммутации. По этой линии можно охарактеризовать коммутацию на основании трех признаков: 1) величина отклонения средней линии от оси абсцисс, 2) ширина области безыскровой коммутации, 3) кривизна средней линии области безыскровой коммутации.

Использование полученных результатов позволяет установить правильную коммутацию.

*Литература*

1. Жерве Г.К. «Промышленные испытания электрических машин» ГЭИ, 1959.

*М. В. Профьев, студ. гр. 4-36; рук. Ю. И. Страдомский к. т. н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **КОНСТРУКЦИЯ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПРИВОДА КОМПРЕССОРОВ**

В настоящее время в технике широко используются компрессоры. Компрессор — устройство промышленного применения для сжатия и подачи воздуха и других газов под давлением. По принципу действия все компрессоры можно разделить на две большие группы: динамические и объёмные. На примере двух видов объёмных компрессоров, поршневых и винтовых, рассмотрим требования, предъявляемые к приводным двигателям.

Выбор синхронного двигателя в качестве приводного обуславливается несколькими основными причинами: во-первых, для компрессора типичен продолжительный режим работы, поэтому их электроприводы, как правило, неререверсивные с редкими пусками; во-вторых, жёсткая характеристика синхронных двигателей, то есть при

увеличении нагрузки на валу двигателя обороты не изменяются; в третьих, при своих габаритах синхронный двигатель имеет большую мощность по сравнению с асинхронным двигателем.

Вид компрессора оказывает влияние на конструкцию приводного двигателя. Например, поршневой компрессор создает пульсирующий момент на валу двигателя за счет работы кривошипно-шатунного механизма. Для уменьшения пульсаций требуется двигатель с массивным ротором-маховиком, обеспечивающим динамическую уравновешенность. Для приведения во вращение винтового компрессора используется двухполюсный турбодвигатель, поскольку данный вид компрессора работает на высоких частотах вращения.

Обычно в компрессорных установках применяются синхронные двигатели серий СТД, СДК-2, СТМ, ТДС, закрытого или защищенного исполнения. Вентиляция осуществляется принудительно, с помощью вентилятора на валу происходит движение воздуха внутри машины. Температура окружающей среды для нормальной работы лежит в диапазоне от +5 до +40 °С. В качестве возбудителей используются тиристорные возбудители ТВУ-2, бесщеточные БВУ или статические возбудители серии ТЕ-320-5.

#### Литература

1. <https://ru.wikipedia.org>.
2. <http://www.physic-explorer.ru>.
3. **Важнов А. И.** Электрические машины. Л.: Энергия. 1968.

*А. А. Гайворонская, студ.; В.П. Шишкин, к.т.н., проф.  
(ИГЭУ, Иваново)*

## **ВОПРОСЫ РАСЧЕТА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ЭКРАНИРОВАННЫМИ ПОЛЮСАМИ**

В настоящее время электрические машины малой мощности активно используются в различных областях промышленности. Маломощные электрические машины применяются в системах автоматики, в транспортных средствах, в гироскопических приборах, в радиосвязи, в дистанционном управлении, выполняют различные функции в промышленности, сельском хозяйстве, а также в бытовых приборах[1].

В данной работе рассматриваются проблемы расчета асинхронного двигателя с экранированными полюсами (АДЭП) и способы их решения. Именно АДЭП получили наибольшее распространение из-за простоты конструкции, относительно низкой цене и надежности в работе. Большое распространение АДЭП во многих сферах деятельности приводит к необходимости усовершенствования конструкции двигателя и оптимизации его показателей.

Описание процессов в АДЭП и расчет его показателей и характеристик усложняется из-за наличия сильно выраженных пространственных гармоник магнитного поля, четырех групп потоков рассеяния статора и короткозамкнутого витка, ось которого образует угол  $\beta$  с осью остальной части полюса. Данный угол меньше  $90^\circ$  [2]. При рассмотрении основных процессов в АДЭП не учитывают действие высших гармоник НС и магнитного поля, воздушный зазор полагают равномерным, угол  $\beta$  принимают равным  $90^\circ$ , реактивности всех обмоток считаются независимыми от положения ротора [3].

Для анализа процессов и выведения формул можно использовать метод обобщенного трансформатора. Нахождение характеристик двигателя проводится с использованием методов, применяемых при исследовании других асинхронных машин. Для достижения этих целей используется схема трансформатора с сосредоточенной вторичной обмоткой [4].

Все характеристики двигателя находятся методом аналогии с однофазным двигателем. Например, формула момента выглядит таким образом:

$$M_n = \frac{1}{\omega_1} \left[ \left( I_{an}'' \right)^2 r_{an}^2 - \left( I_{bn}'' \right)^2 r_{bn}^2 \right] = \left( I_{2n}'' \right)^2 (a-b) \frac{r_2''}{\omega_1}$$

Пусковой ток определяется:

$$I_{2n}'' = \frac{\dot{U}_1 Z_0'}{Z_1 Z_0' + Z_1 Z_2'' + Z_0' Z_2''},$$

где  $Z_2''$  - сопротивление обмотки ротора при  $s=1$ ;  $Z_1$  - сопротивление обмотки статора;  $Z_0'$  - полное эквивалентное комплексное сопротивление цепи намагничивания.

Сравнив формулы, делаем вывод, что метод обобщенного трансформатора и расчет АДЭП по подобию однофазного двигателя упрощает исследование характеристик двигателя.

Также для расчета АДЭП можно использовать систему продольного и поперечного поля – систему осей d и q [3]. Токи и ЭДС ротора в этой системе:

$$\begin{aligned}i_f &= \frac{1}{2}(i_d + j i_q) \\i_b &= \frac{1}{2}(i_d - j i_q) \\ \dot{E}_d &= \dot{E}_f + \dot{E}_b \\ \dot{E}_q &= \frac{1}{j}(\dot{E}_f - \dot{E}_b)\end{aligned}$$

После всех преобразований [1] получена формула момента:

$$M = \left( 2I_d I_q \sin(i_d i_q) + (I_d^2 + I_q^2)n \right) \frac{R_2}{1-n} \frac{p}{2\pi f}$$

Система осей d и q неподвижна относительно полюсов статора, следовательно, ее применение наиболее рационально ввиду несимметрии магнитной и электрической цепи статора.

#### Библиографический список

1. **Лифанов В.А.** Электрические машины систем автоматики и бытовой техники: Учебное пособие. – Челябинск: изд. ЮУрГУ, 2006. – 237с.
2. **Ланген А.М.** К расчету электродвигателей с короткозамкнутым витком на полюсе / А.М. Ланген // Вестник электропромышленности. – 1956. – №9 – с. 31-38.
3. **Сорокер Т.Г.** Основы теории однофазного двигателя с короткозамкнутым витком на полюсе / Т.Г. Сорокер, Е.М. Лопухина // Электричество. – 1951. – №7. – с. 43-48
4. **Голубков Н.Е.** О схеме замещения однофазного асинхронного двигателя с экранированными полюсами / Н.Е. Голубков // Известия ВУЗов «Электромеханика». – 1975. – №1. – с. 37-44.

*А.В. Кузнецова студ.;  
рук. Н.А. Морозов, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **МАГНИТОЖИДКОСТНАЯ МУФТА С КОНУСНЫМ РАБОЧИМ ЗАЗОРОМ**

Магнитожидкостные электромеханические устройства постепенно находят своё применение в научной и производственной практике. Их распространение сдерживают не только большая стоимость магнитной жидкости (МЖ), являющейся в них рабочим телом, но и слабая проектно-конструкторская проработка устройств различного назначения. Во многих случаях заранее неизвестно, как поведёт себя МЖ при изменении тех или иных эксплуатационных режимах.

Магнитожидкостные муфты передачи вращающего момента выгодно отличаются от электромагнитных муфт скольжения значительно меньшими потерями в стали. Во всех индукционных машинах увеличение скольжения ведущей и ведомой полумуфт ведёт к резкому росту потерь в стали ведомой полумуфты и сильному нагреву её. Следовательно диапазон регулирования частоты вращения ведомой полумуфты при неизменной частоте вращения ведущей очень ограничен.

Муфты передачи момента вращения с МЖ в качестве рабочего тела выгодно отличаются возможностью широкого регулирования передаваемого момента и частоты вращения ведомой полумуфты. Наиболее широкими диапазонами регулирования обладает МЖ муфта с конусным рабочим зазором. В ней наблюдается плавное изменение значения рабочего зазора при смещении ведомой полумуфты относительно ведущей. При этом магнитный поток меняется в рабочем зазоре не только при изменении намагничивающей силы катушки управления, но и при смещении полумуфт друг относительно друга. Использование магнитореологических суспензий (МРС) увеличивает передаваемый муфтой момент. Неустойчивость МРС в поле гравитации и градиентных магнитных полях можно компенсировать в реальных конструкциях муфт разными способами. Поведение МРС и МЖ в рабочем зазоре электромагнитных муфт часто одинаково, поэтому в данной работе не делается различие между ними и используется единое обозначение МЖ.

В зависимости от конструкции МЖ муфты объём рабочей среды в ней может быть переменным или постоянным. Такие муфты отлича-

ются степенью влияния на передаваемый момент количества МЖ в муфте. Полностью неисследованным является случай, когда объём МЖ в муфте не изменяется. Это приводит к неопределённости положения МЖ пробки в конусном зазоре при изменении положения полумуфт. В данной работе проводится анализ положения МЖ пробки в зависимости от осевого смещения полумуфт.

Рассмотрим случай, когда объём МЖ в рабочем зазоре постоянен и определяется начальным заполнением рабочего зазора. Будем считать для определённости, что при минимальном зазоре  $\delta_0$  коническая часть зазора полностью заполнена МЖ, как это показано на рис. 1, а. По мере смещения одной полумуфты относительно другой зазор увеличивается и МЖ заполняет уже не всю коническую поверхность одной части зазора.

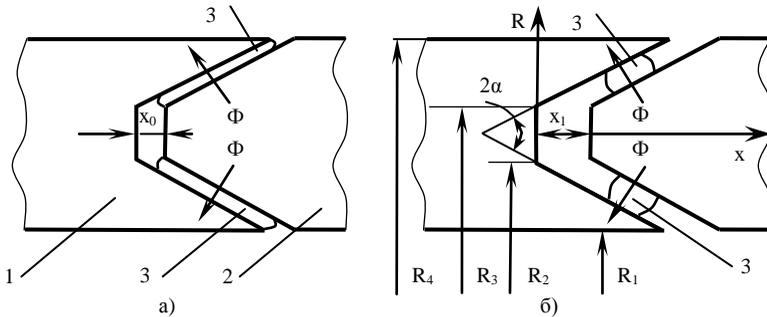


Рис. 1. Рабочая зона конусной магнитожидкостной муфты:

1 – ведущая полумуфта; 2 – ведомая полумуфта; 3 – магнитная жидкость

Условия на верхней и нижней поверхностях одинаковы, рассматриваем поэтому только одну из них. Длину образующей конической поверхности  $L$  выразим через разность радиусов  $\Delta R$ ,  $\Delta R = R_4 - R_3$ , и угол при вершине конусного зазора  $2\alpha$ ,  $L = \Delta R / \sin \alpha$ . Тогда начальный объём  $V_0$  МЖ в зазоре муфты можно выразить через длину окружности среднего радиуса  $R_{CP}$  и значение начального зазора  $\delta_0$ , который определяется начальным заполнением полумуфт  $x_0$ ,  $\delta_0 = x_0 \sin \alpha$ .

$$V_0 = 2\pi R_{CP} \frac{\Delta R}{\sin \alpha} x_0 \sin \alpha = 2\pi R_{CP} \Delta R x_0. \quad (1)$$

При сдвиге полумуфт значение среднего радиуса зазора  $R_{CP} = 0,5(R_4 - R_3)$  не меняется. В каком-то текущем положении полумуфт объём МЖ найдём через длину образующей  $L_K$  конусного зазора, ко-

торую занимает МЖ, и текущее значение зазора  $\delta = (x_0 + x) \sin \alpha = x_0 (1 + x^*) \sin \alpha$ .

$$V_{\text{ж}} = 2\pi R_{\text{ср}} L_{\text{ж}} \delta = 2\pi R_{\text{ср}} L_{\text{ж}} x_0 (1 + x^*) \sin \alpha. \quad (2)$$

Приравнивая объёмы МЖ при начальном и текущем зазорах, определим длину образующей, занимаемую МЖ.

$$L_{\text{ж}} = \frac{\Delta R}{(1 + x^*) \sin \alpha}. \quad (3)$$

Можно также определить сдвиг полумуфт, при котором сечение МЖ пробки образует квадрат.

$$x^* = \frac{1}{\sin \alpha} \sqrt{\frac{\Delta R}{x_0}} - 1. \quad (4)$$

Дальнейший сдвиг полумуфт ведёт к увеличению зазора, и МЖ пробка будет удерживаться только магнитными силами. Положение МЖ пробки зависит также от центробежных сил, действующих на неё при вращении муфты.

*Д. В. Волкова, асп.; рук. В. А. Камакин, д.т.н., проф.  
(РГАТУ им. П. А. Соловьёва, г. Рыбинск)*

## **МЕТОДЫ АППРОКСИМАЦИИ ПЕТЕЛЬ ГИСТЕРЕЗИСА ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СТАЛЕЙ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РАСЧЕТУ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ТРАНСФОРМАТОРА**

В настоящее время нелинейные устройства разнообразного назначения нашли широкое применение в различных областях техники. Точность расчетов подобных устройств, к которым относится и параметрический трансформатор, зависит от правильности выбора метода аппроксимации динамической кривой перемагничивания. Поскольку магнитопровод параметрического трансформатора изготавливается из электротехнической стали, то все дальнейшие рассуждения будут излагаться применительно к ней.

Многие известные способы аппроксимации петель гистерезиса электротехнических сталей не обеспечивают необходимой точности при расчетах. В работе [1] в качестве аппроксимирующей предлагается функция следующего вида:

$$B = B_m \cdot th \left[ \frac{(H \pm H_c)}{k \cdot H_c} \right],$$

(3)

где  $B_m$  – индукция насыщения;  $H_c$  – коэрцитивная сила;  $k$  – коэффициент, подбор которого позволяет обеспечить схождение кривой расчета с экспериментальными данными.

В работе [2] приведен анализ данного метода аппроксимации и сделан вывод, что подбором  $k$  не удастся добиться совпадения аппроксимирующей кривой с экспериментальными данными.

В работе [3] в качестве перспективного метода аппроксимации петель гистерезиса предложена функция вида:

$$H = f(B) + H_c \cdot \cos(\omega t + \varphi); f(B) = a_1 B + a_2 B^3,$$

(2)

где  $H_c$  – коэрцитивная сила;  $a_1, a_2$  – коэффициенты аппроксимации кривой намагничивания;  $\varphi$  – фаза индукции относительно напряжения на входе цепи.

В [4] было отмечено, что использование данного выражения затруднено непосредственной привязкой изменений напряженности и индукции к входному напряжению и применению гармонической функции времени, тогда как токи и напряжения в подобных цепях не-синусоидальные.

Аппроксимирующая функция петель гистерезиса электротехнической стали должна соответствовать следующим условиям: адекватная передача кривизны характеристики кривой перемагничивания, возможность получения аналитической кривой, хорошо согласующейся с экспериментальными данными, а также возможность моделирования динамической кривой перемагничивания с адекватной реакцией на изменение амплитуды и частоты магнитной индукции.

Наиболее перспективной аппроксимирующей функцией, отвечающей вышеперечисленным требованиям, является функция вида:

$$\left( \frac{2H}{H_s} \right) = \left( \frac{B}{B_s} \right)^n + \left( \frac{B}{B_s} \right) \cos \alpha + \frac{\sin \alpha}{\omega} \frac{d}{dt} \left( \frac{B}{B_s} \right),$$

(3)

где  $H$  – напряженность магнитного поля,  $H_s$  – напряженность магнитного насыщения,  $B$  – индукция магнитного поля,  $B_s$  – индукция магнитного насыщения,  $\alpha$  – угол сдвига, изменение которого приводит к изменению площади петли гистерезиса, а также к изменению кривизны кривых.

Работа [5] содержит подробный анализ метода аппроксимации динамической кривой перемагничивания параметрического трансформатора.

тора с помощью системы параметрически заданных функций, приведенных после ряда математических преобразований к выражению вида (3).

Аппроксимирующая функция (3) позволяет получить аналитическую кривую, хорошо согласующуюся с экспериментальными данными и, следовательно, может быть использована для создания модели, максимально соответствующей динамической кривой перемагничивания электротехнической стали.

#### Библиографический список

1. **Врублевский А. Н., Григорьев А. Л., Бовда А. М.** Математическая модель быстродействующего электромагнита для топливной системы ДВС // Автомобильный транспорт (Харьков, ХНАДУ), 2006, №19, стр. 138-143.
2. **Цзяньхуэй Ч., Грехов Л. В.** Описание петель статического гистерезиса электротехнических сталей применительно к расчету быстродействующего электроуправляемого клапана топливной аппаратуры ДВС с электронным управлением. Материалы 77-й международной научно-технической конференции ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров», стр. 110-115.
3. **Король Е. Г.** Анализ методов моделирования петли гистерезиса ферромагнитных материалов/ Е. Г. Король// Електротехніка і електромеханіка. – 2007. - №6. – стр. 44-47.
4. **Канов Л. Н.** Схемное моделирование электромагнитных цепей переменного тока с гистерезисом. Вісник СевДТУ. Вип. 97: Механіка, енергетика, екологія: зб. Нау. Пр – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2009, стр. 48-51.
5. **Камакин В. А., Волкова Д. В.** Система регулирования тока на базе параметрического трансформатора, Сборник материалов научной конференции «Энергия-2014», ИГЭУ, 2014, стр. 23-27

## СЕКЦИЯ 22

### МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ И МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Председатель – к.т.н., доцент **Терехов В.Г.**

Секретарь – инженер **Аполонский В.В.**

*В.И. Левин, студ.; рук. А.А. Анисимов, д.т.н. (ИГЭУ, г. Иваново)*

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ЗАДАЧИ ИДЕНТИФИКАЦИИ И НАСТРОЙКИ СИСТЕМЫ С РЕГУЛЯТОРОМ СОСТОЯНИЯ

Любая нейронная сеть используется в качестве самостоятельной системы представления знаний, которая в практических приложениях выступает, как правило, в качестве одного из компонентов системы управления либо модуля принятия решений, передающих результирующий сигнал на другие элементы, не связанные непосредственно с искусственной нейронной сетью. Выполняемые сетью функции можно разделить на несколько основных групп: аппроксимации и интерполяции, распознавания и классификации образов; сжатия данных; прогнозирования; идентификации; ассоциации [1].

При решении задач идентификации и управления динамическими процессами нейросеть, как правило, выполняет несколько функций. Она представляет собой нелинейную модель этого процесса, обеспечивающую выработку соответствующего управляющего воздействия. Сеть также выступает в роли следящей системы, адаптирующейся к изменяющимся условиям окружающей среды. Очень большое значение, особенно при управлении роботами, имеет функция классификации, реализуемая при выработке решения о дальнейшем развитии процесса.

Важнейшие свойства нейронных сетей:

- Параллельная обработка информации одновременно всеми нейронами.
- Нечувствительность к ошибкам, возникающим в отдельных контактах.
- Способность к обучению и обобщению полученных знаний.

Для осуществления идентификации на входе ЭМС формируется тестовый сигнал прямоугольной формы с заданной амплитудой. Вектор отсчетов полученной переходной характеристики подается на вход ИНС, которая дает оценку вектора параметров линейной модели объекта управления.

Применяются как ИНС с обратными связями, так и сети прямого распространения (сигмоидальные, радиальные). В рамках данной работы была рассмотрена радиальная ИНС.

Важное достоинство такой сети – значительно упрощенный алгоритм обучения. При наличии только одного скрытого слоя и тесной связи активности нейрона с соответствующей областью пространства обучающих данных точка начала обучения оказывается гораздо ближе к оптимальному решению, чем это имеет место в сетях другой архитектуры [3].

Радиальная ИНС представлена на рисунке 1.

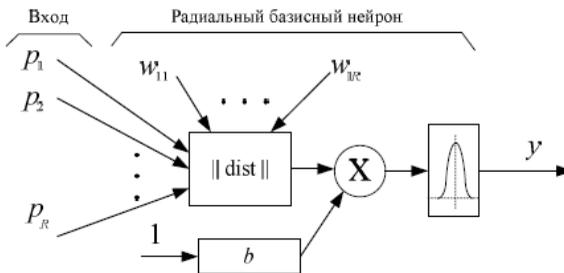


Рис. 1. Радиальный искусственный нейрон ( $p_1, p_2, \dots, p_R$  – компоненты входного вектора;  $b$  – смещение;  $W_{11}, \dots, W_{IR}$  – весовые коэффициенты;  $\text{dist}$  – функция определения Эвклидова расстояния;  $y$  – выход нейрона)

Исследование эффективности идентификации с использованием радиальной ИНС проводилось на примере типичной двухмассовой ЭМС (рис. 2) [2].

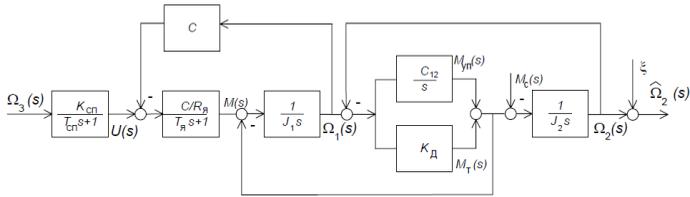


Рис. 2. Структурная схема линейной модели двухмассовой ЭМС

Составлена программа в MatLAB для формирования обучающей выборки для радиальной ИНС. В качестве обучающей выборки использовались графики переходных процессов в системе по каждой переменной состояния. При каждой итерации осуществлялась вариация ( $\pm 25\%$ ) таких параметров как моменты инерции двух масс  $J_1$  и  $J_2$ , коэффициенты  $c_{12}$  и  $k_d$  (упругое и вязкое трение).

Обучающая выборка представляет собой набор модулированных графиков (рисунок 3).

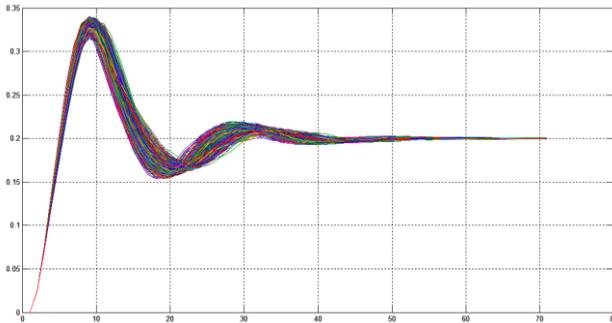


Рис. 3. Обучающая выборка, поступающая на вход ИНС

Для обработки обучающей выборки была создана радиальная базисная сеть с ошибкой  $10^{-6}$  и самоорганизацией первого слоя, позволяющая получить нулевую погрешность на обучающем множестве.

Далее формировалась новая выборка не связанная с предыдущей для проверки адекватности работы нейронной сети. Был произведен пострегрессионный анализ по каждой переменной состояния (см. ри-

сунок 4). Очевидно линейное соответствие входов и целей, что свидетельствует о корректной работе нейронной сети.

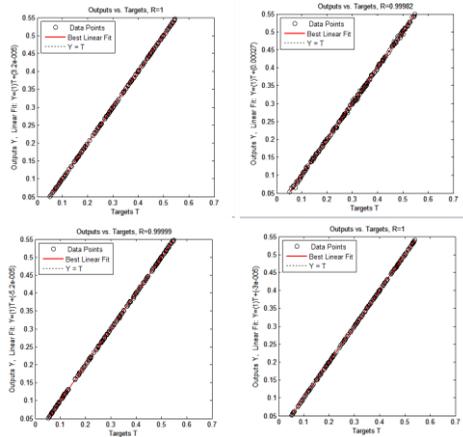


Рис. 4. Пострегрессионный анализ работы ИНС

### Вывод:

Таким образом, предложенный подход, основанный на применении ИНС для оценивания параметров линейной модели объекта управления (ЭМС), позволяет существенно сократить длительность процедуры идентификации в процессе настройки системы управления.

Ограничением при использовании данного метода является наличие таких нелинейностей, при которых система не может быть адекватно представлена линеаризованной моделью. Кроме того, следует иметь в виду, что при воздействии интенсивных помех погрешность идентификации параметров объекта управления существенно возрастает.

### Библиографический список

1. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации: Пер. с польск. – М.: Финансы и статистика, 2002.
2. Анисимов А.А., Горячев М.Н., Идентификация электромеханических систем с использованием искусственной нейронной сети – "Вестник ИГЭУ", Вып. 3, 2008 г.
3. Медведев В.С., Потемкин В.Г. Нейронные сети MATLAB 6. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. – 496с.

## ЛОГИЧЕСКИЕ АНАЛИЗАТОРЫ

Логические анализаторы (ЛА) предназначены для отладки и диагностирования сложных цифровых устройств, в частности микропроцессорных систем. В задачу ЛА входят фиксация последовательностей цифровых сигналов, их визуализация и анализ. При этом они предоставляют больше информации, чем можно увидеть на экране. Ключ к полному использованию возможностей ЛА — правильная его конфигурация. Нужно выбрать режим анализа, подсоединить ЛА к выводам сигнала, установить пусковые механизмы — и ЛА готов проследить аппаратные и программные дефекты. Модульное построение ЛА позволяет подбирать конфигурацию, необходимую для конкретной работы, наращивать производительность и расширять возможности. Большинство современных моделей ЛА имеют дружественный интерфейс с пользователем — подсказки, освобождающие оператора от части рутины, удобная форма отображения полученной информации на дисплее. Основные принципы построения и работы ЛА можно считать неизменными, однако различные компании имеют свои взгляды на состав и особенности ЛА, как, например, ведущие в этой области американские фирмы Agilent Technologies и Tektronix, создающие наиболее совершенные образцы семейства ЛА. [1]

«Логические анализаторы — контрольно-измерительные приборы, предназначенные для сбора данных о поведении дискретных систем, для обработки этих данных и представления их человеку на различных уровнях абстракции. Они работают независимо и незаметно для испытуемых дискретных систем и применяются для их отладки и диагностирования (в первую очередь микропроцессорных систем) на всех этапах жизненного цикла.»

Логические анализаторы характеризуются числом каналов, емкостью памяти на канал, частотой записи, способами синхронизации и запуска, формами представления данных.

Для определения значений сигналов ЛА используют компараторы, с помощью которых выясняется, выше или ниже входной сигнал заданного порогового уровня. Если сигнал превышает порог, его уровень определяется как высокий, если ниже порога, то низкий. Пороговое напряжение компараторов, как правило, может регулироваться (в основном от  $-10$  до  $+10$  В).

Подключение ЛА требует доступа к участкам цифрового устройства (например, выводам микросхем или трассам платы). Анализаторы снабжаются специальными щупами и зажимами. Основное требование – минимизация влияния прибора на испытываемое устройство. ЛА должны обладать высоким входным сопротивлением (примерно 1 МОм) и малой входной емкостью (порядка 1025 пФ). Для обеспечения этих требований компараторы логических уровней делаются выносными.

Запись информации в ЛА происходит по тактовым сигналам (clock). В том случае, когда тактовые сигналы поступают от внутреннего генератора независимо от испытываемого объекта, реализуется асинхронный режим записи данных. Если для синхронизации работы ЛА используются сигналы испытываемого объекта, то реализуется синхронный режим записи данных. При этом значения могут записываться фронтом или срезом тактового сигнала. Выборочная запись информации реализуется с помощью квалификаторов – отдельных каналов, не фиксируемых в памяти, но определяющих возможность записи входных данных в память. Это позволяет экономить объем свободной памяти.

В реальных системах могут возникать импульсы и всплески, длительность которых меньше длительности тактового сигнала. Такие ложные сигналы считаются помехами. Существует два способа обнаружения помех: увеличение тактовой частоты в асинхронном режиме и применение «ловушек». В первом случае помехи фиксируются и визуализируются как данные, во втором случае помехи фиксируются отдельно от основных данных и визуализируются не как биты данных, а как ложные сигналы.

Основное разнообразие в семейство логических анализаторов вносят способы запуска и формы представления данных. [2]

#### **Библиографический список**

1. <http://www.electronics.ru/journal/article/1167>
2. <http://www.uran.donetsk.ua/~masters/2010/fknt/blinov/library/article5.htm>

*Р.Ж. Маидже, студент гр. 3-34 (ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ДАТЧИКИ В ОХРАННЫХ СИСТЕМАХ ЧАСТНЫХ ДОМОВ**

В наше время, для защиты частного дома не достаточно высокой ограды, сторожевой собаки или кооперативного сторожа. Отличным решением являются охранные системы.

Обеспечение безопасности начинается с периметра участка: на входе устанавливается домофон, видео наблюдение территории, забор под напряжением. В самом доме устанавливается множество датчиков для контроля различных процессов: проникновение, пожар, утечка газа, затопление, поддержание комфортной среды (температура, влажность, освещённость). Современные датчики легко монтируются, имеют маленькие размеры, и различные цвета, чтобы вписаться в интерьер помещений. Также они являются устройствами скрытой установки с эффективным обхватом пространства охраняемого системой.

Датчики могут быть проводными и беспроводными, чтобы связываться с контрольной панелью. Беспроводные применяют в сложившемся интерьере, а проводные до работ по внутренней отделки помещений.

Промышленность выпускает ряд датчиков объёма, вот несколько видов: микроволновые, акустические, ультразвуковые, инфракрасные и комбинированные. Комбинированные датчики наиболее надёжны, сочетание различных видов сканирования, позволяет более точно выявлять несанкционированные действия. Каждый из датчиков предназначен для решения своих задач. Выбор того или иного устройства зависит от бюджета, характера контроля места установки.

Магнитоконтактные датчики состоят из двух частей магнита и магнитоуправляемого контакта (геркон), когда они сомкнуты, по геркону течёт ток, если их разамкнуто то ток прервётся. Такие датчики обычно устанавливают на всё что открывается (двери, окна)

Инфракрасный пассивный (тепловой) датчик он реагирует на изменение температуры в помещении. Внутри датчика стоит линза, собирающая инфракрасное излучение помещения. Когда нарушитель попадает в зону действия датчика, то интенсивность инфракрасного излучения становится выше.

Инфракрасный активный (лучевой) датчик состоящий из двух частей передатчика и приёмника инфракрасного излучения. При прерывании их связи, подаётся сигнал тревоги. Ширина инфракрасного луча порядка двух метров.

Датчики давления, как только кто-то наступает на датчик, сразу же отправляется соответствующий сигнал. Они не так эффективны на больших площадях, т.к. потребуется большое количество таких устройств.

Для предупреждения опожаре существует ряд датчиков такие как дымовой, тепловой и комбинированный. Дымовой датчик чаще всего используют в пожарной сигнализации. Внутри в одной связке работают светодиод и фотоэлемент, расположенных на разных уровнях и в обычном режиме они не взаимодействуют друг с другом, при попадании в датчик дыма цепь замыкается. Комбинированный (многоканальный) реагирует на свет, и на тепло и на дым.

В системах безопасности используют тревожную кнопку, тревожная кнопка это электронное устройство, предназначенное для передачи сигнала тревоги в центр мониторинга, после чего на место происшествия выезжает группа оперативного реагирования. Следует отметить, что у тревожной кнопки быстроедействие выше, чем у телефона, т.к. адрес уже известен.

Виды тревожных кнопок: стационарные, беспроводные .

Стационарные кнопки устанавливают в скрытых, но легкодоступных местах, чтобы каждый посвященный смог незаметно, а главное быстро добраться до нее и отправить сигнал тревоги. Достоинства стабильный сигнал т.к. питается от сети и не требует обслуживания. Недостаток нахождение кнопки в определённом месте, до которого ещё нужно добраться, необходимость прокладки кабеля, привязка системы к конкретному месту. Беспроводная тревожная кнопка изготавливаются в виде брелоков, которые можно постоянно носить с собой. Они позволяют при необходимости быстро вызвать экстренную помощь. Достоинства мобильность и миниатюрность. Недостатки возможность потери кнопки, требует замены аккумулятора. И в основном отдаётся предпочтение беспроводным системам из-за эстетических и технических соображений.

В данной работе проведён анализ датчиков в охранных системах частных домов. Выявлены их достоинства и недостатки, случаи применения. Была показана общая тенденция движения развития датчиков в охранных системах частных домов.

## ТЕРМЕНВОКС

Это первый инструмент, положивший начало новому направлению в радиоэлектронике — электронной музыке. Необычен тем, что не имеет клавиатуры, струн или труб, с помощью которых получают звуки нужной тональности. В терменвоксе находятся два независимых генератора, вырабатывающих колебания весьма высокой частоты — около сотни тысяч герц. Но частоту одного из генераторов можно изменять своеобразным переменным конденсатором, образуемым рукой играющего и металлическим штырем-антенной, соединенной с частотоподающей цепью генератора. Приближение руки к антенне или удаление ее приводит к изменению суммарной емкости частотоподающей цепи, а значит, частоты генератора. Собран терменвокс на трех интегральных микросхемах.

Терменвокс питается от источника GB1. Для предупреждения взаимного влияния генераторов напряжение на каждый из них подается через RC-фильтр. Потребляемый инструментом ток составляет 7...10 мА.

Все детали, кроме источника питания, монтируют на печатной плате из одностороннего фольгированного стеклотекстолита толщиной 1...1,5 мм. Она же является и лицевой панелью инструмента. Переменные резисторы и выключатель устанавливают в отверстиях платы, трансформатор и динамическую головку приклеивают. Напротив диффузора головки в плате сверлят отверстия и закрывают их со стороны монтажа неплотной тканью. Выводы деталей припаивают к проводникам платы.

Эксплуатация: включив питание, устанавливают резистором R2 режим так называемых нулевых биений, когда частоты обоих генераторов равны и в динамической головке звука нет. В то же время при поднесении руки к антенне звук должен появляться. Более точной установкой движка резистора R2 добиваются того, чтобы звук появлялся на возможно большем расстоянии между рукой и антенной. Тональность звука должна возрастать, когда руку приближают к антенне.

*А.О. Адаменко, И.Р. Парахневич, студ.*

## **СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ДОСТУПА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

На сегодняшний день система контроля доступа транспортных средств является неотъемлемой частью любого крупного предприятия, словно воздух для человека. Это связано с тем, что автопарк у крупных предприятий велик и требует охраны его, а также фиксации прибытия и убытия транспорта с этого автопарка. Это позволяет не только обеспечивать сохранность материальных ценностей и безопасность персонала компании, но и контроль над отработанными часами сотрудников. Система контроля доступа позволяет автоматизировать работу контрольно пропускного пункта, исключая влияния человеческого фактора. Тем самым позволяет упорядочить проезд на автотранспорте на территорию предприятия.

Работа с системой производится по следующей схеме: оператор вносит в базу данных системы индивидуальные номера выданной пропускной карты, данные о владельце, поставщике и другие сведения. Подъезжая к контрольно пропускному пункту, сотруднику достаточно иметь карту, лежащую на приборной панели или в кармане, чтобы считыватель зафиксировал ее номер, и система пустила его на предприятие. Также моментально записывается время прибытия сотрудника. Таким образом, человек освобождается от рутинных операций по идентификации личности, пропуску и фиксированию всех событий, что снижает к минимуму человеческий фактор.

В настоящее время существует много вариантов систем контроля доступа на охраняемые объекты. Но, как правило, они являются дорогими, сложными и используют устаревшую элементную базу. Это не позволяет решать проблему полного контроля въезда на объект. Для расширения функциональных возможностей и для снижения стоимости при разработке системы контроля необходимо использовать более новую элементную базу и микропроцессоры, что позволяет реализовать аппаратуру с улучшенными техническими и потребительскими характеристиками.

*В.А. Усачева, студ.; рук. Б.П. Силуянов, доц.*

## ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРЫ В СИСТЕМЕ «УМНЫЙ ДОМ»

Термин "умный дом" появился еще в 20-м веке, однако для России "интеллектуальные" здания до сих пор остаются экзотикой. Основная задача, которую призван решить комплекс опций «умный дом», – это максимальный комфорт конкретного жильца в конкретном доме. Как правило, она подразумевает энерго эффективные технологии и включает в себя беспроводные системы управления и управление удаленным доступом инфраструктурой дома: освещением, вентиляцией, системой кондиционирования, теплыми полами, бытовой техникой и многим другим. Возможности данной технологии обширны, вплоть до создания индивидуального климатического уровня для каждого помещения в квартире с возможностью максимально быстрого и простого изменения параметров этого уровня.

Современный дом сложно представить себе без системы управления климатом. Однако часто бывает так, что сложные и дорогостоящие инженерные системы даже не подозревают о своем совместном сосуществовании. Кондиционер может долго пытаться охладить воздух в то время, как система отопления исправно будет пытаться сохранить заданную температуру. Решение этой задачи хорошо известно в рамках создания системы климат-контроля **умного дома**. Климатические системы проектируются с возможностью анализа температуры и влажности с помощью специальных датчиков в тех помещениях, в которых необходимо поддерживать заданные климатические параметры.

Рассмотрим принцип работы и структуру датчика температуры. Ведь, на основе его параметров температуры система управления «Умный дом», используя заложенные в нее алгоритмы климат-контроля, подает сигналы управления на сервоприводы приборов и контуров отопления или воздушные клапаны вентиляционной системы с системой охлаждения.

Данная технология позволяет экономить энергоресурсы, минимизировать работу оборудования и создавать комфортные для человека условия жизни.

### Библиографический список

1. Web сайт: <http://www.conon.ru/>
2. Web сайт: <http://www.tria-komm.ru>

*И.В. Алябин, А.А. Климашова; В.В. Аполонский.  
(ИГЭУ г. Иваново)*

## ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ OLED ПАНЕЛЕЙ

Первое диодное устройство было изобретено в Eastman Kodak доктором Чинг В Таном (Ching W Tang) и Стивеном Ван Слайком (Steven Van Slyke) в 1980-х. Этот диод дал начало термину OLED используя сочетание двух слоев с отдельными слоями отвечающими за перенос дыр и электронов, которые рекомбинируются в центре органического слоя и испускают свет. Это потребляет меньше напряжения и более эффективная система. Так началась эра OLED-устройств.

### Принцип действия и конструкция

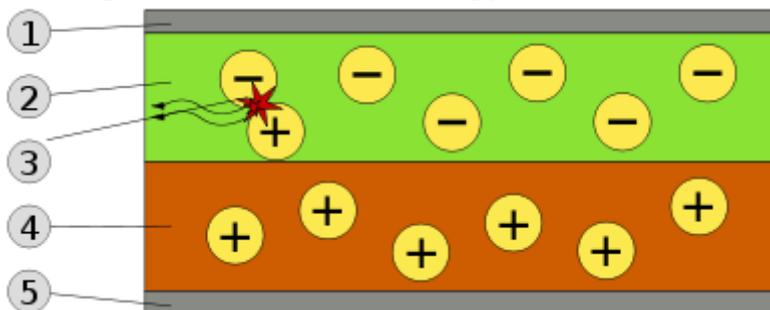


Рис. 1 - Схема 2-слойной OLED-панели: 1. Катод(-), 2. Эмиссионный слой, 3.Испускаемое излучение, 4. Проводящий слой, 5. Анод (+)

### Amoled дисплей на примере samsung galaxy note 4.

Экран Samsung GALAXY Note 4 выполнен по технологии Super AMOLED и имеет впечатляющие характеристики: диагональ 5,7 дюйма, разрешение 2560 x 1440 точек (Quad HD), плотность пикселей порядка 515 ppi. Естественно, при такой плотности изображения уже трудно придаться к четкости: надежно скрывается даже упрощенная структура пикселей PenTile.

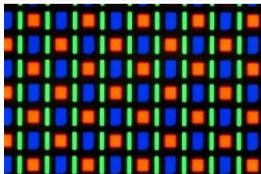


Рис. 2 - структура пикселей PenTile

### Сравнение super amoled с ips



Рис. 3 - Сравнение IPS(сверху) и Super AMOLED (снизу)

### Преимущества

В сравнении с жидкокристаллическими дисплеями (LCD) на тонкоплёночных транзисторах основными достоинствами технологии являются:

- энергопотребление напрямую зависит от яркости изображения на экране, поэтому при отображении тёмных тонов потребление энергии низкое, но если на экране тона преимущественно светлые, то энергопотребление такого экрана больше, чем у жидкокристаллического.
- способность отображать большую цветовую гамму (на 32 % больше физического предела жидкокристаллической матрицы Super IPS).
- значительно меньшее время отклика (приблизительно 0.01 мс, против минимального 2 мс для TN матрицы).
- полные углы обзора по вертикали и горизонтали порядка 180 градусов при абсолютном сохранении яркости, цветности и контрастности изображения (чуть хуже чем у кинескопных (ЭЛТ) мониторов).
- меньше толщина экрана (не тратится место на подсветку).

- высокая контрастность - черный цвет является действительно черным, ведь пиксели в этой области вообще не излучают свет.

### **Перспективы развития**

Уменьшение времени отклика, увеличение максимального разрешения, уменьшение энергопотребления, создание гибких Super AMOLED дисплеев, введение программных компонентов для более гибкой настройки цветовой передачи дисплея.

#### **Библиографический список**

1. <http://www.mobile-review.com/review/iphone6plus-vs-galaxynote4.shtml>.
2. [https://hi-tech.mail.ru/review/Samsung\\_GALAXY\\_Note\\_4-rev.html#photo\\_57](https://hi-tech.mail.ru/review/Samsung_GALAXY_Note_4-rev.html#photo_57)
3. [https://ru.wikipedia.org/wiki/#Super\\_AMOLED.2B](https://ru.wikipedia.org/wiki/#Super_AMOLED.2B)
4. <http://www.proza.ru/2010/12/28/1341>
5. [https://ru.wikipedia.org/wiki/#cite\\_note-7](https://ru.wikipedia.org/wiki/#cite_note-7)

*Д.С. Ермолов, студ.; рук. А.П. Карандашев уч. степень (к.т.н.)  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **УСТРАНЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАЗИТНЫХ ЭХО-СИГНАЛОВ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ УРОВНЕМЕРЕ**

Точные измерения уровня жидкости очень актуальны в настоящее время. Областью применения является различные отрасли промышленности: химическая, строительная, пищевая, металлургическая, топливная и т.д.

Перспективным направлением измерения уровня является применение ультразвуковых уровнемеров. Достоинствами ультразвуковых уровнемеров являются, прежде всего, точность и бесконтактный способ измерения, но эти приборы имеют существенный недостаток, связанный с отражением сигнала от технологических конструкций и датчиков, расположенных в резервуаре. Следствием этого может являться ошибка измерения уровня жидкости. Решением является точная настройка прибора. В качестве объекта исследования был взят уровнемер Prosonic M FMU41, установленный в резервуарах хранения серной кислоты.

Целью данного исследования является устранение влияния паразитных эхо-сигналов на основе метода предварительного сканирования.

Уровнемер выдает ультразвуковые импульсы в направлении поверхности продукта. Затем эти импульсы отражаются и принимаются датчиком уровнемера. Производится измерение времени  $t$  между передачей и приемом импульсов. Прибор использует время  $t$  (и скорость звука  $c$ ) для вычисления расстояния  $D$  между мембраной датчика и поверхностью продукта:

$$D = \frac{c \cdot t}{2}$$

Как только прибор распознает пустое расстояние  $E$  от входного сигнала пользователя, уровень вычисляется следующим образом:

$$L = E - D$$

Интегрированный температурный датчик компенсирует изменения скорости эхо-сигнала, обусловленные изменениями температуры. Принцип измерения уровня жидкости обозначен на рисунке 1.

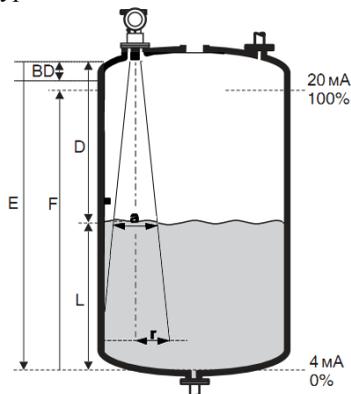


Рисунок 1. - Принцип измерения уровня жидкости

Проблемой при измерении уровня жидкости в уровнемере является появление паразитных эхо – сигналов, отражающихся от конструктивных элементов резервуара, датчиков, трубопроводов и т.д., что соответственно вносит ошибку в измерение уровня жидкости или делает измерение невозможным.

Для решения проблемы паразитных эхо – сигналов, требуется тщательная настройка прибора.

Вначале проверяется, отображается ли измеряемое расстояние  $D$  от мембраны датчика до поверхности продукта вместе с уровнем  $L$ .

Затем следует настройка функции «проверка расстояния». Выбираем одно из предложенных значений, в зависимости от ситуации. Если

расстояние правильное, то это подтверждается, также расстояние может быть либо мало, либо велико или вообще неизвестно. Также возможна ручная настройка, в которой определяется самостоятельно область подавления.

Следующей функцией настройки является «диапазон отображения», в которой предполагаемая область подавления отображается. Исходной точкой всегда является мембрана датчика. Поэтому возможно редактирование этого значения. При ручном подавлении значение по умолчанию равно 0 м.

И, наконец, функция «начало отображения». Для этой функции доступны 2 состояния: «ничего не подавляется» и «начинается подавление». Если графическое отображение уже имеется, оно будет перезаписываться до расстояния, указанного в функции «диапазон отображения». Вне этого расстояния имеющееся графическое отображение остается неизменным. После подавления измеряемое расстояние D от мембраны датчика до поверхности продукта отображается вместе с уровнем. Проверяется это значение, чтобы значение соответствовало фактическому уровню и/или фактическому расстоянию. Возможны следующие состояния:

1. Расстояние верно – Уровень верен, т.е. завершение основной калибровки
2. Расстояние неверно – Уровень неверен, т.е. необходимо выполнить дополнительное подавление эхо- сигналов. Возвращение к функции «проверка расстояния».
3. Расстояние верно– Уровень неверен, т.е. проверка значения функции «калибровка пустой емкости».

Настройка завершается при достижении состояния 1 «Расстояние верно – Уровень верен».

Вывод: Применение предварительной настройки ультразвукового уровнемера позволяет устранить влияние паразитных эхо-сигналов и добиться заявленной точности измерения с приведенной погрешностью 0,2%.

#### Библиографический список

1. Руководство по эксплуатации ультразвуковой уровнемер Prosonic M FMU 41

О.А. Кузнецова, студ.; И.А. Мошкин, студ.  
(ИГЭУ, г. Иваново)

## НАНОМОТОРЫ. ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ, БУДУЩЕЕ

Сегодня всё большее значение отводится нанотехнологиям. Важной и неотъемлемой частью в этом вопросе являются наномоторы, которые позволяют значительно расширить поле человеческой деятельности, позволяют делать то, что ранее казалось недостижимым. Поэтому мы поставили себе цель разобраться в этой теме подробнее и поделиться результатами с остальными.

Невозможно составить полную картину о предмете, не зная его истории. Поэтому для начала надо рассказать о том, с чего всё начиналось. Пожалуй, отправной точкой можно считать 1959 год, именно тогда Ричард Фейнман впервые озвучил идею о возможности создания молекулярных моторов. Второй важной датой является 1999 год, когда Росс Келли впервые сообщил о создании молекулярного двигателя вращения, который работал по химическому принципу и обеспечивавший вращение на  $120^\circ$ .

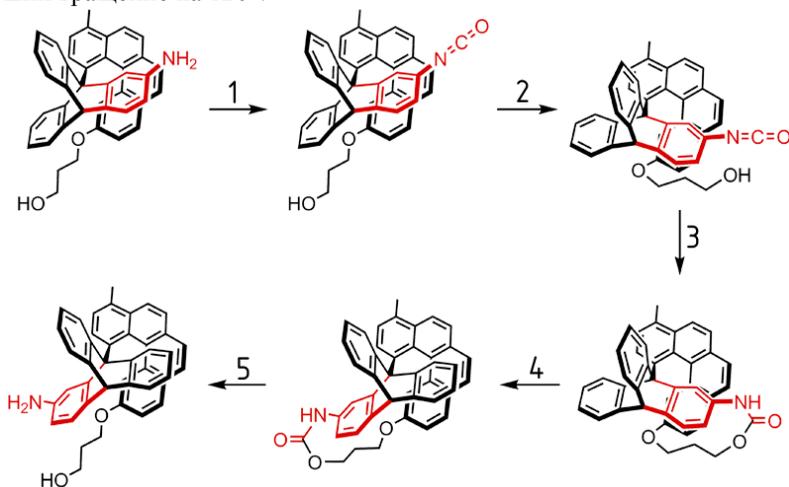


Рисунок 1. Схема вращения двигателя Келли

Существует достаточно большое число разновидностей современных наномоторов, мы же постараемся выделить наиболее характерные.

Принципиально они различаются на классы:

- На биологической структуре (белки)
- На основе нанотрубок
- «Nanopag» («наноавто» на основе фуллерена)

Биологические наномоторы тоже подразделяются на виды, в зависимости от конструкции, назначения и вида исходного материала – например, АТФаза, кинезин, различные устройства на базе бактерии E.Coli. На основе нанотрубок создаётся немало число наномоторов. Например, уже в 2003 году был создан электромеханический двигатель, осуществлявший вращение на  $360^\circ$  при подаче напряжения 80 В.

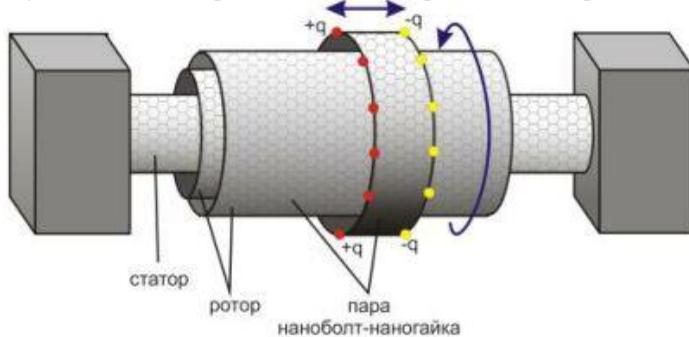


Рисунок 2. Схема наномотора на нанотрубке

Основными проблемами наномоторов являются достаточно плохая управляемость, низкая точность, а для биологических – ещё и жёсткие требования к окружающей среде.

#### Библиографический список

1. W. F. Paxton, K. C. Kistler, C. C. Olmeda, A. Sen, S. K. St. Angelo, Y. Cao, T. E. Mallouk, P. Lammert, и V. H. Crespi, "Autonomous Movement of Striped Nanorods," J. Am. Chem. Soc., 126, 13424-13431 (2004)
2. Однонаправленные вращательные движения молекулярных систем Росс Келли, Харшани и Ричард Сильва. журнал Nature 1999, 401, 150—152.

*С. Швецов, студ. (ИГЭУ, г. Иваново)*

## **УНИВЕРСАЛЬНАЯ СИСТЕМА ДВУНАПРАВЛЕННОЙ СВЯЗИ**

Одной из наиболее актуальных задач в телемеханике объектов электроэнергетического хозяйства является удаленное конфигурирование объектов, мониторинг нештатных ситуаций и оперативное реагирование на поступивший сигнал. В частности, правильно организованная двунаправленная связь с реклоузерами (блоками максимальной токовой защиты / блоками релейной защиты) на линиях электропередач в настоящее время, в условиях тотальной зависимости от энергоснабжения, позволяет оперативному персоналу быстро отрабатывать нештатные ситуации (перегрузки, включение/отключение вакуумного выключателя, другие ситуации), предотвращать долговременные перебои энергоснабжения и удаленно настраивать работу оборудования. Дополнительные мероприятия и оборудование позволяют также получать информацию о потреблении активной/реактивной энергии на линиях.

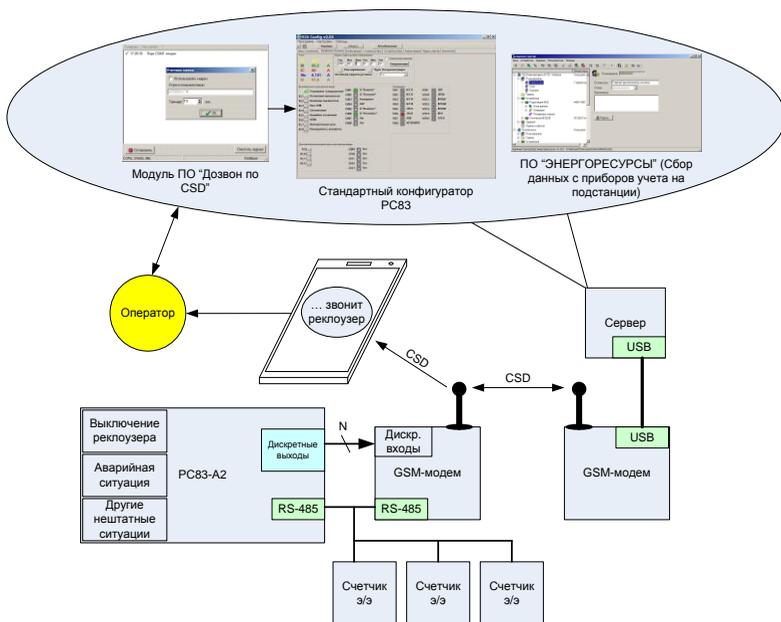
Большое многообразие блоков релейной защиты (далее – “БРЗ”), используемых на объектах энергосистемы в составе реклоузеров, подразумевает не меньшее многообразие протоколов, интерфейсов связи этих блоков с системами верхнего уровня и программных модулей для настройки. Крупные электросетевые компании обслуживают десятки и сотни БРЗ разных типов и от различных производителей, а приведение этого “зоопарка” к единому типу оборудования является очень дорогой и трудоемкой задачей. В данной статье рассматривается универсальное решение по мониторингу нештатных ситуаций на БРЗ и по удаленному конфигурированию этих блоков. Детальная схема системы представлена на рисунке.

Как правило, каждый БРЗ имеет набор дискретных выходов, по которым можно определить возникновение какой-либо нештатной ситуации. На стороне удаленного объекта (БРЗ) устанавливается специально разработанный GSM-контроллер МУР1001.2 GSM DI, имеющий до

8-ми дискретных входов, подключенных к дискретным выходам БРЗ, а также подключенный к БРЗ по интерфейсу RS485/RS232. Этот контроллер с частотой не менее 1 раза в 5 секунд непрерывно опрашивает дискретные выходы БРЗ. Поскольку своевременная доставка SMS-сообщений не гарантирована сотовым оператором, то при возникновении какой-либо нештатной ситуации (определенный уровень сигнала на одном из дискретных выходов) GSM-контроллер осуществляет голосовой дозвон на определенный настройками сотовый номер диспетчера системы. Диспетчер системы видит звонок с GSM-контроллера и понимает, что произошла нештатная ситуация. На рабочем месте диспетчера установлено программное обеспечение от производителя конкретного БРЗ, выходы которого опрашиваются GSM-контроллером. Также на стороне рабочего места диспетчера через USB-соединение подключен GSM-модем MUP 1001.9 GSM CSD. Если программное обеспечение производителя БРЗ позволяет организовать связь через CSD-соединение, диспетчер через это программное обеспечение посредством GSM/CSD связи, организованной GSM-модемом и GSM-контроллером, подключается к блоку релейной защиты, исследует возникшую ситуацию, конфигурирует параметры, принимает решение по оперативному устранению неполадок. Если программное обеспечение производителя БРЗ не позволяет установить соединение по CSD, то для дозвона используется программный модуль “CSD-дозвон”, далее работа ведется через стандартное программное обеспечение так же, как через проводное соединение.

Другими полезными параметрами, интересными для эксплуатирующей организации, часто являются параметры потребления активной и реактивной энергии на удаленном объекте. На объекте, как правило, установлены несколько приборов учета электрической энергии, информацию с которых диспетчер системы может считывать по тому же каналу связи, что используется для связи с БРЗ. На верхнем уровне системы для учета электроэнергии используется программный комплекс “Арго: Энергоресурсы”, поддерживающий около 250 типов приборов учета.

Представленная в статье система является универсальной и позволяет электросетевой организации внедрить недорогую, легко тиражируемую, масштабируемую, и простую в эксплуатации систему двусторонней связи на базе имеющегося оборудования. В простейшем варианте (без модуля “CSD-дозвон” и функций АСКУЭ никакого дополнительного программного обеспечения верхнего уровня не требуется).



*Е.Ю.Курылин, студ.; рук. С.А.Капустин доцент. (ИГЭУ, г. Иваново)*

## **РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ ХАРАКТЕРИОГРАФА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ**

При любительском конструировании радиоаппаратуры зачастую сведений об исправности радиокомпонента бывает недостаточно для выбора нужного экземпляра в создаваемом устройстве. Особенно это касается активных приборов – транзисторов, когда приходится сталкиваться с проблемой подбора одинаковых по параметрам биполярных транзисторов. Радиолюбителям - практикам хорошо известен тот факт, что транзисторы даже из одной заводской партии и из одной упаковки, по основному нормируемому параметру “коэффициенту передачи тока  $h_{21э}$ ” могут отличаться в разы. Особенно остро вопрос подбора пар идентичных по параметрам транзисторов стоит при построении 2-х тактных усилителей мощности звуковой частоты, когда расхождение по  $h_{21э}$  в 10% приводит к значительному увеличению коэффициента амплитудных искажений. Известный способ снятия выходных характеристик транзистора вручную и построение графиков по точкам довольно долгий и трудоемкий процесс. Решением этой проблемы является применение характериографа, прибора, который позволяет визуально наблюдать характеристики транзистора на экране монитора (осциллографа) для реального режима его работы. Этот прибор позволяет снимать выходные характеристики транзисторов без рутинных измерений и построений и наглядно, с помощью осциллографа, сравнивать их между собой. В итоге можно сделать вывод о работоспособности и идентичности сравниваемых транзисторов.

На рис. 1. представлена электрическая принципиальная схема для снятия выходных характеристик [ $I_k=f(U_{эк})$  при  $I_b=const$ ] биполярного транзистора структуры p-n-p и внешний вид этих характеристик, применительно к маломощному транзистору.

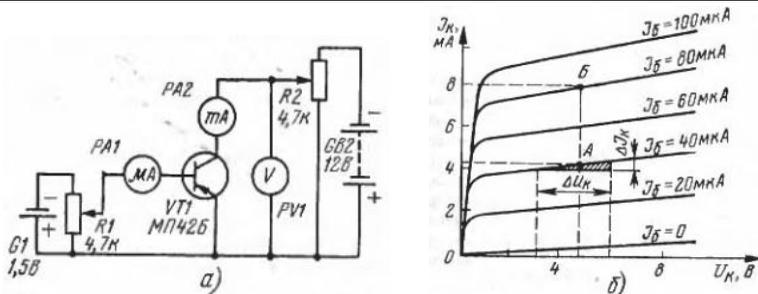


Рис. 1. Схема для снятия выходных характеристик биполярного транзистора структуры p-n-p (а); внешний вид этих характеристик (б)

Из внешнего вида характеристик транзистора можно сделать вывод, что для визуального их отображения, в структуре характериографа должен быть генератор плавно нарастающего напряжения, подаваемого на коллектор  $U_{кэ}$  и генератор стабильного тока, подаваемого на базу транзистора  $I_{б}$ , ступенчато изменяемый во времени. Учитывая, что для целей усиления у транзистора рабочим является пологий участок характеристик, то, следовательно, генератор базового тока  $I_{б}$ , с целью упрощения конструкции, может быть заменен на генератор напряжения, который ступенчато будет задавать этот ток. «Ступеньки» тока должны быть одинаковы. Тогда на экране осциллографа можно будет наблюдать выходные характеристики в виде неподвижного изображения.

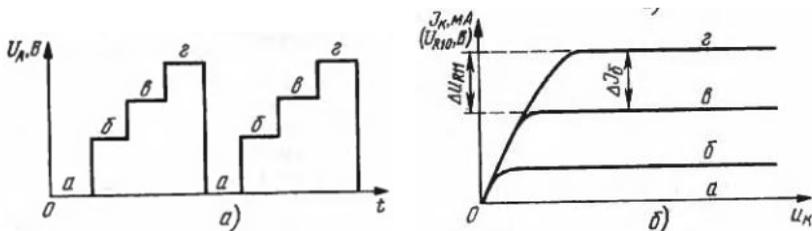


Рис. 2. Форма ступенчатого напряжения, задающего ток базы (а); внешний вид формируемой выходной характеристики транзистора (б)

Полная электрическая принципиальная схема характериографа, позволяющего получить на экране осциллографа вид семейства выходных характеристик транзистора, для 3-х заданных (с

возможностью регулирования) базовых токов  $I_b$ , представлена на рис. 3.

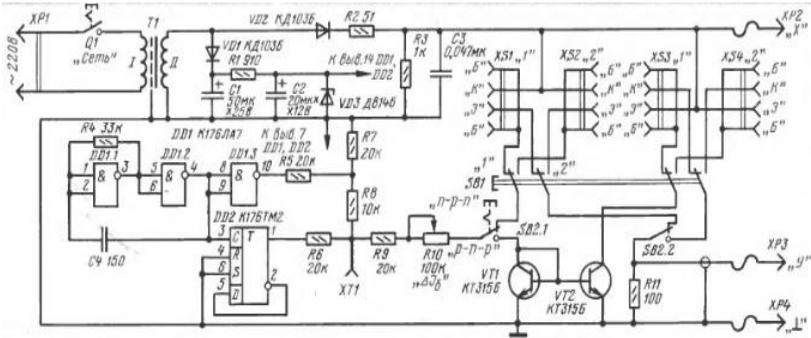


Рис. 3. Характериограф, схема электрическая принципиальная

Питание модуля осуществляется от сети переменного тока. С вторичной обмотки понижающего трансформатора T1 напряжение подается на 2 выпрямителя. Первый выполнен на диоде VD1, сглаживающем фильтре C1-R1-C2 и стабилитроне VD3, который предназначен для питания микросхем. Второй — на диоде VD2 и предназначен для подачи пульсирующего напряжения на питание коллекторной цепи проверяемого транзистора и получения горизонтальной развертки осциллографа.

На элементах DD1.1, DD1.2 собирается генератор прямоугольных импульсов с частотой около 100 кГц. Эти импульсы поступают на инвертор DD1.3 и делитель частоты на 2, который выполнен на триггере DD2. К выводам триггера подключается цифроаналоговый преобразователь, выполненный на резисторах R5-R6-R7-R8. На контакте XT1 образуется ступенчатое напряжение (рис. 2, а).

При подключении транзистора, на коллектор поступает пульсирующее напряжение (однополупериодное). В то же время на базу подается ступенчатое напряжение с цифроаналогового преобразователя через резисторы R9 и R10. Переменным резистором R10 изменяется значение напряжения, а значит и значение тока в цепи базы. Протекающий при этом ток через транзистор создает «ступенчатое» падение напряжения на резисторе R11, установленном в эмиттерную цепь. Снимаемое с этого резистора напряжение подается на вертикальный вход осциллографа. Поскольку частота изменения

«ступенек» гораздо больше частоты развертки, мы увидим практически непрерывные изображения выходных характеристик (рис 2, б). В данном случае наблюдается не коллекторный ток, а эмиттерный, который мало отличается от коллекторного.

Меняя положение кнопки SB1 можно сравнивать выходные характеристики то одного, то другого транзистора.

Вышеприведенный способ относится к транзисторам типа п-р-п. Если же нужно проверить транзисторы структуры р-п-р, на базу подается ступенчатое напряжение через так называемое «токовое зеркало». Оно организовывается на 2-ух согласованных транзисторах п-р-п структуры. Они обеспечивают такую же полярность сигнала на базе транзистора р-п-р типа по отношению к эмиттеру, как и в случае проверки транзистора другой структуры. В результате картина выходных характеристик на осциллограмме получается неизменной при проверке транзисторов любого типа.

#### Библиографический список

1. Тигце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство. Пер. с нем.- М.: Мир, 1983.
2. Справочник радиолюбителя – конструктора. – 3-е изд.- М.: Радио и связь, 1983
3. С.А. Гаврилов. Полупроводниковые схемы. Секреты разработчика. Электронная версия издания (pdf – формат).

*Л. Д. Галанова, студ.; рук. А.И. Терехов к.т.н., доцент  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## ПРИМЕНЕНИЕ КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ В МЕДИЦИНЕ

Квантовая электроника изучает методы усиления и генерации электромагнитных колебаний с использованием вынужденного излучения квантовых систем.

Лазер — это устройство, преобразующее энергию накачки в энергию когерентного, монохроматического, поляризованного и узконаправленного потока излучения.

Принцип действия лазера заключается в явлении вынужденного (индуцированного) излучения.

Лазер имеет три составляющие:

1. активная среда
2. система накачки

### 3. оптический резонатор

Лазеры обширно применяются в таких областях медицины, таких как: хирургия, офтальмология, онкология, стоматология, дерматология и др.

Лазеры, применяемые в медицине:

1. аргоновые лазеры
2. полупроводниковые лазеры
3. ИАГ-лазеры
4. гелий-неоновые лазеры
5. CO<sub>2</sub>-лазеры
6. эксимерные лазеры
7. лазеры на красителях

Характеристики хирургических лазеров, определяющие их применение в медицинской технике:

1. мощность излучения
2. непрерывный или импульсный режим работы
3. способность коагулировать кровенасыщенные ткани
4. возможность передачи излучения по оптическому волокну

Лазеры могут быть использованы в исследовательских целях и в качестве инструмента непосредственного воздействия на ткани организма.

В диагностике лазеры применяются для обнаружения различных неоднородностей (опухолей, гематом) и измерения параметров живого организма.

Лазерная технология позволяет создавать универсальные аппараты, которые могут использоваться для различных медицинских процедур: как наружных, так и внутрисполостных.

Перспективным направлением медицины лазерную хирургию делает ряд особенностей: отсутствие механического контакта инструмента и ткани; минимальные потери крови; стерилизующее действие излучения; минимальное воздействие на соседние ткани; возможность изменять эффект взаимодействия ткани и лазера, изменяя его параметры.

По воздействию на ткани организма лазеры могут оказывать следующие эффекты:

1. Физиотерапевтический эффект наблюдается при использовании маломощных лазеров (мощность порядка  $10 \text{ ватт/м}^2$  ) приводит к биохимическим и физиологическим изменениям в организме.

2. При мощности порядка  $10^5 \text{ ватт/м}^2$  лазер используется для

облучения патологических тканевых образований, при этом не происходит сильного повреждения тканей и возникновения дефектов.

3. Мощность порядка  $10^7$  ватт/м<sup>2</sup> позволяет использовать «лазерный скальпель», который способен рассечь ткани за счет их испарения.

**Библиографический список:**

1. **Захаров В.П., Шахматов Е.В.** Лазерная техника: учеб. пособие. - Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2006.
2. Справочник по лазерной технике. Пер. с немецкого. М., Энергоатомиздат, 1991.
3. **Жуков Б.Н., Лысов Н.А., Бакуцкий В.Н., Анисимов В.И.** Лекции по лазерной медицине: Учебное пособие. - Самара: СМИ, 1993.
4. Применение лазерной хирургической установки «Скальпель-1» для лечения стоматологических заболеваний. - М.: Министерство здравоохранения СССР, 1986.
5. **Канюков В.Н., Терегулов Н.Г., Винярский В.Ф., Осипов В.В.** Развитие научно-технических решений в медицине: Учебное пособие. Оренбург: ОГУ 2000.

*А.А. Муравьева, студ.; рук. А.П. Бурков уч. степень к.т.н.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ СИНТЕЗА ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ ЧАСТОТНОЙ КОРРЕКЦИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Одним из показателей, который в настоящее время указывается ведущими производителями приводов, является динамическая точность. Под динамической точностью понимается ошибка регулирования положения независимо от характера движения во всем скоростном диапазоне, сюда же, как правило, относят способность электропривода компенсировать механические ошибки кинематической передачи.

К числу ошибок слежения, вызванных кинематической передачей можно отнести:

1. Кинематический зазор в передаче, люфты и несоосности;
2. Погрешности, вызванные ограниченной жесткостью кинематической передачи;
3. Погрешности, вызванные изменением геометрических размеров элементов передачи вследствие температурных колебаний;
4. Колебания, вызванные собственными резонансными частотами передачи в целом и её элементов в частности.

Основными способами устранения ошибок слежения, связанных с законом движения применительно к приводу, является введение компенсирующих связей по скорости и ускорению задающего сигнала, а также в отдельных случаях введением интегральной составляющей по сигналу управления. Компенсация резонансных частот, как правило, производится установкой в канал управления специальных полосовых цифровых фильтров, способных подавлять нежелательные частоты. Погрешности, связанные с кинематическим зазором, компенсируются посредством его косвенной идентификации и выборки на максимально возможной скорости.

В настоящее время возник разрыв между возможностями современных электроприводов и требованиями существующих стандартов. Данный разрыв становится сдерживающим фактором в области проектирования и эксплуатации качественных современных электроприводов. Поэтому имеет практический смысл дополнить существующий стандарт

новыми техническими условиями, опирающимися на прямые показатели качества: динамическую и статическую точность, разрешающую способность, повторяемость, динамическую жесткость. Примерами тестовых воздействий, выявляющих указанные характеристики, являются обработка ступенчатого и гармонического сигнала, круговая интерполяция. Также современный станочный электропривод должен обладать механизмами компенсации погрешностей кинематической передачи и фильтрами для подавления собственных резонансных частот. [1]

Наиболее идеальным видом фильтров для подавления резонансных частот является частотно-заграждающая цепь (ЧЗЦ), также называемая полосно-заграждающая цепь (ПЗ). Для компенсации резонансных частот, в канал управления достаточно вставить фильтр второго порядка.

Передаточная функция полосно-заграждающего фильтра имеет вид:

$$H(s) = K * \frac{(s^2 + 2 * \sigma_z * s + \omega_z^2)}{(s^2 + 2 * \sigma_p * s + \omega_p^2)},$$

где,  $\sigma_z < \sigma_p$ .

Синтез данного фильтра, начинается с определения значения и положения его полюсов и нулей. Их необходимо выбирать так, чтобы нули являлись доминирующими по отношению к полюсам (рисунок 1).

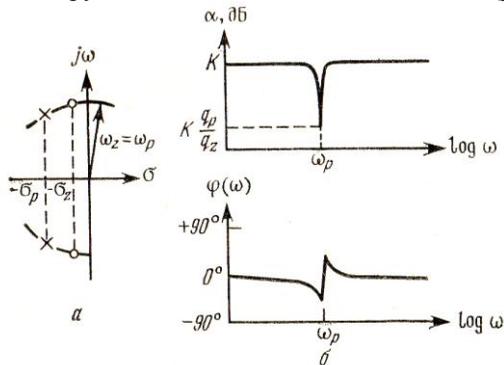


Рисунок 1 – Характеристики ПЗ: а) расположение нулей и полюсов; б) АФЧХ фильтра второго порядка

Для проектирования ПЗ достаточно знать необходимую частоту, которую будет подавлять фильтр.

Рассмотрим случай, что частота среза, находится в промежутке от 20 до 200Гц ( от 125,66 рад/с до 1256,64 рад/с)

Примем частоту среза за 100 Гц = 628,32 рад/с.

Здесь возникает сложность построения окружности и нахождения точного значения полюсов. Существуют соотношения:

$$\begin{aligned} \omega_z^2 &= \sigma_z^2 + \tilde{\omega}_z^2, & \omega_p^2 &= \sigma_p^2 + \tilde{\omega}_p^2, \\ q_z &= \omega_z/2\sigma_z, & q_p &= \omega_p/2\sigma_p. \end{aligned} \quad (1)$$

И на диаграмме полюсов и нулей они выглядят следующим образом (рисунок 2):

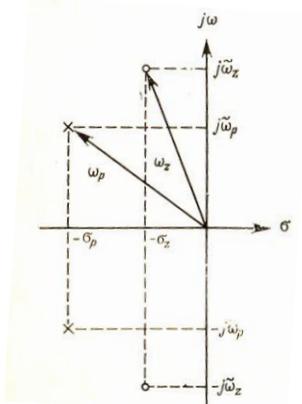


Рисунок 2 – Диаграмма полюсов и нулей передаточной функции второго порядка

Таким образом, радиус окружности на комплексной плоскости:

$$\omega_z = \omega_p = 628,32 \text{ рад/с.}$$

Примем, что  $\tilde{\sigma}_p = 350$  рад/с. Так как она должна быть меньше

$$\omega_z = \omega_p = 628,32 \text{ рад/с.}$$

В результате расчетов в программном комплексе Matlab, получаем:

значения полюсов :  $p = [-350+521.8103i \quad -350-521.8103i]$ ;

значения нулей:  $z = [628.32i \quad -628.32i]$ ;

передаточная функция имеет вид:

$$H(s) = \frac{(5s^2 + 1973900)}{(s^2 + 700s + 394790)}$$

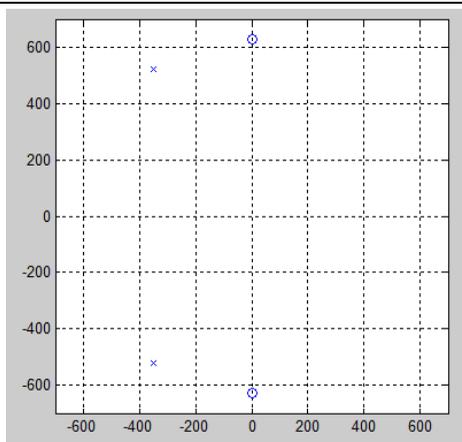
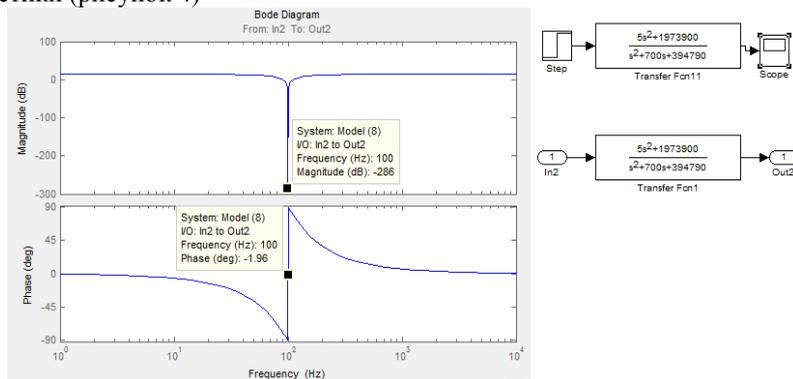


Рисунок 3 - Диаграмма полюсов и нулей, при частоте среза равной 100 Гц

Проверим значение частоты среза, построив АФЧХ этой характеристики (рисунок 4)



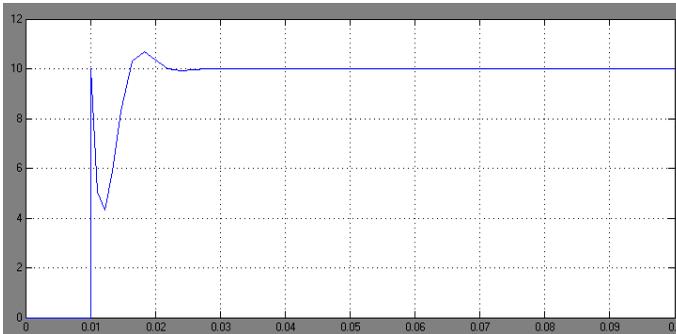


Рисунок 4 – АФЧХ и переходная характеристика при частоте среза, равной 100 Гц

Данный метод, позволяет определять расположения нулей и полюсов, таким образом, чтобы подавлять нежелательную частоту объекта управления и сглаживать итоговые характеристики АФЧХ.

Для большинства передаточных функций переход от аналогового вида к цифровому осуществляется с помощью подстановки методом Эйлера:

$$s(z) = \frac{z-1}{T_0 z}$$

Осуществляем данную подстановку, в передаточную функцию вида:

$$H(s) = \frac{(5s^2 + 1855.1s + 1973900)}{(s^2 + 700s + 394790)}$$

$$p = [-350 + 521.8103i \quad -350 - 521.8103i];$$

$$z = [-186.5101 + 600i \quad -186.5101 - 600i];$$

Частота среза равна 100 Гц.

Такт квантования выбираем равным 0,0001 с.

Получаем, что передаточная функция в цифровом фильтра выглядит следующим образом:

$$H(z) = \frac{(5 - 10.18z^{-1} + 5.205z^{-2})}{(1 - 2.07z^{-1} + 1.07395z^{-2})}$$

Сравним переходные характеристики аналогового и цифрового фильтра (рисунок 6).

Как видно из рисунка 6, характеристики аналогового и цифрового фильтра практически идентичны. Из этого следует, что расчет и такт квантования выбраны верно.

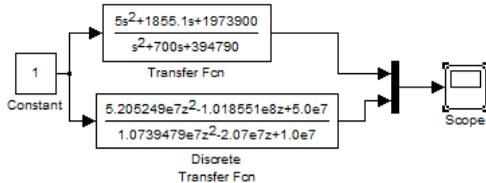


Рисунок 5 – Схема для определения характеристик аналогового и цифрового вида фильтра

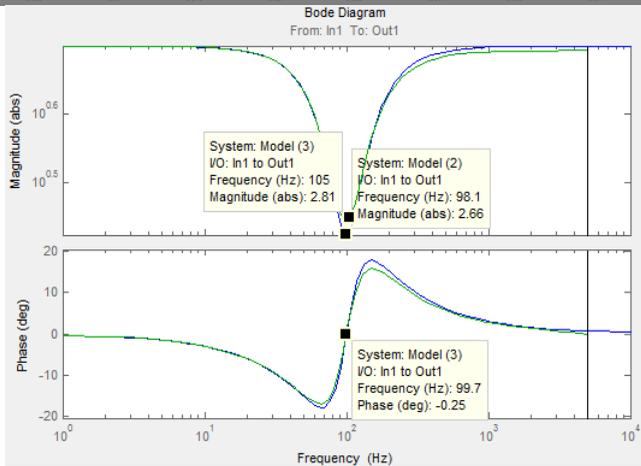
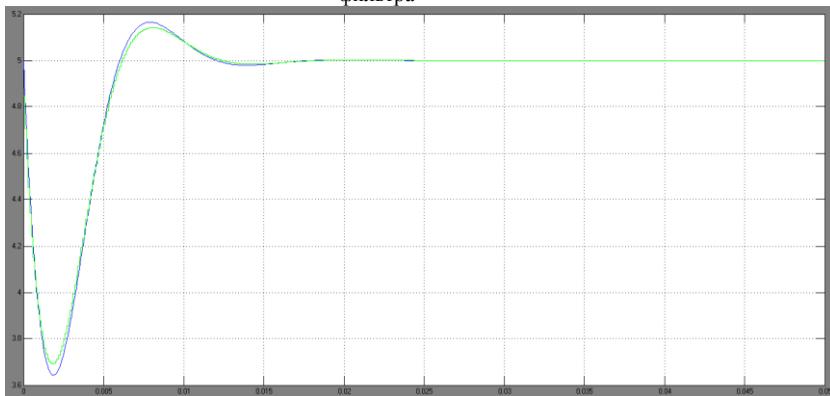


Рисунок 6 – АФЧХ и переходные характеристики аналогового и цифрового фильтра (аналогового – синяя линия, цифрового – зеленая)

Таким образом, синтез необходимого цифрового фильтра достаточно прост, но осложняется точностью определения его параметров. Если «провал» АФЧХ ПЗ будет находится на месте «всплеска» АФЧХ объекта управления, то итоговая АФЧХ будет иметь сглаженный вид, что позволит устранить нежелательные помехи в работе электропривода. Такой электропривод будет отвечать современным требованиям точности и будет востребован потребителями.

#### Библиографический список

1. **А.П. Бурков, Е.В. Красильникьянц, кандидаты техн. наук, А.А. Смирнов, асп., Н.В. Салахутдинов, инж; ст. «Современные требования к электроприводам станков с ЧПУ» «Вестник ИГЭУ» Вып. 4, 2010 г.**
2. **Г. Мошиц, П. Хорн; «Проектировани активных фильтров», 1984 г.**
3. **Э.Л. Тихомиров, В.В. Васильев, Б.Г. Коровин, В.А. Яковлев.** Микропроцессорное управление электроприводами станков с ЧПУ/– М.: Машиностроение, 1990. – 320 с.
4. **Михайлов, Р.Т. Орлова, А.В. Пальцев.** Гибкие производственные системы, промышленные роботы, робототехнические комплексы. Практик. Пособие. В 14-ти кн. Кн. 14/ О.П.. Современный электропривод станков с ЧПУ и промышленных роботов; Под ред. Б.И. Черпакова. – М.:Высш.шк., - 1989. – 111 с.
5. **Motion Control Theory Needed in the Implementation of Practical Robotic Systems.** James Mentz. Thesis submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of science in Electrical Engineering. Aipril 4, 2000 Blackburg, Virginia
6. **Omron. Omnuс W-series. User’s Manual. AC Servomotors/Servo Drivers**
7. **Lenze. Инструкция по эксплуатации Global Drive. Сервоинверторы серия 9300.**
8. **Mitsubishi. Инструкция по эксплуатации приводов серии FR-700A.**
9. **Siemens. Главные приводы SIMOVERT. Инструкция по эксплуатации**
10. **Siemens. Приводы SIMOREG. Инструкция по эксплуатации**
11. **Lecture2. Accuracy of Machine Tools.**
12. **Modelling, Analysis and Control of Linear Feed Axis In Precision Machine Tools.** A thesis submitted in fulfillment of the requirements for the award of the degree Doctor of Philosophy from University of Wollongong by Jeffrey William Moscrop, Be (Hons) 2008.
13. **Протокол сравнительных испытаний преобразователя привода подачи “PowerDRV” и преобразователя ЭПБ-2 (ЧЭАЗ) с электродвигателем ДВУ2М2155LT1УХЛ4. Иваново 2002.**

## **ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ**

Процесс создания печатной платы состоит из четырёх последовательных этапов.

Первый этап – конструирование. Наиболее известными для этого программами являются OrCAD, P-CAD и др. Нормативы на конструкторскую документацию прописаны в ГОСТ 2.123-93 и ГОСТ 2.417-91.[1]

Второй этап – изготовление заготовки и её обработка. В настоящее время он осуществляется по двум основным технологиям: субтрактивной и аддитивной. Первая состоит в том, что в качестве исходного материала используется фольгированный медью изоляционный материал. После переноса рисунка печатных проводников лишнюю фольгированную основу вытравливают либо удаляют механически или лазером. [2] Главным отличием аддитивного метода состоит в том, что металл проводников наносится на изоляционный материал, а не вытравливается.[3] Если аддитивный метод прост в производстве и часто используется радиолюбителями, то субтрактивный больше подходит для серийного производства печатных плат. Кроме того к этому этапу относят нанесение различных покрытий (“паяльной маски”. шелкографии и т.д.) и механическую обработку.

Третий этап заключается в монтаже компонентов. Основным методом монтажа является пайка. Она может производиться как в ручную, так и с помощью специальных технологий. В настоящее время на производстве используют два основных способа пайки: пайку волной и пайку в печах. Пайку волной чаще используют для монтажа навесных компонентов. Она осуществляется волной припоя особой формы. В настоящее время существуют проблемы его применения для сборки плат сложной конструкции.[4][5] С появлением SMD компонентов на смену пайки волной пришла пайка в специальных печах. Эти печи бывают двух видов: камерные и конвейерные. Второй тип печей встраивают в технологические линии. Этот способ монтажа более производительен, но имеет существенный недостаток – вибрацию плат, из-за чего в процессе пайки часть плат просто лишаются компонентов.[6][7]

Заключительный этап состоит в тестирование и контроле

произведённых печатных плат. Одним из способов является электрическое тестирование плат. Оно может производиться как в ручную, так и по методам “ложе гвоздей”, “летающих щупов” и “летающих матриц”. Три последних метода полностью автоматические и не требуют вмешательства человека, полностью исключая человеческий фактор. [8] Вместе с электрическим тестированием часто применяют оптический контроль качества монтажа, который позволяет выявить смещения компонентов, недостаток или избыток припоя и т.д. [1]

Представленные выше этапы изготовления печатных плат и методы их исполнения являются основными методами, применяемыми в настоящее время как радиолюбителями, так и крупными производствами. Существует множество других способов, но либо их технология устарела, либо не нашла применения в реалиях современного мира.

#### Библиографический список

1. <https://ru.wikipedia.org>
2. <http://ictech.com.ua/publications/technical-articles/107-formirovanie-steka-mpp-part1>
3. Электроника: НТБ №2, 1998
4. [http://www.global-smt.ru/process\\_equipment/wave\\_soldering/](http://www.global-smt.ru/process_equipment/wave_soldering/)
5. <http://xn--glafsi.xn--p1ai/wave.html>
6. <http://pcbdesigner.ru/pcb/montazh-pechatnykh-plat/pajka-oplavlениem-priпoяa-v-тexнoлoгии-poвepxнoстнoгo-moнтaжa.html>
7. <http://xn--80avlo9b.xn--p1ai/?pcb-mounting.15>
8. Технологии в электронной промышленности №2, 2005

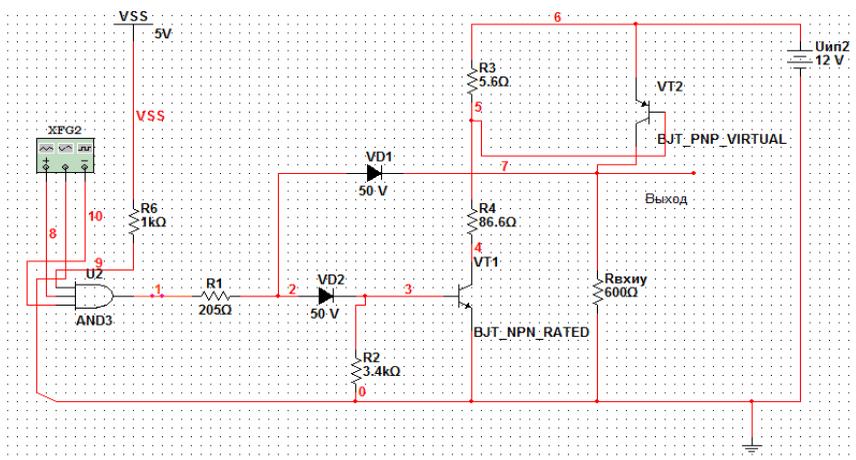
*Е.И. Некрасова, студ.; рук. А.И. Терехов, доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УРОВНЯ

Бурное развитие цифровой электроники привело к созданию большого количества различных блоков, входные и выходные сигналы которых могут быть не согласованы друг с другом по электрическим параметрам. Так возникла необходимость в создании устройств преобразователей уровня.

Задача исследования - обеспечение управления исполнительным устройством, имеющим входное сопротивление от элементов ТТЛШС серии 555. В работе исследовалась схема преобразователя уровня, построенного на дискретных транзисторах и входных диодах. По большому счету, схема представляет собой ключевое устройство с комби-

нацией кремниевых транзисторов n-p-n и p-n-p-типов. При уровне логического нуля на выходе элемента ТТЛШ транзисторы VT1 и VT2 закрыты. При уровне логической единицы – оба транзистора насыщены, и на входном сопротивлении исполнительного устройства будет откладываться необходимое напряжение. Назначение диодов VD1 и VD2 - предотвратить выход из строя транзистора VT2 при закорачивании выхода схемы на «землю».



Исследуемая схема, собранная в программе Multisim

Рассчитаны элементы схемы, а также параметры нормальной ее работы, выбраны номиналы резисторов и типов транзисторов, произведен выбор типов выпрямительных диодов.

В ходе исследования были выявлены и испытаны аварийные режимы работы схемы. При появлении на выходе инвертора уровня логической единицы и отсутствии или нарушении работы диода VD2 происходит открытие транзистора VT2, что приведет к выходу из строя преобразователя уровня.

Можно сделать вывод, что ключевые транзисторные схемы в качестве преобразователей уровня используются в том случае, когда требуется согласование схем, питающихся напряжением разного знака при большой величине логического перепада в каждой из схем.

#### Библиографический список

1. Терехов А.И., Терехов В.Г. Преобразователи уровня электрических сигналов для систем сбора и обработки информации. И.:ИГЭУ. 2009

*Е.И. Некрасова, студ.; рук. А.И. Терехов, доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

В последние несколько лет часто упоминаются системы управления, основанные на нейронных сетях. Целью данного доклада является подробное описание принципов работы нейронных сетей. Задача доклада состоит в доказательстве превосходства использования нейронных сетей или нелинейной логики в системах управления и при решении задач.

Повышенный интерес к искусственным нейронным сетям связан с их успешным применением в различных областях – медицине, бизнесе, геологии, физике. Нейронные сети имеют богатые возможности, решают задачи прогнозирования, управления, классификации. Нейронные сети – исключительно мощный метод моделирования, позволяющий воспроизводить чрезвычайно сложные зависимости, к тому же нейронные сети нелинейны по своей природе. Нейронные сети просты в использовании. После отбора данных запускается алгоритм обучения, который автоматически воспринимает структуру данных. В будущем развитие таких нейро-биологических моделей может привести к созданию действительно мыслящих компьютеров, то есть искусственного интеллекта.

Для изучения искусственного нейрона в работе проводятся параллели с биологическим нейроном. На вход искусственного нейрона (узла), представляющего собой процессор, поступает множество сигналов. Каждый вход умножается на соответствующий весовой коэффициент, после чего сигналы суммируются, и определяется уровень активации нейрона. Рассмотрено функционирование базовой модели нейронной сети.

В работе проиллюстрированы задачи, решаемые с помощью нейронных сетей. Для их решения необходимо условие связи между входными значениями и неизвестными выходами. Примечательно является также то, что зависимости между входом и выходом находятся в процессе обучения. Для управляемого обучения подбирается набор обучающих данных и уже известных для них выходов. Тогда сеть

учится устанавливать между ними связь. Хорошо обученную цепь можно в дальнейшем использовать для прогнозирования.

Наиболее интересно неуправляемое обучение сети, при котором имеются только входные данные, так называемая самообучаемая сеть Кохогена. Основным элементом этой сети является слой Кохогена, состоящий из линейных сумматоров.

В работе представлено использование нейронных сетей в системах управления.

Нейронным сетям предстоит пройти тот же путь, по которому еще совсем недавно развивались компьютеры, увеличивая свои возможности и производительность, захватывая новые сферы применения по мере возникновения новых задач и развития технической основы для их разработки.

На мой взгляд, за нейросетевыми системами управления стоит будущее.

#### **Библиографический список**

1. **Заенцев И.В.** Нейронные сети: основные модели. М.:Наука,1999.-76с.
2. **Суровцев И.С., Клюкин В.И., Пивоварова Р.П.** Нейронные сети. — Воронеж: ВГУ, 1994. — 224 с.
3. **А.В. Напалков, Л.Л. Прагина.** Мозг человека и искусственный интеллект. М.: Наука,1985.- 120 с.
4. **Мкртчян С.О.** Нейроны и нейронные сети. (Введение в теорию формальных нейронов). М.: Энергия, 1971. — 232 с.

*Чёрненко А.С., студ.; рук. проф. Терехов А.И.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИМПУЛЬСНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ НАПРЯЖЕНИЯ**

Основная задача исследования - создание математической модели понижающего импульсного преобразователя напряжения, для которой в качестве регулятора выбрана система управления, синтезированная методами каскадного регулирования, а также система с полиномиальным регулятором и регулятором состояния. В качестве инструмента для исследования выбран аппарат дифференциальных уравнений, моделирование и проверка работоспособности регулятора в компьютерной среде MatLab.

Проводятся исследования над понижающим импульсным

преобразователем напряжения, который имеет в своем составе как линейные, так и нелинейные элементы. Математическое описание элементов объекта управления готовит теоретическую базу для выбора характеристик и параметров приборов и устройств, позволяет провести сравнение методов построения регулятора. В качестве основного выбран метод синтеза систем с полиномиальным регулятором, позволяющий синтезировать регулятор, моделирование которого при работе на двигательную и резистивную нагрузку доказывает эффективность решения. Также проводится исследование импульсной модели регулятора, работоспособность которой предполагается провести экспериментально.

Кроме того, учитываются особенности контура регулирования тока при широтно-импульсном управлении и проводится анализ контура регулирования тока с учетом импульсного характера управления, выполняемый с использованием элементарного математического аппарата и позволяющий понять физическую природу возникновения нежелательных колебаний и способы их устранения. Рассмотрен пример использования модуля питания для решения важной проблемы современности - энергопотребления.

*Д.Р. Владимиров ; рук. Э.Н. Фоминич, д.т.н., профессор.  
ВИ (ИТ) ВА МТО, Санкт-Петербург*

## **ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ТЕРРОРИЗМ, НОВАЯ УГРОЗА ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ.**

В настоящее время жизнь современного общества тесно взаимосвязана, а порой и зависит от качества работы информационно-управляющих систем (ИУС). Современные требования к быстродействию и объему обрабатываемой информации способствует широкому использованию в ИУС микроэлектронных компонентов. Технические параметры указанных микроэлектронных компонентов достигаются за счет их миниатюризации, уменьшения уровня полезного сигнала, уменьшения времени переключения до единиц и долей наносекунд и существенным повышением тактовых частот.

Как известно, прогресс не стоит на месте, и одновременно с совершенствованием микроэлектронных компонентов появилась возмож-

ность создания специальных генераторов преднамеренных силовых электромагнитных воздействий (ПД ЭМВ). Использование указанного оборудования принесло в нашу жизнь новый вид угрозы - электромагнитный терроризм, действие которого заключается в нарушении работы микропроцессорных средств. Поражающее действие средств электромагнитного терроризма на микроэлектронное оборудование обусловлено как непосредственным воздействием импульсных электромагнитных полей на электрические и радиотехнические цепи, так и наведенными в соединительных линиях и цепях токами и напряжениями.

Для нормативного обеспечения требований по устойчивости ИУС к ПД ЭМВ в настоящее время используется ГОСТ Р 52863-2007 “Защита информации. Автоматизированные системы в защищенном исполнении. Испытания на устойчивость к преднамеренным силовым электромагнитным воздействиям”. Данные о параметрах воздействий, а также характеристики имитаторов получены с помощью компьютерного моделирования различных сценариев атаки с применением методов электромагнитного терроризма [1].

Анализ параметров испытательных воздействий, приведенных в [1], и сравнение их с современной нормативной базой по устойчивости технических средств к электромагнитным воздействиям различного рода и происхождения позволяет сказать, что электромагнитный терроризм несет особую угрозу, так как значения величин напряжения, тока и энергии превосходят значения соответствующих параметров из области ЭМС. Так, к примеру, имитаторы наиболее мощных электромагнитных воздействий в области ЭМС – микросекундных импульсных помех по сети электропитания, имеют длительность импульса до 50 мкс и энергию накопительного конденсатора, не превышающую 0,2 кДж, а имитаторы преднамеренных силовых электромагнитных воздействий могут иметь длительность импульса 0,1...20 мс с энергией 1...150 кДж. Параметры высоковольтных однократных наносекундных импульсов напряжения, приведенных в [1], по энергии превышают похожие на них наносекундные импульсные помехи и электростатический разряд из области ЭМС на 4...5 порядков.

Авторами статьи совместно с различными научными коллективами РФ были проведены экспериментальные исследования устойчивости системы видеонаблюдения (СВ) (поэлементно) и защищенных вычислительных машин, используемых в авиационной промышленности, на устойчивость к ПД ЭМВ. Испытания проводились при эксплуатации объектов в рабочем режиме.

По результатам экспериментальных исследований было выявлено, что СВ не обладает устойчивостью к такого рода воздействиям. Нарушения в работе элементов СВ, в том числе и при воздействиях на передающую/приемную антенну удалось получить при более низких параметрах ПД ЭМВ, чем требует [1]. Аналогичные результаты были получены при экспериментальных исследованиях защищенных вычислительных машин, специально предназначенных для работы в условиях тяжелой электромагнитной обстановки.

Также во время испытаний было установлено, что ошибки и сбои можно вызвать при значительно меньших напряженностях поля, но при более высоких частотах следования импульсов [2]. Следует отметить, что современные генераторы могут оказывать электромагнитное воздействие с напряженностью электрического поля не менее 30 кВ/м.

Таким образом, проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали и доказали необычайно высокую эффективность воздействия на ИУС средств электромагнитного терроризма. А задача обеспечения защиты от такого рода воздействия – является важной и актуальной.

#### **Библиографический список:**

1. ГОСТ Р 52863-2007, М., Стандартинформ, 2008 г.
2. Фоминич Э.Н., Владимиров Д.Р., Особенности поражающего действия преднамеренных СШП ЭМП. Оборонный заказ, 2014 г.

*А.Н. Серов, ст. преп.; рук. А.А. Шатохин, к.т.н., доц.  
(НИУ «МЭИ», г. Москва)*

## **ВЛИЯНИЕ НЕЛИНЕЙНОСТИ ФУНКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ АЦП НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ЗНАЧЕНИЯ**

Современные цифровые измерительные преобразователи действующего значения (ДЗ) сигнала содержат в своём составе аналого-цифровой преобразователь (АЦП). АЦП необходим для преобразования аналогового сигнала в цифровую форму для выполнения последующей цифровой обработки в соответствии с реализуемым алгоритмом измерения. Функция преобразования реального АЦП нелинейная. Возникающая вследствие этого погрешность относится к классу погреш-

ностей линейности, и не может быть скомпенсирована ни установкой нуля, ни калибровкой. По этой причине представляет большую важность разработка эффективного метода оценки влияния нелинейности функции преобразования АЦП на погрешность измерения действующего значения сигнала.

Оценка формы нелинейности функции преобразования конкретного АЦП имеет ряд трудностей. Большинство производителей указывают лишь значения некоторых параметров, связанных с нелинейностью функции преобразования, среди которых интегральная, дифференциальная нелинейности, ряд динамических параметров (например, SNR, SFDR, THD, THDN). В некоторых случаях производители указывают типовую форму нелинейности, полученную в результате усреднения большого числа экспериментальных данных. Однако нет никакой гарантии, что конкретный АЦП обладает формой функции преобразования, которая указана в его техническом описании в качестве типовой.

Результаты имитационного моделирования показывают, что форма нелинейности функции преобразования оказывает существенное влияние на погрешность измерения ДЗ и соотношение составляющих спектра выходного сигнала АЦП. Из доступных литературных источников [1, 2] известно, что погрешность принимает максимальные значения в случае, когда нелинейность обладает свойством нечетной симметрии. Для нелинейности данного вида, в случае подачи на вход синусоидального сигнала, спектр выходного сигнала АЦП содержит нечетные гармоники (как правило, с преобладанием отклонения первой гармоники). В случае нелинейности, обладающей свойством четной симметрии, выходной спектр АЦП содержит постоянную составляющую и четные гармоники. Указанная взаимосвязь формы нелинейности и соотношения гармоник выходного спектра АЦП представляет интерес в задачах измерения ДЗ отдельных гармоник сигнала и измерения ДЗ сигнала в заданной полосе частот.

В настоящее время существуют различные подходы к оценке формы нелинейности функции преобразования АЦП. Следующие подходы могут быть применены и в решаемой нами задаче:

- метод «наихудшего случая» [1, 2];
- метод, основанный на полиномиальной аппроксимации [2];
- «комбинированный метод» [3].

Согласно методу «наихудшего случая» значение нелинейности функции преобразования АЦП принимает предельное положительное значение в случае положительных отчетов сигнала и предельное отрицательное значение для отрицательных отчетов сигнала. Предельные

значения нелинейности, как правило, указываются в техническом описании АЦП в виде параметра интегральной нелинейности. Данный подход представления нелинейности применим для оценки погрешности измерения ДЗ сигнала произвольной формы. Это свойство, как и простота расчета оценки погрешности, являются главными достоинствами метода «наихудшего случая»; к его недостаткам следует отнести сильное завышение оценки погрешности.

В настоящее время для аппроксимации функции преобразования АЦП широкую популярность получил так называемый «комбинированный метод». Согласно данному методу нелинейность представляется в виде трех компонент: «низкочастотной» (аппроксимируемой полиномиальной функцией 3–5 порядка), «высокочастотной» (аппроксимируемой кусочно-линейной функцией) и случайной составляющей (имеющей, как правило, равномерное распределение и нулевую автокорреляционную функцию). Результаты имитационного моделирования показывают, что «комбинированный метод» позволяет существенно приблизить оценку погрешности измерения ДЗ, вызванную нелинейностью функции преобразования АЦП, к её реальному значению.

#### Библиографический список

1. **Adamo F.** Frequency Domain Analysis for Dynamic Nonlinearity Measurement in A/D Converters/ F. Adamo, F. Attivissimo, N. Giaquinto, I. Kale// IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement – 2007, vol. 56, No. 3, p. 760-769.
2. **Suchanek P.** Several approaches to ADC transfer function approximation and their application for ADC nonlinearity correction / P. Suchanek, D. Slepicka, V. Haasz // Metrology and Measurement Systems – 2008, vol. 15, No. 4, p. 501–511.
3. **Arpaia P.** Influence of the architecture on ADC error modeling / P. Arpaia, P. Daponte, L. Michaeli // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement – 1999, vol. 48, No. 5, p. 956-966.

*А.А. Щобак, студ;  
рук. М.О. Скрипачев, ст. преподаватель  
(ФГБОУ ВПО «СамГТУ», г. Самара)*

## **УСТРОЙСТВО ПОФИДЕРНОГО КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ ПРИСОЕДИНЕНИЙ ЩИТОВ ПОСТОЯННОГО ОПЕРАТИВНОГО ТОКА**

Установка устройства предназначена для цепей постоянного оперативного тока электрических станций и подстанций. Система постоянного оперативного тока предназначена для питания цепей защиты и автоматики, питания приводов высоковольтных выключателей электрических станций и подстанций.

Шины постоянного оперативного тока представляет собой систему двух, изолированных относительно земли, питаемых от аккумуляторных батарей. Потребители запитаны от шин через соответствующую коммутационную аппаратуру. На отходящих приседаниях возможно замыкание на землю одного из полюсов. При этом аварий, связанных с протеканием сверхтоков не происходит. Оборудование может работать и далее. Но, в этом случае, возможна ложная работа защиты и автоматики, запитанной от данной системы шин, может возникнуть замыкание второго противоположного полюса на землю, тогда ложная работа обеспечена.

Терминалы релейной защиты и автоматики на современных энергообъектах выполнены на микропроцессорной элементной базе, поэтому поиск «земли» методом поочередного отключения неприемлем. При повторном подключении терминала защиты возможно ложное срабатывание, с большими последствиями для энергосистемы.

Для обеспечения поиска поврежденного участка без отключения присоединения от системы постоянного оперативного тока было разработано устройство, позволяющее оперативному персоналу энергообъекта определить поврежденный участок с наименьшими затратами по времени.

Суть работы системы заключается в наложении на систему шин небольшого переменного напряжения, через емкостную развилку. Затем, с датчиков, установленных на каждом отходящем присоединении контролируется переменная составляющая тока, обусловленная действием наложенной ЭДС.

Из-за пространственной распределенности, система постоянного оперативного тока может иметь значительную емкость на землю. При этом в сигнале с датчиков тока отходящих присоединений будет составляющая, обусловленная данной паразитной емкости. При этом активное сопротивление утечки фидера на землю велико, т.е. повреждение изоляции отсутствует.

Для того чтобы отличить повреждение от емкостной утечки анализируется активная составляющая сигнала с датчика тока относительно потенциала системы шин.

Аналоговый коммутатор переключает датчики тока, микропроцессор анализирует активную составляющую. У присоединения с наивысшим значением активной составляющей будет иметь место повреждение на землю.

Система позволяет определить без отключения поврежденные присоединения с одноименными полюсами. Может быть установлено на любых объектах, имеющих, распределенные пространственно цепи постоянного.

#### Библиографический список

1. **Бессонов Л.А.** Теоретические основы электротехники. – М.: изд. «Высшая школа» - 1996, 638 с.
2. **Ричард Лайонс.** Цифровая обработка сигналов: Второе издание. – М.: изд. БИНОМ -2006, 652 с.
3. **Титце У., Шенк К.** Полупроводниковая схемотехника.— М.: Мир.-1982., 512 с.

**И.В.Вершинин аспирант, В.В.Тютиков д.т.н., профессор  
(ИГЭУ, г.Иваново)**

## СИНТЕЗ ПАРАМЕТРИЧЕСКИ ГРУБЫХ СИСТЕМ МОДАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Обеспечение низкой параметрической чувствительности является важным требованием к современным системам автоматического управления. Исследования в этом направлении начались достаточно давно [1] и в настоящее время активно продолжаются [2-4].

Использование систем модального управления, позволяющих обеспечивать требуемое качество процессов в объектах, в общем случае может приводить к получению САУ с высокой чувствительностью к вариациям параметров. Вопросам повышения параметрической грубости таких систем также посвящено немало работ.

Системы с полиномиальными регуляторами (ПР) «входа-выхода» (рис. 1), где  $A(s)$ ,  $B(s)$ ,  $C(s)$ ,  $R(s)$  полиномы знаменателя и числителя передаточных функций (ПФ) объекта и регулятора соответственно, и являются наиболее простым в структурном отношении решением задачи синтеза систем модального управления. Поэтому решение проблемы обеспечения параметрической грубости целесообразно начать именно с них.

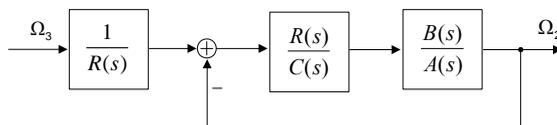


Рис. 1

Известно [5], что повышение коэффициента петлевого усиления в контуре является эффективным средством снижения чувствительности к параметрическим возмущениям. В рамках выбранного подхода наиболее наглядно это можно показать на примере синтеза ПР для объекта, не имеющего нулей в ПФ ( $B(s) = b_0$ ). В этом случае можно принять  $C(s) = 1$  и уравнение синтеза ПР примет вид:

$$A(s) + b_0 R(s) = D(s), \quad (1)$$

где  $D(s)$  – характеристический полином ПФ замкнутой системы.

Из (1) очевидно, что при увеличении значений коэффициентов полинома  $D(s)$  влияние коэффициентов полинома  $A(s)$ , а, следовательно, и вариаций его параметров на значения коэффициентов регулятора снижается.

Однако при этом необходимо учитывать, что использование в качестве  $D(s)$  стандартных полиномов (Ньютона, Баттерворта и т.п.) при увеличении значений  $d_i$  приводит к росту быстродействия:

$$D(s) = s^n + d'_{n-1} \Omega_0 s^{n-1} + \dots + d'_1 \Omega_0^{n-1} s + \Omega_0^n.$$

Здесь  $\Omega_0$  - среднегеометрический корень, определяющий быстродействие системы,  $d'_i$  - коэффициенты, от которых зависит характер переходных процессов.

Известно, что быстродействие динамических систем зависит от расположения «созвездия» корней их ХП на комплексной плоскости: чем дальше оно расположено от мнимой оси (чем выше значение  $\Omega_0$ ), тем выше быстродействие. Характерной особенностью стандартных

полиномов является компактное расположение корней относительно друг друга. Поэтому их использование при задании свойств САУ не позволяет в полной мере использовать потенциал модального управления.

Для обеспечения параметрической грубости систем предлагается разделить корни на две группы: первая будет обеспечивать повышение коэффициента петлевого усиления, а вторая – требуемое быстродействие. При этом достаточно, чтобы во второй группе был один корень.

Результаты исследований, выполненные на математической модели объекта, соответствующей типовой упругой двухмассовой электро-механической системе с полиномиальным регулятором, подтвердили эффективность предложенного подхода.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки в рамках базовой части государственного задания.

#### Литература

1. **Надеждин П.В.** О практической неустойчивости (негрубости) систем, полученных по методу статьи [1] // Изв. РАН. Автоматика и телемеханика. – 1973. – №5. – С. 196–198.
2. **Гончаров В. И.**, Лиепиньш А. В., Рудницкий В. А. Синтез робастных регуляторов низкого порядка // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2001. – № 4. – С. 36–43.
3. **Поляк Б.Т.**, Щербаков П.С. Робастная устойчивость и управление. – М.: Наука, 2002. – 303 с.
4. **Филимонов А. Б.**, Филимонов Н. Б. Метод больших коэффициентов усиления и эффект локализации движений в задачах синтеза систем автоматического управления // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2009. – № 2. – с. 2-10.
5. **Мееров М. В.** Синтез структур систем автоматического регулирования высокой точности – М. : Наука, 1967. – 424 с.

## СЕКЦИЯ 23

### ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Председатель – д.т.н., проф. **Полетаев В.А.**

Секретарь – к.т.н., доц. **Ведерникова И.И.**

*А.А. Подолян, асс.; рук. Г.С. Тымчик д.т.н., проф.  
(НТУУ «КПИ», г. Киев)*

#### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ ЭМА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ**

Среди исследований, связанных с созданием аппаратуры неразрушающего контроля, особое место занимают поиски бесконтактных методов возбуждения и регистрации ультразвука в твердых телах [1]. Успехи в отмеченном направлении достигнуты за счет применения электромагнитно-акустического (ЭМА) способа возбуждения и приема ультразвуковых колебаний. Теоретические исследования формирования ультразвуковой волны ЭМА методом рассмотрены рядом авторов [2,3]. Целью исследований является подтверждение теоретических зависимостей экспериментальными результатами.

Для исследования формирования акустической волны ЭМА преобразователем использовался ЭМА датчик с постоянным магнитом и гребенчатым излучателем с регулируемой величиной зазора между излучателем и поверхностью объекта контроля;

На графиках (рис.1-2) показаны как экспериментально полученные результаты, так и теоретические зависимости. Анализ графиков позволяет сделать вывод об их хорошей сходимости.

В процессе выполнения работы проведены экспериментальные исследования формирования акустической волны ЭМА преобразователем, получены экспериментальные данные по изменению выходного сигнала в зависимости от величины зазора между излучателем и поверхностью объекта контроля и силы тока через нити-излучатели. Показана хорошая сходимость результатов теоретических и экспериментальных исследований.

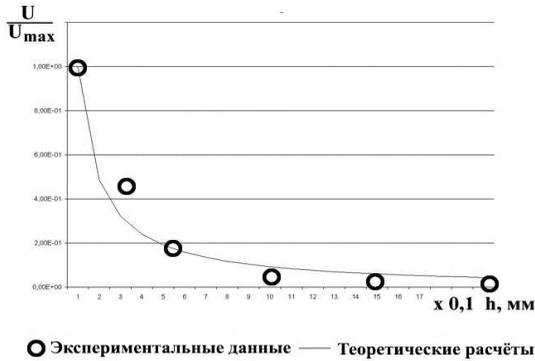


Рис. 1. Зависимость выходного сигнала от величины зазора между излучателем и поверхностью объекта контроля

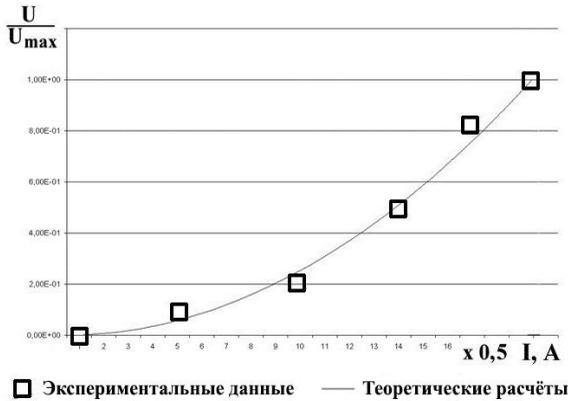


Рис. 2. Зависимость выходного сигнала от силы тока через нити излучателя

### Библиографический список

1. **Неразрушающий контроль и диагностика:** Справочник / Под ред. В.В. Клюева М.: Машиностроение. – 2005. – 656 с.
2. **Тымчик Г.С., Подолян А.А.** Анализ Формирование импульсов специальной формы для электромагнитных акустических преобразователей Вестник национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт" серия приборостроения. Киев. 2013. Вып. 45.
3. **Тымчик Г.С., Подолян А.А.** Анализ электромагнитно-акустического преобразователя с угловым вводом возбуждения ультразвуковой волны Вестник национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт" серия приборостроения. Киев. 2014. Вып. 47.

*А.А. Голяс, студ.; рук. В.А. Полетаев, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ЭЛЕКТРОДУГОВЫМ НАПЫЛЕНИЕМ**

Металлизация распылением является одним из способов нанесения покрытий. Принцип этого метода упрочнения основан на непрерывном плавлении металла в виде проволоки или порошков при помощи металлizationных аппаратов и распыления его на специально подготовленную поверхность. Источником плавления материалов в современных металлizationных аппаратах служит электрическая дуга. Явления, которые происходят при образовании металлizationных покрытий, вследствие многообразия факторов, влияющих на металлization, имеют сложный характер. Мельчайшие частицы расплавленного металла или сплава увлекаются воздушной струей со скоростью до 200 м/сек. Вследствие большой скорости полета эти частицы достигают поверхности покрываемой детали в жидком или пластическом состоянии. Попадая на металлizationную поверхность, частицы деформируются и принимают форму чешуек, которые нагромождаются друг на друга, образуют покрытие слоистого строения. При металлization сцепление частиц с основанием и друг с другом происходит вследствие шероховатости поверхности основания и под действием молекулярных сил. Прочность сцепления покрытий металлization меньше, чем у других покрытий. Однако при надлежащих условиях сцепление частиц оказывается достаточным, чтобы прочно удерживать напыленный слой на основном металле.

Электродуговое покрытие производилось с применением электродугового металлizationатора ЭДМ-5М, токарного станка и сварочного выпрямителя типа ВДУ-600. В качестве наплавочного материала использовалась порошковая проволока диаметром 2 мм марки 40Х13. С целью обеспечения прочности сцепления напылительного материала с поверхностью ротора на последней нарезалась «фрваная» резьба глубиной 3 мм и шагом 1,5 мм с последующей струйно-коррундовой обработкой до получения сплошного матового состояния поверхности. После этого осуществлялось нанесение покрытия на металлizationаторе ДМ-5М.

Металлизация выполнялась способом колебания металлizationатора по всей ширине шейки ротора. Частота колебаний – 20 колеб/мин,

дистанция металлизации – 110–120 мм, ток – 230 А, частота вращения вала – 200 об/мин, скорость линейного перемещения металлизатора (подача) – 1 мм/об (0,2 м/мин). Покрытие толщиной  $\varnothing_{\text{ном}} + 1,0$  мм (припуск на обработку) наносилось за 2 прохода.

Металлизированные шейки ротора обрабатывались точением с последующим шлифованием или алмазным выглаживанием до номинального размера..

На рис.1. показана микрофотография продольного разреза «рваной» резьбы детали с нанесенным покрытием, а на рис. 2. – микрофотография продольного разреза покрытия по впадине резьбы.

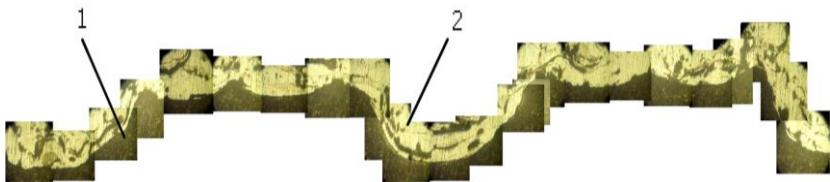


Рис.1.Микрофотография продольного разреза поверхности детали с нанесенным металлизированным покрытием:1 – металл; 2 – покрытие. Ув.  $\times 50$

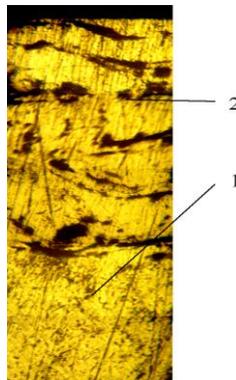


Рис. 1. Фотография продольного разреза металлизационного покрытия во впадине резьбы: 1- металл; 2 – покрытие. Увеличение  $\times 50$

Проведенные исследования по упрочнению деталей электродуговым напылением показали возможность нанесения на сталь 45 метал-

лизационного покрытия и последующего его алмазного выглаживания.

*А. П. Решетников, студ.; рук-ли И. В. Ившин, д.т.н., проф.;*

*Р. Р. Чураев, к.т.н., доц.*

*(КГЭУ, г. Казань)*

## **РАЗРАБОТКА И ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ЛИНЕЙНОГО ГЕНЕРАТОРА С НЕОДИМОВЫМИ МАГНИТАМИ**

Данная работа посвящена проектированию линейного генератора возвратно-поступательного действия, состоящего из одной камеры сгорания и соединенным с ней поршнем преобразователя, состоящего из статора и цилиндрического титанового полого ротора (транслятора) с закрепленными и утопленными на нём цилиндрическими магнитами из сплава неодим-железо-бор (NdFeB). Основная задача исследования – создание опытного образца со следующими выходными характеристиками – скорость перемещения транслятора – 10 м/с, выходная мощность – 10 кВт. Также необходимо обеспечить работу генератора в тяжелых условиях эксплуатации при температуре не менее 150 градусов Цельсия.

Сам автор занимается оптимизацией электрической части генератора – выбора геометрических размеров составляющих его частей, при которых обеспечение заданных выходных параметров оптимально коррелирует со стоимостными показателями материалов, учитывающих динамику цен.

Для решения полевых задач было выбрано программное обеспечение Ansys Maxwell, использующее метод конечных элементов (МКЭ). Ansys Maxwell располагает удобным САПР, позволяющим избегать ошибок при конвертации чертежей, сделанных в других программных пакетах, что, как показал опыт, значительно сокращает время расчета и существенно увеличивает точность расчетов, оцененную не с математической, а именно с инженерной точки зрения. Примерный вид расчетной модели двигателя, построенной в Ansys Maxwell, приведен на рисунке 1.

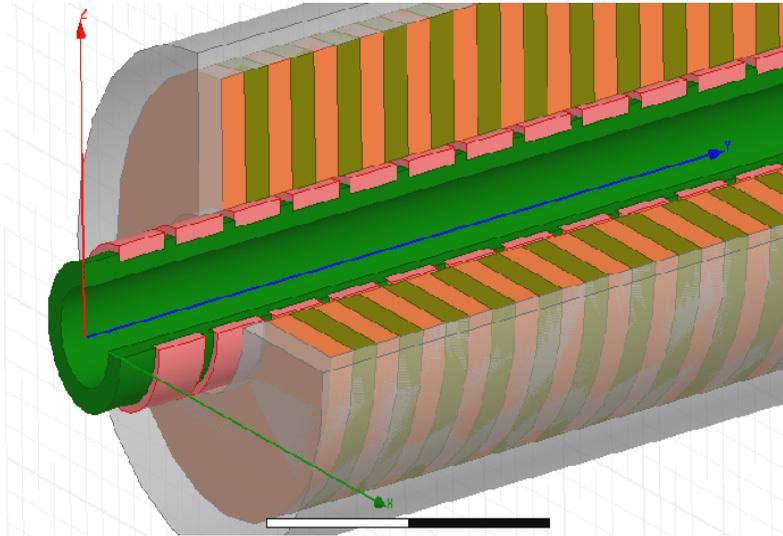


Рис. 1. Аксонометрический разрез модели линейного генератора, построенной в Ansys Maxwell.

Был проведен тщательный анализ патентной базы, после чего не осталось сомнений в актуальности проводимых исследований. Данный генератор может применяться как резервный источник электропитания в системах электроснабжения [1]. Вне сферы энергетики применение ограничено только здравым смыслом.

#### Библиографический список

1. **Хигерер М.Я., Овчинников И.Е.** Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения. – СПб.: КОРОНА Принт, 2004.

*Е.А. Булгачев, студ.; А.В. Мухин, студ.;  
рук. В.Н. Копосов, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ОБУЧЕНИЕ САПР ТП «ТЕХНОПРО» ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

На современных машиностроительных предприятиях для проектирования технологических процессов (ТП) используются системы автоматизированного проектирования (САПР). Одной из таких САПР ТП является система «ТехноПро» (разработка фирмы «Вектор-Альянс», г. Москва). Она применяется в учебном процессе на кафедре «Технология машиностроения» ИГЭУ.

Для автоматического проектирования технологических процессов в «ТехноПро» необходимо создать базу данных. Для этого нужно сгруппировать детали, в основном по сходству технологии их изготовления. При этом для каждой группы создается общий технологический процесс, который содержит весь перечень операций изготовления всех деталей группы. Для создания общего технологического процесса используются технологические процессы, уже освоенные в производстве. Можно использовать «бумажные» варианты технологических процессов с последующим их «превращением» в электронный вариант или конкретные технологические процессы, созданные в ходе работы с «ТехноПро» в диалоговом режиме.

Создание общего технологического процесса осуществляется в следующей последовательности. Один из технологических процессов группы принимается за базовый и вводится в виде общего технологического процесса (можно скопировать один из конкретных технологических процессов, созданных в ходе работы в «ТехноПро» в диалоговом режиме). Затем в него добавляются недостающие операции и переходы из других технологических процессов (конкретных технологических процессов).

При добавлении выявляются признаки, в зависимости от которых необходимо выбирать ту или иную операцию, переход или маршрут. Проверка каждого из признаков вносится в виде условий в базу «ТехноПро». Примерами таких условий являются проверки: вида заготовки, марки или твердости материала детали, габаритов детали, наличия определенных поверхностей, их размеров и т.д.

Создавая общие технологические процессы и условия, технолог «обучает» «ТехноПро» проектированию технологии конкретного (сво-

его) производства. Однажды обучив систему, он может быть уверен, что «ТехноПро» никогда не забудет производственных нюансов проектирования технологических процессов. Это позволяет зафиксировать и сохранить опыт ведущих технологов предприятия.

После создания общего технологического процесса можно приступить к автоматическому проектированию индивидуальных технологических процессов. Для этого достаточно создать описание конструкции детали, для которой необходимо спроектировать технологический процесс ее обработки. Описание можно взять (считать автоматически) с электронной версии параметрического чертежа детали, созданного посредством систем геометрического моделирования и проектирования T – FLEX, КОМПАС и др. Описание чертежа детали можно создать также без использования графических средств, вводя необходимые данные с клавиатуры. Этот процесс заключается в заполнении общих сведений о детали (данных из штампа и технических требований чертежа) и параметров элементов конструкции (поверхностей), имеющих на чертеже детали. После создания описания детали ей назначается общий технологический процесс соответствующей группы деталей. Затем запускается процесс автоматического формирования технологического процесса. В течение этого процесса «ТехноПро» выбирает из назначенного общего технологического процесса операции и переходы, необходимые для изготовления каждого элемента конструкции детали и переносит их в конкретный технологический процесс. Затем из выбранного перечня система отбрасывает операции и переходы, обеспечивающие лучшее качество изготовления поверхностей детали по сравнению с указанными требованиями на чертеже.

После этого система отбрасывает из конкретного технологического процесса операции и переходы, в которых условия их выбора не выполнены. Далее «ТехноПро» производит расчеты, имеющиеся в условиях оставшихся операций и переходов.

Затем система рассчитывает технологические размерные цепи с учетом значений припусков, указанных в переходах общего технологического процесса.

Далее «ТехноПро» выполняет условия подбора технологического оснащения операций и переходов и выполняет имеющиеся в этих условиях расчеты режимов обработки и норм изготовления.

В конце процесса проектирования система формирует тексты переходов, заменяя имеющиеся в них параметры на конкретные значения. Значения параметров выбираются в зависимости от типа выполняемой обработки – предварительной или окончательной.

*Ю.М. Тютюнников, студ., рук. Н.В. Третьякова, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, Иваново)*

## **ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

Современные композиционные материалы (КМ) сочетают высокую прочность и незначительную массу. Их использование в машинах позволяет снизить вес конструкции, трудоемкость изготовления, сократить энерго- и материалоемкость, увеличить технический ресурс машин, снизить до минимума потери от коррозии, расход топлива и т.д. В автомобилестроении часто применяются КМ на полимерной основе, например «Карбон», «Торлон» и др. «Карбон» – полимерный КМ из переплетённых нитей углеродного волокна, расположенных в матрице из полимерных смол. Карбон отличается высокой прочностью, жёсткостью и малой массой, часто прочнее стали, но гораздо легче.

Основная составляющая часть карбона – нити углерода. Такие нити очень тонкие (примерно 0,005-0,010 мм в диаметре), порвать их достаточно трудно. Из этих нитей сплетаются ткани. Они могут иметь разный рисунок плетения (ёлочка, рогожа и др.).

Для придания ещё большей прочности ткани из нитей углерода кладут слоями, каждый раз меняя угол направления плетения. Слои скрепляются с помощью эпоксидных смол.

Из карбона изготавливаются кузовные детали (двери, крышки капотов, багажников, бампера, и т.п.). Для производства деталей требуется дорогое оборудование, например, автоклав.

«Торлон» или полиамид-имид – это продукт реакции между триметилангидридом и ароматическими диаминами. «Торлон» является самым твердым термореактивным пластиком в мире, обладающим при этом достаточно высокой термоустойчивостью, детали могут работать без потери свойств при температурах до 290 °С, он легок и имеет низкий коэффициент трения, негорюч и отлично противостоит воздействию химических веществ и радиации с высокой энергией (гамма- и рентгеновские лучи).

Из торлона 7130, армированного углеволокном, изготавливают блоки цилиндров, головки блоков, поршни с кольцами, шатуны, крышки клапанного механизма, шестерни привода распредвала, клапаны, клапанные пружины.

Торлон 4203 имеет наибольшую жёсткость и ударопрочность. Благодаря хорошей термостойкости, а также, размерной стабильности и лёгкости в обработке, этот материал идеален в производстве прецизионных деталей высокотехнологичного оборудования. Хорошие элек-

троизоляционные свойства обеспечивают возможности его применения для электротехнических изделий.

Торлон 4301 самый износостойкий и имеет самый низкий коэффициент трения, обеспечивает стабильность размеров в широком диапазоне температур, отлично проявляет себя в соединениях с сильным износом, таких как несмазываемые подшипники, уплотнения, сепараторы подшипников качения и детали поршневых компрессоров.

В авиации очень широко используются бороалюминиевые и бороэпоксидные КМ, это позволяет снизить вес самолёта, а значит улучшить аэродинамические характеристики и уменьшить затраты на топливо.

Для бороалюминия в качестве армирующего наполнителя используются волокна бора, а в качестве матрицы – алюминиевые сплавы. Бороалюминий в 3,5 раза легче алюминия и в 2 раза прочнее его. При высоких температурах (до 430 °С) бороалюминий имеет в 2 раза большие значения удельной прочности и жесткости, чем титан, что дает возможность его применения для высокоскоростных самолетов, (хвостовая часть, кессоны, лопадки вентилятора двигателя).

Боропластики, содержат в качестве упрочняющего наполнителя борные волокнистые материалы. Наполнитель применяют в виде мононити, жгутов из нескольких таких нитей, оплетенных вспомогательной стеклянной или органичной нитью, а также тканей и лент, в которых борные нити или жгуты переплетены другими нитями. Связующими в боропластиках служат эпоксидные смолы, полиамиды или другие полимеры, главным образом терморреактивные.

Для боропластиков характерны высокие значения модуля упругости, усталостной прочности и других механических свойств, малая ползучесть (до 0,2 %) в направлении ориентации нитей. Ударная вязкость боропластиков может быть улучшена введением в их состав стеклянных или других волокон; при этом снижается и стоимость боропластиков.

Боропластики – конструкционные материалы, применяемые главным образом в авиационной и космической технике для снижения массы высоконагруженных деталей, например панелей стабилизаторов, поверхностей управления, а также для изготовления обшивок.

Развитие производства КМ является наиболее перспективным путем к обеспечению машиностроительной отрасли качественными конструкционными материалами с необходимыми свойствами для выполнения тех или иных задач.

*О.В. Крестьянинова, студ.; рук. В.А. Полетаев, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА

Широкие технологические возможности в сочетании со специально созданными составами смазочно- охлаждающих жидкостей и порошков-инструментов позволили реализовать на практике процессы магнитно-абразивной обработки (МАО) для решения задач:

1. Полирование контактирующих поверхностей деталей машин, подверженных значительным механическим нагрузкам и работающих на износ, контактную и циклическую прочность.

2. Зачистка поверхности изделий перед сваркой.

3. Полирование поверхностей до и после нанесения покрытий.

4. Очистка поверхностей изделий от окисных пленок и дефектных слоев.

Полирование в магнитном поле контактирующих поверхностей применяется для полирования рабочих дорожек колец подшипников качения привода вращения лопастей вертолета, поверхностей трения скольжения штоков-иглопроводителей швейных машин, винтовых и гладких цилиндрических поверхностей винтой, червяков, валов и других деталей.

В атомном машиностроении сложнейшей проблемой является обеспечение необходимой коррозионной стойкости наружных поверхностей оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛОВ), работающих в среде пара при давлении 200 атм и температуре 300°C. Оболочки изготавливают из циркониевых сплавов, а финишную обработку осуществляют электрохимическим полированием в чрезвычайно агрессивных растворах плавиковой кислоты. Эта технология в экологическом отношении крайне ущербна и требует огромных затрат для обеспечения безопасных условий труда работающих и утилизации отработанных реактивов. Проведена замена электрохимической обработки на полирование в магнитном поле.

Магнитная галтовка – вид суперфинишной обработки резанием. Режущим инструментом является ферромагнитный галтовочный наполнитель, средством передачи усилия с вала двигателя на обрабатываемую поверхность является магнитное поле, индуцируемое постоянными магнитами. Обработка происходит в неподвижном рабочем объеме, в который загружены: наполнитель, представляющий из себя

короткие обоюдоострые иглы, обрабатываемые детали и смазочно-охлаждающая жидкость.

На рис.1 представлена конструкция разработанного и изготовленного устройства для магнитной галтовки. Установка работает следующим образом: двигатель передает движение на основной и вспомогательный вал посредством ременной передачи; вращение со вспомогательного вала на втулку №1 передается при помощи крестообразно ремня, из-за чего втулка №1 вращается в противоположную сторону основному валу. Основной вал и втулка №1 передают движение на подвижный диск и подвижный борт. Тем самым поле, индуцируемое основной и вспомогательной группой постоянных магнитов приходит в движение, воздействуя на находящийся в рабочем контейнере галтовочный магнитный наполнитель. Под воздействием поля наполнитель в контейнере начинает перемещаться по сложной траектории и ударяться о поверхность изделий, и, тем самым, обрабатывать их. При необходимости усиления воздействия наполнителя на изделия необходимо увеличить угол наклона рабочего объема.

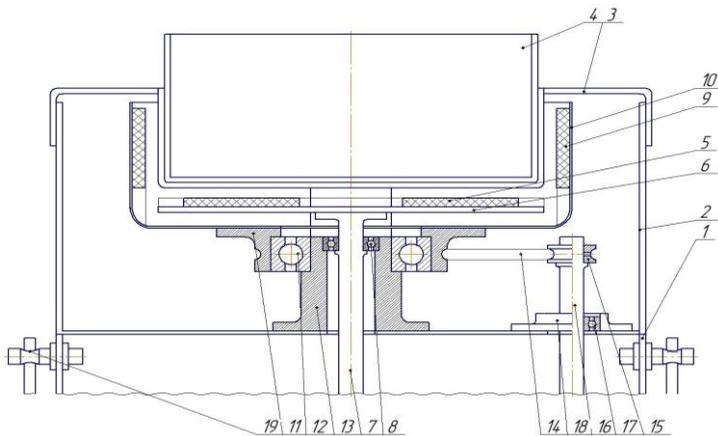


Рис. 1. Установка для магнитной галтовки::1– основной корпус; 2– верхняя часть корпуса; 3– рабочий объем; 4– рабочий контейнер; 5– основная группа постоянных магнитов;6– подвижный диск; 7– основной вал; 8– подшипник; 9– постоянные магниты; 10– подвижный борт; 11– втулка №1;12– основной подшипник;13– втулка №2; 14– ремень; 15– блок;16– вспомогательный вал;17– подшипник; 18– втулка№3;19– поворотный механизм.

*К. Н. Панченко, студ.; рук. Т. Ю. Степанова, к.т.н., доц.  
(ИГХТУ, г. Иваново)*

## РАСЧЕТ НА ИЗНОС МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ НИТИ

Разработка методики расчета на износ металлической нити при контакте с оснасткой ткацкого станка позволяет решить задачу прогнозирования прочности нити при механической переработке. Существует много теорий, которые освещают отдельные аспекты инженерных расчетов на износ, поэтому необходимо создать методику расчета конструкционного материала на износ.

При расчетах на износ для большинства случаев применяют линейную зависимость между временем изнашивания  $t$  и величиной износа  $U$ , то есть считают, что в период нормальной переработки металлической нити скорость изнашивания  $\gamma$  остается постоянной:

$$\gamma = \frac{U}{t} = \text{const}$$

Установлено [1-3], что для контактной пары «металлическая нить-металл оснастки станка» основным видом износа является абразивный. Это определяется режимом переработки нити: температура 20-28°C, нет больших контактных давлений и высоких скоростей скольжения.

Закон М. М. Хрущева определяет, что для абразивного изнашивания износ вдоль оси металлической нити  $U$  прямо пропорционален контактному напряжению  $\sigma_n$  на поверхности трения и пути трения  $S$ :

$$U = kS\sigma_n$$

где  $k$  – коэффициент, характеризующий износостойкость материала нити,  $\text{Па}^{-1}$ .

Контактирующие поверхности являются твердыми телами, и их контактирование будет происходить по прямой линии. В условиях производства, при взаимодействии конструкционного материала нити с металлом деталей станка с определенным усилием и наличием упругопластических деформаций, контактирование будет происходить по площадке определенной длины. Длина площадки контактирования за-

висит от величины контактного давления (напряжения), поверхностной твердости, микро- и макрогеометрических характеристик пары - трения. Для большинства пар - трения аналогичной конструкции единичное усилие находится в пределах 0,03-0,15Н. Для практических расчетов имеет смысл применять среднюю величину первоначальной площади контактирования, исходя из конструкционных размеров деталей станка и толщины металлической нити. В результате последующих контактов длина площадки контактирования нити с деталью станка будет увеличиваться.

Для выполнения расчета износа металлической нити примем, что сила  $F_r$  равномерно распределена на всех участках контактирования, поэтому на всех участках действует контактное напряжение  $\sigma_n$ , определяемое по формуле Герца:

$$\sigma_n = 0,418 \sqrt{g \frac{E_{np}}{R_{np}}}$$

где  $g$  – нормальная нагрузка на единицу длины контактной линии, н/м;  $E_{np}$  – приведенный модуль упругости, Па;  $R_{np}$  – приведенный радиус кривизны контактирующих поверхностей, м.

Износостойкость нити повышают замасливанием, т.е. используют состав на основе минерального масла и поверхностно-активных веществ.

Испытания нити проводили на приборе ТКИ 5-27-1. После истирания нити до разрушения определяли коэффициент износостойкости, который учитывает площадь контактной поверхности  $A$  и контактную силу  $F_r$ :

$$k = \frac{n_n A}{n_3 F_r}$$

где  $n_n$  – среднее число циклов из 10 результатов испытаний необработанной нити,  $n_3$  – среднее число циклов замасленной нити.

Разработанная методика позволяет определить износостойкость материала нити, а также и влияние замасливающего состава на износ металлической нити.

Библиографический список

1. Степанова, Т. Ю. Исследование влияния ПАВ на фрикционные свойства волокон /Т. Ю. Степанова, Т. Г. Комарова // Эффект безызносности и триботехнологии. – ИГХТУ, Иваново. – 2004. - № 1. – С. 37 – 43. – Библиогр.: с.43.
2. Камбалов, В. С. Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ. – М.: Наука, 1974. – 112 с.
3. Костецкий, Б. И. Поверхностная прочность материалов при трении. – Киев.: Техника. 1976. – 292 с.

*А.П. Марусин, студ.; рук. В.А. Полемаев, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ РАБОЧЕГО ЗАЗОРА МАГНИТОЖИДКОСТНОГО УСТРОЙСТВА

Одним из важнейших путей увеличения работоспособности магнитожидкостного устройства является повышение точности изготовления. Возникающие от наличия эксцентриситета изменения давления в жидкости под полюсом, неравномерность зазора и величина магнитного поля в нем влияют на работу устройства очень существенно. В хороших уплотнениях относительный эксцентриситет не должен превышать 0,1–0,2мкм. При невозможности точного выполнения элементов конструкции следует увеличивать рабочий зазор. Малая величина зазора и возникающие в нем высокие значения магнитной индукции у вершины зубца ведут к интенсивному воздействию на магнитную жидкость и быстрому её старению. В этом случае следует ограничивать величину магнитного поля допустимыми значениями, чему способствует площадка на вершине зубца и рациональная форма его вершины.

Для определения влияния вязкости используемой магнитной жидкости, напряженности магнитного поля, частоты вращения вала, величин шероховатости Ra и волнистости поверхностей сменных втулок и полюсов на момент трения магнитожидкостного устройства была спроектирована и изготовлена установка с радиальным магнитожидкостным уплотнением.

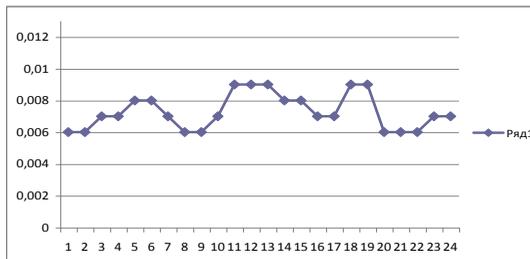
Магнитная жидкость размещается с равномерном рабочем зазоре с одно-родным магнитным полем между сменными полюсами и сменной втулкой. Источником магнитного поля являются цилиндрические постоянные магниты, равномерно размещенные по окружности между полюсными приставками. Вал приводится в движение электродвигателем с регулируемой скоростью вращения. Момент трения, создаваемый магнитной жидкостью и опорными подшипниками, передается на магнитную систему устройства и измеряется электронными весами. Сменные втулки вала выполнены из стали 3 и 40Х13, а сменные полюса – из стали 3. Измерение шероховатости наружной поверхно-

сти сменных втулок и полюсов производилось на приборе профилометре-профилографе АБРИС-ПМ7 с записью на ЭВМ.

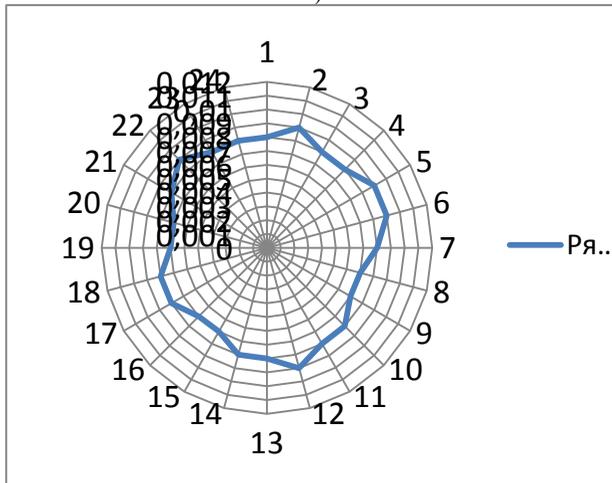
Сменные втулки изготавливались из стали 3 с разными величинами шероховатости  $R_a$  / волнистости наружной поверхности втулок из стали 3: а) –  $R_a = 0,354$  мкм /0,003 мм; б) –  $R_a = 1,220$  мкм /0,003 мм; в) –  $R_a = 7,210$  мкм /0,007 мм, а также из стали 40Х13: а) –  $R_a = 0,362$  мкм /0,002 мм; б) –  $R_a = 0,945$  мкм /0,003 мм; в) –  $R_a = 8,028$  мкм /0,006 мм

Величина шероховатости  $R_a$  / волнистости внутренней поверхности съемных полюсов из стали 3 равна 9,477 мкм/0,003 мм; 3,301 мкм/0,006 мм и 0,808 мкм/0,008 мм .

На рис.1. представлены волнограммы наружной поверхности втулки из стали 3.



а)



б)

Рис.1.. Величина волнистости (мм) наружной поверхности втулки из стали 3 с шероховатостью  $R_a = 1,220$  мкм: а) – продольная; б) – поперечная

## **СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ КОНСТРУИРОВАНИЯ СТАНКОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

Подвижность механизма определяется числом степеней свободы движений в этом механизме, т.е. числом независимых движений на разных входных звеньях, передающих их на одно выходное звено. В соответствии с этим механизмы могут быть одноподвижными (подавляющее большинство) и многоподвижными. Примерами последних являются разнообразные суммирующие механизмы станков и промышленные роботы. Подвижность всего механизма зависит от подвижностей отдельных кинематических пар, определяемых числом возможных перемещений одного звена пары относительно другого. Могут быть одно-, двух-, ..., пяти-, шести-подвижные кинематические пары [1].

Основным элементов многоподвижных станков является параллельный механизм, состоящий из неподвижного основания, подвижной платформы (рабочего органа) и связывающих их приводных штанг, соединенных с основанием и платформой при помощи шарниров.

Перемещение РО относительно обрабатываемой заготовки по любой из трех линейных и трех поворотных осей осуществляется путем согласованного изменения длин штанг с помощью системы ЧПУ. В металлорежущих станках таким РО является шпиндельный узел.

Траектория движения шпинделя формируется в системе координат детали, а его положение в любой точке траектории может быть задано тремя линейными координатами конца инструмента и двумя угловыми координатами, определяющими угол наклона оси инструмента [2].

На сегодняшний день механизмы параллельной кинематики (МПК) представлены широким разнообразием их исполнения. Механизмы параллельной структуры (МПС), применяемые в металлорежущих станках, можно классифицировать по следующим признакам: по виду штанг; по количеству штанг; по характеру расположения шарниров на платформе и основании; по расположению шпинделя и др [4].

По виду штанг разделение происходит:

- на механизмы со штангами управляемой переменной длины

(бипод, трипод, пента- под, гексапод, «ножницы»);

- на механизмы со штангами постоянной длины (линапод, биглайд, триглайд, орто- глайд, гексаглайд, ротопод, «дельта», four-rod).

Механизм *трипод* состоит из трех симметрично установленных телескопических штанг, связанных шарнирно одним концом с РО, а другим - с неподвижным основанием. Эти штанги приводятся от отдельных двигателей и работают на растяжение - сжатие. Дополнительная неприводная штанга расположена в центре. Она воспринимает изгибные деформации от инструментальной головки и поэтому должна иметь значительно большие размеры по сравнению с приводными штангами [3].

Среди триподов наиболее удачной разработкой является линейка станков Tricertфирмы NeosRobotics(Швеция), появившихся в 1992 г. Станки объединяют в себе функции как робота, так и станка (рис. 1).

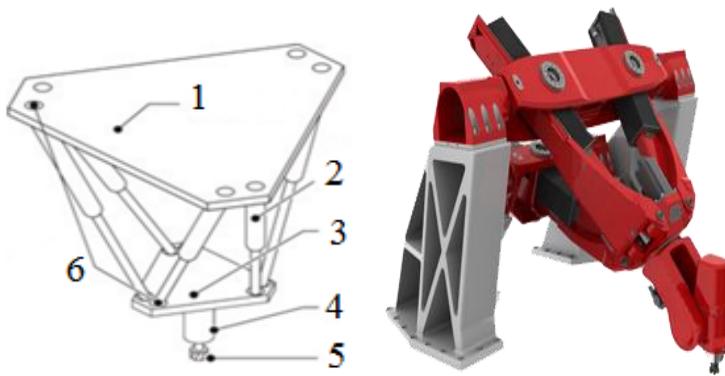


Рис. 1 Конструкция и станок Tricert: 1 – неподвижное основание; 2 – раздвижная штанга; 3 – подвижная платформа; 4 – шпиндельный узел; 5 – инструмент; 6 – шарниры.

#### Библиографический список

1. **Кузнецов, Ю. Н.** Компоновки станков с механизмами параллельной структуры / Д. А. Дмитриев, Г. Е. Диневич; под ред. Ю. Н. Кузнецова. - Киев-Херсон: ПП Вишемирский В.С., 2010. - 471 с.
2. **Бушуев, В. В.** Механизмы параллельной структуры в машиностроении / И. Г. Хольшев // СТИН. - 2001. - № 1. - С. 3-8.
3. <http://www.3e-club.ru/>
4. **Федотёнок А.А.** Кинематическая структура металлорежущих станков.-М.: Машиностроение, 1970.

**Е.В. Шпенькова, студ.; рук. В.А. Полетаев, д.т.н, проф.,  
А.В. Никоноров, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)**

## **ПОЛИРОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ**

Полирование является физико-химическим процессом финишной обработки, которая обеспечивает гладкие поверхности деталей с комплексом заданных эксплуатационных свойств. Цель операции – высокое качество обработанной поверхности.

В машиностроительном производстве на финишных операциях обрабатывается большое количество деталей сложной конфигурации, к качественным показателям поверхностей которых предъявляются высокие требования. Основным недостатком, присущим объемной обработке, является отсутствие стабильности шероховатости поверхности, особенно на труднодоступных участках детали, что обусловлено неодинаковыми условиями абразивного резания. Для повышения стабильности необходимо стремиться создавать одинаковые условия для абразивного резания по профилю обрабатываемой детали. Рассматривая объемную обработку как отделочную, можно выделить два основных критерия эффективности обработки: 1 - достижение требуемых параметров микрорельефа; 2 - стабильность параметров шероховатости на различных участках обрабатываемой поверхности.

При обработке большинством методов механической полировки детали со сложной поверхностью (рис. 1.) можно выделить три зоны: I - «мертвая» зона, где обработка поверхности практически не происходит, так как гранулы шлифовального материала туда не проникают; II - зона нестабильной шероховатости (область неравновероятного попадания абразивных гранул); III - зона стабильной шероховатости, которая представляет собой поверхность, открытую для обработки. Штриховыми линиями на рис. 1. изображено возможное контактирование двух рабочих тел с поверхностями зоны II нестабильной шероховатости. При таком взаимодействии рабочих тел снижается вероятность их проникновения в зону II. Это обуславливает меньшее количество контактов на длине участка Б-Б по сравнению с открытыми поверхностями. Следовательно, в этой зоне можно ожидать образование при обработке более грубой шероховатости поверхности, а I можно рассматривать как размерную характеристику поверхности в зоне II нестабильной шероховатости.

Магнитная галтовка – вид суперфинишной обработки резанием. Режущим инструментом является ферромагнитный галтовочный наполнитель (иглы).

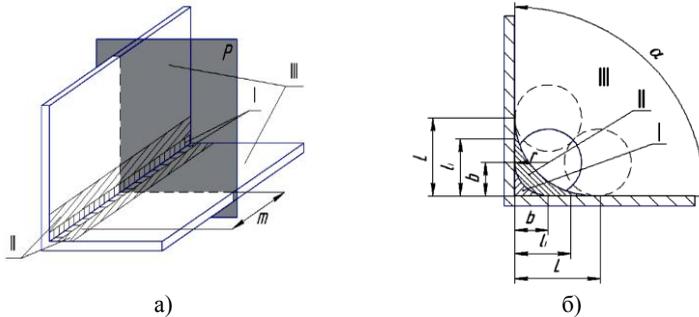


Рис. 1. Схема контакта обрабатывающих тел с деталью «уголок» в зоне сопряжения обрабатываемых поверхностей: а - общий вид детали; б - поперечное сечение детали; I - «мертвая» зон; II - зона нестабильной шероховатости; III - зона стабильной шероховатости

Обработка происходит в неподвижном рабочем объеме, окруженном постоянными магнитами, в который загружены наполнитель, представляющий короткие обоюдоострые иглы, обрабатываемые детали и смазочно-охлаждающая технологическая среда. Полирование деталей происходит за счет соударения перемещаемого магнитным полем наполнителя и обрабатываемых деталей.

На рис.2 показано изменение величины шероховатости  $R_a$  образцов деталей из латуни марки Л63 до и после обработки методом магнитной галтовки.

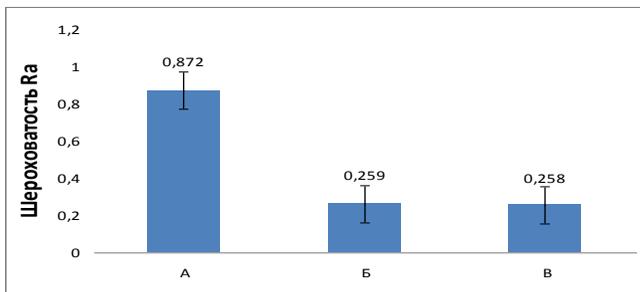


Рис.2. Шероховатость латунного образца при магнитной галтовке: 1 – перед обработкой; 2 – на 30-й минуте обработки; 3 – после обработки.

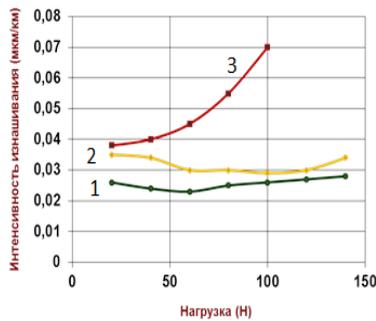
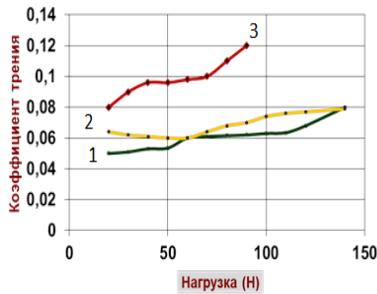
Задача по совершенствованию процесса полирования заключается в качественной и экономичной обработке деталей со сложной фасонной поверхностью для серийного производства.

*И.А. Калинин, курсант; рук. В.В. Киселев, к.т.н, доц.;  
В.П. Зарубин, к.т.н., доц.; П.В. Пучков, к.т.н.  
(ИПСА ГПС МЧС России, г. Иваново)*

## **РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННОГО СМАЗОЧНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ УЗЛОВ ПОЖАРНОЙ ТЕХНИКИ**

Повышение надежности узлов трения машин и механизмов, используемых в системе МЧС и в любой другой сфере, является важной хозяйственной задачей. Техника выходит из строя в основном в результате износа подвижных деталей. Помимо затрат на их ремонт при износе, увеличивается расход топлива, смазочного материала и запасных частей. В автомобилях на преодоление трения расходуется более половины потребляемого ими топлива.

В настоящее время исследованы смазочные композиции с различными видами наполнителей. В первом случае наполнителем являлся медно-оловянный комплекс (1 зависимость), во втором – мелкодисперсный порошок искусственного серпентина (2 зависимость). Эти добавки вводились в базовое индустриальное масло И-20 (3 кривая). Были получены триботехнические характеристики данных смазочных композиций, представленные на рис. 1.



а)

б)

Рис. 1. Триботехнические характеристики смазок: а) зависимость коэффициента трения от нагрузки, б) зависимость интенсивности изнашивания от нагрузки

На этих зависимостях видно, что оба наполнителя существенно улучшили триботехнические показатели базового масла – снизился коэффициент трения и интенсивность износа поверхностей трения, а также увеличилась нагрузочная способность.

Проводилось микрофотографирование поверхностей трения с увеличением в 500 раз. Полученные фотографии свидетельствуют о выравнивании поверхности, снижении ее шероховатости. Этому способствовало введение в масло добавок.

Тем не менее каждая из исследованных добавок: металлсодержащая присадка и порошок искусственного серпентина обладают рядом недостатков. Основными из которых являются:

- для металлсодержащей присадки – это провокация металлического контакта, препятствующая осаждению мягких металлов на поверхностях трения;

- для искусственного серпентина – это повышение поверхностной твердости.

Коллективом авторов получена и исследована новая высокоэффективная добавка на основе солей мягких металлов и порошка искусственного серпентина. Исследования присадки показали, что совместное действие этих компонентов привело к значительному снижению износа в зоне трения, за счет более интенсивного осаждения мягких металлов на контактирующих поверхностях. Выявлено снижение коэффициента трения в узле трения на 10-12 %. Разработанная присадка позволит в значительной мере снизить износ узлов трения и повысить надежность техники.

Технология приготовления смазочного комплекса заключается в механическом смешивании в определенной пропорции двух наполнителей: медно-оловянного комплекса и порошка искусственного серпентина. Смешивание производится при помощи ультразвукового диспергатора, который позволяет получить равномерное распределение порошка серпентина в металлоплакирующем смазочном комплексе.

Объектом внедрения разработки является автотранспорт и машиностроение. Внедрение разработанной добавки в масла позволит снизить затраты мощности на трение, снизить энергопотребление, уменьшить износ трущихся деталей, увеличить ресурс узлов трения.

#### **Библиографический список**

1. **Киселев В.В., Полетаев В.А.** Исследование триботехнических характеристик металлосодержащих присадок к маслам, используемым в электрических машинах// Вестник ИГЭУ. – 2011. – Выпуск 2. – С. 65 – 67.
2. **Киселев В.В., Топоров А.В., Пучков П.В.** Повышение надежности пожарной техники применением модернизированных смазочных материалов// Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2010. - №3. – С. 24–28.

*А.В. Федорова, студ.; рук. В.А. Полетаев, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

В современных графических процессорах для визуализации особенностей трехмерных объектов применяется совокупность синтезирующих методов. Среди них выделяют класс методов для визуализации неровностей поверхности (микрорельефа) трехмерных объектов. Их использование позволяет воспроизводить струк-

туру поверхности объекта более реалистично. Существуют два основных метода визуализации микрорельефа: на уровне геометрии и на уровне визуализации плоских поверхностей. Отображение микрорельефа на уровне геометрии достигается за счет использования триангуляции объекта и последующего смещения новых вершин в нужную позицию (*displacement mapping*). Другой метод визуализации микрорельефа основан на изменении освещенности неровностей и смещении текстурных координат для выборки из текстур материала. На данный момент наиболее популярны следующие разновидности такого метода: метод карт нормалей (*normal mapping*), метод текстурирования с перекрытием (*parallax mapping*) и рельефное текстурирование (*reliefmapping*). Также существует множество их модификаций, устраняющих те или иные их недостатки, например, метод рельефного текстурирования на основе сферических гармоник (*spherical harmonic relief mapping*) и пр. Метод карт нормалей использует специальную текстуру, содержащую информацию о нормалях (вектор направления) в точках поверхности объекта. Такой метод позволяет приближенно передать рельефность поверхности при помощи видимых различий в освещенности неровностей. В методе текстурирования с перекрытием используются метод карты нормалей и одноканальная карта высот, которая, как правило, хранится в виде четвертой компоненты карты нормалей. Для имитации рельефности в видимых точках вычисляется величина смещения текстурных координат. После этого новые координаты используются для выборки из текстуры. Величина смещения рассчитывается из данных карты высот и положения наблюдателя. Метод рельефного текстурирования представляет собой форму упрощенной локальной трассировки лучей. Трассировка используется для нахождения ближайшей точки, видимой по направлению из точки наблюдения. Эта точка определяет текстурные координаты, используемые как и в случае текстурирования с перекрытием. Существуют различные способы нахождения видимой точки. Линейный поиск с последующим уточнением методом бинарного поиска является одним из них. Суть линейного поиска заключается в равномерном разбиении текстурного пространства на ряд слоев и нахождение ближайшего слоя, точка пересечения с которым попадает внутрь предполагаемого рельефа. После этого на отрезке между найденным слоем и предыдущим производится бинарный поиск с целью уточнения точки пересечения. Как правило, число слоев и глубину

бинарного поиска ограничивают сравнительно небольшими величинами, поэтому найденная точка будет лишь некоторым приближением. Такое ограничение связано с вычислительной сложностью точного поиска.

Разработана и использована методика построения трехмерной модели шероховатой поверхности деталей, включающая значения  $R_a$ ,  $R_z$  и  $R_{max}$  для участка поверхности, профилограмму и фотоснимок участка поверхности.

На рис.1 представлена трехмерная модель участка поверхности детали.

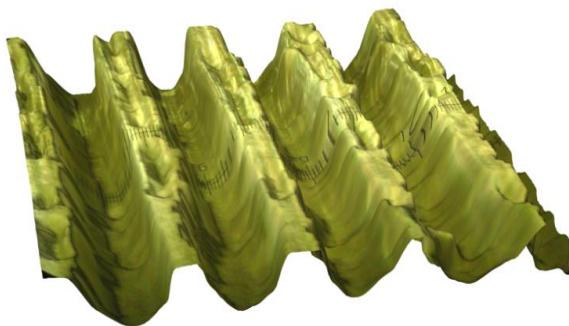


Рис. 1. Трехмерная модель участка поверхности образца

Полученную трехмерную модель можно считать адекватной моделью участка поверхности детали, так как в ней учтены значения шероховатости, полученные по замеру на этом участке. Так же в построении модели были использована фотография данного участка, как источник информации о расположении неровностей на поверхности участка.

*М.В. Смирнов, курсант; рук. А.В.Топоров, к.т.н.,  
В.В. Киселев, к.т.н., доц., А.С. Коновалов, к.ф.-м.н.  
(ИПСА ГПС МЧС России, г. Иваново)*

## **РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ПИРОГЕНЕРАТОРА ДАВЛЕНИЯ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ ДЛЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО АВАРИЙНО - СПАСАТЕЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА**

В настоящее время для привода в действие аварийно - спасательного инструмента применяются бензонасосы и ручные насосы. Недостатком насосов с двигателями внутреннего сгорания является трудоемкость обслуживания, необходимость хранения и транспортировки топлива, проблемы с запуском при низких температурах. Ручные насосы просты в эксплуатации и обслуживании, однако менее эффективны по сравнению с бензиновыми и требуют для работы дополнительную единицу расчета из числа личного состава.

Для устранения указанных недостатков взамен традиционно применяемых двигателей внутреннего сгорания и мускульной силы человека предлагается в качестве источника энергии использовать газ под давлением, полученный в результате сгорания пиропатрона.

В настоящее время существует конструкция гидравлического аварийно – спасательного инструмента с пирогенератором давления рабочей среды[1]. Однако, недостатками данного устройства является необходимость использования двух пирогенераторов давления для функционирования гидравлического аварийно – спасательного инструмента и непосредственный контакт горячих газов, выделяемых при сгорании пиропатрона, с маслом, что может повлечь его окисление или возгорание.

Предлагаемый переносной гидравлический инструмента (рисунок 1) содержит исполнительный механизм, 1 с установленным рабочим органом. В качестве рабочих органов могут быть использованы, например, ножницы, расширители или резак. Пирогенератор давления содержит пневмогидронасос рабочей среды 2 соединенный с исполнительным механизмом 1 шлангами высокого давления 3, имеющими быстроразъемные соединения на концах. Резервуар 4 присоединяется к пневмогидронасосу рабочей среды 2 при помощи шланга 5.

Резервуар состоит из вертикальной цилиндрической ёмкости 6, способной воспринимать давление, верхняя торцевая часть которой снаб-

жена отверстием с крышкой 7, предназначенным для очистки емкости 6. Штуцер 8 служит для подключения шланга 5, идущего к пневмогидронасосу рабочей среды 2. Затвор 9 снабженный системой инициации пирогенератора давления устанавливается в ёмкость 6 и фиксирует сменный пиропатрон 10 в рабочем положении. Предохранительный клапан 11 служит для предотвращения превышения давления внутри ёмкости 4 выше критического значения.

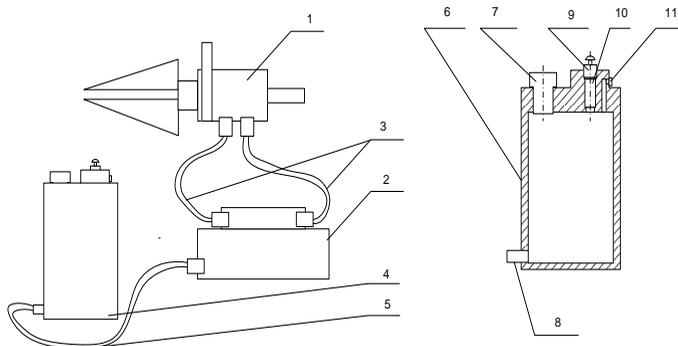


Рис. 1. Принципиальная схема пирогенератора давления и ресивера

Гидравлический аварийно – спасательный инструмента с пирогенератором давления рабочей среды работает следующим образом.

По прибытии к месту работы необходимый по технологии рабочий орган прикрепляется к исполнительному механизму 1, после чего шлангами высокого давления 3 исполнительный механизм 1 подсоединяется к пневмогидронасосу рабочей среды 2, заполненному рабочей жидкостью. В ёмкость 6 устанавливается пиропатрон 10 и запирается затвором 9, снабженным системой инициации пиропатрона. После инициации и сгорания заряда пиропатрона 10 в ёмкости 6 создается избыточное давление газов. Газы пода давлением из ресивера 4 по шлангу 5, присоединенному к штуцеру 8 поступает к пневмогидронасосу рабочей среды 2, преобразующему давление газов в давление рабочей среды, которая по шлангам высокого давления 3 подается к исполнительному механизму 1 приводя его в действие.

#### Библиографический список

1. **Пучков П.В.,** Топорова Е.А., Топоров А.В, Киселев В.В., Марков В.В. Гидравлический аварийно – спасательный инструмент с пирогенератором давления рабочей среды. Патент на полезную модель RU 115267 U1 от 27.04.2012

*К.Г. Виноградов, студ.; рук. В.А. Полетаев, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ВЛИЯНИЕ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД НА ПРОЦЕСС МАГНИТНО-АБРАЗИВНОГО ПОЛИРОВАНИЯ**

Смазочно-охлаждающие технологические среды (СОТС) выполняют в различных процессах обработки металлов резанием разнообразные функции. При изучении явлений, связанных с воздействием СОТС на поверхностный слой металлов, были сделаны следующие выводы: СОТС в процессе резания производит смазочное, диспергирующее, моющее, охлаждающее действие; процессе резания образуются физические и химические пленки, снижающие адгезию между режущим инструментом и стружкой; важную роль при шлифовании металлов имеет моющее действие СОТС.

Улучшение шероховатости поверхности, обработанной в присутствии СОТС, объясняется уменьшением интенсивности трения и образования задиров и надрывов в присутствии смазки, а также пластифицирующим действием поверхностно-активных компонентов СОТС и увеличением при этом доли пластического выглаживания обрабатываемой поверхности. Состав СОТС может существенно влиять на кинематику зерен порошка в рабочих зазорах и посредством этого – на производительность процесса и стойкости порции порошка. Вязкие СОТС препятствуют перемещениям зерен и самозатачиванию абразивного компонента. Отсутствие перемешивания абразивной массы приводит к быстрому снижению интенсивности резания.

Состав СОТС изменяет условия разрушения и пластического деформирования обрабатываемой поверхности и влияет на формирование физико-механических свойств и структуры приповерхностного слоя. Правильный подбор СОТС позволяет избежать появления в процессе МАП структурно измененного слоя на поверхности цветных металлов и сплавов, который служит причиной преждевременной пассивации процесса полирования.

Приведены результаты обработки деталей из латуни марки Л63 методом магнитного галтования производилась в различных СОТС с составами №1 которая содержит бис-алкил, полиоксиэтилен фосфат калия, моноэтаноламида синтетических жирных кислот, циклогексанон,

бакцид и воду, и составом №2, содержащим бис-алкил, полиоксиэтилен фосфат калия, моноалкиловые эфиры полиэтиленглеколя на основе первичных жирных кислот, глицерин, уксусную кислоту и воду.

На рис. 1-2 представлены изменения массы образца из латуни марки Л63 при магнитной галтовке в СОТС №1 и №2.

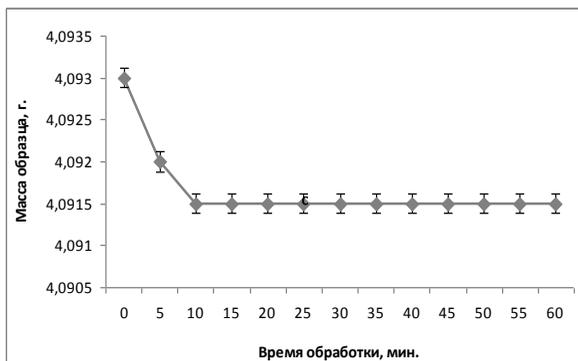


Рис 1. Изменение массы образца в ходе обработки с применением СОТС №1.

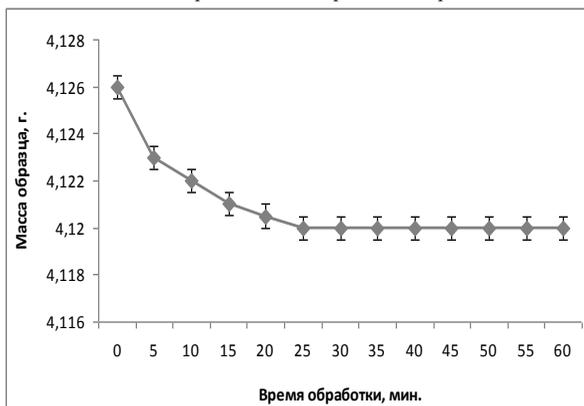


Рис 2. Изменение массы образца в ходе обработки с применением СОТС №2

Анализ рис. 1-2 показывает, что основной съем металла при использовании СОТС состава №1 заканчивается через 10 минут, а при СОТС составом №2 – через 25 минут. Это может означать, что СОТС №1 эффективней СОТС №2, так как съем металла происходит за меньшее количество времени.

*Ю.С. Мухин студ.; А.С. Волков, студ.;*  
*рук. А.С. Орлов к.т.н; И.Ю. Долгих(ст. препод)*  
*(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ПРИМЕНЕНИЕ УСТАНОВОК ТВЧ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

Впервые идея применения токов высокой частоты (ТВЧ) для сварки металлов была предложена в 1946 г. советскими специалистами во главе с А.В. Улитовским. В 50-е годы в Советском Союзе и за рубежом начались интенсивные исследования по созданию технологии и оборудованию для высокочастотной сварки труб, а несколько позже и для оболочек кабеля и профилей. Был создан способ промышленного применения высокочастотной сварки, при котором изделие перед сварочным узлом формируется в виде заготовки с V-образной щелью между свариваемыми кромками. К кромкам посредством скользящих контактов или индуктором подводится ТВЧ таким образом, чтобы он проходил от одной кромки к другой через место их схождения. Вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости, который по мере сближения кромок усиливается, достигается высокая концентрация тока в месте схождения кромок. Благоприятное распределение тока, высокая степень концентрации мощности обеспечивают возможность ведения процесса с оплавлением тонкого слоя на поверхности свариваемых кромок и получение прочного качественного сварного соединения. Нагретые кромки изделия обжимаются с помощью валков и свариваются. Качество сварного соединения и расход электроэнергии тесным образом связаны с особенностями протекания ТВЧ по проводникам.

Высокочастотная сварка металлов основана на использовании законов электромагнитной индукции и полного тока, а также следующих явлений: поверхностного эффекта, эффекта близости, кольцевого или катушечного эффекта, влияния магнитопроводов и медных экранов на распределение тока в проводнике, изменения свойств металлов при изменении температуры и напряженности магнитного поля, возникновения электромагнитных сил. В результате появляются индукционные токи (вихревые токи, или токи Фуко), которые и вызывают нагрев. Исходя из современных представлений о сварке металлов, процессы высокочастотной сварки можно разделить на три группы.

***Сварка давлением с оплавлением.*** Осуществляется при предварительном нагреве и местном расплавлении свариваемых поверхностей. Расплавленный металл удаляется из зоны соединения при осадке;

сварное соединение образуется между поверхностями, находящимися в твердом состоянии. Скорость нагрева достигает 150-103 °С/с; осадка - 0,15-1,5 мм; Скорость осадки - 2000 мм/с.

**Сварка давлением без оплавления.** Осуществляется с предварительным нагревом свариваемых поверхностей до температуры ниже точки плавления свариваемого металла. Скорость нагрева не превышает 400 °С/с; осадка - 2,5-6,0 мм; Скорость осадки - 20 мм/с.

**Сварка плавлением без давления.** Осуществляется при нагреве свариваемых элементов до оплавления. Ванна расплавленного металла застывает, образуя сварной шов без приложения давления. Скорость нагрева доходит до 8000 °С/с.

**Сварка давлением с оплавлением.** Этот процесс наиболее широко распространен при производстве сварных изделий и полуфабрикатов с непрерывным швом из черных и цветных металлов.

В проведённом эксперименте использовалась установка типа ВЧ-40АВ мощностью 26 кВт изображённая на рис.1. По полученным результатам был сделан вывод, что при использовании цилиндрического индуктора получается большая зона термического влияния.



Рис.1. Индукционная нагревательная установка

Работа ведется в направлении уменьшения ЗТВ посредством использования плоского индуктора, оказывающего электромагнитное воздействие на поверхности изделий, непосредственно участвующих в создании сварного соединения.

#### Библиографический список

1. <http://www.inductory.ru>

*М.А. Масляев, студ., рук. Н.В. Третьякова, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, Иваново)*

## **АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПРЕССОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ В ФОРМАХ**

*Композиционные материалы или композиты – это искусственно созданные многокомпонентные материалы с чёткой границей раздела между компонентами: матрицей и арматурой.* Характеристики создаваемого изделия и его свойства, зависят от выбора исходных компонентов и технологии их совмещения. Для изготовления деталей из полимерных композиционных материалов широко применяются методы прессования в формах. Использование пресс-форм обеспечивает нужную конфигурацию изделий. Различают три основных метода прессования: прямое, литьевое и термокомпрессионное. Выбор метода определяется конструкцией формы, свойствами применяемого материала, способом его загрузки в форму.

*Прямое прессование.* Материалом для изготовления деталей служат: волокнистая масса, пропитанная связующим; таблетированные полимерные композиты; пропитанные связующим маты или ткани; предварительно отформованные заготовки из полимерных композитов. В зависимости от режимов обработки и методов пропитки содержание армирующего материала может составлять 20...50 %. Прессуемый материал загружают в матрицу, нагретую до определенной температуры. Сверху на него воздействует пуансон. Под действием давления разогретый в форме материал принимает конфигурацию рабочей полости. Извлечение изделия из формы осуществляется после отверждения композиционного материала. Отверждение термореактивного материала происходит в течение некоторого времени при определенной температуре. Термопластичный материал отвердевает при понижении температуры. Для практической реализации метода используют гидравлические прессы с одним или двумя рабочими цилиндрами. Пресс-формы могут быть съёмными или стационарными, открытыми и закрытыми.

Метод используют при изготовлении несложных по конструкции изделий, достаточно больших по объёму и массе, а также при переработке низкотекучих высоконаполненных пресс-материалов.

*Литьевое прессование.* В загрузочную камеру помещают прессуемый материал. Материал нагревается, размягчается и под действием литьевого пуансона через литниковый канал поступает в полость пресс-формы, имеющую контуры изделия. Материал в оформляющую полость поступает уже в пластичном состоянии, не позволяющем ока-

зывать значительное силовое воздействие на прессовываемую арматуру. Это обстоятельство допускает возможность использования арматуры с относительно низкой прочностью. Прессовка выдерживается в нагретом состоянии в течение времени, необходимого для отвердения материала. После отвердения пресс-форма раскрывается, и полученное изделие вместе с литниковой системой извлекается из нее. Литниковый остаток отрезается.

Из-за малого перепада температур по толщине стенок деталей внутренние напряжения при литьевом прессовании меньше, чем при прямом прессовании. Детали, полученные по технологии литьевого прессования, характеризуются высокой точностью размеров.

Основным недостатком метода является повышенный расход материала, связанный с наличием литникового канала и пресс-остатка.

Для реализации процесса используют гидравлические прессы с одним или двумя рабочими цилиндрами.

*Термокомпрессионное прессование.* Для реализации метода используют специальные пресс-формы, основными частями которых являются жесткая металлическая матрица, имеющая конфигурацию изделия, и эластичный формующий элемент. Между эластичным формующим элементом и матрицей располагается уплотняемый пакет. Деформация пакета осуществляется за счет расширения материала эластичного формующего элемента при нагревании. Нарастание давления на деформируемый материал происходит в процессе нагревания оснастки пропорционально изменению температуры.

На практике для термокомпрессионного прессования используют два типа пресс-форм: с постоянным и переменным объемами формования. В формах первого типа металлический пуансон и металлическая матрица жестко связаны друг с другом. Давление прессования можно изменять, управляя температурой нагрева эластичного формующего элемента. В формах с переменным объемом формования металлический пуансон связан с матрицей посредством упругих тарированных элементов. При повышении давления в форме за счет перемещения пуансона по направляющим колонкам давление формования сохраняется на заданном уровне.

Метод термокомпрессионного прессования позволяет изготавливать равнотолщинные изделия из полимерных композиционных материалов. Материалы, полученные таким методом, отличаются хорошей структурой и высоким уровнем механических свойств. Важным достоинством метода является относительно невысокая трудоемкость изготовления технологической оснастки.

*Д.А. Лебедев, курсант; рук. А.С. Коновалов, к.ф-м.н.;  
А.А.Покровский, к.т.н.; В.Е. Иванов, к.т.н.  
(ИПСА ГПС МЧС России, г. Иваново)*

## **ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ В КАЧЕСТВЕ УПЛОТНИТЕЛЯ В РАЗЪЁМНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ПОЖАРНЫХ РУКАВОВ**

Магнитные жидкости были открыты и синтезированы в 1960-х гг. Благодаря своей способности менять форму под действием магнитного поля материал был отнесен к группе «умных материалов». Необычные свойства жидкости обусловили широкий спектр перспективных направлений ее применения (медицина, приборо и машиностроение, дефектоскопия и т.д.).

Магнитная жидкость (МЖ) – гетерогенная жидкая система, представляющая собой устойчивый коллоидный раствор частиц твердого ферромагнетика в немагнитной жидкости-носителе: вода, глицерина, углеводороды, минеральные или вакуумные масла.

МЖ применяют в качестве уплотнителей. Магнитожидкостные герметизаторы имеют ряд важных преимуществ перед известными уплотнительными устройствами. Это, прежде всего, малый момент трения, самовосстановление уплотняющей способности при прорыве, отсутствие износа (при использовании малоиспаряющихся жидкостей-носителей) и возможность подпитки уплотняющего кольца жидкости без разбора конструкции узла. К недостаткам относятся сравнительно малое удерживаемое давление и невысокая рабочая температура (не выше 100—130°С), а также нагревание жидкости при высоких скоростях вращения вала и трудность герметизации жидкостей в многоступенчатых уплотнителях.

Одна ступень герметизатора способна выдержать перепад давления порядка 0,3—0,5 атм. Для повышения удерживаемого давления герметизаторы делаются многоступенчатыми.

Уплотняющие слои магнитных жидкостей могут выполнять одновременно и функции жидких подшипников.

Силы магнитной левитации способствуют удерживанию вращающегося вала в центральном симметричном положении, а также стабилизируют жидкостные системы торцевого подвеса вращающихся или линейно перемещающихся узлов. В технической литературе имеются

сведения о создании магнитожидкостных подшипников различного назначения. Одной из актуальных проблем в пожарной технике является смерзание соединительных головок пожарных рукавов при эксплуатации их в зимний период. В качестве решения данной проблемы предлагается заменить установленные резиновые уплотнения на магнитоэластомер [2], представляющий собой резиновую основу с магнитным наполнителем (рис. 1).



Рис. 1. Схема нанесения магнитной жидкости

Магнитная жидкость наносится непосредственно перед эксплуатацией на эластомер. Уплотнения такого рода относят к бесконтактным щелевым уплотнениям, работающим по принципу гидравлического затвора. Соединения такого рода обладают высокой степенью герметичности и низкой степень износа. Преимуществом использования МЖ в качестве уплотнителя заключается в том, что она, удерживаемые магнитным полем, не будут вытекать области соединения, выдерживает достаточно высокий перепад давлений. Жидкость удерживается в рабочей области за счет магнитного поля, а широкий диапазон рабочих температур препятствует смерзанию полугаек рукавов и облегчает разборку соединения.

#### Библиографический список

1. Орлов Д.В., Михалёв Ю.О., Мышкин Н.К., Подгорков В.В., Сизов А.П. Магнитные жидкости в машиностроении. – М.: Машиностроение.– 1993.–272 с.
2. Топоров А.В., Киселев В.В., Топорова Е.А., Пучков П.В., Русанов М.А. Применение магнитоэластомерных материалов в уплотнениях пожарных насосов//Материалы XXIII Международной научно-практической конференции «Предупреждение. Спасение. Помощь».– 2013.– С. 281-284.

*А.В. Мухин, студ.; рук. В.А. Полетаев, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН НАНЕСЕНИЕМ ГАЛЬВАНОПОКРЫТИЯ ИЗ ХРОМА С УЛЬТРААЛМАЗАМИ**

Для реализации технологии получения хромированных покрытий с ультраалмазами использовалось специальное оборудование, включающее ванну хромирования, резервуар, циркуляционный насос, фильтры и трубопроводы.

Ванна хромирования представляет собой емкость диаметром, достаточным для размещения существующего ныне кольцевого анода с зазором 10–15см между стенкой ванны тыльной стороной анода. В нижней части ванны размещено распределительное устройство кольцевого типа для подачи электролита в межэлектродное пространство. В верхней части ванны расположен штуцер для отбора электролита (или переливное отверстие). Резервуар представляет собой закрытую теплоизолированную емкость, в которую введены нагревательный и охлаждающий змеевики, штуцера и распределительные устройства для ввода и вывода электролита, термодатчик. Резервуар снабжен люком для отбора проб и загрузки химикатов при корректировке раствора. Циркуляционный насос в коррозионно-стойком исполнении производительностью  $\sim 8\text{ м}^2/\text{час}$  обеспечивает принудительную подачу электролита в ванну хромирования. Фильтрующие элементы обеспечивают очистку электролита от шлама (дендриты хрома, чешуйки хрома свинца с анодов и т.п.) и защиту насоса от грубых частиц

Технические характеристики ультраалмазов: размер частиц – 4–8 нм (первичные микрокристаллиты 20–30 нм – первичные агрегаты); удельная поверхность –  $300 + 30\text{ м}^2/\text{г}$ ; фазовый состав: кубический алмаз – 80–100 %; алмазоподобный рентгеноаморфный углерод – до 20 %; содержание примесей – не более 3,0 %.

Технология нанесения гальванопокрытия включает следующие этапы:

1) Подготовка деталей к нанесению гальванопокрытия. Детали из стали 45 обрабатывались сначала на токарном станке, а потом на шлифовальном станке с целью получения величины шероховатости Ra не более 0,600 мкм.

2) Приготовление электролита. Объем электролита  $V=V_1 + V_2$ , где  $V_1$  – рабочий объем ванны хромирования ( $\sim 1\text{ м}^3$ ),  $V_2$  – рабочий объем

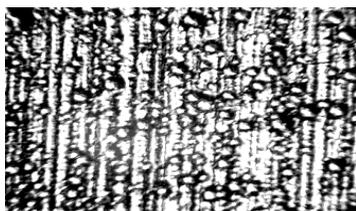
резервуара 2 (~ 0,5м<sup>3</sup>). Загрузка компонентов (CrO<sub>3</sub>, ультраалмазы, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) – в любую из емкостей 1, 2.

3) Нагрев и термостатирование электролита. Нагрев до температуры T = 50° С проводился в резервуаре 2 путем подачи горячей воды в змеевик при одновременной циркуляции раствора.

4) Нанесение гальванопокрытия из хрома с ультраалмазами. В ванну загружались детали партиями от 10 до 40 штук и вынимаются через 45 мин. Толщина полученного покрытия составляет 20 мкм. Потребление ультраалмазов при хромировании составляет 10–15 кг на 1 м<sup>3</sup> электролита, что обеспечивает получение 25–50 тыс. м<sup>2</sup> высококачественных покрытий. Расход ультраалмазов на 1 м<sup>2</sup> покрытия (при толщине 1 мкм) не превышает 1 карата (0,2 г).

Технология упрочнения деталей алмазным выглаживанием включает следующие этапы: токарная обработка (точение) на станке типа ИЖ 250 ИТВМФ1 при режимах : n = 800 об/мин, S = 0,15 мм/об; алмазное выглаживание при режимах: n = 200 об/мин, S = 0,015 мм/об, сила выглаживания – 200 Н для неупрочненных деталей и 300 Н для деталей, упрочненных термообработкой (ТО) или нанесением гальванопокрытия из хрома с ультраалмазами (УА).

На рис. 1. показана поверхность стали 45 с нанесённым слоем хрома и ультра алмазами после точения (а), после точения и алмазного выглаживания слоя хрома и ультра алмазами (б).



а)



б)

Рис. 1. Поверхность стали 45: а) – с нанесённым слоем хрома и ультра алмазами после точения; б) – после точения и алмазного выглаживания слоя хрома и ультра алмазами (ув.× 2500)

Проведенные исследования механических свойств деталей из сталей 45 после точения, шлифования, алмазного выглаживания и нанесения покрытия из хрома с ультраалмазами на сталь 45 показали возможность нанесения на сталь 45 покрытия из хрома с ультраалмазами.

**М.А. Поляков, курсант; рук. С.Г. Казанцев, А.В. Топоров, к.т.н.  
(ИПСА ГПС МЧС России, г. Иваново)**

## **ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ БЫСТРОРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПОЖАРНЫХ РУКАВОВ К УДАРНЫМ НАГРУЗКАМ**

В настоящее время в нашей стране для соединения пожарных рукавов широко используются быстроразъёмные соединения. Одним из наиболее распространенных типов быстроразъёмных соединений является устройство Богданова [1]. Надёжность крепления в таких соединениях обеспечивается направляющими ребрами по поверхности втулки. Изготавливаются из алюминиевого сплава или комбинируются с пластмассовыми деталями [2].

Несмотря на хорошие рабочие характеристики соединению Богданова присущи и недостатки.



Рис.1. Скол запорных выступов соединительной головки пожарного рукава

Одной из основных проблем, связанных с эксплуатацией подобных соединений является скалывание запорных выступов - «клыков» вследствие внешних механических воздействий (рисунок 1).

В результате опроса технических служб пожарных частей города Иваново установлено, что в течение года при эксплуатации напорных рукавных линий выходят из строя в результате скола «клыков» от 6 до 13 соединений. В учебной пожарной части Ивановской пожарно – спа-

сательной академии ГПС МЧС России в год по этой же причине выходят из строя от 9 до 16 соединений.

Прямой материальный ущерб от разрушения соединений является незначительным, однако выход из строя рукавов может привести к срыву выполнения задачи по тушению пожара. При выезде на тушение пожара, вдалеке от базы, замена рукава с разрушенным соединением становится серьезной проблемой. Проведение ремонта соединений в полевых условиях так же не представляется возможным.

Поэтому, стойкость быстроразъемных соединений пожарных к ударным нагрузкам является актуальной задачей.

В решении данной задачи можно выделить два основных направления:

1. использование более стойких к ударным нагрузкам материалов для изготовления корпусов соединений

2. разработка мер по защите «клыков» соединения от ударных нагрузок.

Использование новых материалов, например сплавов на основе меди, взамен алюминиевых, традиционно применяемых для изготовления корпусов соединений, приведет к их значительному удорожанию. Кроме того в эксплуатации в подавляющем большинстве находятся именно алюминиевые соединения и их замена может затянуться на значительных срок.

Таким образом, наиболее перспективным является именно второе направление. В рамках этого направления возможна разработка специальных защитных устройств, предотвращающих удар частей соединения при падении, демпфирующих покрытий «клыков», например на основе резины, поглощающих ударные нагрузки, усиление мест наиболее частого разрушения за счет применения композиционных материалов. Именно за счет практической реализации указанных направлений в дальнейшей работе предполагается добиться положительных результатов и решить поставленную задачу.

#### Библиографический список

1. **Казанцев С.Г.**, Сорокин Д.В., Волков О.Г. Сравнительный анализ использования быстроразъемных соединений в России и за рубежом. Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Актуальные вопросы противопожарного водоснабжения», 2013 г.
2. **Теревев В.В.** Справочник руководителя тушения пожара. Тактические возможности пожарных подразделений. Академия ГПС МЧС России. М.,2004.–248с.

*А.П. Сошников, студ.; рук. В.А. Полетаев, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ

Детали электронасосов испытывают воздействие факторов внешней среды: агрессивных газов и аэрозолей, морской воды, отделочных растворов и т.п. При этом у деталей разрушается рабочая поверхность, контактирующая, например, с жидкостью. В основном эти детали изготавливают из дорогостоящих сталей 40X13 и 12X18Н10Т или из стали 45 с металлизированным покрытием.

Скорость коррозии определяется двумя основными показателями коррозионной стойкости металлов:

– глубинный показатель коррозии  $K_n$  – глубина коррозионного разрушения  $\Pi$  в единицу времени  $\tau$ ,  $K_n = \Pi/\tau$  (мм/год);

– показатель изменения массы  $K_m$  – изменение массы образца металла в результате коррозии, отнесенное к единице поверхности металла  $n$  в единицу времени,  $K_m = \Delta m/S \cdot \tau$  (г/м<sup>2</sup>·час).

Скорость коррозии определяется объемным методом, т.е. по объему выделившегося водорода. Затем определяется группа и балл коррозионной стойкости. Для этого используется аппарат с самоциркулирующей для коррозионных испытаний с выделением водорода (по Льюису и Эвансу). В качестве агрессивных сред использовался 5 % раствор серной кислоты H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Поверхности образцов обрабатывались точением, шлифованием и алмазным выглаживанием.

По объему выделившегося водорода с помощью формулы находили изменение массы образцов по формуле

$$\Delta m = \frac{A \cdot V_o}{n \cdot 11,2 \cdot 1000},$$

где  $A$  – атомный вес металла;  $V_o$  – объем выделившегося водорода (мл);  $n$  – валентность металла.

Затем определяли показатель изменения массы  $K_m$  и глубинный показатель коррозии  $K_n$  соответственно по формулам:

$$K_m = \frac{\Delta m}{S \cdot \tau} \text{ (г/м}^2\text{·час)}, \quad K_n = \frac{K_m \cdot 8,76}{\gamma_{\mu e}} \text{ (мм/год)}$$

где  $S$  – площадь поверхности образца ( $\text{м}^2$ ),  $\tau$  - время испытаний (час).

$\gamma_{\text{ме}}$  - плотность материала ( $\text{г}/\text{см}^3$ ).

Потом по найденным величинам  $K_m$  и  $K_n$  определяли группу и балл коррозионной стойкости. Результаты проведенных исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты проведенных исследований

| № п/п | Материал образца  | Скорость коррозии                             |                                 | Группа коррозионной стойкости | Балл коррозионной стойкости |
|-------|---|---|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
|       |   | $K_m$<br>$\text{г}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ | $K_n$<br>$\text{мм}/\text{год}$ |                               |                             |
| 1     | 2   | 3   | 4                               | 5                             | 6                           |
| 1.    | Сталь 40Х13:<br>– обработка точением;                           | 27,7  | 2,16                            | Пониженностойкие              | 3                           |
|       | – обработка шлифованием;  | 22,1  | 1,91                            | Пониженностойкие              | 3                           |
|       | – обработка алмазным выглаживанием.                             | 15,2  | 1,16                            | Пониженностойкие              | 3                           |
| 2.    | Сталь 12Х18Н10Т:<br>– обработка точением;                       | 7,92  | 0,98                            | Стойкие                       | 2                           |
|       | – обработка шлифованием;  | 7,01  | 0,88                            | Стойкие                       | 2                           |
|       | – обработка алмазным выглаживанием.                             | 6,56  | 0,70                            | Стойкие                       | 2                           |
| 3.    | Сталь 45 с металлизированным покрытием<br>– обработка точением; | 2,2   | 1,0                             | Стойкие                       | 2                           |
|       | – обработка шлифованием;  | 2,0   | 0,82                            | Стойкие                       | 2                           |
|       | – обработка алмазным выглаживанием.                             | 1,6   | 0,71                            | Стойкие                       | 2                           |

Из проведенных исследований можно сделать вывод, что коррозионная стойкость деталей, обработанных алмазным выглаживанием больше, чем при обработке точением и шлифованием. Основной причиной повышения коррозионной стойкости при алмазном выглажива-

нии являются остаточные напряжения сжатия , а для металлизированного покрытия – технология нанесения покрытия, приводящая к увеличению твердости поверхности.

*Е.Д. Гладченко, студ.; рук. П.В. Пучков, к.т.н.;  
В.В. Киселев, к.т.н., доц.; И.А. Легкова, к.т.н., доц.  
(ИПСА ГПС МЧС России, г. Иваново)*

## **АНАЛИЗ ПРИЧИН КОРРОЗИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ**

Известный человечеству не одно тысячелетие процесс разрушения металлов под воздействием окружающей воздушной среды принято называть атмосферной коррозией. Атмосферная коррозия – это самопроизвольное разрушение металлов в результате химического или физико-химического взаимодействия с окружающей средой. Это наиболее распространенный вид коррозии, и её проявления весьма многочисленны и разнообразны. Ржавление железа, входящего в состав стали, является самым распространенным видом коррозии ( рис.1.)



Рис.1. Ржавчина – продукт коррозии железа

В настоящее время строительство металлоконструкций пользуется все более возрастающим спросом. Атмосферной коррозии подвержены все металлоконструкции, эксплуатируемые на открытом воздухе (около 50 % от всего имеющегося металлофонда), а именно: трубопроводы и емкостное оборудование надземного расположения, металлические части строений, опор, мостов, транспортные и погрузочно-разгрузочные средства. Поверхности конструкций при эксплуатации неизбежно подвергаются увлажнению и загрязнению, что является первопричиной возникновения и развития коррозионных процессов. Причиной коррозии служит термодинамическая неустойчивость кон-

струкционных материалов к воздействию веществ, находящихся в контактирующей с ними среде. Так как сталь является неоднородным материалом, то на поверхности стали при попадании на поверхность электролита, роль которого выполняет пленка влаги (толщиной от нескольких молекулярных слоев до одного миллиметра), постоянно присутствующая на поверхности металла, возникает местная коррозия.

К местной коррозии относятся так называемые точечная, пятнистая или язвенная её разновидности. В свою очередь очаги местной коррозии являются концентраторами напряжений и приводят к ослаблению сечения металлоконструкций. Основные причины дифференциации поверхности стали на анодные и катодные участки могут быть различны: неоднородность структуры металла (в углеродистых сталях присутствуют фазы – феррит и цементит, структурные составляющие – перлит, цементит и феррит, имеющие различные электродные потенциалы); наличие на поверхности сталей оксидных пленок, загрязнений, неметаллических включений и т.п.; неравномерное распределение окислителя на границе «металл-электролит», например, различные влажность и аэрация на различных участках поверхности металла; неравномерность распределения температуры; контакт разнородных металлов. Следует отметить, что процесс коррозии невозможно остановить полностью, его можно только замедлить. Коррозионные процессы наносят огромный материальный ущерб экономике и приводят к медленному разрушению металлоконструкций.

Основной целью решения многовековой проблемы коррозии металлов является продление сроков эксплуатации различных металлоконструкций до их морального износа. Защита от коррозии в целом представляет комплекс мероприятий, направленных на предотвращение и ингибирование коррозионных процессов, сохранение и поддержание работоспособности узлов и агрегатов машин, оборудования и сооружений в требуемый период эксплуатации. Методы защиты металлоконструкций от коррозии основаны на целенаправленном воздействии, приводящем к полному или частичному снижению активности факторов, способствующих развитию коррозионных процессов, и условно подразделяются на методы воздействия на металл, окружающую среду, а также комбинированные методы.

#### Библиографический список

1. **Защита** от коррозии, старения и биоповреждений машин, оборудования и сооружений. Справочник под редакцией А.А. Герасименко. Москва, «Машиностроение», 1987.
2. **Жук Н.П.** Курс коррозии и защиты металлов. Москва, «Металлургия», 1968 г.

*А.М. Власов, асп., А.А. Голяс, студ., Цеценевская О.И., асп.  
рук. В.А. Полетаев (д.т.н., проф.)  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММЫ ANSYS ДЛЯ ТЕПЛОВОГО АНАЛИЗА**

С помощью программы ANSYS можно выполнить тепловой анализ для следующих задач: стационарная теплопроводность; неустановившийся температурный режим; расчет температурных напряжений и деформаций.

Для определения влияния вязкости используемой магнитной жидкости, напряженности магнитного поля, частоты вращения вала, величин шероховатости Ra и волнистости поверхностей сменных втулок и полюсов на величину температуры и тем самым на момент трения в рабочем зазоре магнитожидкостного устройства была спроектирована и изготовлена установка с радиальным магнитожидкостным уплотнением. В процессе работы уплотнение нагревается до 60 °С. Для решения задачи распределения температуры приняты условия: начальная температура нагрева уплотнения 60 °С; температура окружающей среды 22 °С; время охлаждения 30 минут.

Порядок действий:

1. Запустить *ANSYS Workbench*.
2. Выбрать тип решателя. Добавить в рабочую область проекта блок *TransientThermal*.
3. В *EngineeringData* из базы данных материалов добавить в расчет необходимые данные.
4. Загрузить геометрической моделью уплотнения, заранее созданную в САД системе «КОМПАС 3D». Загруженная геометрическая модель представлена на рис. 1.
5. Зайти в *Geometry* и выбрать для каждой детали сборки тип элемента *Fluid* (жидкий) или *Solid* (твердый).
6. Приступить к созданию конечно-элементной модели. Зайти в ячейку *Model*. Откроется приложение *Mechanical*. Выбрать ветку *Geometry – Solid* и завести данные по материалам деталей. Далее через ветку *Mesh* задать параметры конечно-элементной модели. Затем вызвать контекстное меню ветки *Mesh* и пункт *GenerateMesh* (Создать сетку). При этом будет создана конечно-элементная модель уплотнения (рис. 2)

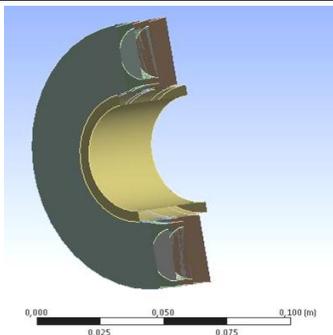


Рис. 1. Геометрическая модель уплотнения

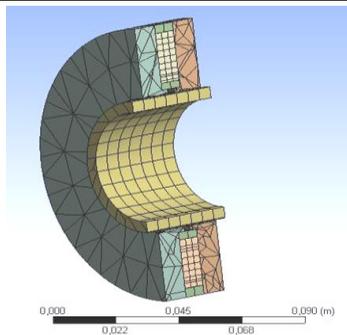


Рис. 2. Конечно-элементная модель уплотнения

7. Далее задать начальные условия для расчета. В *InitialTemperature* установить начальную температуру уплотнения равной 60°C.

8. Затем в *AnalysisSettings* определить последовательность расчета. В свойствах *AnalysisSettings* отключить автоматический выбор шага расчета (*AutoTimeStepping*), а время окончания расчета установить в 1800 с; шаг расчета 180 с..

9. Далее задать параметры теплообмена уплотнения с окружающей средой. Добавить тепловое воздействие типа конвекция (*Convection*). В свойстве *Geometry* ветки *Convection* определить область уплотнения, на которое происходит тепловое воздействие. Также задать температуру окружающей среды 22 °C и коэффициент теплопередачи (*FilmCoefficient*).

10. В *Solution* добавить расчетный параметр *Temperature*(температура) и выбрать *Solve* с целью начала расчета задачи.

11. После вычисления получен результат (рис.3.).

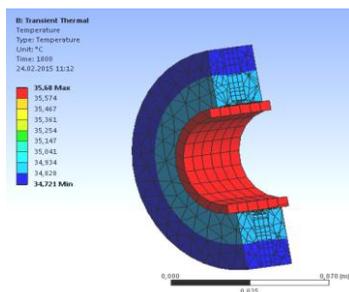


Рис.3 . Температурное поле.

*Л.А. Гусев, курсант; рук. С.Г. Казанцев, препод.; А.В.Топоров, к.т.н.  
(ИПСА ГПС МЧС России, г. Иваново)*

## РАЗРАБОТКА НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ КРЫШЕВОЙ ЛЕСТНИЦЫ

Любые работы на крыше здания, в котором развивается пожар, могут быть крайне опасными. При вскрытии крыш для выпуска дыма из чердака пожарные должны подойти к коньку крыши, по возможности ближе к месту загорания чердака. Вскрытие следует производить только у конька кровли (за исключением плоских крыш), на одном или обоих скатах. [1]

При выполнении работ по вскрытию и разборке кровли необходимо соблюдать правила охраны труда при работе на высоте, чтобы исключить вероятность травмирования людей. Все работы должны выполняться при наличии страхующей веревки (рис.1) места вскрытия.

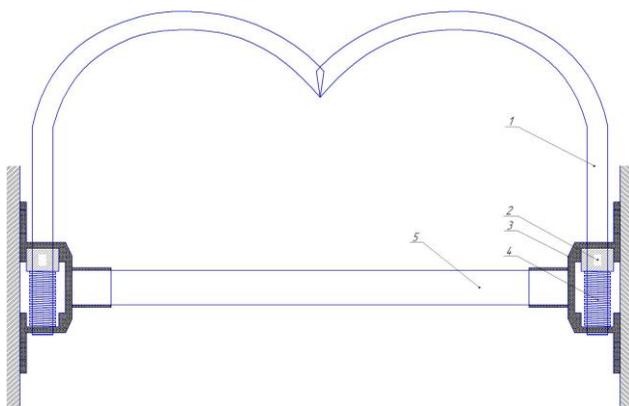


Рис. 1. Эскиз поворотных крюков соединенных ступенью крышевой лестницы. 1 – крюк, 2 – фиксатор, 3 – основание, 4 – пружина, 5 – ступень

При этом значительную роль при вскрытии кровли играет ветер. При наличии ветра или невозможности вскрыть кровлю с обеих сторон конька необходимо вскрывать кровлю только с подветренной стороны (по направлению ветра)

Для успешной и безопасной работы вскрытие кровли необходимо производить всегда впереди себя, чтобы обеспечить в случае необхо-

димости путь отступления пожарных со стволом с рукавной линией [2]. Место вскрытия кровли должно выбираться из расчета возможности окончания работы пожарных ранее, чем огонь дойдет до данного

Поэтому обеспечение безопасности проведения аварийно-спасательных работ на кровле зданий является актуальной задачей. Одним из направлений решения данной задачи можно определить безопасное нахождение пожарных на крыше зданий при возможности обрушения ее или образовании провала.

Для этого предлагается разработка «крышевой лестницы» (рис.2). Крышевая лестница – предназначена для проведения аварийно-спасательных работ на крышах зданий, угол ската которых больше  $10^\circ$ .



Рис. 2. Крышевая лестница в сборном и разборном состоянии

Штурмовая лестница состоит из двух параллельных тетив, жестко соединенных двенадцатью поперечными опорными ступеньками, двумя поворотными крюками для подвески на опорную поверхность крыш (коньки и выступы зданий и сооружений) и четырех поворотных металлических шипов. Тетивы и ступени крышевой лестницы изготавливаются из алюминиевого сплава. Ступени закреплены в отверстиях тетив путем развальцовки. Длина лестницы около 4 метров, ширина между тетивами 25 см, расстояние между ступенями 34 см. Вес не более 10 кг.

Новая конструкция лестницы позволит повысить эффективность работы подразделений ГПС МЧС России, снизить риск получения травм при проведении аварийно-спасательных работ на крышах зданий.

#### Библиографический список

1. **Теребнёв В.В.** Подготовка спасателей-пожарных. Пожарно-строевая подготовка: (Учебно-методическое пособие) /В.В. Теребнёв, В.А. Грачёв, Д.А. Шехов.- Екатеринбург: Калан, 2013.-300с.
2. **Теребнёв В.В.** Специальная профессионально-прикладная подготовка пожарных /В.В. Теребнёв, В.А. Грачёв, М.А. Шурыгин.-Екатеринбург: ООО «Калан», 2013.-216с.

*Е.В. Шпенькова, студ.; рук. В.А. Полетаев, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМОРАСШИРЕННОГО ГРАФИТА**

Графит известен с древних времен как «черный мел». Первое месторождение графита было подвергнуто промышленной разработке в XV веке в Италии, в провинции Пьемонт.

Интенсивные исследования по разработке, изучению и совершенствованию технологических процессов промышленного получения интеркалированного графита (ИГ) начались в 60-е годы XX века. Одной из причин, инициировавших эти исследования, было стремление синтезировать слоистое соединение графита, обладающее высокотемпературной («теплой») сверхпроводимостью. Однако основной причиной повышенного интереса к ИГ было обнаружение его способности к термоинициированному вспучиванию (термическому расширению) с образованием ТРГ. Именно возможность получения ТРГ с определенными физико-химическими свойствами, позволяющими изготавливать из него жаростойкие и химически инертные изделия (гибкую графитовую фольгу и уплотнения на ее основе) вызвало промышленное освоение технологий синтеза ИГ и получения ТРГ.

Процесс интеркалирования сводится к внедрению молекул и ионов серной кислоты в присутствии окислителя (обычно – перекиси водорода, бихромата калия, перманганата калия, азотной кислоты) между слоями кристаллической решетки графита. При этом происходит увеличение межслоевого расстояния углеродной матрицы. Распределение слоев внедренных веществ (в рассматриваемом случае –  $H_2SO_4$ ) между углеродными слоями принято называть ступенями внедрения.

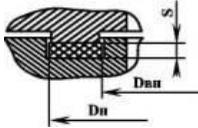
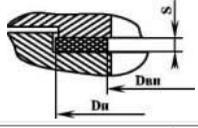
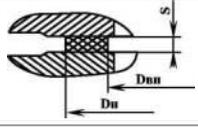
Некоторые виды уплотнений (набивки, многослойные прокладки и др.) изготавливают с применением связующих и армирующих элементов (металлических, полимерных и др.), а также модифицирующих элементов (ингибиторов коррозии или окисления, антиадгезионных добавок и покрытий и др.).

Основным применением терморасширенного графита является производство фольги ТРГ и графитового прокладочного материала, а также графитовых уплотнений на их основе, таких как уплотнительные прокладки разных типов, сальниковые кольца, плетеные набивки и др.

Существуют данные о применении ТРГ и материалов из него в качестве: теплоизоляционных материалов (тепловых экранов вакуумных печей и др.); наполнителя термопластичных и терморезистивных полимеров (полиамидов, полиэфиров, полиэтилена, полипропилена) при изготовлении композитов с низким или анизотропным электросопротивлением (обивочных материалов, свободных от статического электричества; материалов для защиты от электромагнитных излучений); составляющей пластичных антифрикционных смазок, работоспособных в широком интервале температур и нагрузок в течение длительного времени; углеродной компоненты при реакционном спекании керамики на основе карбида кремния; носителя катализатора; сорбента для сбора минеральных масел и нефти, в т.ч. в случае аварийных разливов на поверхности воды; мембран (в виде самопрессованного упрочненного ТРГ); фильтров (в виде низкоплотных матов из ТРГ); резьбовых лент и т.д.

Прокладки уплотнительные из ТРГ предназначены для эксплуатации во всех макроклиматических районах (исполнение В по ГОСТ 15150 ). В зависимости от типа соединения рекомендуются следующие типы прокладок (табл. 1).

Таблица 1. Типы прокладок

| Обозначение типа прокладки | Схема <a href="#">фланцевого соединения</a>   | Назначение прокладки  |
|----------------------------|---|---|
| А                          |    | Уплотнение фланцевых соединений типа «шип паз».                           |
| Б                          |  | Уплотнение фланцевых соединений типа «выступ-впадина».                    |
| Д                          |  | Уплотнение фланцевых соединений с гладкими уплотнительными поверхностями. |

Основные размеры прокладок для разъемных соединений по ГОСТ 12815 для условных давлений до 20 МПа и температур до 600°С, по ГОСТ 28759.2 для условных давлений до 1,6 МПа и температур до

300°С, по ГОСТ 28759.3 для условных давлений до 6,3 МПа и температур до 600°С .

*А.М. Зайцев, студ.; рук. Д.А. Бекташов, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ НА КАЧЕСТВО ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ РЕЗАНИИ**

В настоящее время в металлообрабатывающей промышленности обработка материалов резанием занимает одно из главных мест. Поэтому правильный выбор заготовки, режущего инструмента и режимов резания обеспечивает снижение себестоимости и высокое качество выпускаемой продукции.

Шероховатость поверхности заготовки является результатом воздействия ряда факторов в процессе ее получения. При обработке заготовки резанием на поверхности возникают микронеровности. Шероховатость, измеренная в направлении движения подачи, обычно больше шероховатости, измеренной в направлении главного движения.

Применение режущего инструмента для труднообрабатываемых материалов из минералокерамики позволяет получить шероховатость обработанной поверхности как при шлифовании ( $R_a$  0,8...0,6 мкм ). Это позволяет заменить процесс шлифования - резанием. Но для получения такого качества обработанной поверхности нужно правильно подобрать режимы резания, которые оказывают большое влияние.

**Цель работы:** экспериментальным путем определить оптимальную скорость резания для чистовой обработки инструментальных сплавов с обеспечением шероховатости  $R_a$  0,8 - 0,6 мкм, а также изучить ее влияние.

### **Методика поведения экспериментальных исследований**

Исследовался процесс резания инструментом из минералокерамики ВОК 71. В качестве обрабатываемого материала использовалась закаленная инструментальная сталь У8 с твердостью HRC 45...50.

При проведении эксперимента использовался резец с механическим креплением режущих четырехгранных пластин, которые имели следующую геометрию режущей части:  $\alpha = 7^\circ$  ,  $\gamma = 0^\circ$  ,  $\varphi = 45^\circ$  ,  $\varphi' = 45^\circ$ .

Для определения влияния скорости резания на качество обрабатываемой поверхности строился полный факторный эксперимент типа  $2^k$

[1]. Первый этап планирования эксперимента для получения линейной модели основан на варьировании факторов на двух уровнях.

По известному числу факторов находилось число опытов, необходимых для реализации всех возможных сочетаний уровней факторов по следующей формуле:

$$N=2^k, \quad (1)$$

где  $N$  - число опытов,

$k$  - число факторов,

2 - число уровней.

Эксперимент, в котором реализуются все возможные сочетания уровней факторов, называется полным факторным экспериментом. Так как глубина резания на качество обрабатываемой поверхности особого влияния не оказывает, то для исследования влияния режимов резания выбиралось два фактора - скорость резания и подача. Через  $X_1$  - обозначалась подача, а через  $X_2$ -скорость резания. Если число уровней каждого фактора равно двум, то имеется полный факторный эксперимент типа  $2^2$ .

Условия эксперимента записывались в виде таблицы, где строки соответствуют различным опытам, а столбцы значениям факторов. Основным параметром качества обработанной поверхности является шероховатость  $R_a$  ( $Y$ ). После проведения эксперимента получили полную матрицу планирования с результатами, представленными в таблице 1.

**Таблица 1.** Полная матрица планирования с результатами эксперимента

| № опыта | $X_0$ | $X_1$ | $X_2$ | $Y_1$<br>( $R_a$ ), мкм | $Y_2$<br>( $R_a$ ), мкм | $Y_{cp}$<br>( $R_a$ ), мкм |
|---------|-------|-------|-------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|
| 1       | 1     | +1    | -1    | 1,8                     | 1,6                     | 1,7                        |
| 2       | 1     | +1    | +1    | 1,3                     | 1,2                     | 1,25                       |
| 3       | 1     | -1    | -1    | 0,9                     | 0,7                     | 0,8                        |
| 4       | 1     | -1    | +1    | 0,8                     | 0,7                     | 0,75                       |

**Вывод:** Экспериментальным путем было установлено, что для чистовой обработки твердых материалов с обеспечением шероховатости обработанной поверхности  $R_a$  0,8 - 0,6 мкм, скорость резания должна составлять 600 м/мин.

#### Библиографический список

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Издательство "Наука". М., 1976, с. 280.

*И.А. Калинин, курсант.; рук. В.А. Полетаев, д.т.н., проф.  
(ИПСА ГПС МЧС России, г. Иваново)*

## **АЛМАЗНОЕ ВЫГЛАЖИВАНИЕ**

Выглаживание является одним из методов отделочно-упрочняющей обработки поверхности пластическим деформированием и заключается в пластическом деформировании обрабатываемой поверхности скользящим по ней инструментом – выглаживателем, закрепленным в оправке алмазным кристаллом, который обладает следующими свойствами: высокой твердостью; низким коэффициентом трения; высокой степенью чистоты; высокой теплопроводностью.

Выглаживание производится для уменьшения шероховатости поверхности (отделка), упрочнения поверхностного слоя, повышения точности размеров и форм деталей (калибрование). В зависимости от способа внедрения алмазного инструмента различают жесткое и упругое выглаживание. При жестком выглаживании инструмент закрепляют на станке подобно резцу и он во время обработки внедряется в поверхность детали на данную глубину. Жесткое выглаживание не получило широкого распространения вследствие высоких требований к допустимым биениям и точности геометрической формы детали, а также к жесткости системы станок – инструмент – приспособление – деталь. Упругое выглаживание является более простым и удобным способом применения его в производственных условиях. Основным преимуществом инструментов с упругим элементом нагружения является обеспечение постоянства заданной силы выглаживания независимо от погрешностей установки и точности геометрической формы заготовки. Конструкция таких выглаживателей позволяет реализовать силу выглаживания в широком диапазоне. По типу системы нагружения выглаживатели могут быть механическими, гидравлическими, электромагнитными и комбинированными, наибольшее распространение получили выглаживатели с механической системой нагружения, поскольку они отличаются простотой конструкции, удобством эксплуатации. В качестве упругого элемента в них обычно применяют тарированную проволочную или пластинчатую пружину.

Образующийся в результате алмазного выглаживания микрорельеф поверхности обуславливается следующими факторами: кинематикой процесса (направлением взаимного перемещения инструмента и обрабатываемой детали); величиной исходной шероховатости;

формой и размером рабочей части алмаза; величиной внедрения алмаза в обрабатываемую поверхность; пластическим течением материала, обуславливающим появление вторичной шероховатости; шероховатостью рабочей части алмаза; величиной упругого восстановления поверхности после выглаживания; вибрациями системы СПИД.

На рис.1 показаны фотографии поверхности стали 45 (вид сверху), на рис.2–фотографии поверхности стали 40X13; а на рис.3–фотографии поверхности поверхности стали 12X18Н10Т.

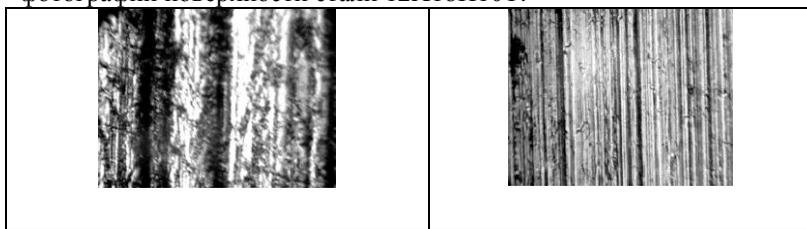


Рис.1. Поверхность стали 45 (вид сверху): а) – после точения; б) –после точения и алмазного выглаживания (ув.× 2500)



Рис.2. Поверхность стали 40X13 (вид сверху): а) – после точения; б) –после точения и алмазного выглаживания (ув.× 2500)

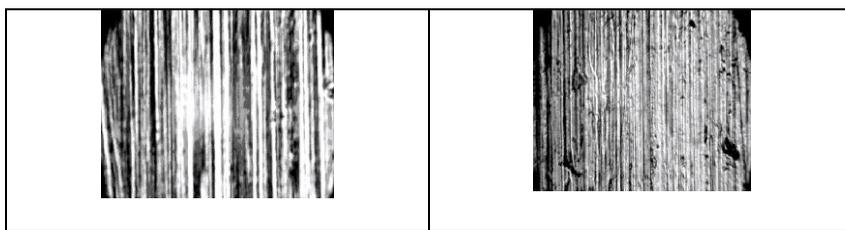


Рис.3. Поверхность стали 12X18Н10Т(вид сверху а) – после точения; б) –после точения и алмазного выглаживания (ув.× 2500)

*А.А. Коровкин, студ., рук. И.И. Ведерникова, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ УПРОЧНЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

При длительной работе любой машины даже при нормальных условиях эксплуатации и соблюдении правил технического обслуживания ее составные части изнашиваются. По характеру воздействия на поверхность трения и протекающих на ней процессов при эксплуатации оборудования классифицируют виды изнашивания различной природы. Продукты износа, физико-химическое воздействие окружающей среды оказывают определенное влияние на процесс коррозии поверхностей и их последующее разрушение.

Была проведена проверка коррозионной стойкости различных покрытий. Проверялась модель износа в присутствии электролита.

Скорость коррозии определяется двумя основными показателями коррозионной стойкости металлов:

а) глубинный показатель коррозии  $K_n$  – глубина коррозионного разрушения  $\Pi$  в единицу времени  $\tau$   $K_n = \Pi/\tau$  (мм/год)

б) показатель изменения массы – изменение массы образца металла в результате коррозии, отнесенное к единице поверхности металла  $n$  к единице времени:

$$K_m = \Delta m/S \cdot \tau \text{ (г/м}^2 \cdot \text{час)}$$

Скорость коррозии определялась объемным методом, т.е. по объему выделившегося водорода, в конечном итоге определяется группа и балл коррозионной стойкости.

В качестве агрессивных сред выступали 5 % раствор КОН и 6 % раствор серной кислоты  $H_2SO_4$ .

Брали 4 образца:

1 – образец неанодированного алюминия;  
2 – образец алюминия, анодированного в растворе серной кислоты с добавлением щавелевой кислоты  $H_2SO_4 + H_2C_2O_4$ , упрочненный лазерным модифицированием;

3 – образец, анодированный в растворе серной кислоты  $H_2SO_4$ ;

4 – образец нержавеющей легированной стали X18H9T.

Результаты проведенных исследований приведены в табл. 1

Таблица 1. Скорость коррозии

| Материал образца   | Раствор и его концентрация         | Расчетная убыль массы металла, г | Скорость коррозии              |                   | Группа коррозионной стойкости | Балл коррозионной стойкости |
|--|------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|-------------------|-------------------------------|-----------------------------|
|  |                                    |                                  | $K_{sm}$ , г/м <sup>2</sup> ·г | $K_{sp}$ , мм/год |                               |                             |
| Неанодированный алюминий   | КОН 5 %                            | 0,03                             | 1,6                            | 5,19              | малостойкие                   | 9                           |
| Алюминий, анодированный в растворе H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , упрочненный лазерным модифицированием | КОН 5 %                            | 0,029                            | 1,59                           | 5,16              | малостойкие                   | 9                           |
| Алюминий, анодированный в растворе H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>  | КОН 5 %                            | 0,013                            | 0,7                            | 2,27              | малостойкие                   | 8                           |
| Сталь X18H9T   | КОН 5 %                            | -                                | 0,06                           | 0,07              | стойкие                       | 5                           |
| Неанодированный алюминий   | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 6 % | 0,015                            | 0,006                          | 0,019             | стойкие                       | 4                           |
| Алюминий, анодированный в растворе H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , упрочненный лазерным модифицированием | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 6 % | 0,008                            | 0,003                          | 0,0028            | весьма стойкие                | 3                           |
| Алюминий, анодированный в растворе H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>  | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 6 % | 0,0072                           | 0,010                          | 0,009             | весьма стойкие                | 3                           |
| Сталь X18H9T   | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 6 % | -                                | 0,089                          | 0,1               | стойкие                       | 4                           |

Из проведенных исследований можно сделать вывод: в щелочной среде коррозионная стойкость анодированного алюминия по сравнению с неанодированным не хуже, а в кислой среде даже лучше, что можно объяснить взаимодействием химического состава анодной пленки со средой. Разрыхление получаемых покрытий не наблюдалось.

*Е.О. Попова, И.В. Федоров, студ.; рук. А.М. Шурыгин, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИВОДНЫХ УСТРОЙСТВ В СРЕДЕ MATHCAD**

При выполнении научно-исследовательских работ в области машиностроения часто приходится решать разнообразные задачи ограниченной сложности. Для этого можно использовать универсальные средства автоматизации математических расчетов. К таким программам, в частности, относится среда MathCAD, которая представляет собой автоматизированную систему, обеспечивающую динамическую обработку данных в числовом и аналитическом виде.

В качестве основы для построения приводных устройств технологического оборудования широко применяются двигатели постоянного и переменного тока. Исследование статических и динамических характеристик двигателя может выполняться с использованием его имитационной модели, составленной в среде MathCAD.

Для моделирования в среде MathCAD уравнения двигателя должны быть записаны в виде единой системы дифференциальных уравнений первого порядка, представленной в нормальной форме, при которой в левых частях уравнений, образующих данную систему, находятся только первые производные неизвестных функций, а правые части уравнений производных не содержат. Затем нормальная система дифференциальных уравнений записывается в матричной форме, при которой все переменные, соответствующие неизвестным функциям, становятся компонентами одного вектора:

$$\frac{d}{dt} X = D(t, X),$$

где  $t$  – аргумент (время),  $X$  – вектор, компонентами которого являются переменные, соответствующие неизвестным функциям,  $D$  – вектор, компонентами которого являются выражения, определяющие первые производные неизвестных функций.

Численное решение систем дифференциальных уравнений первого порядка в среде MathCAD осуществляется на основе применения стандартной встроенной функции  $rkfixed(X_{нач}, t_{нач}, t_{кон}, k, D)$ , реализующей метод Рунге-Кутты четвертого порядка, где  $X_{нач}$  – вектор начальных значений неизвестных функций,  $t_{нач}$  – начальное значение отрезка интегрирования,  $t_{кон}$  – конечное значение отрезка интегрирования,  $k$  – количество расчетных точек на отрезке интегрирования.

## ОБУЧЕНИЕ САПР ТП «ТЕХНОПРО» ДЛЯ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Технологические процессы (ТП) сборки изделий, механической обработки деталей и т.д. на современных машиностроительных предприятиях разрабатываются с помощью систем автоматизированного проектирования (САПР). В России наибольшее распространение получили следующие САПР ТП: «ТехноПро» (разработка фирмы «Вектор-Альянс», г. Москва); «Т-FLEX Технология» («Топ Системы», г. Москва) и «Вертикаль» («АСКОН», г. Санкт-Петербург).

На кафедре «Технология машиностроения» ИГЭУ в учебном процессе используется САПР ТП «ТехноПро». Особенность этой системы заключается в том, что она позволяет пользователям с помощью специального встроенного языка запрограммировать любые сценарии расчета параметров ТП (режимов резания, норм времени и т.д.). Программируя различные сценарии расчета параметров ТП, имеется возможность обучения системы. При обучении системы создается база условий и расчетов (БУР). Для создания БУР «ТехноПро» предусмотрен специальный интерфейс. Каждая строка описания условия содержит левую часть «Условие», которая включает в себя оператор условия и проверяемое выражение, и правую часть «Действие», которая включает в себя оператор действия и выполняемое выражение.

Операторами условия могут быть: «Если», «ЕслиУсл», «Иначе», «ИначеЕсли» или пустой оператор «---». Проверяемое выражение содержит собственно проверяемое условие. Операторами действия могут быть: «Выбрать», «Вычислить», «Подобрать», «ВыполнитьУсл» или «СоздатьЭлем». Выполняемое выражение содержит собственно выражение, которое должно быть выполнено при удовлетворении соответствующего условия.

Пример. «Если![Свойство]=«С пластинами из твердого сплава»!Вычислить![S;Режим]=0.5!Иначе!Вычислить![S;Режим]=0.1!Конец Если». Это означает: если резец выполнен с пластиной из твердого сплава, то величина подачи равна 0,5 мм/об., если в другом исполнении (подразумевается, что резец из быстрорежущей стали), то величина подачи – 0,1 мм/об.

База условий и расчетов в «ТехноПро» позволяет учитывать опыт проектирования ТП на конкретном производстве, что является несомненным достоинством системы.

*Е.О. Попова, И.В. Федоров, студ.; рук. А.М. Шурыгин, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В СРЕДЕ MATHCAD

При составлении имитационных моделей электродвигателей в среде MathCAD основной задачей является представление уравнений моделируемого двигателя в виде единой системы дифференциальных уравнений первого порядка, записанной в нормальной форме. Если для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением и синхронного двигателя с постоянными магнитами такая задача решается относительно несложно, то в случае асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором приходится выполнять достаточно большое количество подстановок и математических преобразований. Используя в качестве основы известные уравнения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в неподвижной относительно статора системе координат  $\alpha, \beta$ , не указывая промежуточные выводы, запишем систему дифференциальных уравнений данного двигателя в нормальной форме:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{s\alpha}}{dt} = \frac{1}{L_s - \frac{L_m^2}{L_r}} \left( u_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha} + \frac{L_m}{L_r} (R_r i_{r\alpha} + \omega_{\text{эл}} (L_r i_{r\beta} + L_m i_{s\beta})) \right), \\ \frac{di_{s\beta}}{dt} = \frac{1}{L_s - \frac{L_m^2}{L_r}} \left( u_{s\beta} - R_s i_{s\beta} + \frac{L_m}{L_r} (R_r i_{r\beta} - \omega_{\text{эл}} (L_r i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha})) \right), \\ \frac{di_{r\alpha}}{dt} = \frac{1}{L_r - \frac{L_m^2}{L_s}} \left( -R_r i_{r\alpha} - \omega_{\text{эл}} (L_r i_{r\beta} + L_m i_{s\beta}) - \frac{L_m}{L_s} (u_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha}) \right), \\ \frac{di_{r\beta}}{dt} = \frac{1}{L_r - \frac{L_m^2}{L_s}} \left( -R_r i_{r\beta} + \omega_{\text{эл}} (L_r i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha}) - \frac{L_m}{L_s} (u_{s\beta} - R_s i_{s\beta}) \right), \\ \frac{d\omega_{\text{эл}}}{dt} = \frac{P_n}{J_{\text{мп}}} \left( \frac{m}{2} P_n L_m (i_{r\alpha} i_{s\beta} - i_{r\beta} i_{s\alpha}) - M_c \right), \end{array} \right.$$

где

$u_{s\alpha}, u_{s\beta}$  – напряжения обмоток статора по осям  $\alpha, \beta$ ;

$i_{s\alpha}, i_{s\beta}$  – токи обмоток статора по осям  $\alpha, \beta$ ;

$R_s, L_s$  – активное сопротивление и полная индуктивность обмотки фазы статора;

$i_{r\alpha}, i_{r\beta}$  – приведенные токи обмоток ротора по осям  $\alpha, \beta$ ;

$R_r, L_r$  – приведенные активное сопротивление и полная индуктивность обмотки фазы ротора;

$L_m$  – взаимная индуктивность между обмотками фазы статора и ротора;

$\omega_{эл}$  – угловая скорость ротора, измеряемая в эл. рад/с;

$m$  – число фаз;

$p_n$  – число пар полюсов двигателя;

$J_{пр}$  – приведенный момент инерции;

$M_c$  – момент сопротивления.

Полученная нормальная система дифференциальных уравнений асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором является основой для создания его имитационной модели в среде MathCAD.

Разработанная модель позволяет выполнять расчеты переходных процессов во всех необходимых режимах работы двигателя, как под нагрузкой, так и при ее отсутствии, а также исследовать влияние параметров асинхронной машины на ее статические и динамические характеристики.

*А. А. Масловский, студ.; рук. А. А. Киселев, к. т. н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **СВОЙСТВА И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУР**

Цель данного доклада состоит в том, чтобы сделать очередной шаг в направлении популяризации современных материалов и технологий под девизом «Нанотехнологии – в массы».

Лучшие технические решения при создании новых многофункциональных материалов получаются тогда, когда удастся совместить в одном материале традиционно противоречивые сочетания свойств: малый вес, супервысокие прочность и гибкость, а также уникальные электрические и магнитные характеристики, которыми можно легко и оперативно управлять.

Научные исследования и практические эксперименты ученых по всему миру на протяжении последних 25 лет привели к тому, что сегодня можно реально говорить о фантастических вещах, например:

- нанонить диаметром в 10 мкм, выдерживающая нагрузку до 10 т;
- наноконтейнеры для доставки лекарств к больному органу или для хранения и транспортировки токсичных отходов, при этом наноконтейнеры суперпрочны и доступны в обслуживании;
- полностью управляемые электронные приборы с плотностью тока до  $10^{13}$  А/см<sup>2</sup>, характерной для сверхпроводимости.

Речь идет о трех типах структурно взаимосвязанных, но разных наноматериалах, созданных на основе широко распространенного углерода: графен, фуллерен и нанотрубки. Структуры этих материалов приведены на рис. 1.

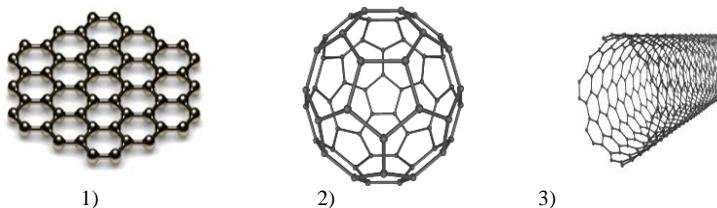


Рис. 1. Типы углеродных наноструктур: 1) графен, 2) фуллерен, 3) нанотрубка

По рисункам видно, что структура графена – это наноструктура в виде двумерного одноатомного слоя молекул углерода с гексагональной кристаллической решеткой, а структуры фуллерена и нанотрубки сформированы из листа графенана, пространственно замкнутого сферически или цилиндрически.

Каждый из этих типов наноструктур имеет свои совершенные формы и уникальные характеристики, которые определяют области их применения и перспективы развития. Их сравнительные характеристики приведены в таблице 1.

**Таблица 1. Основные характеристики углеродных наноструктур**

| Характеристики           | Тип углеродной наноструктуры   |                            |                                      |
|--------------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
|                          | Графен                         | Фуллерен                   | Нанотрубки                           |
| Размерность, нм          | От 0,35 (толщиной в один атом) | 0,7÷1 (отдельная молекула) | Диаметр внутр. от 2. Длина до $10^5$ |
| Прочность на разрыв, ТПа | До 1                           | До 2                       | До 1,5                               |
|                          | В 100 раз прочнее стали        |                            |                                      |
| Механ. гибкость          | Высокая                        | Низкая                     | Высокая                              |

*ЭНЕРГИЯ-2015. Материалы конференции*

|  |   |  |  |
|--|---|--|--|
| Тип электропроводности                         | Проводник/ изолятор/полупроводник   | Полупроводник с шириной запрещенной зоны 1,5 эВ. | Проводник (прямая трубка), полупроводник (изогнутая тр.) |
| Удельная проводимость, См/м                    | До 87,15  |  |  |
|  | Управляемая величина. На 50% выше, чем у меди.  |  |  |
| Теплопроводность, Вт/(м·К)                     | До $5 \cdot 10^3$   |  |  |
|  | Рекордно большая (выше, чем у алмаза)   |  |  |
| Подвижность электронов, см <sup>2</sup> /(В·с) | До $10 \cdot 10^5$  |  |  |
|  | В 100 раз больше чем у кремния  |  |  |
| Сложность формирования наноструктуры           | Технологически относительно простое   | Сложное и дорогостоящее                          | Сложное  |
| Рабочая частота приборов, ТГц                  | До 1,0 ÷ 10,0   |  |  |
| Использование как ячеек памяти                 | Энерго и радиационно независимая память с плотностью записи до 250 Гбит/см <sup>2</sup> (в 5 раз выше чем у флеш-памяти ) |  |  |

Характеристики углеродных наноструктур, приведенные в табл. 1, впечатляют и позволяют говорить о новой технологической революции в создании современных материалов и устройств на их основе.

Уже сегодня активно ведутся работы по коммерческому использованию сделанных открытий: изготовление полевых нанотранзисторов, твердотельных полупроводниковых лазеров, ячеек памяти большой ёмкости, гибких дисплеев, суперпрочных легких бронезилетов, уникальных смазок и т.д.

Сейчас наука и производство в начале нанотехнологического пути. Каждое следующее открытие новых свойств и возможностей этих материалов порождает новые направления и цели в исследованиях уникального углеродного материала. Нанотехнология и наноэлектроника – это достойные цели и «поле» для деятельности молодых ученых.

## СЕКЦИЯ 24

### ДИНАМИКА, ПРОЧНОСТЬ, ВИБРОДИАГНОСТИКА

Председатель – к.т.н., доц. **Ноздрин М.А.**

Секретарь – асс. **Круглов А.В.**

*М.Ф. Низамиев, аспирант; рук. И.В. Ившин д. т. н., профессор  
(КГЭУ г. Казань)*

### ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНО- ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Целью работы является разработка методики экспресс-контроля корпуса сложной формы турбокомпрессора двигателя КАМАЗ. Наиболее подходящим для такого рода контроля является интегральный метод свободных колебаний [1], основанный на возбуждении свободно затухающих упругих колебаний в контролируемом объекте и анализе параметров этих колебаний с привлечением целевых функций сравнения. В основу метода положено наличие корреляционных зависимостей между упругими константами материала, изделия и такими физико-механическими свойствами, как твердость, пористость, плотность, прочность и т. п., а также эксплуатационными характеристиками изделий и технологией их изготовления.

Однако метод не лишен трудностей методического характера, в качестве которых можно выделить:

- 1) целесообразность выбора нескольких информативных критериев отбраковки изделия;
- 2) необходимость анализа сигналов в широком диапазоне частот для эффективности определения разных типов дефектов;
- 3) необходимость выполнения большого объема работ для обнаружения местоположения дефекта.

В связи с этим, в среде программирования LabVIEW 13.0 разработан унифицированный пакет прикладных программ, позволяющий существенно упростить задачу отбраковки деталей [2]. Отличительной особенностью предложенного программного комплекса является возможность одновременного контроля с помощью пяти виброакустических датчиков, чувствительных к колебаниям в различных частотных областях спектра. Датчики могут быть установлены в разных контрольных точках изделия. При этом к принятию решения об отбраковке изделий можно привлечь до пяти целевых функций сравнения.

Отбраковка изделий производится в зависимости от результатов сравнения эталонного и текущего спектров по значениям пяти целевых функций сравнения:

- площади спектра
- коэффициента корреляции;
- непараметрическая ранговая оценка Спирмена;
- оценка Имана-Коновера;
- статистика знаков Фишера.

Для классификации изделий на «годное» или «дефектное» используется подход, характерный для процедур отбраковки аномалий: программа интерпретирует совокупность вычисленных значений некоторой статистики  $(p_1, p_2, \dots, p_m)$  как множество измеренных значений некоторого абстрактного параметра и применяет к этой совокупности значений следующую процедуру:

- 1) вычислить оценку положения  $\bar{p}$ ;
- 2) вычислить оценку разброса  $S$ ;
- 3) для заданного уровня значимости  $\alpha$  построить доверительный интервал

$$\bar{p} \pm S \cdot t\left(1 - \frac{\alpha}{2}, m - 2\right)$$

где  $t(\alpha, m)$  -  $\alpha$ -квантиль распределения Стьюдента с  $m$  степенями свободы.

Программный комплекс включает в себя следующие основные части: программу диагностики, программу формирования эталонных спектров, программу сравнения спектров с эталоном.

Все эти составные части объединены в одной интегрированной оболочке, обеспечено протоколирование работы с возможностью дальнейшего просмотра результатов записи и режимов обработки сигнала.

лов. Заключение о состоянии изделия делается в автоматическом режиме без участия пользователя, что исключает субъективизм в принятии решения.

В результате работы разработаны алгоритмы, позволяющие реализовать метод свободных колебаний для экспресс-контроля корпуса турбокомпрессора газового двигателя КАМАЗ. Программный комплекс носит унифицированный характер и может быть использован при контроле любых деталей сложной формы.

#### Библиографический список

1. **Ившин И.В.** Разработка новых низкочастотных виброакустических методов контроля технического состояния деталей, узлов и механизмов вооружения и военной техники. Издательство КВВКУ, Казань, 2009, 170 с.
2. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014613692. Программный комплекс для экспресс-контроля деталей двигателя КАМАЗ/ И.В. Ившин, Ю.В. Ваньков, Е.В. Измайлова, А.Р. Загретдинов, М.Ф. Низамиев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «КГЭУ» - №2014611426; заявл. 25.02.2014г.; зарег. 02.04.2014 г.

*А.В. Швед, О.Г. Бизяева, студенты;  
рук. Л.Б. Маслов, д.ф.-м.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ РАМЫ ОТСЕКА КРЫЛА САМОЛЁТА В СРЕДЕ MSC.PATRAN /NASTRAN

MSC.Patran – интерактивный программный продукт с открытой архитектурой, обеспечивающий интеграцию автоматизированных систем проектирования, моделирования, анализа и оценки результатов расчетов. Использование MSC.Patran в комбинации с другими программными продуктами компании MSC.Software позволяет достичь наибольшей эффективности в оценке работоспособности и оптимальности конструкции изделий при их разработке, производстве и эксплуатации еще до того, как начнутся изготовление и испытания опытных образцов.

MSC.Patran располагает развитыми средствами генерации конечно-элементных сеток, что придает этому процессу недостижимые ранее гибкость и степень автоматизации. Нагрузочные и граничные условия могут быть увязаны как с геометрическими, так и с конечно-элементными категориями. Развитые средства визуализации (в том

числе, изоповерхности) помогают ускорить и повысить качество анализа полученных результатов расчета.

Управляемый графический интерфейс MSC.Patran и интерактивная справочная система обеспечивают высокую эффективность и удобство работы с программным продуктом.

При использовании MSC.Patran основой создаваемой конечно-элементной системы является, как правило, геометрическая модель, для чего MSC.Patran предоставляет прямой доступ к результатам геометрического моделирования в наиболее популярных в мире программных пакетах автоматизированного проектирования. Программа MSC.Patran располагает также собственными обширными возможностями создания и модифицирования геометрических моделей, контроля CAD-геометрии и преобразования ее перед построением конечно-элементной модели [1].

Ставится задача прочностного расчета рамы отсека крыла самолета MSC.Patran /Nastran. На рис. 1 изображена конструкция длиной  $L=1000$  мм и шириной  $h=800$ мм, толщиной стенки  $t=1$ мм.

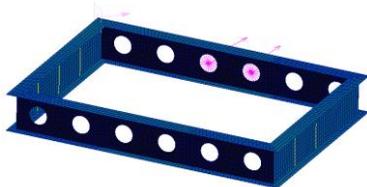


Рис.1. Конечно-элементная модель рамы

Рама разбивается на конечные элементы типа оболочка (shell) и балочные элементы (beam), выполняющие роль элементов жесткости, сетка регулярная (рис. 2). Материал рамы дюраллюминий с модулем Юнга  $E=107$  МПа и коэффициентом Пуассона  $\nu=0,33$ . Рама нагружается силой  $P=350$  Н, распределенной по краям отверстий, жестко закрепляется по 4 верхним углам. На рисунке 3 изображена модель рамы с вызванными напряжениями.

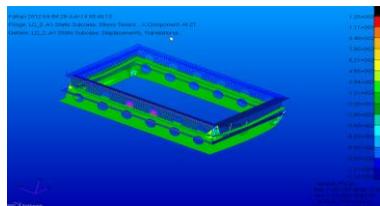
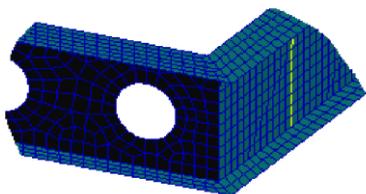


Рис. 2. Увеличенное изображение КЭ сетки

Рис. 3. Визуализация полученных напряжений

В результате расчёта получены следующие величины: максимальное перемещение 10,1 мм (нижний контур рамы); максимальное напряжение 1,28 КПа, возникающее в уголках рамы, где находилось место условного закрепления; минимальное напряжение -1,18 КПа. Данный расчет позволяет произвести прочностную оценку конструкции и сформулировать предложения по ее оптимизации.

#### Библиографический список

1. **Рыбников Е. К.** Инженерные расчеты механических конструкций в системе MSC.Patran-Nastran/ Рыбников Е. К. – М.: 2003. – 130 с.

*Е.С. Шильцев, студ.; рук. Н.А. Сабанеев, ст. преп.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПОПЕРЕЧНОЙ БАЛКИ ПОЛА ФЮЗЕЛЯЖА САМОЛЕТА

Инженерные расчеты применяются для оценки характеристик деталей, узлов при заданном наборе геометрических параметров, нагрузок и свойств материалов. Расчеты также можно использовать для получения ответов на вопросы:

- что произойдет, если нагрузка изменится?

- какие параметры влияют на поведение системы больше?
- какая геометрия оптимальна для данной конструкции?

На эти и другие вопросы можно ответить после соответствующего исследования модели.

Для решения современных задач широко используются методы оптимизации с целью экономии времени и рассмотрения наибольшего количества вариантов с учетом разброса параметров.

Целью данной работы является разработка оптимальной конструкции поперечной балки пола фюзеляжа самолета при заданных ограничениях по габаритным размерам, материалу и нагружению. Поперечная балка фюзеляжа предназначена для передачи нагрузок, приложенных к полу фюзеляжа, на шпангоуты и, далее, на основную конструкцию самолета. Нагрузки прикладываются на балку пола в сосредоточенных узлах крепления рельсов пола (рис.1.). Кроме того, существуют нижние опорные вертикальные стержни, поддерживающие балку в двух сечениях и передающие нагрузку также на шпангоуты.

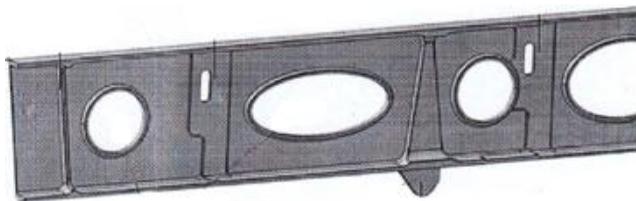


Рис.1.Общая конструкция балки.

Для поиска оптимальной конструкции, предполагается, что часть параметров непрерывно изменяется в пределах заданных диапазонов, а ожидаемый результат является откликом различных характеристик.

Нагрузки, некоторые размеры и свойства материалов балки являются неизменными параметрами. Для проведения оптимизации модели были взяты следующие параметры: длина балки фиксирована и равна  $L=5700$  мм, расстояние между опорами равно  $R=4700$  мм, материал балки – алюминиевый сплав Д-16Т. У других размеров есть определенный допуск. Дополнительным условием на геометрию балки является отсутствие потери устойчивости в пределах заданных нагрузок.

Для проведения параметрической оптимизации выбран [ANSYS DesignXplorer](#). DesignXplorer является модулем параметрической оптимизации [на платформе Workbench](#). Оптимизация реализована в зави-

симости от перебора входных параметров в соответствии с которыми изменятся расчетные параметры (напряжения, собственные частоты).

Результатом данной работы является трехмерная модель балки, ее характеристики по прочности и устойчивости.

*М.А. Воробьев, Е.С. Шильцев, студенты;  
рук. А.В. Круглов, асс.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## РАСЧЕТ НА ФЛАТТЕР СТРЕЛОВИДНОГО КРЫЛА В ДОЗВУКОВОМ ПОТОКЕ

Расчет на флаттер проводится по программе, составленной в соответствии с “Методикой расчета на флаттер стреловидного крыла большого удлинения в дозвуковом потоке” [1]. Согласно этой методике крыло заменяется балкой, работающей на изгиб и кручение, консоль крыла вдоль оси жесткости делится узловыми точками на некоторое число участков. Каждому узлу приписывается три степени свободы.

Для расчета крыла на флаттер была составлена MathCad-программа, позволяющая находить критическую скорость флаттера и комплексные частоты, а также программа численного интегрирования уравнения возмущенного движения по времени.

Уравнение возмущенного движения стреловидного крыла в дозвуковом потоке имеет вид:

$$M \cdot \ddot{q} + k_d \cdot D \cdot \dot{q} + \frac{1}{\pi} \cdot M \cdot \Omega \cdot \Delta \cdot \dot{q} + k_b \cdot B \cdot q + M \cdot \Omega^2 \cdot q = 0$$

где  $M$  – матрица инерции;  $D$  – матрица аэродинамического демпфирования;  $B$  – матрица аэродинамической жесткости;  $q$  – вектор-столбец обобщенных координат, таких, что перемещения  $w = F \cdot q$ ;  $F$  – матрица форм собственных колебаний;  $k_d$ ,  $k_b$  – множители, являющиеся функцией условий полета;  $\Omega$  – диагональная матрица собственных частот;  $\Delta$  – диагональная матрица логарифмических декрементов колебаний.

Собственные частоты и формы находятся из уравнения:

$$\omega_j^2 \cdot C \cdot f_j = G \cdot f_j, \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

где  $n$  – число тонов,  $C, G$  – соответственно матрица инерции и жесткости для обобщенных координат.

Угол стреловидности крыла  $\chi = 30^\circ$ . Размах крыла  $L=1810$  мм. Модель рассматриваемого крыла приведена на рис. 1.

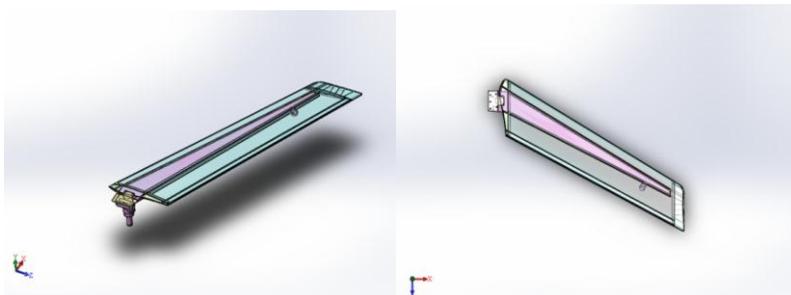


Рис.1. Модель крыла

Сравнение результатов динамических испытаний и расчета в системе MathCad приведенные в таблице 1.

Таблица 1. Экспериментальные и расчетные значения собственных частот

| №                     | 1      | 2      | 3       | 4       | 5       | 6       |
|-----------------------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| $\omega$ , Гц (эксп.) | 15,3   | 67,5   | 126,8   | 178,5   | 305,8   | 460,4   |
| $\omega$ , Гц (расч.) | 16,293 | 65,023 | 136,403 | 148,574 | 244,101 | 268,746 |

Примеры форм колебаний крыла, рассчитанных в MathCad, показаны на рис. 2.

Расчетная скорость, на которой происходит флаттер, равна 470 м/с. Максимальная рассчитываемая скорость полета изделия 0,8 Маха, или  $V_{\max}=272$ м/с.

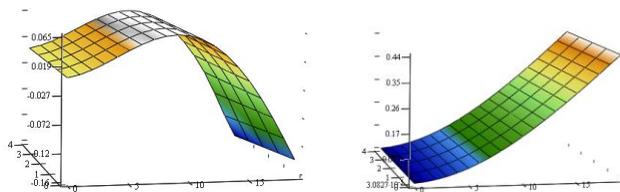


Рис.2. Формы колебаний крыла: а) первая, б) вторая

По данным расчета критическое значение скорости флаттера составляет 470 м/с, это значение соответствует 1.38 М, следовательно,

при максимальной скорости объекта в 0.8 М данное крыло может быть использовано без риска разрушения по причине флаттера.

**Библиографический список**

1. **Моргунов С.В.** Методика расчета на флаттер стреловидного крыла большого удлинения в дозвуковом потоке. – Дубна, Гос МКБ «Радуга».

*К.И. Евграфова, студ.; рук. З.В. Зарубин, доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ПАМЯТИ ФОРМЫ ПРИ ИЗГИБЕ ПЛАСТИНЫ

Эффект памяти формы – явление возврата к первоначальной форме при нагреве детали, которое наблюдается у некоторых материалов после предварительной деформации. Разработка алгоритмов расчета элементов конструкций из материалов с эффектом памяти формы необходима для применения в конструкциях из новых материалов с заданными физико-механическими свойствами.

Рассматривается (для конкретизации общего алгоритма) квадратная опертая пластина со стороной  $2a$  под действием равномерной нагрузки  $q$  (рис.1).

Безразмерные координаты точек пластины соотнесены с размерами пластины:  $\xi = \frac{x}{a}$  и  $\eta = \frac{y}{a}$ . Производится аналитический расчет задачи изгиба пластины с эффектом памяти формы. Определяется масса пластины  $m = \frac{64}{\pi^4}$ , удовлетворяющая равенству:  $\frac{\iint P_x d\xi d\eta}{\iint \bar{w} d\xi d\eta} = 1$ . Получена формула прогиба в центре пластины:  $w_0 = \frac{4}{\pi^2} \cdot \frac{a^2 \cdot e_3}{h} \cdot e_0$ .

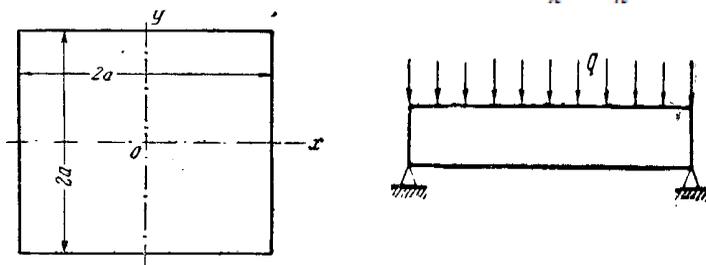


Рис.1. Расчетная схема пластины

Устанавливается зависимость между температурой и формой пластины. При повышении температуры пластина возвращается в первоначальную форму.

Полученные результаты являются основой для проектирования терморегулирующих устройств в теплоэнергетике.

*И. В. Иванова, Д. В. Корепов, студенты;  
рук. М.А. Ноздрин, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ МОДЕЛИ КРОНШТЕЙНА САМОЛЕТА

Кронштейн — консольная опорная деталь или конструкция, служащая для крепления на вертикальной плоскости (стене или колонне) выступающих или выдвинутых в горизонтальном направлении частей машин или сооружений. Конструктивно кронштейн может выполняться в виде самостоятельной детали либо многодетальной конструкции с раскосом, а также в виде значительного утолщения в базовой детали. Механический принцип действия — сопротивление материала на скол и сдвиг [1].

Расчет на прочность кронштейна производится в программе MSC.Patran. Трехмерная модель исследуемого объекта представлена на рис. 1.

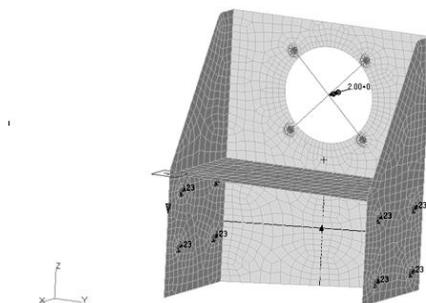


Рис. 1. Модель кронштейна, разбитая на элементы, нагруженная моментом и закрепленная по боковым отверстиям

В процессе конечно-элементного анализа вычисляется реакция модели на внешнее нагружение с учетом закреплений, то есть в процессе моделирования учитываются определенные нагрузки и граничные условия. Нагрузки – это внешние силовые факторы, такие как сосредоточенная сила, давление, температура и др. Граничные условия описываются в терминах степеней свободы, т.е. направлений, в которых модель может двигаться поступательно или вращательно.

Конечно-элементная модель (КЭМ) построена методами программы MSC.Patran. Сгущения сетки создаются искусственно для обеспечения высокого качества расчета.

В результате линейного статического анализа определены перемещения кронштейна (рис. 2), при этом максимальное перемещение в примере расчета составляет 10 мм.

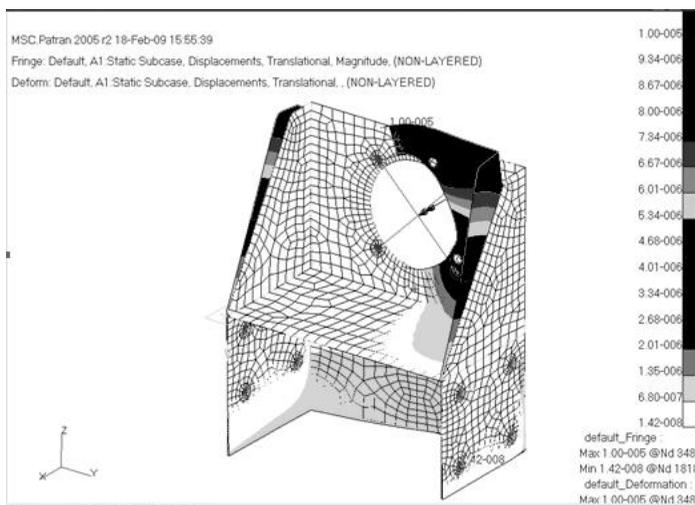


Рис. 2. Перемещения кронштейна, полученные в результате статического анализа

По расчетам статического анализа определены и напряжения кронштейна.

#### Библиографический список

1. Кронштейн [Электронный ресурс]: Материал из Википедии — свободной энциклопедии : Версия 59977130, сохранённая в 06:52 UTC 8 декабря 2013 / Авторы Википедии//Википедия, свободная энциклопедия.—Электрон. дан. — Сан-Франциско: Фонд Викимедиа, 2013. — Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/?oldid=59977130>

*Е.Э. Ильина, студ.; рук. Л.Б. Маслов, д.ф-м.н., доц.  
(ИГЭУ, Иваново)*

## **ИЗУЧЕНИЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРОДУКТА СТЕКЛОПРОИЗВОДСТВА**

Системы автоматизированного проектирования в процессе развития прошли четыре стадии: двухмерное черчение, трехмерное каркасное моделирование, трехмерное твердотельное моделирование и трехмерное твердотельное моделирование с ассоциативными, параметрическими и элементарно-ориентированными характеристиками. Последнее современное состояние, пятое поколение САПР называется поведенческим моделированием. Требования к изделиям становятся все более и более изменчивыми, а изделия все более специализированными. В этой ситуации необходимы условия для автоматизации процесса проектирования деталей таким образом, чтобы конструктор мог сосредоточиться на творческой работе. Поэтому создание 3D-эскизов, к примеру, стеклотары ведется с помощью программы Pro/ENGINEER, а создание 2D-чертежей – в программах AutoCad или Компас3D.

Объектом исследования в данной работе является продукт стеклопроизводства – бутылка «Солнышко». Номинальная вместимость тары 0,5 л, производится из бесцветного стекла.

Разработанные в программе Pro/ENGINEER 3D-эскизы выбранной модели представлены на рисунке 1.

В цехе отрезается капля стекломассы нужного веса, которая попадает в черновую форму. Существует три метода выработки тары в черновой: узкогорлый пресс NPВ; пресс-выдув РВ; двойной выдув ВВ. После выработки одним из методов тара перебрасывается в чистовую форму, где при температуре 1600°С принимает нужный вид. При выходе из чистовой формы на горячем конце происходит охлаждение и напыление специальных средств, повышающих прочность изделия, после чего тара попадает в печь для отжига, необходимого для снятия остаточных напряжений.

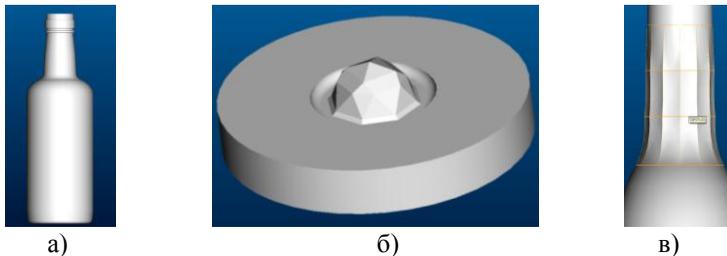


Рис. 1. Трехмерная модель исследуемой тары: а) – общий вид; б) - дно; в) – горловина для чистовой формы

В установленном ГОСТ порядке делается выборка и производится дополнительный контроль параметров: контроль остаточных напряжений после отжига, отклонение от перпендикулярности вертикальной оси относительно плоскости дна, сопротивление вертикальной нагрузке, определение вместимости, контроль массы, толщины стенки и дна, высоты, наружного диаметра корпуса и диаметра венчика горловины тары.

Остаточных напряжений после отжига в бутылке «Солнышко» не выявлено. При контроле толщины стенки (рис. 2) определено значение толщины, равное 1,19 мм, норма для данного типа тары лежит в промежутке от 0,83 мм до 0,99 мм.



Рис.2. Контроль толщины стенки тары

Так как были замечены отклонения от стандартов, партию, из которой сделана данная выборка, сняли с производства до выяснения причин, вызвавших такое отклонение.

#### Библиографический список

1. Шульц М. М. О природе стекла // Природа № 9. 1986.

2. Химическая энциклопедия: в 5-ти тт. / Редкол.:Зефиров Н. С. (гл. ред.). — Москва: Советская энциклопедия, 1995. — Т. 4. — С. 289. — 639 с. — 20 000 экз. — ISBN 5—85270—039—8.
3. ГОСТ 22238-76 Контроль неразрушающий. Меры образцовые для проверки. Общие положения.

*В.Ф. Огай, студ.; рук. М.А. Ноздрин, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, Иваново)*

## КОМПЛЕКСНЫЙ РАСЧЕТ КОМПОЗИТНОЙ ПАНЕЛИ МЕХАНИЗАЦИИ КРЫЛА САМОЛЕТА

Композитные материалы в авиастроении получают всё большее распространение, поэтому создание системы комплексного расчета прочности авиационных панелей из композита является актуальной задачей. Как во вновь создаваемых, так и в модернизируемых изделиях композиты становятся основными конструкционными материалами [1].

Объектом исследования данной работы является внутренний закрылок крыла самолета SSJ100(российский ближнемагистральный пассажирский самолёт, разработанный компанией «Гражданские самолёты Сухого»). Модель закрылка показана на рис. 1

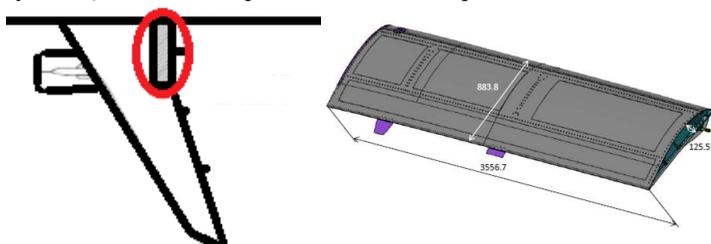


Рис. 1. Внутренний закрылок крыла самолета SSJ 100

Схема закрепления и нагружения показана на рис. 2. В указанных четырех точках модели закрылка накладываются ограничения по перемещениям (по трем компонентам).

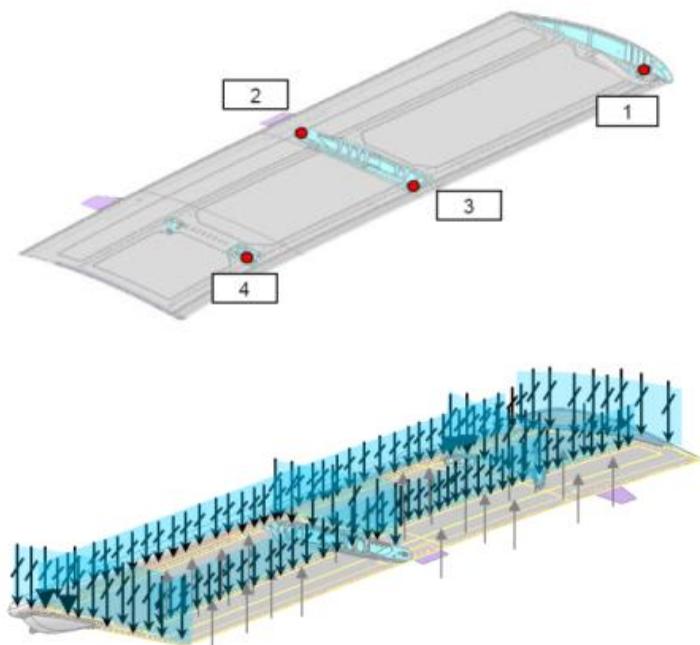


Рис.2. Схема закрепления и нагружения закрылка

Алгоритм решения задачи в программах MSC Patran, MD Nastran содержит следующие этапы:

- 1) создается модель внутреннего закрылка, которая разбивается на 4 – х узловые конечные элементы;
- 2) задаются нагрузки и граничные условия модели закрылка;
- 3) находятся напряжения всех элементов с помощью программы MSC Nastran.

Целью работы является создание программы анализа и обработки расчетных данных программы MSC Patran, которая позволяет находить запас прочности элементов композитной панели самолета. Программа обрабатывает данные о геометрии элементов и приложенных к ним усилий, взятых с выходных данных MSC PATRAN.

Разработанная программа позволяет существенно сократить время анализа напряженно-деформированного состояния конструкции, со-

стоящей из слоистых композитных материалов, применяемых в большинстве современных самолетов.

Комплексная программа вычисляет действующие напряжения для каждого композитного слоя и различных способов укладки слоев, а также указывает на самый опасный слой и элемент для каждого нагруженного случая.

Для создания программы использовался язык программирования Visual Basic, интегрированный в ПО Microsoft Excel [2]. Данная программа применяется для расчета компонентов самолета SSJ 100, состоящих из композита. Она может успешно использоваться для любых композитных конструкций.

Произведен расчет на прочность закрылка самолета SSJ 100.

Основными преимуществами программного комплекса являются:

- скорость обработки выходных данных с MSC Nastran (файлы (.prt)) с силовыми потоками конечных элементов ( $N_x$ ,  $N_y$ ,  $N_{xy}$ ) в 3 раза выше;
- простота изменения исходных данных: свойств материала, толщин монослоев, количество слоев и углов укладки;
- возможность быстрого анализа определённой группы элементов посредством создания её в MSC PATRAN.

К недостаткам работы программного комплекса можно отнести отсутствие визуализации, которая требует дополнительной доработки.

#### Библиографический список

1. **Справочник** по композиционным материалам: в 2-х кн. С74 Кн. 2/Под ред. Дж. Любина; Пер. с англ. А. Б. Геллера и др.; Под ред. Б. Э. Геллера. – М.: Машиностроение, 1988. – 584 с.: ил.
2. **Хореев, В.Д.** Самоучитель программирования на VBA в Microsoft Office/. —Киев.: Юниор, 2001. —320 с., ил.

*В.Е. Тунцев, студ.; рук. М.А. Ноздрин, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, Иваново)*

## РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СТОЙКИ ШАССИ САМОЛЕТА

Большая часть работ, посвященных моделированию динамических процессов шасси самолета, рассматривает аналитическое моделирование динамических процессов. Однако взаимное влияние шероховатости взлетно-посадочной полосы, частоты работы системы ABS (англ. *Anti-lock braking system* – антиблокировочная система торможения), скорости самолета, жесткостных и демпферных свойств стойки шасси на износ авиационных шин и аэродромных покрытий изучено недостаточно. Таким образом, тема дипломного проекта представляет собой актуальную и востребованную задачу.

Объектом исследования данной работы является стойка и пневматик двухколесного шасси узкофюзеляжного среднемагистрального пассажирского самолета, аналога Airbus A320.

Моделирование динамических процессов происходит по трем параметрам:  $Y_a(t)$  – зависимость расстояния от верхней точки стойки до оси колеса от времени;  $h(t)$  – зависимость расстояния от оси колеса до аэродромного покрытия от времени;  $\varphi(t)$  – зависимость угла поворота колеса от времени (рис.1).

Для описания данных параметров используется система трех дифференциальных уравнений [1], состоящая из уравнений описывающих вертикальные и горизонтальные воздействия от конструкции самолета на стойку, а так же воздействие аэродромного покрытия на колесо шасси.

Целью работы является создание программного модуля для решения системы уравнений и нахождения трех параметров  $y_a(t), h(t), \varphi(t)$  на промежутке от 0 до 9 секунд.

В качестве численного метода решения системы используется итерационный численный метод Ньютона. Данный метод состоит в выборе начального приближения и цикличного уточнения данного приближения для заданной точности. [2]

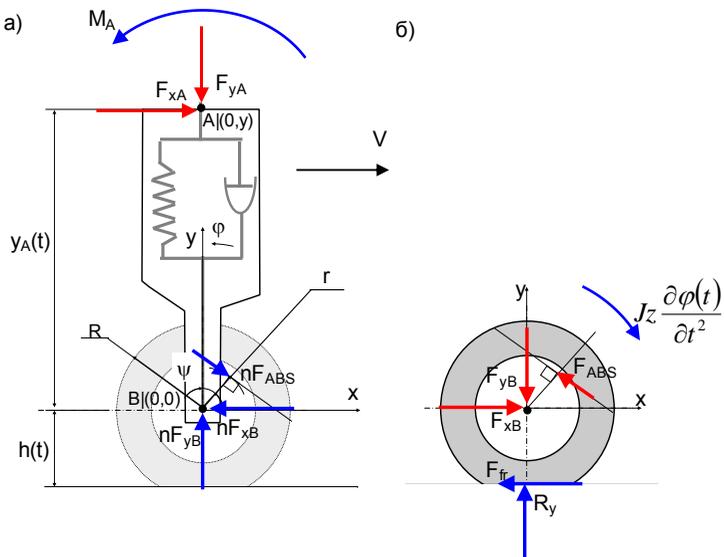


Рис. 1. Математическая модель шасси: а) стойка; б) колесо

Решение реализуется в программной среде Visual Basic Application for MS Excel.

Результатами вычислений разработанной программы являются массивы чисел. На рис. 2 представлены графики, построенные по полученным массивам.

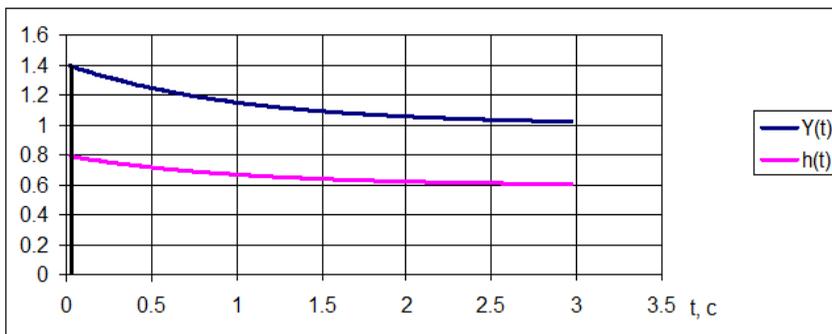


Рис. 2. Графические зависимости координаты верхней точки стойки и координаты оси колеса от времени

Программный модуль позволяет отслеживать вертикальные перемещения важных точек шасси самолета во время всего посадочного и тормозного пути с учетом взаимодействия аэродромного покрытия и колеса шасси, частоты работы ABS, скорости самолета, жесткостных и демпферных свойств стойки шасси.

#### Библиографический список

1. **Кашфразиев, Ю.А.** Влияние покрытия на износ шин / Ю.А. Кашфразиев, Б.В. Шептунов, Ю.М. Шептунова / Аэропорты. – 2013. – № 2[59]. – С. 14–17.
2. **Бахвалов, Н.С.** Численные методы. М.: Бином. / Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. / Лаборатория знаний, 2003. - 632 с.

*И.С.Цветков, студ.; рук. Л.Н. Крайнова, доц., к.т.н.  
(ИГЭУ, Иваново)*

## **ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ЛОПАТКИ ПОСЛЕДНЕЙ СТУПЕНИ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ**

Лопатки паровых турбин – это одна из наиболее нагруженных и ответственных деталей турбины. Воздействие высоких температур пара, вибрационные и динамические нагрузки, нестабильность режима нагрева, остановки и быстрые запуски турбины вызывают в лопатках изгиб, кручение, растяжение и колебание. Создание новых рабочих лопаток с большой площадью выхлопа – сложная комплексная задача.

Целью работы является оценка статической и динамической прочности «сверхдлинной» лопатки последней ступени паровой турбины. Трехмерная модель лопатки разработана ОАО НПО ЦКТИ им. Ползунова в пакете Solid Works. Длина лопатки  $l=1480$ мм, угловая скорость вращения  $\omega = 314$  рад/сек, материал лопатки титановый сплав ВТЗ-1. Профильная часть лопатки представляет собой закрученный стержень переменного сечения, утончающийся от корня к периферии. Лопатка испытывает действие центробежных сил вращения.

Один из этапов проектирования последней ступени – расчет прочности. В работе проведены исследования лопаток под воздействием напряжений двумя методами: аналитический метод определения растягивающих напряжений в лопатке постоянного профиля и расчет с помощью программного комплекса ANSYS.

Напряжения растяжения определяются по формуле:

$$\sigma = N(z) / F(z),$$

где  $N(z)$  – растягивающее усилие в сечении с координатой  $z$ ;  $F(z)$  – площадь поперечного сечения лопатки в точке оси стержня с координатой  $z$ .

В корневом сечении лопатки напряжения достигают максимального значения равного 1090 МПа.

Центробежные силы инерции оказывают также влияние на напряжения при изгибе рабочих лопаток. Направление и величина этого воздействия зависит от первоначальной изогнутости лопатки и ее установки. В поле центробежных сил происходит также закрутка рабочих лопаток. Аналитический расчет прочности затруднен сложностью геометрической формы лопатки и нелинейным распределением

нагрузки. Применение современных расчетных комплексов упрощает задачу.

Величина максимальных напряжений по всей длине лопатки не превышает 1050 МПа, за исключением напряжений у корня лопатки в месте хвостового соединения, в связи с чем, необходимо сделать вывод о дополнительном расчете лопатки вместе с хвостовиком.

Задачей динамического расчета является определение собственных частот и форм колебаний лопатки. При совпадении частот собственных колебаний лопатки с частотами вынужденных колебаний наступают резонансные колебания, которые могут привести к разрушению лопатки. Опасных явлений можно избежать путем изменения частоты собственных колебаний лопаток или частоты и величины возбуждающей силы.

В работе приводятся результаты аналитического расчета собственных частот колебаний незакрученной лопатки постоянного профиля.

Уравнения движения в плоскости *хоx* и *хоу* незакрученной лопатки постоянного сечения с учетом вращения получаем из уравнения статического изгиба лопаток, добавляя по принципу Даламбера в число внешних нагрузок инерционные нагрузки.

При вращении лопатки центробежные силы инерции вызывают снижение поперечной деформации лопатки, вызываемые колебаниями, как бы увеличивают поперечную жесткость лопатки и поэтому в условиях вращения частоты лопаток выше, чем у невращающихся лопаток. С увеличением собственных частот колебаний зависимость частот от вращения лопатки снижается.

По вибрационной диаграмме видно, что низшая частота колебаний лопатки на рабочей частоте вращения находится выше возмущения первой кратности. При кратности гармоники  $k = 1-5$  запас между рабочей и резонансной частотами вращения достаточен для обеспечения надежной работы лопаток. Таким образом, резонансные режимы работы лопаток находятся за пределами рабочего диапазона частот вращения ротора. Резонансы кратности больше шестой возможны, но как правило, не опасны вследствие низкого уровня амплитуд возмущающих сил.

#### Библиографический список

1. Костюк А.Г. Динамика и прочность турбомашин: Учебник для вузов. — 2-изд., перераб. и доп. — М.: Издательство МЭИ, 2000. — 480 с.
2. Воробьев Ю.С., ШоррБ.Ф. Теория закрученных стержней. -Киев: Наук. Думка, 1983,- 188 с.

*А.М. Селезнев, студ.; рук. Ф.Б. Огурицов, доц., к.т.н.  
(ИГЭУ, Иваново)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ВИБРОДИАГНОСТИКИ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ**

Разнообразные подшипники качения – шариковые и роликовые, радиальные и радиально-упорные, однорядные и двухрядные и т. д. широко применяются в оборудовании различного назначения. В настоящее время на долю электрических и виброакустических методов диагностирования приходится около 60 % изобретений, что подтверждает целесообразность исследования электрических и вибрационных процессов в подшипниках. Поэтому, вопросы оценки технического состояния и диагностики подшипников, прогнозирования ресурса их работы являются актуальными.

На кафедре ТиПМ проводились исследования с целью анализа возможностей диагностики контактного износа на базе статистического анализа радиально шариковых подшипников различных классификаций. Цель данной работы – выявление статистических характеристик радиально-упорных роликовых, радиально-упорных шариковых, самоцентрирующихся шариковых двухрядных подшипников, а также оценка влияния смазки на их работу.

На первом этапе произведен патентный обзор на наличие патентной новизны. Прямого аналога не выявлено, поэтому диагностирование на базе статистического анализа обладает патентной новизной.

На втором этапе работы проведены экспериментальные исследования.

Функциональная схема стенда отображает систему, предназначенную для снятия и обработки вибрационных параметров исследуемого подшипника, основными элементами которой являются: блок питания; стенд для создания условий работы подшипника максимально приближенным к реальным; датчик вибрации; усилитель, предназначенный для усиления сигнала с вибродатчика; фильтр – стандартный, третьоктавный, с регулируемой полосой пропускания частот; S-Recorder-L – цифровой многоканальный самописец.

Программная часть комплекса, отвечающая за первоначальную обработку данных с датчика вибрации, реализована цифро-

вым многоканальным самописцем «S-Recorder-L». Программа позволяет осуществлять ввод данных с платы NVL 08 в цифровой массив, выделение амплитуды гармоник сигналов поступающих с датчика и выводит график высокочастотного процесса на экран компьютера.

Проведение эксперимента проходило в два этапа. На первом этапе трижды снимались характеристики со смазанных подшипников, каждый раз увеличивая скорость вращения. На втором этапе эксперимента тем же способом исследовались “сухие” подшипники.

Перед проведением эксперимента все три подшипника были смазаны, настроены коэффициент усиления и полоса пропускания частот фильтра. После включения стенда устанавливалась первая рабочая частота вращения, и для установленного подшипника снимался 10 секундный вибрационный сигнал. Результаты записывались в файл в виде временного и амплитудного массива цифр, состоящего примерно из миллиона значений. По завершению диагностики одного подшипника, стенд отключался, и производилась замена подшипника. Все результаты записывались в массив файла.

Результатом работы программы по первоначальной обработке данных при снятии вибрационного сигнала с подшипника является файл со значениями амплитуд ударных импульсов. Числовые значения амплитуд расположены в файле построчно, одно под другим. Для согласования с системой MathCad файл переименовывается – к имени файла добавляется тип расширения «dat». Далее с помощью функции «мастер импорта данных» происходит считывание данных из файла.

В полученном массиве необходимо выделить локальные максимумы, то есть найти пиковые значения ударных импульсов, для этого нормированы массив и выделена огибающая.

Выделение локальных максимумов происходило из условия, что значение элемента массива должно быть больше двух соседних значений элементов с обеих сторон от  $n$ -элемента. Все не подходящие под локальные максимумы элементы обнуляются. Далее строится график локальных максимумов, наложенный на исходный массив (рис. 1).

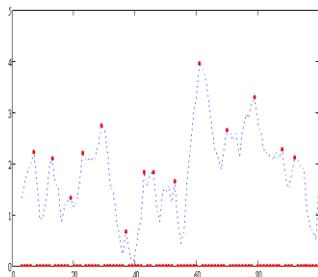


Рис.1. График выделения максимумов

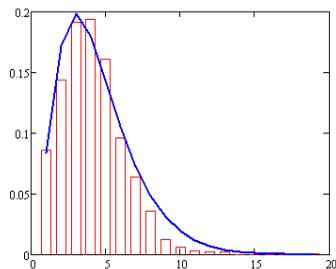


Рис.2. Гистограмма регрессии

Гистограммой называется график, аппроксимирующий по случайным данным плотность их распределения. При построении гистограммы область значений случайной величины разбивается на заданное число сегментов, а затем подсчитывается число попаданий в каждый сегмент. Для построения гистограммы диапазон значений элементов массив  $G$  был разбит на 20 интервалов (рис. 2). Построение осуществлялось с помощью функции  $\text{hist}(\text{int}, G)$ .

Полученные данные заносились в таблицу и для каждого подшипника проводилось сравнение.

*С. Е. Воробьев, студ.; рук. А.Б. Колобов, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, Иваново)*

## РАСЧЕТ ЧАСТОТНЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ДЕФЕКТОВ РОТОРНЫХ МАШИН

В качестве объекта принят двухступенчатый цилиндрический ко-созубый горизонтальный редуктор общепромышленного назначения и приводимый трехфазный асинхронный электродвигатель.

Для выполнения диагностики необходимо, что бы объект обладал контрольпригодностью, т. е. его конструкция позволяла выполнять вибродиагностические процедуры. Большинство проектных и конструкторских разработок в настоящее время не ставят своей целью создание объектов, обеспечивающих контролепригодность, что существенно снижает, а в ряде случаев делает невозможным проведение вибродиагностики.

На основе исходных данных о параметрах редуктора была разработана конструкция, которая оптимально приспособлена для проведения вибродиагностики, прежде всего за счет выполнения конструкции подшипниковых узлов редуктора, облегчающей возможность установки вибродатчиков в трех ортогональных направлениях. На крышках подшипников предусмотрены плоские посадочные участки для установочных магнитов и отверстия с резьбой М5 для установочных шпилек датчиков.

Вторым системным недостатком проектно-конструкторских работ является отсутствие рекомендованных к использованию виброанализирующих технических средств. Выбор приборных средств произведен исходя из разрешающей способности прямого спектрального анализа и спектра огибающей вибрации так, чтобы имелась возможность выделить информационные частоты.

Для этого произведен расчет информационных частот дефектов редуктора и электродвигателя. После анализа рассчитанных частот появления дефектов можно отметить, что общий диапазон изменения частот от 6,2 до 5460 Гц. Весь частотный диапазон можно условно разделить на 3 полосы: низкочастотный - до 100 Гц, среднечастотный от 100 до 2000 Гц и высокочастотный - более 2000 Гц. Наибольшее количество частот располагается в среднечастотном диапазоне. для него произведен расчет и построены гистограммы распределения частот (рис. 1).



Рис. 1. Гистограмма распределения информативных частот в СЧ диапазоне для зубчатой передачи

Из анализа гистограммы видно, в каждой из групп в одну полосу частот шириной 10 Гц могут попадать от 1 до 23 частот, что затрудняет диагностику при подобной ширине полосы частот. Поэтому ширина спектральной линии виброанализатора должна быть <10 Гц.

Аналогично построены распределение частот для подшипников качения и электродвигателя с шириной спектральной линии 10 и 5 Гц.

Для подшипников наибольшая достоверность при диагностировании дефектов будет при частоте разрешения 2 Гц, а для электродвигателя можно ограничиться разрешением не более 5 Гц.

На основе анализа гистограмм установлено, что для приемлемой достоверности диагностики большинства дефектов необходимо использовать виброанализирующую аппаратуру, обеспечивающую разрешающую способность спектра не более 5 Гц. По техническим, функциональным и эргономическим характеристикам предпочтение отдается виброанализатору Агат-М.

Таким образом, в результате выполнения работы был предложен подход к выполнению проектной работы с учетом разработки рекомендаций по диагностированию редуктора в составе электропривода с целью повышения надежности в эксплуатации.

*Е.А. Сидякина, студ. (ИГЭУ, г. Иваново);  
К.Ю. Соколов, студ. (ИВГПУ, г. Иваново);  
рук. В.А. Огурцов, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **КИНЕТИКА ГРОХОЧЕНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ**

Грохочение является механическим процессом разделения на фракции сыпучих материалов (щебня, гравия, строительного песка и других) на просеивающей поверхности вибрационного грохота. Если рассматривать наиболее характерное для промышленных условий непрерывное грохочение, то с уменьшением толщины слоя снижается производительность грохота, а увеличение времени грохочения может быть достигнуто только за счет увеличения длины грохота, то есть его габаритов. Поэтому поиск наилучших условий для достижения высокой степени извлечения нельзя вести без накладываемых ограничений на производительность грохота и его габариты.

Пусть полная поверхность сита грохота и его производительность по исходному материалу заданы. При постоянной скорости материала в питателе постоянным является его проходное сечение. Очевидно, что изменение ширины грохота требует одновременного изменения его длины и высоты слоя материала. При постоянной скорости транс-

порта материала вдоль грохота, увеличение его длины увеличивает степень извлечения. С другой стороны, увеличение высоты слоя материала отрицательно сказывается на степени извлечения, так как частицам требуется большее время для достижения поверхности сита. Для количественной оценки этих разнонаправленных влияний разработана универсальная математическая модель кинетики классификации сыпучих материалов на вибрационных грохотах различных модификаций и типов, основанная на теории цепей Маркова, учитывающая влияние режимных и конструктивных факторов процесса грохочения на его характеристики.

Экспериментально подтверждена возможность использования результатов тестовых экспериментов по периодической классификации натуральных сыпучих материалов для расчета основных конструктивных и технологических параметров промышленных грохотов. Выявлено, что при заданной площади сита грохота и производительности существует оптимальное соотношение длины и ширины, обеспечивающее максимальную степень извлечения. Это соотношение зависит от амплитуды и частоты колебаний грохота и его универсальное значение не может быть рекомендовано, но предложен метод, позволяющий определять его в каждом конкретном случае.

*А.А. Навдаев, студ. (ИГЭУ, г. Иваново);  
И.Н. Гоглев, студ. (ИВГПУ, г. Иваново);  
рук. В.А. Огурцов, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МИГРАЦИИ ЧАСТИЦ ПО ВИБРООЖИЖЕННОМУ СЛОЮ**

Математические модели процесса движения частиц в виброожиженном слое строятся на основе классического уравнения конвективной диффузии, которое базируется на вероятностном подходе для описания стохастических процессов миграции частиц. Эти процессы наблюдаются как при перемешивании, так и при грохочении сыпучих материалов.

Создана лабораторная установка, в которой исследование закономерностей миграции частиц проходит при одинаковых условиях как для процесса грохочения, так и для процесса перемешивания. Уста-

новка представляет собой рабочий орган, где слой из частиц различной крупности подвергался вибровоздействию.

Для упрощения исследования физической картины процессов фракционирования и перемешивания опыты проводились на двухкомпонентной смеси. Для удобства и наглядности исследования процесс миграции частиц по виброоживленному слою осуществлялся в плоскости экрана, состоящего из прозрачных пластин, расстояние между которыми равнялось толщине одной частицы. Таким образом, получалась плоская картина перемещения частиц при их перемешивании и фракционировании.

В математической модели этих процессов, основанной на теории цепей Маркова, введено понятие «вектор состояния».

Эволюцию вектора состояния определяет выражение, которое описывает распределение мелких частиц в ячейках слоя. Таким образом, вектор состояния моделирует объект исследования – слой сыпучего материала. Лабораторная установка позволяла отслеживать изменение концентрации частиц по слою и исследовать изменение состояния частиц в ячейках слоя.

Матрица переходных вероятностей определяет закономерности движения частиц по слою и изменения их относительной концентрации в ячейках слоя, таким образом, моделирует с помощью стохастических коэффициентов вибровоздействие рабочего органа на слой сыпучего материала. То есть матрица переходных вероятностей моделирует вибрационный грохот или аппарат для перемешивания частиц без дополнительных внутренних устройств.

Если содержание мелких частиц в исходной смеси велико, то, как при процессе фракционирования, так и при процессе перемешивания происходит уменьшение скорости сегрегации при перемещении мелких частиц к нижней границе слоя. Это обусловлено тем, что мелкие частицы, находящиеся в поле силы тяжести, подвергаются случайным соударениям с крупными частицами сыпучей среды. Это определяет осредненное перемещение мелких частиц вниз. Через некоторое время происходит их скопление в нижних областях слоя сыпучего материала. Сегрегация мелких частиц в среде, где они находятся в избытке, замедляется.

Совпадение расчетных и экспериментальных данных подтвердили адекватность описания миграции частиц в виброоживленном слое с помощью вероятностной модели.

*Д.С. Сидоров, студ. (ИГЭУ, г. Иваново);  
Е.В. Богданов, студ. (ИВГПУ, г. Иваново); рук. А.П. Алешина, асс.  
(ИВГПУ, г. Иваново)*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ВИБРОГРОХОТАХ**

Существующие в настоящее время методики расчета производительности грохота и эффективности классификации, основаны на эмпирической информации, полученной в результате эксплуатации промышленных грохотов. Они не учитывают многих особенностей процесса и физико-механических свойств сыпучих материалов. В настоящее время классифицирующее оборудование совершенствуется в сторону интенсификации вибровоздействия просеивающих поверхностей грохотов на сыпучий материал. Усложняется траектория колебаний сит, применяется многочастотное виброударное воздействие просеивающих поверхностей на сыпучий материал, используются различные приспособления и механизмы для интенсификации процесса грохочения. Модели, основанные на эмпирических исследованиях, не могут учесть эти особенности. Поэтому создание универсальной и достоверной методики определения основных показателей процесса удобной для инженерных расчетов и не требующей сбора эмпирической информации, полученной с большими материальными и трудовыми затратами, является актуальной задачей.

К основным показателям процесса грохочения относится эффективность классификации (степень извлечения проходových частиц из исходной смеси), под которой понимают отношение массы частиц, прошедших через отверстия сита, к массе частиц того же размера, содержащихся в исходном материале. Считаем, что крупные частицы не попадают в подситовой продукт.

Качество товарного продукта (его гранулометрический состав) зависит от эффективности грохочения. Но полностью качество товарного продукта определяется засоренностью его частицами некондиционного размера, то есть соотношением массы посторонних зерен к массе частиц товарного продукта. Эффективность работы грохота может принимать достаточно высокие значения. При этом засоренность товарного продукта, которая зависит от содержания мелких проходových

частиц в исходном материале, может принимать значения, которые могут быть выше допустимых. Наиболее информативной характеристикой качества продуктов грохочения является кинетика классификации, то есть зависимость степени извлечения проходových частиц от времени классификации, которая определяет конечный гранулометрический состав товарного продукта.

При моделировании кинетики классификации сыпучих материалов используем теорию марковских процессов, учитывающую множество случайных факторов, влияющих на результат грохочения.

Перспективным направлением работы будет исследование процесса грохочения реальных сыпучих материалов. Опыты по периодическому грохочению гравийно-песчаных смесей позволят получить информацию для расчета основных показателей процесса грохочения дробильно-сортировочных заводов, выпускающих сыпучие строительные материалы, где вибрационные грохоты работают на различных стадиях технологической линии. Таким образом, можно прогнозировать результаты работы как отдельных участков цеха сортировки сыпучих материалов, так и всего предприятия в целом. Эмпирическая информация, необходимая для расчёта реальных процессов может быть получена в лабораторных условиях без особых материальных и трудовых затрат.

*А.П. Алешина, асс., М.А. Гриценко, асс.;  
рук. Е.Р. Брик, к. т. н., доц.  
(ИВГПУ, г. Иваново)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ ПЕСЧАНО-ГРАВИЙНЫХ СМЕСЕЙ**

Возрастающие в настоящее время требования к качеству продукции предприятий, производящих сыпучие строительные материалы, к уменьшению затрат электроэнергии на выпуск единицы продукции и к повышению производительности труда определяют необходимость совершенствования технологий, модернизацию оборудования для фракционирования сыпучих материалов.

Анализ научной и патентной литературы показал, что применение узких фракций сыпучих материалов с низким содержанием некондиционных частиц играет важную роль в конечных результатах техно-

гических процессов различных производств. Объемы использования гравия, щебня и песка в качестве сырья для изготовления цементобетонных и асфальтобетонных конструкций постоянно увеличиваются. Это приводит к тому, что в ивановской области возрастает количество карьеров, где производится добыча нерудных строительных материалов. Вновь разрабатываемые месторождения имеют низкое содержание валунов и гравия. Поэтому возникает необходимость переработки сыпучего сырья непосредственно в карьере, где происходит предварительное обогащение сыпучих смесей. Песок и гравий мелких фракций извлекается с помощью грохотов из общей добываемой массы, что позволяет снизить транспортные расходы на доставку сыпучего материала и снизить объем перерабатываемой массы на дробильно-сортировочных заводах или дробильно-сортировочных установках.

Разработка валунно-гравийно-песчаных месторождений в Ивановской области проводится на карьерах, принадлежащих производственному объединению «Ивавтодор» концерна «Росавтодор», ООО «Хромцовский карьер», ТОО «Дорожник», АО «Красный Октябрь», АООТ «ДСУ-1», ГП ДСУ №25, АП «Гаврилово-Посадский ДПМК», АО «Дормостстрой» и другим организациям. Предприятия, ведущие разработку минерально-сырьевых месторождений, сталкиваются с проблемой фракционирования гравийно-песчаных смесей с низким содержанием каменного материала. Так содержание песка по фракции 0-5 мм в добываемом сырье может достигать 85%. Анализ исследований фракционных свойств песчано-гравийных смесей, добываемых в карьерах предприятий нерудной промышленности Ивановской области, показал, что перспективы увеличения запасов строительного камня по геологоразведочным работам на вновь разрабатываемых месторождениях весьма ограничены.

Для сокращения затрат на транспортирование песчано-гравийных смесей от карьера до дробильно-сортировочного завода ООО «Хромцовский карьер» нами предложено использовать технологическую схему предварительного обогащения, состоящую из установленных последовательно грохотов ГИТ-41 и ГИЛ-41, для отбора некондиционных частиц вблизи добычного забоя на вновь разрабатываемом месторождении «Жирславка».

Результаты расчетно-экспериментальных исследований позволили определить следующие показатели процесса фракционирования на грохотах ГИТ-41 и ГИЛ-41: производительность грохота ГИТ-41 – 60 т/час; общая эффективность фракционирования проходовых фракций – 98,6%; засоренность гравия 20-150 мм мелкими частицами – 3,7%;

производительность грохота ГИЛ-41 – 51,2 т/час; общая эффективность фракционирования проходových фракций – 85,7%; засоренность товарного гравия 5-20 мм песком – 4,3%.

*В.М. Седов, студ.;*  
*рук. Л.Б. Маслов, д. ф-м. н., доц.*  
*(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНОЙ ПЕРЕСТРОЙКИ КОСТНОЙ ТКАНИ**

Известно, что живые ткани в процессе своего роста и развития существенным образом реагируют на внешнее силовое поле, в котором они функционируют. Механический фактор оказывает стимулирующее и регулирующее воздействие на специфические клетки тканей, что приводит к запуску и развитию процессов трансформации органа в макроскопическом масштабе. Явление структурной перестройки неразвитой мягкой субстанции в плотную костную ткань происходит в результате дифференциации костных клеток, например, во время восстановления целостности кости после перелома, что приводит к запуску процесса репаративной регенерации кости между костными отломками [1].

Предполагается, что возмущения, вносимые внешней механической нагрузкой в установившееся движение жидкости в транспортной системе кости, могут обеспечивать передачу управляющих сигналов между клетками кости в процессе ее структурной перестройки.

Разработана программа, рассчитывающая структурную перестройку в период 120 дней [2]. Программа позволяет определить физико-механические характеристики костной ткани в процессе регенерации, в частности, упругие модули, плотность, параметры пористости.

Построена конечно-элементная модель кости в зоне перелома с учётом симметрии задачи (рис.1). Модель исследуется под действием вертикальной силы, распределённой по верхней грани (рис.2).

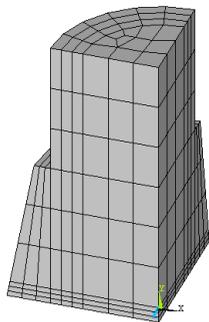


Рис.1 Конечно-элементная модель

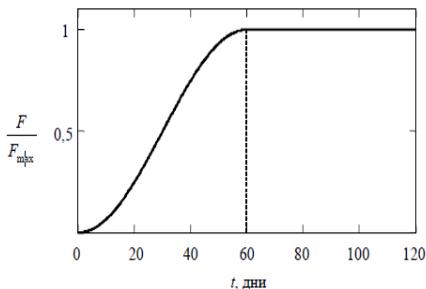


Рис.2 График статической силы F

Планируется работа по анализу влияния параметров приложенной силы на структурную перестройку ткани.

$$F(t, \omega) = F_{cm}(t) + F_{дин}(t) * e^{i\omega t} \quad F_{дин} = k * F_{cm},$$

$$0.01 \leq k \leq 0.5$$

где  $t$  – время (дни),  $\omega$  – частота колебаний динамической составляющей силы (Гц),  $F_{ст}$  – статическая составляющая силы (Н),  $F_{дин}$  – динамическая составляющая силы (Н).

$$E = \frac{m * \omega^2}{2} \Rightarrow E \sim \omega_1^2 \sim \omega_{10}^2 \sim \dots \sim \omega_{100}^2,$$

$$1 \leq \omega \leq 100$$

где  $E$  – энергия колебаний (Дж),  $m$  – масса.

Решается задача подбора оптимальных параметров, при которых процесс регенерации будет проходить наилучшим образом.

#### Библиографический список

1. Математическая модель структурной перестройки костной ткани/ Л. Б. Маслов // ISSN 1812-5123. Российский журнал биомеханики. 2013. Т. 17, № 2 (60): 39–63.
2. Программа трехмерного моделирования физико-механических характеристик костной ткани в процессе регенерации FE3DRPEV: прогр. ЭВМ 2014662247 Рос. Федерация / Маслов Л.Б.; заявитель Маслов Л.Б.; правообладатель ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина» (ИГЭУ). – № 2014660190; заяв. 09.10.14; зарег. в Реестре программ для ЭВМ 26.11.14.

*В.М. Седов, студ.  
рук. Л. Б. Маслов, д. ф-м. н., доц.*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ И ФОРМ КОЛЕБАНИЙ КОНСТРУКЦИИ ФЕРМЕРА

Исходная конструкция представляет собой пространственную ферму, состоящую из стальных труб, и предназначенную для радиотехнических испытаний. Данная конструкция имеет возможность перемещаться по двум направляющим с помощью колёсных тележек и фиксируется в момент измерений. Поскольку масса измерительного прибора сопоставима с массой фермы, задача определения собственных частот актуальна.

Данные для проектирования компьютерной модели были получены при использовании реальных чертежей конструкции. Ферма выполнена из двух видов труб: «основные» – 40x2 мм, «перемычки» – 40x1 мм, которые выступают рёбрами жёсткости. Геометрические характеристики сечений:

- основные трубы: площадь  $A = 1.22 * 10^{-3}, (M^2)$  момент инерции сечения  $Y_{yy} = Y_{zz} = 0.233 * 10^{-7}, (H/M^4)$ ;
- перемычки: площадь  $A = 0.62 * 10^{-4}, (M^2)$  момент инерции сечения  $Y_{yy} = Y_{zz} = 0.121 * 10^{-7}, (H/M^4)$ .

В ходе вычислений представлены расчёты собственных частот и форм колебаний для алюминиевой конструкции. Некоторые свойства материалов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Свойства материалов

| Материал | Плотность(кг/м <sup>3</sup> ) | Модуль Юнга(Па) | Кэф. Пуассона |
|----------|-------------------------------|-----------------|---------------|
| Сталь    | 7800                          | $2 * 10^{11}$   | 0,3           |
| Алюминий | 2700                          | $7 * 10^{10}$   | 0,34          |

При помощи ПК ANSYS была построена 3D модель фермы, с использованием двух узлового элемента BEAM 188. Схема конструкции приведена на рисунке 1.

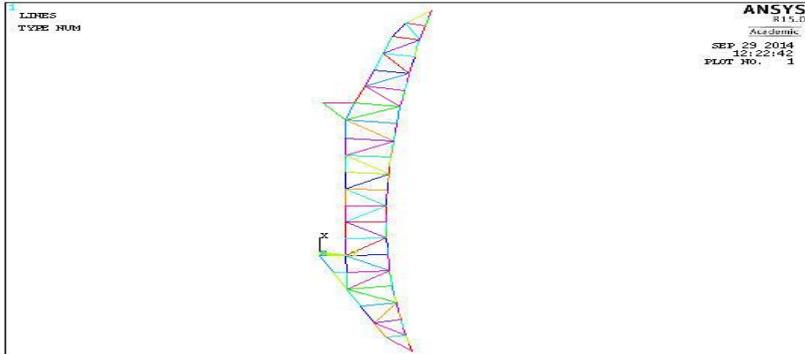


Рис. 1. Компьютерная модель фермы

По результатам модального анализа определены собственные частоты и формы колебаний, рассматриваемой конструкции (рис. 1, рис. 2).

Собственные частоты стальной конструкции – 14,378 и 19,495 Гц, алюминиевой конструкции – 22,257 и 28,642 Гц.

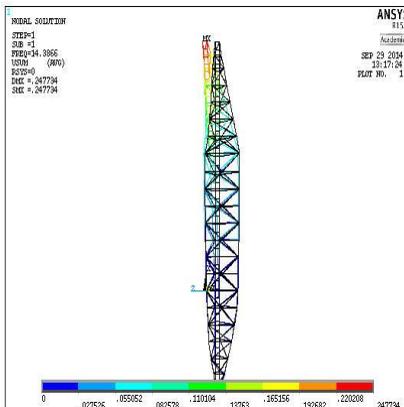


Рис.2. Первая форма колебаний соответствующая  $\omega = 14.378$  Гц

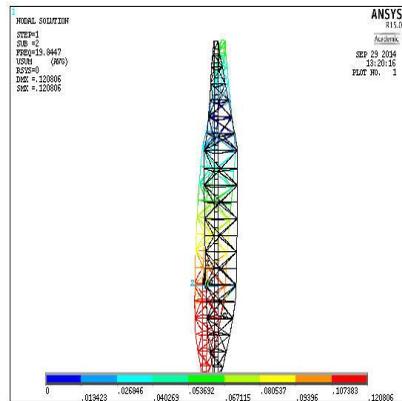


Рис.3. Вторая форма колебаний соответствующая  $\omega = 19.495$  Гц

Данная задача ранее была решена методами механики сплошной среды. Метод решения заключался в том , что ферма принималась как

балка переменной жёсткости. При сравнении результатов, полученных значений собственных частот, обнаружено расхождение не более 15%.

*А. Харькова, студ.; рук. Л.Н. Крайнова, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **РАСЧЕТ ВИБРОИЗОЛИРУЮЩЕГО КРЕПЛЕНИЯ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА САМОЛЕТАХ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

Для планера современного самолета характерно наличие нескольких десятков собственных форм колебаний в низкочастотной части спектра. Взаимодействие некоторых из них с возмущающим воздействием силовой установки через узлы крепления может привести к генерированию в гермокабине высокого уровня низкочастотных составляющих шума, включая инфразвук. Выбор силовой установки для самолетов нового поколения кроме решения проблем внешнего шума требует разработки высокоэффективной системы виброзащиты экипажа и пассажиров для поддержания комфортных условий и обеспечения безопасности полета. Основой виброзащиты должно стать виброизолирующее крепление двигателей, разработанное с учетом реальных динамических характеристик двигателя [1].

Система крепления представляет собой узлы или подкосы, рассчитанные на передачу тяги, развиваемой двигателем, и веса с учетом перегрузок. Рассматриваются следующие расчетные случаи:

- взлетный режим;
- крейсерский режим;
- боковая перегрузка;
- режим полетного малого газа (посадка).

Уменьшение уровня динамического воздействия двигателя на самолет может быть обеспечено встраиванием блоков виброизоляции в узлы крепления. В работе исследуется эффективность применения таких блоков в случае динамической независимости узлов крепления двигателей.

Проведено сравнение результатов динамического расчета упругой подвески, в котором двигатель рассматривается как твердое тело на абсолютно жестком основании по сравнению с жесткостью упругой подвески, и экспериментальных исследований частотных характеристик динамических податливостей двигателей и планера в местах установки двигателей

[2]. Исследование показало, что основой системы виброзащиты должно стать виброизолирующее крепление двигателей, разработанное с учетом реальных частотных характеристик планера и корпусов двигателей самолетов нового поколения.

#### Библиографический список

1. **Бакланов, В.С.** Виброакустика самолетов нового поколения с двигателями большой и сверхбольшой двухконтурности/В.С. Бакланов//Математическое моделирование. 2007. Т.19, №7. С27-38.
2. Исследование динамических и виброакустических характеристик самолета и двигателя методом тарированного тестирования/В.К. Агафонов, В.С. Бакланов, В.М. Вуль [и др.] Доклады VIII конференции по аэроакустике/ ЦАГИ.М.,1990.С.141-144.

*Д. В. Корепов, студ.; рук. И.А. Белов, ст. преп.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## РАЗРАБОТКА ШЕСТИКОМПОНЕНТНОГО ТЕНЗОРЕЗИСТОРНОГО ДАТЧИКА УСИЛИЙ

Анализ напряженного состояния элементов натуральных конструкций требует знания реальных эксплуатационных нагрузок. Для определения этих нагрузок используются датчики – устройства, преобразующие измеряемую величину в электрический сигнал для последующей передачи, регистрации и обработки – в том числе датчики усилий (сил и моментов). По принципу действия классифицируют такие основные типы датчиков усилий: механические, тензорезисторные, пьезоэлектрические [1].

Особую актуальность проблемы создания датчиков приобретают в связи с широким размахом научных исследований (в энергетике, машиностроении, космонавтике) и растущими потребностями материального производства, внедрением автоматизированных систем управления в различных отраслях техники [2].

Целью работы является разработка проекта шестикомпонентного тензорезисторного датчика сил и моментов (6-axis force/moment sensor). Такие датчики позволяют измерять 3 компоненты силы по 3 ортогональным осям и 3 компоненты момента вокруг этих трех осей. Многокомпонентный датчик сил/моментов может применяться в чувствительных звеньях роботов (манипуляторов, роботов-гуманоидов) (рис. 1) [3], в сборочной и технологической оснастке машиностроительного комплекса и т.п.

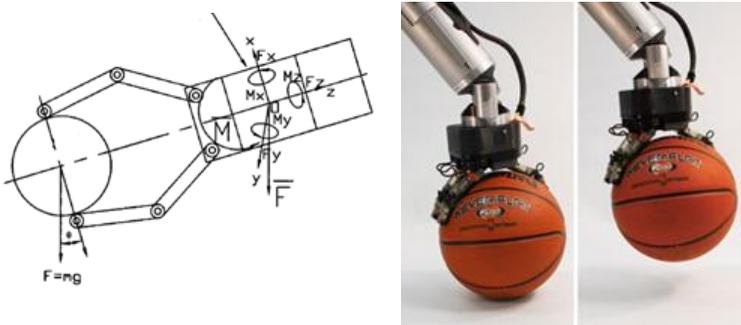


Рис. 1. Устройство захвата робота (robot gripping device) с осязательным элементом

Принцип действия тензорезисторного датчика усилий (рис.2) основан на измерении изменения сопротивления тензорезисторов 2, наклеенных на упругое тело 1, которое под действием силы и/или момента деформируется и деформирует размещенные на нем тензорезисторы. Измерительная цепь 3 преобразует изменение сопротивления  $\Delta R$  в выходной электрический сигнал  $U_{вых}$ . Датчики, построенные на тензорезисторах, имеют высокую надежность, малые габариты и вес.

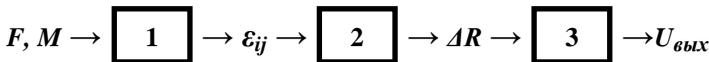


Рис. 2. Структурная схема датчика усилий: 1 – упругий элемент; 2 – тензорезистор; 3 – измерительная цепь

Конструкция упругого элемента (УЭ) датчика усилий может быть выполнена в виде кольца, мембраны, балки, консоли. Широкое распространение получили конструкции в виде стержня (или нескольких стержней). В зависимости от исполнения, датчики усилия можно подразделить на датчики со стержневым, кольцевым, мембранным, балочным упругим элементом.

В тензорезисторных датчиках силы получили распространение две измерительные цепи: неравновесный мост (мост Уитстона) и делитель напряжения. Мост Уитстона представляет собой 4 тензорезистора, соединенных в электрический мост.

Важную роль играет выбор тензорезистора. Чтобы выбрать надежный тензорезистор, необходимо учитывать его электрические характеристики (коэффициент тензочувствительности, температурный

коэффициент, удельное сопротивление) и прочие (материал проводника, подложки, способ аппликации и т.п.) [4].

В ходе работы были определены следующие этапы проектирования: выбор типа УЭ, выбор рабочих параметров датчика, разработка и оптимизация УЭ с использованием КЭ анализа в ANSYS Workbench, подбор тензорезисторов и клея для их аппликации. В результате выполнения всех этапов проектирования разработан проект датчика, предназначенного для измерения сил и моментов по трём координатным осям и оптимизированного по заданным рабочим параметрам.

#### Библиографический список

1. **Экспериментальная механика:** В 2-х книгах: Книга 1. Пер. с англ./ Под ред. А. Кобаяси. М.: Мир, 1990. 616 с.
2. **Проектирование датчиков для измерения механических величин /** Под ред. Е.П. Осадчего. – М.: Машиностроение, 1979. – 480 с., ил.
3. **G.S. Kim**, Design of a six-axis wrist force/moment sensor using FEM and its fabrication for an intelligent robot, *Sensors and Actuators A:Physical*, 133 (1), 27-34.
4. **Руководство по аппликации тензорезисторов.** URL: [kyowa.ru/primeneniye/oblasti-primeneniya-tenzorezistorov/detalnaya-informatsiya-rukovodstvo-po-applikatsii-tenzorezistoro.html](http://kyowa.ru/primeneniye/oblasti-primeneniya-tenzorezistorov/detalnaya-informatsiya-rukovodstvo-po-applikatsii-tenzorezistoro.html).

*Бизяева О.Г., студ.; рук. И.А. Белов, ст. преп.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## РАСЧЁТ РЕЗЬБОВОГО СОЕДИНЕНИЯ ОБСАДНОЙ ТРУБЫ

Развиваясь, человечество начинает использовать все новые виды энергоресурсов. Однако главную роль в обеспечении энергией всех отраслей экономики сегодня играют углеводородные топливные ресурсы. Наибольшее значение в топливной промышленности принадлежит нефтяной и газовой отраслям. Разработка месторождений нефти в основном производится путём строительства нефтяных скважин. Скважины сооружаются путём последовательного бурения горных пород, удаления разбуренного материала и укрепления стенок скважины от разрушения при помощи обсадных труб [1].

В целом, к нефтегазовым трубам относятся две категории изделий:

- нефтепромысловые трубы,
- трубы для транспортировки нефти.

Нефтепромысловая категория включает несколько подвидов:

- обсадные трубы,
- бурильные,

– насосно-компрессорные.



Рис. 1 Обсадная труба

Объектом исследования данной работы являются обсадные трубы (рис. 1). Основная функция этих труб сводится к тому, чтобы удержать стенки скважины от разрушения, смещений пластов и, соответственно, разрушения оборудования нефтедобычи и прекращения трансферта нефти [2]. По ГОСТ 632-80 трубы и муфты к ним должны изготавливаться из стали одной и той же группы прочности. Диаметры таких труб лежат в пределах 114 – 508 миллиметра; толщина стенок трубы – от 5 до 16 мм. При свичивании труб с муфтами должна применяться смазка или другие уплотнители, обеспечивающие герметичность. Трубы с навинченными муфтами должны выдерживать испытания внутренним гидравлическим давлением.

Гидравлическое давление вычисляется по формуле:

$$p = \frac{2 \cdot s \cdot R}{D} \text{ (МПа)},$$

где  $s$  – номинальная толщина стенки (мм),  $D$  – номинальный наружный диаметр трубы (мм),  $R$  – допускаемое напряжение (МПа) [3].

Безопасность опасного производственного объекта – скважины – в значительной степени определяется надежностью крепления её стенок, а именно качеством обсадных труб, правильностью их выбора и монтажа. В значительной степени обсадной колонной определяется и продолжительность «жизнедеятельности» скважины.

Ввиду жесткого ограничения габаритов скважины, на трубы действует широкий спектр внешних нагрузок (вес колонны труб, избыточные наружное и внутреннее давления, изгиб и кручение колонны и др.), достигающих значительной величины. При этом к трубам предъявляются высокие технические требования в отношении статической и

динамической прочности, герметичности (в случае газовой промышленности – газоплотности), износостойкости и др. Наиболее опасными местами обсадной колонны являются резьбовые соединения отдельных её участков.

В работе исследуется компьютерная модель резьбового соединения обсадной трубы. Целью моделирования является оценка возможности выполнения всех предъявляемых к обсадным трубам норм и требований при заданной конструкции и параметрах процесса сборки. Основными требованиями являются герметичность и газоплотность соединения, а также статическая и динамическая прочность.

Исследование ведется в несколько этапов. Первым этапом является моделирование процесса свинчивания трубы и муфты. Моделирование проводится в программном комплексе ANSYS. В ходе вычислительного эксперимента с использованием различных моделей трения определяется момент закручивания, при котором достигается герметичность резьбового соединения, проводится анализ остаточных напряжений.

На втором этапе планируется провести расчёт сборки (части колонны) в нагруженном состоянии с учётом напряжённо-деформированного состояния конструкции, возникающего после процесса сборки. Этот этап позволит определить области допустимых эксплуатационных нагрузок при их различном сочетании.

#### Библиографический список

1. Саркисов Г. М., Сароян А. Е., Бурмистров А. Г., Прочность крепления стенок нефтяных скважин. – М.: Недра, 1977.
2. Трубы обсадные. Руководство по эксплуатации. – Самара: ЗАО «ВНИИТнефть», 2010. URL: [www.tmk-group.ru/media\\_ru/files/87/ruk\\_obs.pdf](http://www.tmk-group.ru/media_ru/files/87/ruk_obs.pdf).
3. ГОСТ 632 - 80. Трубы обсадные и муфты к ним. – М.: Изд-во стандартов, 1998.

*А.В. Швед, студ.; рук. И.А. Белов, ст. преп.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ТРУБОПРОВОДА

Развитие энергетики за последнее годы поставило на повестку дня более жесткие требования к надежности энергетических установок. В связи с этим повысились требования к достоверности расчетов элементов энергетических установок на прочность, причем расчеты на колебания и прочность при вибрационных нагрузках рассматриваются как

неотъемлемая часть общего комплекса прочностных расчетов конструкций. Поэтому важную роль приобретает внедрение в практику проектирования развитых в недавнее время конечно-элементных методов компьютерного моделирования энергетических установок и, в частности, трубопроводов [1].

В настоящей работе рассматривается технологический трубопровод электростанции, по которому передается конденсат из подогревателя высокого давления в деаэратор. Предполагается, что пульсации давления теплоносителя оказывают силовое воздействие на трубопровод, приводя к его вынужденным колебаниям.

С целью исследования опасности вибрационного состояния трубопровода ставятся следующие задачи:

- 1) разработка конечно-элементной модели средствами ANSYS. Сравнение результатов, полученных при моделировании в модуле Piping и при 3D моделировании трубопровода;
- 2) экспериментальное исследование собственных затухающих колебаний исследуемого трубопровода (при наличии возможности, так как эксперимент проводится на выключенном из работы трубопроводе);
- 3) экспериментальное исследование вынужденных колебаний трубопровода в рабочем режиме в точках, доступных для измерения, и пульсации давления теплоносителя (временной сигнал давления записывается синхронно с сигналами виброускорения);
- 4) модальный и гармонический анализ модели исследуемого трубопровода. Расчёт спектров динамических напряжений и выявление наиболее нагруженных участков;
- 5) сравнение результатов, полученных при моделировании и экспериментальном исследовании вибрационного состояния трубопровода.

Экспериментальное исследование вибрации трубопровода осуществляется с использованием следующего оборудования:

- высокочувствительные акселерометры на основе высокотемпературной пьезокерамики;
- фильтры низкой частоты;
- цифровой многоканальный самописец S-Recorder-L;
- портативный компьютер с ПО для регистрации сигналов.

Результатами работы являются: сравнительный анализ эксперимента с данными, полученными при конечно-элементном моделировании. Выявление участков трубопровода, подверженных опасности из-за возникающих вибрационных перемещений. Предложения по возмож-

ной оптимизации конструкции трубопровода, в том числе, его опорно-подвесной системы.

#### Библиографический список

1. Самарин А. А. Вибрации трубопроводов энергетических установок и методы их устранения. – М.: Энергия, 1979. – 288 с., ил.

*А.В. Белов, студ., рук. А.Б. Колобов, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## ВИБРОДИАГНОСТИКА РОТОРНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Работа посвящена модернизации и совершенствованию системы вибромониторинга, разработанной в ФГБОУ ВПО ИГЭУ и реализующей технологию «off-line» мониторинга на основе программной системы «TechCard+», для оценки технического состояния роторных машин. Концепция указанной разработки связана с простым пользовательским интерфейсом ввода исходных данных.

Для повышения эффективности формирования базы данных, расчетных процедур анализа и представления вибросигналов в различных форматах, необходимых для выполнения процедур диагностирования на базе учебно-практического полигона ИГЭУ (газифицированная котельная) произведена установка и отладка, включая создание первичной базы данных результатов измерений и анализа, программного обеспечения АГАТ-ПРОТОКОЛ (ООО «Диамех 2000»).

Программа АГАТ-ПРОТОКОЛ является средством программной поддержки виброанализатора АГАТ («Диамех 2000»). Программное обеспечение позволяет выполнять настройку и программирование виброанализатора АГАТ, а также производить ряд сервисных работ, выполняемых с оборудованием по результатам диагностики, например, балансировки роторов.

Была произведена структуризация всего электромеханического оборудования котельной по функциональным группам и сформирована база данных со строгой иерархической структурой с большим числом подуровней (участки, отделения, механизмы (машины), отдельные узлы машин, контрольные точки измерений вибрации). Например,  $M_{11}$  –  $M_{1k}$  – номера контролируемых машин, территориально или функци-

онально объединенных в технологическую линию (секцию). На каждой из машин выделены точки контроля вибрации (реперные точки). Отдельные технологические секции объединяются в технологические установки.

Принцип технологии «off-line» контроля и иерархичность структуры базы данных поясняется рисунке 1.

Измерение вибрации в контрольных точках машин производится в соответствии с маршрутом измерения (маршрутом сбора данных), который формируется на компьютере и загружается по COM/USB порту в виброанализатор. Маршрутная карта измерений представляет топологическое (по иерархии, принятой в базе данных) последовательное указание: «номер технологической установки» – «номер технологической секции» – «номер контролируемой машины» – «номер контрольной точки на машине», ячеек памяти прибора, в которые будут записываться оцифрованные временные дампы вибросигналов.

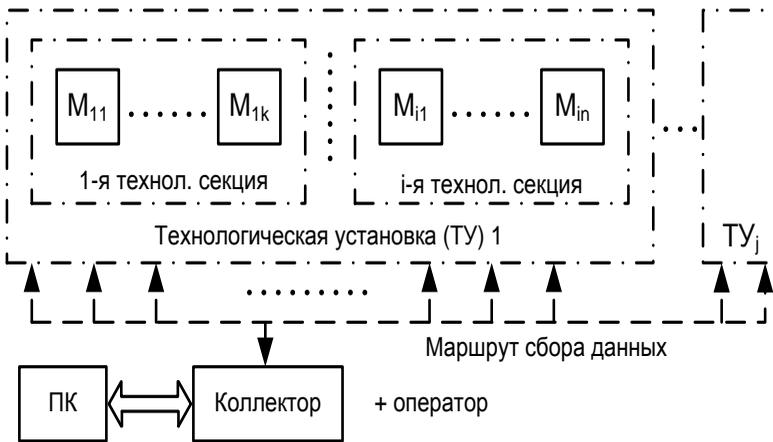


Рис. 1. Технология «off-line» контроля

Создана база графических (формат .jpg) и структурных изображений каждой контролируемой машины с указанием номеров и расположением контрольных точек. На машине расположение и номера контрольных точек помечены и снабжены (при необходимости) деталями для установки вибродатчиков (крепежные шпильки). Создание «маршрутной карты» позволяет распределить области памяти виброанализатора, соответствующие порядковым номерам иерархических уровней.

Программное обеспечение АГАТ-ПРОТОКОЛ позволять производить любые изменения (добавление, удаление, переупорядочение и т.д.) для модифицирования соответствующих маршрутов. Маршрутная карта может быть также распечатана.

Произведено первичное наполнение базы данных измерений в виде дампов, прямых спектров и спектров огибающей вибрации машин.

Произведен анализ и осуществлено практическое применение всех сервисных возможностей программы АГАТ-ПРОТОКОЛ, требуемых при постановке диагноза, в частности:

- построение каскадных спектров;
- формирование оборотно-порядкового спектра;
- совместный вывод различных спектров;
- вывод трендов вибрации и т.п.

Поскольку программа АГАТ-ПРОТОКОЛ не реализует диагностических процедур, то для возможностей дополнительного анализа: выделения ударных импульсов, расчета корреляционных функций, кепстрального анализа и т.п. предусмотрено сохранение информации в формате (.txt).

Полученные в ходе работы результаты могут быть использованы при постановке спецкурсов для учебного процесса подготовки бакалавров и магистров по направлению 010800.

*М.А. Воробьев, студ., рук. А.Б. Колобов, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕФЕКТОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

Объектом диагностирования является центробежный насос с прямым приводом от асинхронного электродвигателя (АЭД).

Вибродиагностика представленного роторного агрегата реализована на следующих принципах:

- осуществляется на основе измерения и анализа параметров вибрации в рабочих режимах эксплуатации;
- выполняется по технологии «off-line» контроля с использованием переносных измерительных средств – виброметров-анализаторов (с возможностью поддержки программной системой ведения базы данных измерений и анализа).

Основными задачами вибродиагностики являются контроль работоспособности и определение вида дефекта.

Задача контроля работоспособности (задача вибромониторинга) предполагает проверку соответствия измеренных значений вибрации в рабочих режимах требованиям ГОСТ ИСО 10816-3. Контроль работоспособности выполняется в двух видах: качественный (допусковый контроль), количественный (оценка запаса работоспособности или остаточного ресурса).

Допусковый контроль в реперных точках дополнен использованием эталонов контурного распределения вибрации для начального определения технического состояния. Распознавание видов технического состояния произведено метрическими методами. Оценена эффективность распознавания при использовании различных метрик: евклидово расстояние, расстояние Хемминга и квадрат расстояния. Наиболее эффективным является метрика Хемминга.

Оценка остаточного ресурса проводилась на основе регрессионной модели. Результаты являются основой для проведения технического обслуживания агрегата.

Собственно задача диагностики решается в том случае, если запас работоспособности агрегата снизился или объект имеет ограниченную работоспособность согласно ГОСТ ИСО 10816. При этом производится:

- определение вида дефекта или совокупности дефектов, приведших к недопустимому снижению запаса работоспособности, и оценка глубины развития дефекта для выдачи рекомендаций по объему предстоящих ремонтных работ;
- назначение, при необходимости, дополнительных вибродиагностических процедур или испытаний при разных режимах работы агрегата для уточнения диагноза;
- выдача заключения о неработоспособном (предельном) состоянии с рекомендациями о немедленной аварийной остановке агрегата или переводе его в резерв.

Основной задачей диагностики является идентификация причин роста вибрации (до 1000 Гц), зафиксированной при вибромониторинге.

Произведен расчет частотных признаков вибрации распространенных дефектов центробежного насоса: гидродинамическая неуравновешенность рабочего колеса; неоднородность потока и появление кавитации; автоколебания ротора с рабочим колесом в потоке перекачиваемой жидкости; бой вала рабочего колеса; дефекты лопастей рабочего колеса.

Отмечено, что гармоника лопаточной частоты в спектре вибрации насосов присутствует всегда и при небольшой амплитуде не является признаком дефектов. Признаками появления дефектов являются:

- устойчивый рост амплитуды на лопаточной частоте;
- появление в спектре высших гармоник лопаточной частоты;
- возникновение боковых составляющих вокруг гармоник лопаточной частоты, сдвинутых на частотный шаг, кратный оборотной частоте вала.

Шаг смещения боковых составляющих может быть не кратен оборотной частоте при различных несимметриях, например при неодинаковом шаге лопаток по окружности колеса или лопаток входного направляющего аппарата. При этом боковые составляющие слева и справа от лопаточных гармоник могут быть взаимно несимметричны по частоте.

- Произведен расчет частотных признаков вибрации дефектов АЭД:
- дефекты обмоток статора и ротора;
  - статический и динамический эксцентриситеты зазора;
  - несимметрия напряжения и нелинейные искажения напряжения питания.

- Также были произведены расчеты частотных признаков дефектов:
- опор валов агрегата – подшипников качения насоса и АЭД;
  - соединительной упругой муфты;
  - сопряжения валов агрегата (различного вида расцентровок);
  - опорной рамы агрегата и установочного фундамента.

Для реализации задач вибродиагностики на основе анализа технических характеристик, произведен выбор необходимой измерительно-анализирующей аппаратуры.

Полученные в работе результаты могут быть использованы при постановке спецкурсов для учебного процесса подготовки бакалавров и магистров по направлению 010800.

*В.В. Иванова, студ., рук. А.Б. Колобов, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ВЕРОЯТНОСТНЫЙ РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТНЫХ ПРИЗНАКОВ ДЕФЕКТОВ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ**

В качестве объекта принят двухступенчатый цилиндрический косо-зубый редуктор общепромышленного назначения приводимый трех-фазным асинхронным (АЭД) электродвигателем.

Проведен статистико-вероятностный расчет контактной и изгибной прочности ступеней зубчатой передачи при условиях нормального распределения действующих в передаче напряжений и пределов выносливости под рекомендуемые коэффициенты запаса. Оценено изменение вероятности работоспособного состояния в зависимости от дисперсии нагрузочных характеристик и предела выносливости. Установлены предельные границы изменения случайных величин для обеспечения требуемого уровня надежности.

Для выполнения диагностики технического состояния необходимо, чтобы объект обладал контролепригодностью, т. е. его конструкция позволяла бы выполнять вибродиагностические процедуры. Большинство проектных и конструкторских разработок в настоящее время не ставят своей целью создание объектов, обеспечивающих контролепригодность, что существенно снижает, а в ряде случаев, делает невозможным проведение вибродиагностики. Поэтому была разработана конструкция, которая оптимально приспособлена для проведения вибродиагностики, прежде всего, за счет компоновки подшипниковых узлов, облегчающей возможность установки вибродатчиков в трех ортогональных направлениях. На крышках подшипников предусмотрены плоские посадочные участки для крепежных магнитов и отверстия с резьбой М5 для установочных шпилек вибродатчиков.

Вторым системным недостатком проектно-конструкторских работ является отсутствие рекомендованных к использованию виброанализирующих технических средств. В работе выбор приборных средств произведен исходя из разрешающей способности прямого спектрального анализа при выполнении условия выделения максимального числа информативных частот дефектов. Для этого произведен расчет частот дефектов редуктора и электродвигателя. После анализа рассчитанных частот появления дефектов можно отметить, что общий диапазон изменения частот от 6,2 до 5460 Гц. Весь частотный диапазон

можно условно разделить на 3 полосы: низкочастотный (НЧ) - до 100 Гц, среднечастотный (СЧ) от 100 до 2000 Гц и высокочастотный (ВЧ) - более 2000 Гц. Распределение вероятностей появления признаков дефектов в диапазонах приведены на рисунке 1.

Из полученных данных видно, что большее количество частот дефектов зубчатой передачи находится в СЧ диапазоне, подшипников качения (при уже развитых дефектах) - в НЧ диапазоне. Частоты дефектов АЭД примерно одинаковы как в СЧ, так и в ВЧ диапазонах.

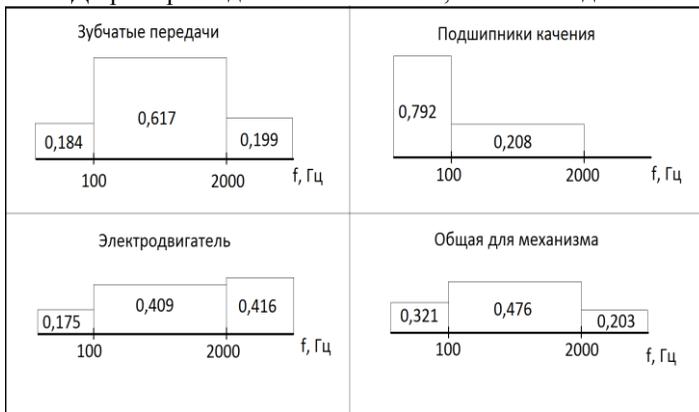


Рис. 1. Вероятности появления признаков дефектов в частотных диапазонах

Наибольшее количество частот располагается в СЧ диапазоне, для которого приведены гистограммы распределения информативных частот (рис. 2).



Рис. 2. Распределение информативных частот в СЧ диапазоне зубчатой передачи

Из анализа гистограммы видно, в каждой из групп в одну полосу частот шириной 10 Гц могут попадать от 1 до 23 частот, что затрудняет диагностику. Поэтому ширина спектральной линии виброанализатора должна быть не более 10 Гц, для подшипников – не более 2 Гц, а для АЭД можно ограничиться разрешением не более 5 Гц.

**СЕКЦИЯ 25**

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ  
В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ**

Председатель – д.т.н., профессор **Мизонов В.Е.**

Секретарь – к.т.н., доцент **Митрофанов А.В.**

*С.А. Лебедев, студ.; рук. д.т.н., проф. В.Е. Мизонов,  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

**ЯЧЕЕЧНАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПРИ  
ТЕМПЕРАТУРОЗАВИСИМЫХ СВОЙСТВАХ СРЕДЫ**

Адекватный расчет процессов теплопереноса необходим в энергетике, строительстве, химической технологии и других отраслях. Важной составной частью процессов теплопереноса является передача теплоты теплопроводностью. Методы аналитического решения линейного уравнения теплопроводности, когда все теплофизические свойства среды считаются постоянными, достаточно хорошо разработаны. Однако для ряда новых материалов, а также моделирования процессов тепломассопереноса это допущение уже не является приемлемым и приходится переходить к численным методам, одним из которых является ячеечное моделирование.

Одномерный объект длиной  $L$ , в котором протекает процесс, разбит на  $m$  ячеек длиной  $\Delta x=L/m$ . Тепловое состояние процесса представлено вектором-столбцом теплоты  $\mathbf{Q}=\{Q_j\}$ ,  $j=1,2,\dots,m$ . Процесс наблюдается в дискретные моменты времени  $\tau_k=(k-1)\Delta\tau$ , где  $k$  – номер временного перехода,  $\Delta\tau$  – его продолжительность. Фрагмент цепи ячеек, моделирующей теплопроводность, показан на рис. 1.

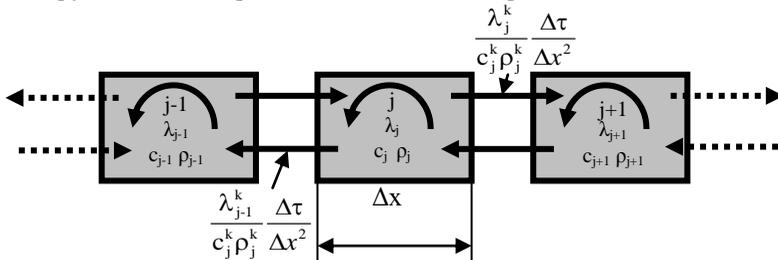


Рис. 1. Фрагмент цепи, моделирующей теплопроводность

Основным кинетическим уравнением процесса является рекуррентное матричное равенство

$$\mathbf{Q}^{k+1} = \mathbf{P}_Q^k (\mathbf{Q}^k + \Delta \mathbf{Q}_e^k), \quad (1)$$

где  $\Delta \mathbf{Q}_e^k$  – вектор внешних источников теплоты,  $\mathbf{P}_Q^k$  – матрица теплопроводности.

При известном векторе теплоты вектор температуры рассчитывается по формуле

$$\mathbf{t}^k = \mathbf{Q}^k \cdot \mathbf{c}^k \cdot \mathbf{p}^k / \Delta x, \quad (2)$$

где  $\mathbf{c}^k$  и  $\mathbf{p}^k$  – векторы удельной теплоемкости и плотности, а оператор  $\cdot$  означает поэлементное деление векторов.

В равенствах (1) и (2) подчеркнuto, что все теплофизические свойства могут меняться от ячейки к ячейке и от перехода к переходу. Наиболее принципиально переменность свойств по длине цепи отражается на матрице теплопроводности  $\mathbf{P}_Q^k$  – трехдиагональной матрице, где в каждом столбце на главной диагонали стоят доли теплоты, остающейся в соответствующих ячейках в течение временного перехода, а выше и ниже их – доли теплоты, переносимой вперед и назад, соответственно. Последние должны рассчитываться именно так, как это показано на рис.1.

Матрица  $\mathbf{P}_Q^k$  сформирована для изолированного по торцам стержня. Если на его краях присутствует теплоотдача (краевые условия 3-го рода), то ее учет осуществляется вектором внешних источников  $\Delta \mathbf{Q}_e^k$ , у которого в данном случае не равны нулю только первый и последний элементы

$$\Delta Q_1^k = \alpha_1 (t_{out1} - t_1^k) \Delta \tau, \quad (3)$$

$$\Delta Q_m^k = \alpha_2 (t_{out2} - t_m^k) \Delta \tau, \quad (4)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи с соответствующей стороны,  $t_{out}$  – температуры окружающих сред.

Если  $\lambda = \lambda(j)$ ,  $c = c(j)$  и  $\rho = \rho(j)$ , то описанная выше модель описывает линейную теплопроводность в многослойном стержне (в том числе, с

непрерывно меняющимися по длине свойствами). Если  $\lambda=\lambda(j,t)$ ,  $c=c(j,t)$  и  $\rho=\rho(j,t)$ , то модель описывает нелинейную теплопроводность.

При постоянной  $\lambda$  асимптотическое распределение температуры является линейным (кусочно-линейным для составной стенки); при  $\lambda=\lambda(t)$  оно выпуклое или вогнутое в зависимости от характера  $\lambda(t)$ . При этом температуры в обоих случаях могут различаться существенно, что особенно важно при одновременном протекании массопереноса или химических реакций.

*Плаксин А.В., студ.; рук. к.т.н., доц. Митрофанов А.В.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЖФАЗНОГО ТЕПЛООБМЕНА В КИПЯЩЕМ СЛОЕ

Рассматриваемая в настоящей работе модель внутреннего теплообмена в кипящем слое основана на теории цепей Маркова. Слой разбивается на цепь малых ячеек, из которых выделяется две параллельных цепи: одна для моделирования миграции частиц в слое, а другая – для движения газа [1,2]. При наличии теплообмена между газом и частицами происходит поперечная передача теплоты между сходственными ячейками цепей и продольный её перенос частицами и газом вдоль соответствующих цепей.

Распределение температуры вдоль цепей может быть описано векторами температур  $T_p$  и  $T_g$ , а векторы текущих запасов теплоты в ячейках рассчитаны как  $Q_p=c_p S_p \cdot T_p$ ,  $Q_g=c_g S_g \cdot T_g$ , где  $c_p$  и  $c_g$  – теплоемкости частиц и газа,  $S_p$  и  $S_g$  – содержания частиц и газа в ячейках, в общем случае переменные по высоте слоя, символ « $\cdot$ » означает поэлементное умножение векторов. Эволюция теплового состояния цепей описывается рекуррентными матричными равенствами, связывающими последовательные состояния цепей через промежуток времени  $\Delta t$  [1]:

$$Q_p^{N+1}=P_p^N(Q_p^N+\alpha \cdot F \cdot (T_g^N - T_p^N)\Delta t), \quad (1)$$

$$Q_g^{N+1}=P_g^N(Q_g^N - \alpha \cdot F \cdot (T_g^N - T_p^N)\Delta t + Q_{gf}), \quad (2)$$

где  $\alpha$  – вектор коэффициентов теплоотдачи от газа к частицам,  $F$  – вектор полных поверхностей теплообмена в ячейках,  $Q_{gf}$  – вектор подачи теплоты с входящим газом при его температуре  $T_{g0}$ , имеющий один

ненулевой элемент  $G_g T_{g0} c_g \Delta t$  для первой ячейки. Матрицы  $\mathbf{P}_p^N$  и  $\mathbf{P}_g^N$  описывают продольное перемещение частиц и газа и их теплоты вдоль цепей. Матрица  $\mathbf{P}_p^N$  содержит вероятности переходов за время  $\Delta t$  из данной ячейки во все другие ячейки цепи, матрица  $\mathbf{P}_g^N$  содержит доли газа, переносимого в течение этого времени в соседние по ходу ячейки. Правила построения этих матриц описаны в работах [1,2].

При моделировании теплообмена в экспериментальной установке использовалось полученное эмпирическое соотношение

$$Nu=0,018Re^{0,991}, \quad (3)$$

где  $Re=w\delta/\nu$  – критерий Рейнольдса ( $w$  – локальная скорость обтекания частиц газом, разная в разных ячейках),  $\delta$  – средний диаметр ожигаемой фракции,  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости газа),  $Nu=\alpha\delta/\lambda$  – критерий Нуссельта ( $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности).

Сама экспериментальная установка представляла собой конический реактор кипящего слоя с углом раскрытия  $8^\circ$  на сторону и газораспределительной решеткой диаметром 100 мм. Нагнетаемый воздуходувкой РГН-427 воздух нагревался, проходя через калорифер, а затем подавался в аппарат.

На решетку засыпалась навеска 300 г. фракции 2...3 мм карбамиды и начиналось измерение с интервалом 20 с температуры газа термопарами, расположенными на высоте 10, 50 и 75 мм над решеткой. Высота слоя материала при отсутствии подачи воздуха составляла 45 мм, а во взвешенном состоянии – 75 мм, то есть последняя термопара находилась фактически на верхней границе слоя в его рабочем состоянии. Замеры температуры продолжались до полной стабилизации температуры слоя, равной температуре подаваемого подогретого до  $95^\circ\text{C}$  воздуха.

После загрузки материала температура газа из-за теплоотдачи к материалу резко снижается, причем снижение выше в верхней части слоя, так как туда поступает уже охлажденный в нижней части слоя газ. Постепенно все температуры повышаются, стремясь к температуре подаваемого нагретого газа, что естественно при имевшейся хорошей теплоизоляции аппарата.

Предлагаемая модель в сочетании с эмпирической зависимостью (3) для расчета коэффициента теплоотдачи обеспечивает хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных. Кроме того, очевидно, что использование гипотезы об изотермичности кипящего слоя,

по крайней мере, в условиях данного эксперимента, было бы далеко идущим допущением.

#### Библиографический список

1. Mizonov, V. Modeling of Particle Concentration Distribution in a Fluidized Bed by Means of the Theory of Markov Chains / V. Mizonov, A. Mitrofanov, A. Ogurtzov, K. Tannous // Particulate Science and Technology: An International Journal. Volume 32, Issue 2, 2014. pp 171-178.
2. Митрофанов, А. В. Экспериментальное исследование гидродинамики частиц биотоплива в топке с кипящим слоем / А.В. Митрофанов, К. Tannous, В.Е. Мизонов // Вестник ИГЭУ.– 2014.– № 3.– С. 65-67.

*Херувимов С. А., студ.; рук. к.т.н., доц. Митрофанов А.В.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЖФАЗНОГО ВЛАГОПЕРЕНОСА В КИПЯЩЕМ СЛОЕ

Техника псевдоожижения сыпучего материала восходящим потоком воздуха получила широкое распространение при реализации различных технологических процессов, сопровождаемых, в том числе, обменом теплотой и влагой между частицами и ожижающим агентом. Однако проектирование новых и эксплуатация существующих реакторов с кипящим слоем зачастую является делом экспериментальным, что делает актуальной задачу поиска эффективных инструментов описания параметров работы этих установок.

Одним из таких инструментов, на наш взгляд, является теория цепей Маркова, модели, построенные на основе которой, хорошо зарекомендовали себя при моделировании смежных процессов [1]. Разработанная модель позволяет рассчитывать расширение слоя и распределение частиц по его объему, а также внутренний межфазный теплообмен. Результаты численного и натурального эксперимента показали неравномерность распределения концентраций и температур фаз по высоте реактора [1]. Учет указанной неравномерности распределения свойств по высоте аппарата необходим для более высокой достоверности расчетов тепломассообменных процессов, реализуемых в кипящем слое. Разработка модели тепломассообменных процессов на основе теории цепей Маркова составляет задачу настоящего исследования. Для этого пространство состояний процесса (рабочий объем, фракци-

онный состав, влажность и др.) разбивается на счетное число ячеек малого, но конечного размера. Текущее состояние процесса представляется совокупностью характеристик этого состояния, организованно в вектор-столбец. Процесс наблюдается через малые конечные промежутки времени. Эволюция вектора состояния от одного момента времени к другому описывается матрицей переходных вероятностей, которая является основным оператором модели.

Текущее состояние процесса представлено вектором-столбцом  $S_p$ , элементы которого содержат массу частиц в каждой ячейке. В течение  $N$ -го перехода состояние  $S_p^N$  переходит в состояние  $S_p^{N+1}$ , причем эволюция состояния описывается матричным равенством

$$S_p^{N+1} = P_p^N S_p^N, \quad (1)$$

где  $N$  – номер перехода,  $P_p^N$  – переходная матрица для частиц материала, порядок построения которой изложен в работе [1].

Если есть условия для переноса массы влаги и теплоты между газом и частицами, то происходит поперечная теплопередача и поперечный перенос влаги между сходственными ячейками цепей, а также продольный перенос массы влаги и теплоты вместе с частицами и газом вдоль соответствующих цепей.

Векторы температур фаз вдоль цепей  $T_p$  и  $T_g$ , зависят от векторов запасов теплоты в ячейках  $Q_p$  и  $Q_g$

$$Q_p = c_p S_p \cdot T_p + c_w S_w \cdot T_p, \quad (2)$$

$$Q_g = c_g S_g \cdot T_g, \quad (3)$$

где  $c_p$ ,  $c_g$  и  $c_w$  – теплоемкости частиц, газа и влаги;  $S_w$  – содержание влаги в материале.

Эволюция теплового состояния цепей описывается матричными равенствами, связывающими последовательные состояния цепей через промежуток времени  $\Delta t$

$$Q_p^{N+1} = P_p^N (Q_p^N + \alpha \cdot F \cdot (T_g^N - T_p^N) \Delta t - \beta \cdot F \cdot \psi \cdot (C_g^N - C_p^N) \Delta t), \quad (4)$$

$$Q_g^{N+1} = P_g^N (Q_g^N - \alpha \cdot F \cdot (T_g^N - T_p^N) \Delta t + \beta \cdot F \cdot \psi \cdot (C_g^N - C_p^N) \Delta t + Q_{gf}), \quad (5)$$

где  $Q_{gf}$  – вектор подачи теплоты с входящим газом при его температуре  $T_{g0}$ , имеющий один ненулевой элемент  $G_g T_{g0} c_g \Delta t$  для первой ячейки.

Матрица  $\mathbf{P}_g^N$  описывает продольное перемещение газа и его теплоты вдоль цепи. Матрица  $\mathbf{a}$  содержит коэффициенты теплоотдачи газ-частицы;  $\mathbf{\beta}$  – коэффициенты скорости сушки;  $\psi$  – удельная теплота парообразования;  $\mathbf{F}$  – поверхности частиц в ячейках;  $\mathbf{C}_g^N$  и  $\mathbf{C}_p^N$  – векторы объемной концентрации влаги в газе и частице.

Равенства (2)–(5) отражают очевидные уравнения баланса, поэтому получаемые по ним решения должны быть правдоподобными. Количественная же достоверность расчетных прогнозов напрямую будет зависеть от достоверности определения коэффициентов теплоотдачи и массоотдачи в ячейках, которые меняются по высоте слоя.

#### Библиографический список

1. Mizonov, V. Modeling of Particle Concentration Distribution in a Fluidized Bed by Means of the Theory of Markov Chains / V. Mizonov, A. Mitrofanov, A. Ogurtzov, K. Tannous // Particulate Science and Technology: An International Journal. Volume 32, Issue 2, 2014. pp 171-178.

*Ермаков К.К., студ.;рук. д.т.н., проф. Шуина Е.А.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ПОРОШКОВ, ПОСТРОЕННАЯ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ЦЕПЕЙ МАРКОВА

Для современного развития химической и смежных отраслей промышленности характерно использование тонкодисперсных порошкообразных материалов, причем требования к их фракционному составу постоянно возрастают. В большинстве случаев исходные технологические операции по производству порошков (главным образом, измельчение) не могут удовлетворить этим требованиям, и необходимо их дополнительное фракционирование, осуществляемое в различного рода классификаторах. Классификация порошков также играет важную роль в замкнутых схемах измельчения, позволяя за счет рецикла повысить производительность и снизить энергоемкость измельчения. Традиционные модели классификации, как правило, базируются на представлении порошка бинарной смесью крупной и мелкой фракции, что не может удовлетворить требованиям современных технологий. Мы предлагаем использовать системный подход, основанный на использовании теории цепей Маркова, к

математическому моделированию процессов аэродинамической классификации порошков.

Мы использовали двухмерную ячейчную модель центробежной классификации, в которой ячейки имеют изменяющийся с удалением от центра объем [1]. Зона классификации разбита на двухмерную сетку ячеек конечного, но достаточно малого объема: по радиусу на  $n$  ячеек, а по углу – на  $m$  ячеек. Эволюция процесса рассматривается через достаточно малые промежутки времени  $\Delta t$  с тем, чтобы материал в течение этого промежутка мог переместиться только в соседние ячейки, но не как не далее. Эволюция процесса классификации определяется матричным равенством

$$\mathbf{M}^{k+1} = \mathbf{P}(\mathbf{M}^k + \mathbf{M}_f^k), \quad (1)$$

где  $k$  – номер перехода,  $\mathbf{M}_f^k$  – вектор подачи исходного материала на каждом переходе,  $\mathbf{M}^k$  – вектор состояния,  $\mathbf{P}$  – матрица переходных вероятностей или матрица классификации, элементы которой подробно описаны в [1].

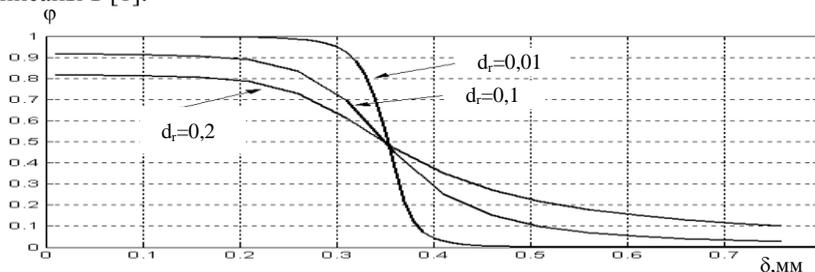


Рис.1. Влияние основных параметров модели на кривые разделения.

Асимптотическая сумма состояний в кольце накопителе мелкого продукта есть точка кривой разделения. На рис. 1 представлены кривые разделения классификатора при различных значениях коэффициента продольной диффузии  $d_r$ .

В целом полученные расчетные результаты совпадают с кривыми, представленными в [2] для центробежных классификаторов, которые были получены на основе аналитических решений с множеством упрощений. Если эти упрощения ввести в построенную модель, то соответствие окажется практически полным.

**Библиографический список**

1. Баранцева, Е.А., Калинин, С.М., Мизонов, В.Е., Berthiaux, H. Ячеечная модель центробежной классификации. / Е.А. Баранцева, С.М. Калинин, В.Е. Мизонов, H. Berthiaux // VII Международная конференция «Теоретические и экспериментальные основы создания новых высокоэффективных процессов и оборудования». Сб. трудов. – Иваново, –2005, С.131-134.
2. Мизонов, В.Е. Аэродинамическая классификация тонкодисперсных сыпучих материалов и оборудование для ее реализации / В.Е. Мизонов, С.Г. Ушаков // Химическое и нефтяное машиностроение, –1992, №1, С. 7-12.

*Полищук И.В., асп.; рук. д.т.н., проф.Бобков С.П.  
(ИГХТУ, г. Иваново)*

## РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЕ И ВЕКТОРИЗАЦИЯ КЛЕТОЧНОГО АВТОМАТА

Клеточный автомат – это дискретная математическая модель, представляющая собой регулярную решетку ячеек (рис.1а). Для каждой ячейки определено множество ее возможных состояний и соседних ячеек. На каждой итерации, используя правила перехода и состояния соседних ячеек, определяется новое состояние каждой ячейки [1].

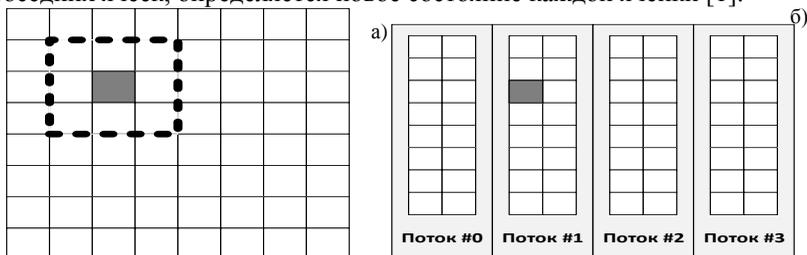


Рис.1. а) схема клеточного автомата с прямоугольной решеткой (пунктиром выделена окрестность серой клетки); б) схема вертикального разбиения решетки клеточного автомата на вычислительные потоки

Таким образом, подходы к оптимизации процесса вычисления новых состояний ячеек классического клеточного автомата могут быть перенесены на более частные задачи, тем самым сократив время моделирования широкого класса задач: теплопереноса, деформация и т.д..

Так как состояния ячеек описывается лишь их внутренним состоянием и состоянием их соседей то расчет каждой ячейки может быть выполнен параллельно с отсутствием каких-либо блокировок. Однако создание отдельных вычислительных потоков для каждой ячейки, будет крайне неэффективным с точки зрения производительности из-за значительных издержек на управление и переключение потоков между вычислительными ядрами, количество которых ограничено на современных процессорах. Гораздо эффективным подходом будет создание такого количества вычислительных потоков, сколько вычислительных ядер имеется на процессоре, и каждый такой вычислительный поток будет обрабатывать не одну ячейку, а некоторую область решетки клеточного автомата. При разбиении решетки следует исходить из равномерности вычислительной нагрузки для каждого вычислительного потока. Например, в случае если каждая ячейка обрабатывается за одно и тоже время, то решетка может быть разбита на равномерные горизонтальные или вертикальные полосы (рис.1б).

Итак, задача распараллеливание клеточного автомата сводится к следующим шагам.

1. Получить количество вычислительных ядер.
2. Разбить решетку на равномерные по вычислительной сложности области исходя из количества имеющихся вычислительных ядер.
3. Создать вычислительные потоки для каждой области и запустить их на отдельных вычислительных ядрах.
4. Ожидать окончания выполнения всех вычислительных потоков.

Еще одним подходом к оптимизации является векторизация вычислений, т.е. выполнение одной инструкции над множеством данных. Современные процессоры предоставляют наборы инструкций: MMX, SSE, AVX и другие, которые позволяют выполнять такую задачу. Например, в случае поддержки процессором AVX инструкций, в распоряжение будет несколько 256 битных регистров, используя которые возможно за раз выполнять операции над двумя векторами по 8 компонент с плавающей запятой одинарной точности. Таким образом одной командой может быть обработано 16 чисел, т.е. два вектора по 8 значений. Прирост производительности получается более чем 8 раз ввиду отсутствия накладных ресурсов на декодирование команд что были бы в случае обработке каждого компонента вектора последовательно (рис.2).

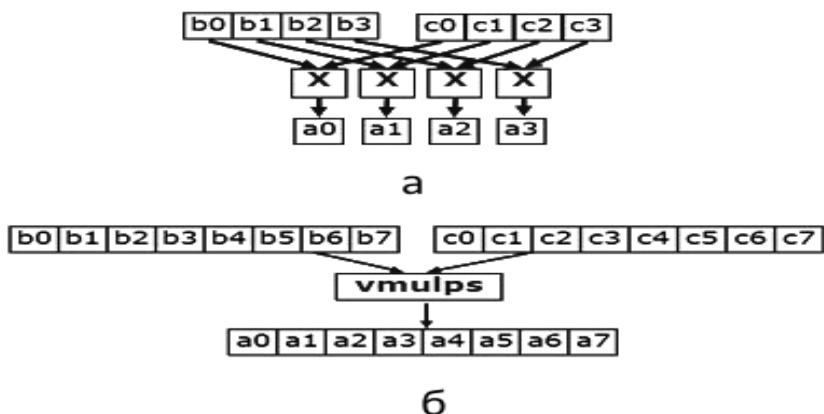


Рис.2. Схема векторизации вычислений. а) – последовательное выполнение вычислений, б) – векторизованное выполнение вычислений.

При получении результатов, описанных в работах [3] и [4] такие инструкции использовались для расчета относительного расстояния и относительной скорости между элементами при деформации, а также при реализации методов численного интегрирования. При этом после распараллеливания производительность вычислений увеличилась в 4 раза, после векторизации в 30 раз. Таким образом был получен прирост производительности более чем в 100 раз.

#### Библиографический список

1. Toffoli T. Cellular Automata Machines / Massachusetts Institute of Technology, 1987.
2. Barbara Chapman, Using OpenMP: Portable Shared Memory Parallel Programming / MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2008
3. Бобков С.П., Полищук И.В., Исследование процесса упругого деформирования с использованием метода дискретных элементов динамических моделей / «Вестник ИГЭУ», 2014, вып.5, с. 47-50
4. Полищук И.В., Бобков С.П., Использование метода дискретных элементов для моделирования процесса неупругого деформирования / «Вестник ИГЭУ», 2014, вып.6, с. 71-74

*Соколов В.Л., асп.; рук. д.т.н., проф. Бобков С.П.  
(ИГХТУ, г. Иваново)*

## **МОДИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ РЕШЕТОЧНОГО ГАЗА**

В последние годы значительно возрос интерес к использованию в математическом моделировании дискретных динамических моделей в виде систем клеточных автоматов. Данный подход предполагает разбиение модельного пространства на элементы – клетки, каждая из которых функционирует, как абстрактный автомат. Основной характеристикой клетки является ее состояние, которое при моделировании физических процессов определяет конкретное значение какой-либо величины: температуры, скорости, деформации и пр. Изменение состояния происходит по шагам дискретного времени синхронно для всех клеток в соответствии с функцией переходов.

Исследования показали, что данный подход обладает целым рядом преимуществ перед традиционными методами, но одновременно выявились и недостатки. Одним из них следует считать значительный объем необходимых вычислительных ресурсов. Дело в том, что обычно даже при 2D моделировании число используемых клеток составляет около  $10^6$ . Шаг дискретного времени тоже весьма мал и, кроме того, часто ограничен. Естественный путь решения этой проблемы – использование параллельных вычислений не всегда возможен из-за ограниченной доступности мультипроцессорных систем. Поэтому необходимо стремиться к упрощению функций переходов клеточных автоматов, т.е. к снижению числа элементарных микроопераций при их вычислении. Это и является одной из целей нашей работы.

Одной из разновидностей клеточных автоматов являются решеточные газы, используемые при моделировании поведения газов и жидкостей. Суть этих моделей в том, что течение сплошной среды симулируется движением гипотетических частиц между узлами пространственной решетки. Существует несколько разновидностей моделей решеточных газов различной сложности. Однако, усложнение моделей привело к повышению их адекватности, но одновременно значительно увеличило объем вычислений и затруднило их использование. В частности, если в первых подходах можно было использовать в качестве компонентов векторов состояний булевы переменные, то более поздние требуют применения целочисленных и вещественных переменных. Тем не менее, в ряде случаев можно найти разумных компо-

мисс между адекватностью модели и ее экономичностью. Нами предлагается модификация одной из простейших решеточных моделей.

Известна модель НРР-газа, которая рассматривает двухмерное течение газа на ортогональной пространственной решетке. В соответствии с общими свойствами решеточных газов, в узлах решетки могут находиться частицы единичной массы. Каждая из частиц может иметь скорость  $c_i$ , направленную в один из соседних узлов, причем такую, что за один шаг по времени она может переместиться, только в данный соседний узел. При этом в отдельном узле не может быть двух и более частиц с одинаковой скоростью. Развитие процесса поведения газа на каждом шаге по времени происходит в два этапа. Первый этап – перемещение частицы в соседние узлы (этап сдвига). Второй этап – соударение частиц в узлах (этап столкновения).

Для НРР модели принимается правило: если в какой-либо узел решетки одновременно попадают две частицы с разных сторон, то они сталкиваются. Правила изменения скоростей частиц при столкновениях показаны на рис.1.

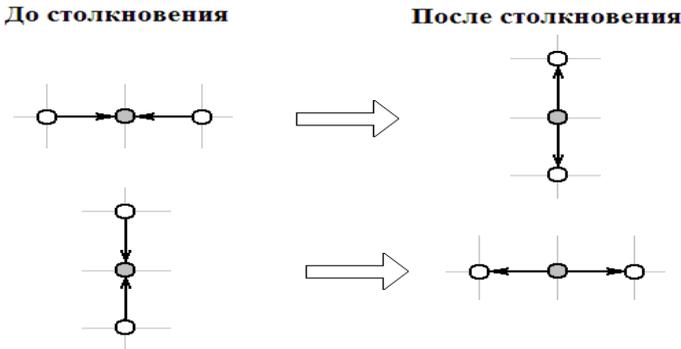


Рис.1. Столкновения частиц в модели НРР

Предлагаемая модификация НРР модели допускает существование частиц покоя. При этом к четырем векторам скорости частиц добавляется еще один – нулевая скорость.

$$c_0=(0;0); \quad c_{1,3}=(\pm 1;0); \quad c_{2,4}=(0;\pm 1). \quad (1)$$

Кроме того, к основным двум правилам столкновения частиц добавляются еще два (рис.2). Теперь моделируемый газ представлен клеточным массивом, в котором состояние каждой клетки (узла) представлен булевым вектором длиной 5, по числу возможных скоростей:  $s = (s_0, s_1, \dots, s_4)$ . Каждый разряд вектора определяет наличие ( $s_i = 1$ )

или отсутствие ( $s_i = 0$ ) в клетке частицы, которая движется с  $i$ -й скоростью.

Функция переходов элементарного автомата внутренних клеток строится, исходя из следующих соображений.

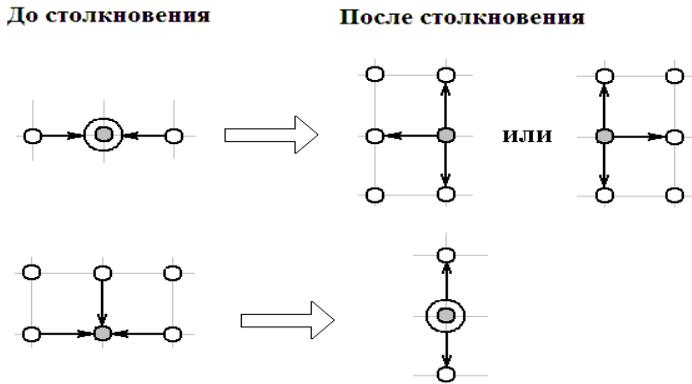


Рис. 2. Дополнительные правила столкновений частиц (кружком выделена покоящаяся частица).

На этапе сдвига происходит изменение одного из разрядов вектора состояний, то есть перемещении частицы. На этапе столкновения происходит изменение нескольких разрядов вектора состояний, в соответствии с правилами функционирования модели. То есть при этом происходит замена одного состояния клетки  $s$  на другое  $s'$ .

Функция переходов внутренних клеток должна обеспечивать выполнение законов сохранения массы и импульса. Введение дополнительной неподвижной частицы увеличит размерность вектора состояний до пяти, однако позволит при вычислении нового значения данного вектора использовать булевы переменные, что значительно эффективнее при компьютерных расчетах.

#### Библиографический список

1. О.Л. Бандман. Клеточно-автоматные модели пространственной динамики. // Системная информатика: Сб. науч. тр.: Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. Вып. 10. С. 59-111.
2. Hardy J., de Pazzis O., Pomeau Y. Molecular dynamics of a classical lattice gas: transport properties and time correlation functions // Physical Review A. 1976. V. 13, N 5. P. 1949-1961

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ КАПСУЛИРОВАНИИ ЧАСТИЦ

Заключение различных материалов в оболочки защищает их от воздействия окружающей среды, обеспечивает замедленное высвобождение активного вещества, удлиняет сроки хранения неустойчивых и быстропортящихся веществ, снижает токсичность продуктов, позволяет смешивать несмешивающиеся и реагирующие друг с другом соединения, придает новые физические и физико-химические свойства, например, позволяет уменьшать летучесть, изменять плотность, форму, маскировать цвет, вкус, запах [1].

Процесс получения защитных оболочек на зернистых материалах в аппаратах кипящего слоя осуществляется путем распыливания растворов или дисперсий полимеров на частицы псевдооживленного слоя с помощью пневматических форсунок. Капли капсулянта, столкнувшись с частицами слоя, растекаются по их поверхности, образуя жидкостную плёнку. Удаление растворителя путем сушки приводит к отверждению плёнки.

Традиционно при моделировании сушки дисперсных материалов поверхность испарения принимается равной площади поверхности частиц. При капсулировании частиц площадь поверхности испарения непрерывно меняется во времени (периодический процесс)

$$F_{\text{исп}} = \pi d_{\text{ср}}^2 N_{\text{сл}} x_{\text{ср}}, \quad (1)$$

где  $d_{\text{ср}}$  – средний диаметр частиц,  $N_{\text{сл}}$  – число частиц в слое,  $x_{\text{ср}}$  – средняя степень покрытия гранул.

Степень покрытия частиц, под которой понимают долю общей поверхности частиц, покрытой защитной оболочкой, при проведении процесса в периодическом режиме, может быть рассчитана по формуле [2]:

$$x_{\text{с}} = \frac{k_4}{z_1 z_2 (z_2 - z_1)} [z_2 - z_1 - z_2 \exp(z_1 \tau) + z_1 \exp(z_2 \tau)], \quad (2)$$

где  $k_1 = -k_c$ ;  $k_2 = k_\lambda + k_\phi$ ;  $k_3 = k_c k_\phi$ ;  $k_4 = k_\lambda k_c$ ,  $z_1, z_2$  - корни характеристического уравнения

$$z_{1,2} = 0,5 \left[ k_1 - k_2 \pm \sqrt{(k_2 - k_1)^2 + 4(k_1 k_2 + k_3)} \right]. \quad (3)$$

В этих выражениях  $k_c, k_\phi$  - относительные расходы частиц через зону "слой", через зону "факел";  $k_\lambda$  - константа скорости роста степени покрытия

$$k_c = \frac{n_\phi}{N_c} = \frac{1}{\tau_c}, \quad k_\phi = \frac{n_\phi}{N_\phi}, \quad (4)$$

где  $n_\phi$  - количество частиц, циркулирующее через зону орошения в единицу времени;  $N_c, N_\phi$  - соответственно, число частиц в зонах «слой» и «факел»;  $\tau_c$  - период циркуляции частиц.

При капсулировании дисперсных материалов путем распыливания эмульсии полимера на слой псевдооживленных частиц, масса гранул не остается постоянной. При попадании капель эмульсии на поверхность частиц, их масса увеличивается. В то же время, за счет испарения растворителя (воды), происходит уменьшение массы. Поскольку испарение влаги идет из тонкой пленки, принимаем допущение, что процесс массообмена лимитирован внешней диффузией. За количественную характеристику влагосодержания частиц примем отношение общей массы влаги к суммарной массе сухого вещества.

$$U = (m_{гр} U_{гр} + m_{п} U_{п}) / (m_{гр} + m_{п}), \quad (5)$$

где  $m_{гр}$  - масса исходной гранулы;  $U_{гр}$  - влагосодержание гранулы;  $m_{п}$  - масса полимера в полимерной пленке на грануле;  $U_{п}$  - влагосодержание пленки.

Начальное влагосодержание пленки можно рассчитать следующим образом:

$$U_{пн} = (1 - V_{пол}) / V_{пол}, \quad (6)$$

где  $V_{пол}$  - массовая доля полимера в эмульсии.

Прогнозировать изменение влагосодержания частиц и их температуры во времени процесса капсулирования позволяют уравнения (7),

(8), полученные на основе соотношений материального и теплового балансов:

$$\frac{dU}{d\tau} = \frac{-\beta_p(p_{II} - p_{Г})F_{исп} + G_{эм}(1 - B_{пол}) - UG_{эм}B_{пол}}{m_{ГР} + G_{эм}B_{пол}\tau}, \quad (7)$$

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{\alpha(t_{Г} - t)F_{Т} - \beta_p(p_{II} - p_{Г})F_{исп}r^* - G_{эм}B_{пол}t \cdot c_{ср}}{(m_{ГР} + G_{эм}B_{пол}\tau) \cdot c_{ср}}. \quad (8)$$

В этих уравнениях  $\beta_p$  - коэффициент массоотдачи;  $P_{II}$  - парциальное давление паров воды над поверхностью пленки;  $P_{Г}$  - парциальное давление паров воды в сушильном агенте;  $F_{Т}$  - площадь поверхности теплообмена;  $c_{ср}$  - средняя во времени процесса теплоемкость частицы;  $t$  - температура частиц;  $t_{Г}$  - температура газа;  $r^*$  - теплота парообразования воды;  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи;  $G_{эм}$  - расход эмульсии.

Система уравнений решалась численным методом. Алгоритм расчета реализован средствами пакета Mathcad. Результаты расчетов, представленные на рис. 1, показывают, что на начальном этапе формирования покрытия, вследствие недостаточности площади поверхности испарения наблюдается повышение температуры и влагосодержания частиц. Далее, при достижении 100% степени покрытия частиц, происходит снижение влагосодержания до начальной влажности капсулируемого материала.

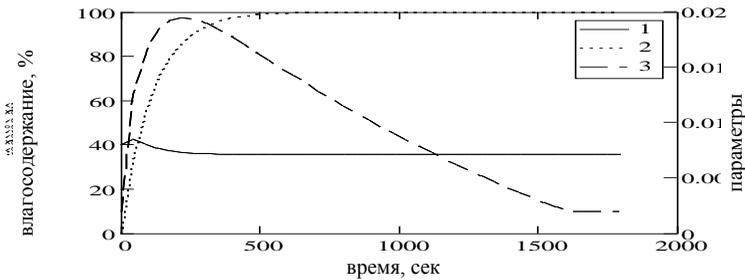


Рис. 1. Изменение параметров частиц во времени процесса капсулирования:  
1 – температура, °C; 2 - степень покрытия, %; 3 - влагосодержание, кг влаги/кг сухого вещества

Предложенная математическая модель отражает наиболее важные особенности процесса и может быть использована при расчете аппарата с псевдооживленным слоем капсулируемых частиц.

**Библиографический список**

1. Овчинников Л.Н., Липин А.Г. Капсулирование минеральных удобрений во взвешенном слое: монография. - ИГХТУ. – Иваново, 2011. -140 с.
2. Липин А.Г. Методика оценки качества капсулирования зернистых материалов в псевдооживленном слое / А.Г. Липин, Л.Н. Овчинников, С.В. Федосов // Известия ВУЗов. Химия и хим.технол. – 2000. - т.43, вып.1. - С.73-75.

*Перов П.А., асп.; рук. д.т.н., проф. Елин Н.Н.  
(ИВГПУ, г. Иваново)*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПАРОПРОВОДОВ ПЕРЕГРЕТОГО ПАРА**

Если для выбора оптимальных гидравлических режимов трубопроводов, транспортирующих несжимаемые среды, существуют известные рекомендации [1], то для сжимаемых сред общепринятой методики практически нет.

Ценность перегретого пара как энергоносителя определяется его способностью отдавать тепло и совершать механическую работу. В качестве показателя, учитывающего оба фактора, принято использовать эксергию [2]. При движении перегретого пара в теплоизолированном трубопроводе изменение эксергии по длине потока описывается выражением:

$$\frac{de}{dl} = \frac{d}{dl}(h - T_0 \times s) = \frac{dh}{dl} - T_0 \times \frac{ds}{dl}, \quad (1)$$

где  $e$  – эксергия,  $h$  – энтальпия,  $s$  – энтропия,  $T_0$  – абсолютная температура окружающей среды.

В качестве оптимального режима эксплуатации паропровода будем считать режим, при котором величина  $(de/dl)$  минимальна. С этой целью нами разработана компьютерная программа теплового и гидравлического расчета паропроводов [3] и выполнен вычислительный эксперимент по исследованию влияния массового расхода пара в трубопроводе заданной конструкции на целевой показатель  $(de/dl)$ .

На каждом участке теплоизолированного паропровода происходят следующие процессы: уменьшение энтальпии и энтропии вследствие

теплопотерь в окружающую среду; увеличение энтропии вследствие дросселирования потока (уменьшения давления).

Изменение энтальпии (первое слагаемое в правой части (1)) происходит исключительно вследствие теплопотерь, а изменение энтропии (второе слагаемое) – как вследствие дросселирования потока, так и вследствие теплопотерь. Для того чтобы выделить влияние каждого процесса на изменение величины эксергии, кроме основного расчета с реальными исходными данными, выполнены два вспомогательных расчета: Для того чтобы определить изменение эксергии вследствие теплопотерь, расчет производился с нулевым коэффициентом гидравлического сопротивления и полученная величина обозначалась  $(de/dl)_q$ ;

Для того чтобы определить изменение эксергии вследствие дросселирования, расчет производился с нулевым коэффициентом теплопроводности и полученная величина обозначалась  $(de/dl)_p$ .

На рис.1 представлены зависимости  $(de/dl)$  и ее составляющих  $(de/dl)_q$  и  $(de/dl)_p$  от массового расхода пара по участку трубопровода длиной 100 м диаметром 159 мм при давлении 1,3 МПа и температуре 220 °С.

Как и следовало ожидать, величина тепловых потерь и связанные с ней величины  $(de/dl)_q$  и  $(dT/dl)_q$  обратно пропорциональны расходу и поэтому зависимости имеют гиперболический характер.

Так как дифференциальный эффект Джоуля-Томсона  $(\partial T/\partial p)_{h=\text{const}}$  для фиксированного сечения потока постоянный, а градиент давления пропорционален квадрату массового расхода, то зависимости  $(dT/dl)_p$  и  $(de/dl)_p$  от расхода имеют параболический характер.

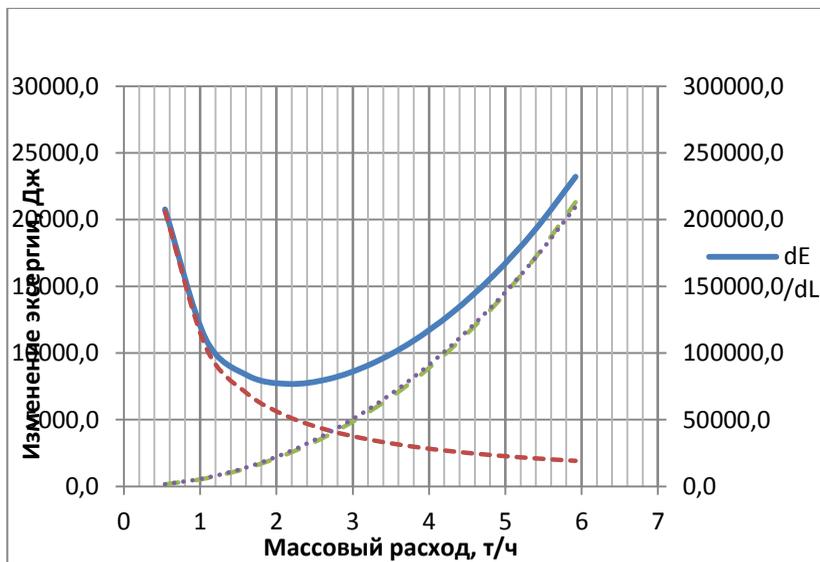


Рис.1. Зависимость уменьшения эксергии потока перегретого пара и ее составляющих от массового расхода пара

Наличие минимумов на зависимости  $(de/dl)=f(G)$  указывает на существование энергетически наиболее выгодной загрузки паропровода перегретого пара, а предлагаемая методика и ее компьютерная реализация позволяет находить оптимальные режимы.

#### Библиографический список

1. Теплоснабжение/А.А. Ионин, Б.М. Хлыбов, В.Н. Братенков, Е.Н. Терлецкая - М.: Стройиздат, 1982. 336 с.
2. Бродянский В.М. Эксергетический метод термодинамического анализа. - М.: Энергия, 1973. - 296 с.
3. Компьютерная программа для моделирования режимов эксплуатации паропроводов/Н.Н. Елин, М.А. Гольбин П.А. Перов, А.А. Котков//Информационная среда вуза: Материалы XXI Международной научно-технической конференции, Иваново, ИВГПУ, 2014 – с.533-538.

*Королёв М.Г., асп. (НВГУ, г. Нижневартовск);  
рук. д.т.н., проф. Елин Н.Н. (ИВГПУ, г. Иваново).*

## РЕЖИМНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ В СИСТЕМЕ ЗАВОДНЕНИЯ НЕФТЯНЫХ ПЛАСТОВ

В связи с тем, что до 40% энергозатрат нефтегазодобывающих предприятий приходится на систему поддержания пластового давления, актуальной является оптимизации кустовых насосных станций (КНС) по критерию энергопотребления[1].

При параллельной работе насосных агрегатов различного типоразмера необходимо найти параметры регулирования их подачи, соответствующие минимуму энергетических затрат на подачу жидкости. Наиболее эффективен метод частотного регулирования насосных агрегатов. Известно, что энергетическая эффективность группы совместно работающих насосов повышается при увеличении степени равномерности их загрузки, когда частота вращения вала насоса большего типоразмера такова, что его напор холостого хода равен напору холостого хода насоса меньшего типоразмера[2,3,4].

В общем виде задача режимной оптимизации насосной станции заключается в поиске вектора частот вращения всех роторов нагнетателей насосных агрегатов, установленных на станции  $[v_{i,1}]$ , при котором обеспечивается минимальное энергопотребление  $P_{общ}$  при заданных напоре и подаче.

Математическая модель КНС строится как совокупность напорно-расходных характеристик и характеристик мощность-напор каждого насоса при условии равенства напора для всех агрегатов:

$$H_i = \left( \frac{v_{i,1}}{v_{i,0}} \right)^2 F \left( Q_i \frac{v_{i,0}}{v_{i,1}} \right), \quad P_i = \left( \frac{v_{i,1}}{v_{i,0}} \right)^3 G \left( Q_i * \frac{v_{i,0}}{v_{i,1}} \right),$$
$$H_i = H_j, \quad v_{i,\min} < v_{i,1} < v_{i,0}, \quad \sum_{i=1}^M Q_i = Q_{общ}, \quad (1)$$
$$P_{общ} = \sum_{i=1}^M P_i \Rightarrow \text{Min.}$$

где  $v_0$  и  $v_i$  - номинальная и измененная частота вращения ротора об/мин,  $M = \frac{N_{общ} - N_{нар}}{2} + N_{нар}$ ,  $N_{общ}$ ,  $N_{нар}$  - общее количество насосов и количество параллельно соединённых насосов соответственно,  $H$  - напор, развиваемый насосными агрегатами,  $v_{i,min}$  - минимальная допустимая частота  $i$ -ого регулятора частоты.

Целевой функцией в данном случае является энергопотребление всей насосной станции  $P_{общ} = \sum P_i$ , а управляющим параметром вектор измененных частот вращения  $[v_{i,l}]$ .

Вследствие влияния ограничения на измененную частоту вращения  $v_{i,l}$  и подачу  $Q_i$  каждого насоса, решение задачи (1) строится на методе ветвей и границ нелинейного программирования. При очередном изменении частот  $v_{i,l}$  получаем  $M$  нелинейных уравнений, после решения которых определяем подачу каждого насоса  $Q_{i,j}$  и, далее, общие энергозатраты насосной станции  $P_{общ}$ .

Задача сводится к поиску глобального минимума функции энергопотребления  $P_{общ}$ . На рис. 1 представлены некоторые результаты вычислительного эксперимента с использованием предлагаемой модели для насосной станции с двумя работающими насосами.

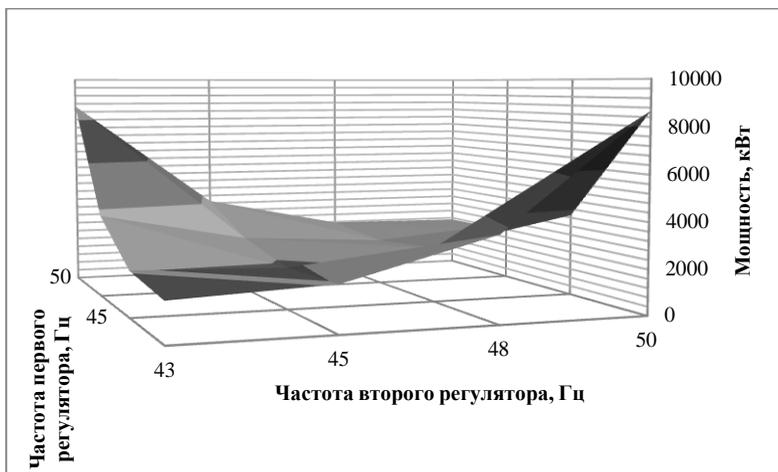


Рис. 1 Зависимость мощности, потребляемой насосной станцией, от частот вращения насосов

В результате оптимизации КНС в системе ППД методом изменения числа оборотов ротора нагнетателя возможно достижение следующих целей:

1. Снижение, без вреда для экологии, энергопотребления КНС за счет точной настройки насосных агрегатов.

2. Увеличение срока службы насосного оборудования за счет использования системы плавного пуска агрегата.

3. Настройка КНС на новый режим работы в случае изменения требований по перекачке, технологически обусловленных влиянием сети водоводов высокого давления.

#### Библиографический список

1. Елин Н.Н., Ашкарин Н.И., Насонов Ю.В., Ворожцова Л.С., Загинайко Д.В., Попов А.П. Разработка и эксплуатация математических моделей систем обустройства нефтяных месторождений. - Иваново, ИГХТУ, 2006 - 272 с.
2. Елин Н.Н., Бубнов В.Б., Снегирев Д.Г. Насосные станции: учеб. пособие / ООНИ ИВИ ГПС МЧС России. – Иваново, 2012. – 129 с.
3. Елин Н.Н., Цыплов А.В., Мизонов В.Е. Повышение энергетической эффективности процессов гидродобычи рудного сырья // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 6. – С. 95–98.
4. Reinbold C., Hart V. The Search for Energy Savings: Optimization of Existing & New Pumping Stations // FloridaWaterResourcesJournal. – 2011, March. – P. 44–52.
5. Загинайко Д.В., Елин Н.Н., Попов А.П., Королёв М.Г., Васин Я.А. Снижение энергозатрат в системах ППД и ППН нефтегазового промысла путем оптимизации режимов работы насосных станций // Нефтяное хозяйство. – 2014. – Вып. 9. – С. 42–45.

*И.А. Балагуров, асп.; рук. В.Е. Мизонов, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ СМЕШИВАНИЯ СЕГРЕГИРУЮЩИХ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ РАЗЛИЧНОЙ КРУПНОСТИ**

Целью данной работы является построение математической модели кинетики смешивания сегрегирующих сыпучих материалов различной крупности.

Эффективным инструментом для моделирования, на наш взгляд, является математический аппарат теории цепей Маркова. В предшествующих работах<sup>[2]</sup> была предпринята попытка создать модель эволюции распределения при смешении трех сегрегирующих компонентов. На основе этой работы было проведено обобщение модели для произвольного числа смешиваемых компонентов.

Ключевым моментов математического аппарата цепей Маркова является разбиение исследуемой области на элементарные ячейки. При-

мем следующие правила построения модели: разобьем зону смешивания на  $m$  ячеек высотой  $\Delta y = H/m$ , где  $H$  – высота зоны смешивания; каждая ячейка вмещает в себя единичный объем порции компонентов или смеси, независимо от её состава; время наблюдения разобьем на конечные промежутки  $t_k = (k-1)\Delta t$ , где  $\Delta t$  – продолжительность временного интервала,  $k$  – номер временного перехода; в каждый момент времени распределение содержания какого-либо компонента по ячейкам характеризуется вектором-столбцом  $S^k$ , а его эволюция от перехода к переходу описывается рекуррентным матричным равенством:

$$S^{k+1} = PS^k, \quad (1)$$

где  $P$  – матрица переходных вероятностей, которая может быть представлена в виде

$$P = \begin{bmatrix} 1 - v_1^k - d & d & 0 & \dots & \dots \\ d + v_1^k & 1 - v_2^k - 2d & d & \dots & \dots \\ 0 & d + v_2^k & 1 - v_3^k - 2d & \dots & \dots \\ 0 & 0 & d + v_3^k & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $d$  – вероятность диффузионного (симметричного) переноса в ячейки, соседние с ячейкой  $j$ ,  $v_i^k$  – вероятность (скорость) сегрегации из ячейки  $j$  в ячейку  $(j+1)$ . Пусть в смешивании участвуют  $n$  компонентов с номерами  $i$ , соответствующими возрастанию скорости сегрегации в чистый компонент  $e_{0ie}$ . Схематическое представление механизма формирования скорости сегрегации показано на рис. 1.

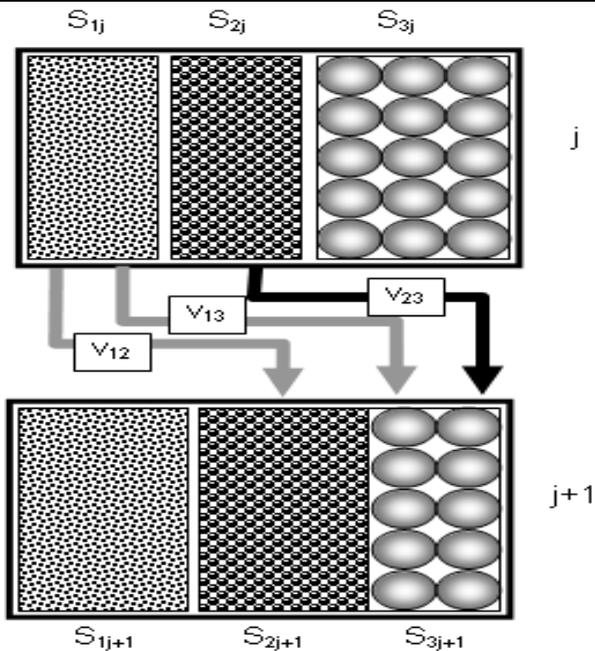


Рис.1. Схематическое представление механизма сегрегационных переходов.

С учетом всех допущений [3] для всех компонентов, кроме  $i=n$  и  $i=n-1$ :

$$P_{j,j+1,i} = d_i, \quad P_{j+1,j,i} = d_i + (1 - \sum_{b=1}^i S_{j+1,b}^k) \frac{\sum_{b=1}^n (v_{b,i} S_{j+1,b}^k)}{\sum_{b=i+1}^n (S_{j+1,b}^k)}, \quad (3)$$

где  $n$  – общее число компонентов,  $i = \{1..n-2\}$  – номер компонента, отсчитываемый сверху,  $v$  – вероятности (скорости) сегрегации из  $j$ -ой ячейки в  $j+1$ , представленные в матричной форме.

Для предпоследнего  $i=n-1$  компонента:

$$P_{j,j+1,n-1} = d_{n-1}, \quad P_{j+1,j,n-1} = d_{n-1} + v_{n,n-1} \left(1 - \sum_{b=1}^{n-1} S_{j+1,b}^k\right), \quad (4)$$

Для n-ого компонента:

$$P_{j,j+1,n} = d_n, \quad P_{j+1,j,n} = d_n, \quad (5)$$

Однако, вышеуказанные (3-9) выражения описывают перемещение компонентов только вниз. Поэтому следует дополнить эти выражения описанием перемещения компонентов вверх:

$$\Delta S_j^{k+1} = 1 - \sum_{b=1}^n S_{j,b}^{k+1}, \quad S_{j,i}^{k+1} = S_{j,i}^{k+1} + \Delta S_j^{k+1} \frac{S_{j+1,i}^{k+1}}{\sum_{b=2}^n S_{j+1,b}^{k+1}}. \quad (6)$$

В результате численных экспериментов были получены графики (рис. 2), из которых видно, что равномерность смеси сначала увеличивается, а затем снова уменьшается. Поэтому необходимо так выбрать момент выключения установки, когда равномерность перемешивания максимальная.

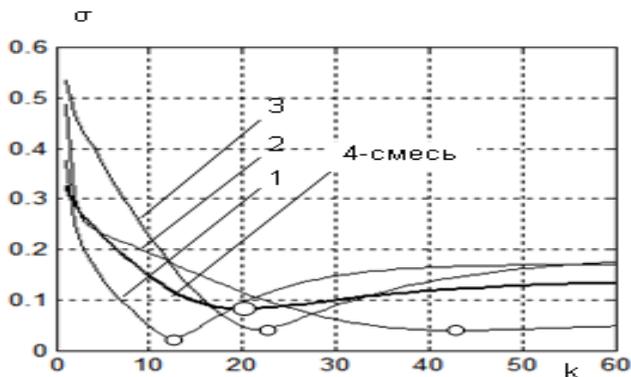


Рис.2. Зависимость среднеквадратичного отклонения  $\sigma$  от идеального распределения с течение времени  $k$ .

Представленная модель даёт достаточно ясное представление о поведении компонентов различной крупности в ходе процесса смешивания.

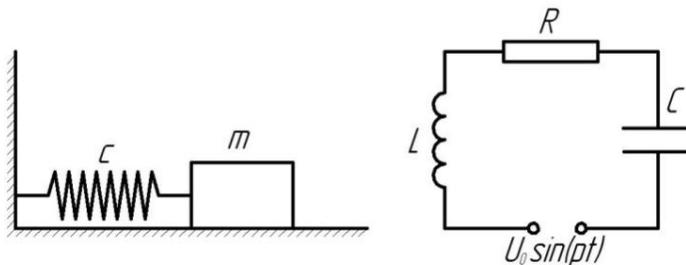
Библиографический список

1. Berthiaux, H., Mizonov, V., Zhukov, V. Application of the theory of Markov chains to model different processes in particle technology // Powder Technology 157 (2005) 128-137.
2. Балагуров И.А., Мизонов В.Е., Митрофанов А.В. Математическая модель формирования многокомпонентной смеси сегрегирующих компонентов // Изв. Вузов «Химия и хим. технология». 2014, Т. 57, №. 8, с. 67-70
3. И.А. Балагуров, В.Е. Мизонов, Н. Berthiaux, С. Gatamel. Моделирование кинетики смешивания разнородных сыпучих материалов // Вестник ИГЭУ. № 6, 2014, с.67-70

*Санига Д.А., Кравале И.А., студ.; рук. к.т.н., доц. Лезнова Н.Р.  
(ИГЭУ, г.Иваново)*

## РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ СИСТЕМ С ОДНОЙ СТЕПЕНЬЮ СВОБОДЫ

Рассматривается задача разработки программного обеспечения для нахождения графического представления колебания напряжения в замкнутом контуре или колебания грузика на пружине (Рис.1), зная технические характеристики колебательных систем и начальные условия.



С другой же стороны: численно решить дифференциальное уравнение второго порядка, путем разбиения его на систему двух дифференциальных уравнений первого и вывести полученное решение на монитор. Например, ДУ для колебательной системы грузика на пружинке имеет вид:

$$mx'' + bx' + cx = F_0 \sin(pt) ,$$

ИЛИ

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F_0}{m} \sin(pt) - \frac{b}{m} v - \frac{c}{m} x, \quad (1)$$

$$\frac{dx}{dt} = v, \quad (2)$$

и сопровождаются начальными условиями:  $v(0) = v_0; x(0) = x_0$ .

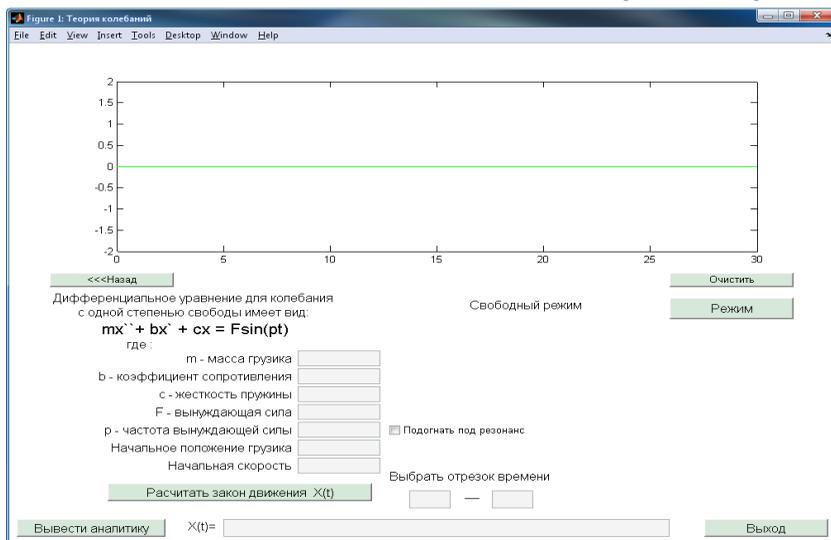


Рис.2. Интерфейс виртуальной лаборатории.

Для решений этой задачи была использована среда программирования MATLAB. Создаем удобный и доступный интерфейс (Рис. 2). Пользователь вводит технические параметры колебательной системы ( $m, b, c, F, p, X_0, V_0$ ) и при запуске реализуется решение уравнений 1 и 2 методом Рунге-Кутты четвертого порядка. В программу интегрирована функция «Режим», где пользователь может выбрать один из восьми предложенных. В зависимости от инертной и колебательной составляющих получит подсказки на ввод сопротивления среды, силы вынуждающего колебания и ее частоты под выбранный режим. Также

пользователь имеет возможность самостоятельно выбрать промежуток времени (По умолчанию 0-30с), на котором хочет исследовать колебание выбранной им системы. Интеллектуальная система в «Свободном режиме» распознает характер колебания в зависимости от введенных пользователем технических параметров. Также данное программное обеспечение ограждает пользователя от ввода ошибочных данных (например  $m=0$ ,  $m<0$ ), и указывает на введенную ошибку.

Таким образом, данное программное обеспечение позволяет изучить колебания в различных колебательных системах, не углубляясь в их математическую природу.

#### Библиографический список

1. Методические указания по проведению лабораторных работ для студентов специальностей 180100 и 180400. / Сост.: Жуков В.П., Митрофанов А.В. Иваново, 2012.
2. Яблонский А.А. Курс теории колебаний / А. А. Яблонский. –М., Краснодар: Лань, 2003.
3. Кривилев А. В. Основы компьютерной математики с использованием системы MATLAB / А. В. Кривилев. – М., 2005.

*Сергунин Н.А., студ.; рук. д.т.н., проф. Шуина Е.А.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПОДАЧЕЙ СЕГРЕГИРУЮЩЕГО КОМПОНЕНТА В СМЕСИТЕЛЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Одной из важнейших задач математического моделирования процессов смешивания является поиск рациональных программ загрузки склонного к сегрегации ключевого компонента в уже работающий смеситель, что для многих конструкций смесителей периодического действия не является технической трудностью. Для математического описания процесса воспользуемся подходом, основанным на теории цепей Маркова [1]. Рассмотрим одномерную миграцию частиц ключевого компонента вдоль определяющего направления процесса. На этом направлении выделим конечное число  $m$  дискретных состояний - положений ключевого компонента. Тогда его распределение по рабочему объему может быть описано вектором-столбцом размером  $m \times 1$   $S = \{S_j\}$ , где  $S_j$  – относительное содержание ключевого компонента в  $j$ -ом состоянии (ячейке). Будем рассматривать процесс через малые проме-

жутки времени  $\Delta t$ , в течение которых мелкомасштабное смешивание допускает переход частиц только в соседние состояния, но не далее. Тогда текущее время процесса может быть описано как  $\tau_k=(i-1)\Delta t$ , где  $i$  – номер временного перехода, или дискретный аналог текущего времени. В течение перехода вектор состояния  $S^i$  меняется и переходит в  $S^{i+1}$ . Его преобразование может быть описано рекуррентным матричным равенством

$$S^{i+1}=P(S^i + S_r^i), \quad (1)$$

где  $P$  – матрица переходных вероятностей, которая имеет вид (пример для  $m=4$ )

$$P = \begin{bmatrix} 1-d-v & d & 0 & 0 \\ d+v & 1-2d-v & d & 0 \\ 0 & d+v & 1-2d-v & d \\ 0 & 0 & d+v & 1-d \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $d=D\Delta t/\Delta x^2$ ,  $v=V\Delta t/\Delta x$ ,  $D$  – дисперсионный коэффициент,  $V$  – средняя скорость сегрегации частиц ключевого компонента в смеси (матрица (2) записана для сегрегации вниз),  $\Delta x$  – длина ячейки,  $S_r^i$  – вектор подачи ключевого компонента в зону смешивания.

При начальной загрузке всего ключевого компонента в верхнюю ячейку начальный вектор его состояния имеет вид  $S_r^i=[1 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0]$  при  $i=1$  и  $S_r^i=[0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0]$  при  $i>1$ . Рассмотрим распределенную во времени подачу ключевого компонента – его непрерывную засыпку в смеситель в течение  $k$  первых переходов. Такой подаче соответствует вектор  $S_r^i=[1/k \ 0 \ 0 \ \dots \ 0]$  при  $1 \leq i \leq k$  и  $S_r^i=[0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0]$  при  $i>k$ , то есть в течение  $k$  первых переходов в первую ячейку на каждом переходе добавляется доля  $1/k$  общей единичной загрузки ключевого компонента. Рассмотрим кинетику формирования качества смеси при различной продолжительности загрузки ключевого компонента, оценивая качество смеси среднеквадратичным отклонением

$$\sigma(i) = \sqrt{\frac{1}{m} \left( \sum_{j=1}^m (S_j^i - \frac{1}{m}) \right)^2}. \quad (3)$$

На рис.1 показана кинетика формирования качества смеси при различных значениях  $k$ , причем рассматривать изменение величины  $\sigma$

имеет смысл только при  $i > k$ , когда в смесителе находится уже весь ключевой компонент.

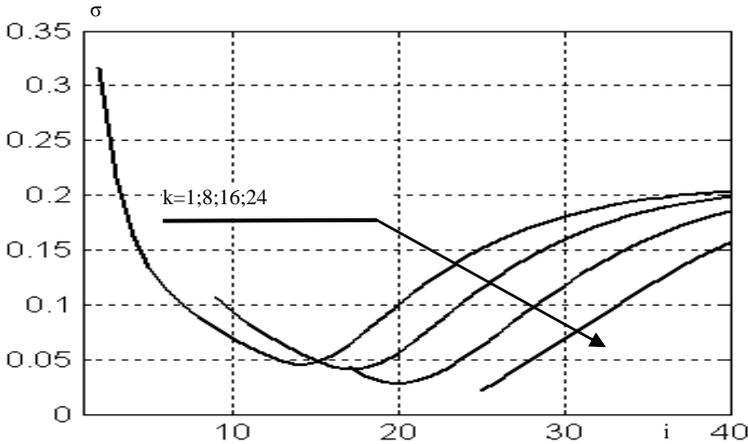


Рис.1. Влияние программы загрузки ключевого компонента на формирование качества смеси ( $m=10$ ;  $v=0,4$ ;  $d=0,2$ )

Случай  $k=1$  соответствует традиционной загрузке всего ключевого компонента в начале процесса. При  $i=13$  достигается наилучшее качество смеси (минимум  $\sigma$ ), которое затем быстро ухудшается. «Размазывание» подачи на 8 первых переходов приводит к смещению минимума вправо, что соответствует снижению производительности, однако само минимальное значение  $\sigma$  несколько уменьшается. Более заметно увеличение предельного качества смеси при  $k=16$ , но для его достижения также необходимо продолжать процесс после окончания загрузки компонента. Однако при  $k=24$  процесс следует прервать сразу после окончания загрузки, так как качество сразу начинает ухудшаться. Таким образом, показано, что существует оптимальная программа загрузки ключевого компонента в работающий смеситель непрерывного действия, обеспечивающая наилучшее качество смеси склонных к сегрегации компонентов.

Библиографический список

1. Berthiaux H., Mizonov V., Zhukov V. // Powder Technology 157 (2005) 128-137.

*Чернявская А.С., асп.; рук. д.т.н., проф. Бобков С.П.  
(ИГХТУ, г. Иваново)*

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ДВИЖУЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ

Моделирование процессов в движущихся жидкостях и газах является очень важной прикладной задачей при исследовании технических систем. Одним из методов, позволяющих успешно моделировать течение жидкости, является метод решеточного газа Больцмана [1].

В данной модели плоская сплошная среда разбивается на малые объемы-ячейки жидкости. Количество материальных частиц в каждой ячейке характеризуется локальной плотностью  $\rho$ . Каждая ячейка характеризуется количеством теплоты  $Q$ . Для каждой ячейки предусмотрено наличие девяти направлений (скоростных каналов), по которым могут двигаться частицы. Это сама клетка и восемь ее соседей. Направления скоростных каналов задаются векторами  $c_i$ .

Количество частиц, движущихся по каждому из скоростных каналов  $i$ , характеризуется плотностью распределения частиц в каждом из них  $f_i(r, t)$ , где  $r$  и  $t$  – координаты ячейки потока в пространстве и времени соответственно.

Итерацию клеточного автомата можно записать следующим образом:

$$f_i(r + c_i, t + 1) - f_i(r, t) = \Omega_i(f), \quad (1)$$

$$q_i(r + c_i, t + 1) - q_i(r, t) = \Lambda_i(f), \quad (2)$$

где  $\Omega_i(f)$  - оператор столкновений,  $\Lambda_i(f)$  — оператор теплообмена.

Физический смысл оператора столкновений можно трактовать, как релаксацию плотностей распределения к равновесному состоянию. Поэтому он вычисляется следующим образом:

$$\Omega_i(f) = \frac{-1}{\tau} (f_i(r, t) - f_i^{eq}(r, t)), \quad (3)$$

где  $\tau$  - время релаксации.

Функция  $f_i^{eq}$  обозначает равновесное распределение частиц по скоростным каналам и зависит от локальной скорости и плотности среды.

$$f_{i,eq} = W_i \rho \left( 1 + 3c_i v + \frac{9}{2} (c_i v)^2 - \frac{3}{2} v^2 \right), \quad (4)$$

где  $u$  – вектор скорости для данной ячейки,

$$W_0 = \frac{4}{9}, \quad W_{1,2,3,4} = \frac{1}{9}, \quad W_{5,6,7,8} = \frac{1}{36}. \quad (5)$$

Расчетная формула для оператора теплообмена аналогична формуле оператора столкновений:

$$\Lambda_i(f) = \frac{-1}{\tau_q} (q_i(r, t) - q_i^{eq}(r, t)), \quad (6)$$

где  $q^{eq}$  – плотность равновесного распределения количества теплоты по скоростным каналам,  $\tau_q$  - температурное время релаксации,

$$q_{i,eq} = W_i Q (1 + 3c_i v). \quad (7)$$

Более подробно данная модель была описана нами ранее [2].

Далее приведем результаты компьютерного моделирования, полученные при использовании данной модели. На представленном ниже рис.1 показано протекание жидкости по искривленной трубе с препятствием внутри. Области потока с более высокой температурой на рисунке темнее. Температура стенок и препятствия ниже, чем температура жидкости. Поток движется слева направо.

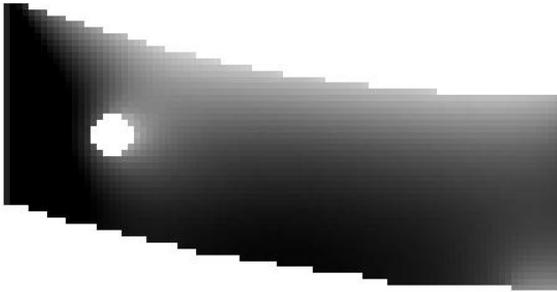


Рис.1. Температурное поле в искривленной трубе с препятствием

Можно видеть, что температура жидкости снижается рядом со стенками и препятствием. При этом ввиду искривления трубы у одной из стенок жидкость охлаждается сильнее, чем у другой.

Полученные результаты совпадают с теоретическими представлениями о реальных процессах теплопереноса в движущейся жидкости.

#### Библиографический список

1. Dieter A. Wolf-Gladrow. Lattice-Gas Cellular Automata and Lattice Boltzmann Models: An Introduction / Editors: A. Dold, Heidelberg, F. Takens, Groningen, B. Teissier, Paris. Lecture Notes in Mathematics. Berlin: Springer-Verlag, 2000, 1725. – 2005.
2. Чернявская А.С., Бобков С.П. Моделирование процесса теплопереноса в движущейся жидкости. Вестник ИГЭУ, 2014, вып.4, с.53-57.

*А. А. Гайворонская, студ.; рук. д.т.н., проф. В.П. Жуков.,  
(ИГЭУ, Иваново)*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРОВОДНИКА С ТОКОМ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ТЕПЛООБМЕНА С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

Целью данной работы является исследование изменения во времени температуры проводника с током при различных условиях теплообмена проводника с окружающей средой.

При выполнении исследования были поставлены и решены следующие задачи: задача теплообмена проводника с током при постоянной температуре окружающей среды ( $t_2 = \text{const}$ ); задача теплообмена проводника с током с учетом изменения температуры окружающей среды ( $t_2 = \text{var}$ ); задача теплообмена проводника с током с учетом изменения температуры окружающей среды и с учетом температурной зависимости сопротивления материала проводника ( $t_2 = \text{var}$ ,  $R = f(t_2)$ ).

Решение перечисленных задач выполнено на примере проводника из олова для следующих исходных данных: длина проводника  $l=0,01\text{м}$ , диаметр проводника  $d=0,1\text{ мм}$ , удельное сопротивление  $\rho_{\text{олово}}=12 \cdot 10^{-8}\text{ Ом}\cdot\text{м}$ , коэффициент теплоотдачи  $\alpha=12\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ , удельная теплоемкость олова  $c_1=220\text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ , плотность олова  $\rho_{\text{олово}}=7280\text{ кг}/\text{м}^3$ , температура плавления олова  $t_{\text{плавл}}=232^\circ\text{C}$ , сила тока  $I=16\text{А}$ .

Для решения первой задачи составляется уравнение теплового баланса проводника при условии постоянной температуры окружающей среды ( $t_2 = \text{const}$ ): выделяющаяся при прохождении тока тепловая энергия ( $I^2 R dt$ ) расходуется на нагрев проводника ( $c_1 m_1 dt_1$ ) и потери теплоты в окружающую среду за счет теплоотдачи ( $\alpha F(t_1 - t_2) dt$ ):

$$I^2 R dt = \alpha F(t_1 - t_2) dt + c_1 m_1 dt_1$$

или после преобразований

$$\frac{dt_1}{dt} = \frac{I^2 R}{c_1 m_1} - \frac{\alpha F(t_1 - t_2)}{c_1 m_1}, \quad (1)$$

где  $R$  –сопротивление проводника;  $\tau$ –время процесса,  $F$ –площадь теплообмена,  $t_1, t_2$ –температура проводника и окружающей среды соответственно,  $m_1$ –масса проводника.

Из решения дифференциального уравнения (1) с начальными условиями  $t_1(0)=0$  выражается время, за которое проводник с током нагревается до заданной температуры  $t_1^*$ :

$$\tau = -\frac{c_1 m_1}{\alpha F} \ln \left( \frac{I^2 R + \alpha F t_2 - \alpha F t_1^*}{I^2 R + \alpha F t_2} \right). \quad (2)$$

В том случае, если проводник с током помещается в ограниченный объем, температура которого может заметно изменяться, тепловые балансы для проводника и выделенного объема записываются в виде системы дифференциальных уравнений относительно температур проводника и среды в виде:

$$\frac{dt_1}{dt} = \frac{I^2 R}{c_1 m_1} - \frac{\alpha F(t_1 - t_2)}{c_1 m_1}, \quad \frac{dt_2}{dt} = \frac{\alpha F(t_1 - t_2)}{c_2 m_2}, \quad (3)$$

где  $m_2$ –масса выделенного объема среды.

Для учета изменения сопротивления проводника от его температуры используется известная зависимость вида:  $R = R_{20}(1 + \tilde{\alpha}(t_1 - 20))$ , с учетом которой система дифференциальных уравнений (3) принимает вид:

$$\frac{dt_1}{d\tau} = \frac{I^2 R_{20}(1 + \tilde{\alpha}(t_1 - 20))}{c_1 m_1} - \frac{\alpha F(t_1 - t_2)}{c_1 m_1}, \quad \frac{dt_2}{d\tau} = \frac{\alpha F(t_1 - t_2)}{c_2 m_2}. \quad (4)$$

Для численного решения систем уравнений (3) и (4) использовался метод Рунге-Кутты четвертого порядка, расчеты производились в среде MATLAB. В результате расчетов определялось время нагрева проводника до температуры плавления. Для проводника с выбранными характеристиками оно оказалось равным 0,087с без учета зависимости сопротивления от температуры и 0,073с с учетом данной зависимости. При помещении проводника в среду с изменяющейся температурой, наблюдается как нагрев проводника, так и нагрев среды. Причем при одном и том же времени процесса (0,1с) проводник нагрелся до более высокой температуры при учете температурной зависимости сопротивления материала проводника.

*С.М. Коринченко, студ.; рук. д.т.н., проф. В.П. Жуков  
(ИГЭУ, Иваново)*

## АЛГОРИТМ РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАТЕРИАЛА ПО ВЫСОТЕ КИПЯЩЕГО СЛОЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТА IMAGE PROCESSING TOOLBOX

Аппараты с кипящим слоем широко используются для проведения целого ряда теплофизических и химических процессов в энергетической, химической и фармацевтической отраслях промышленности. Для моделирования и расчета таких аппаратов наряду с теоретическими подходами [1] активно проводятся экспериментальные исследования, на основании которых осуществляются как разработка эмпирического обеспечения инженерных методов расчета, так и проверка адекватности теоретических описаний. Одним из важнейших факторов, влияющих на кинетику процессов в кипящем слое, является распределение

частиц твердой фазы по размерам зерен и по высоте аппарата. Данные распределения позволяют определять как время пребывания материала в слое, так и площадь межфазной поверхности, которые во многом определяют кинетику теплофизических и химических процессов, протекающих в кипящем слое.

Целью работы является разработка алгоритма обработки экспериментальных фотографических изображений для определения распределения частиц материала по размерам и высоте слоя.

Разработанный алгоритм обработки фотографических изображений слоя с использованием Image Processing Toolbox пакета Matlab [2] включает следующие этапы: преобразование полноцветного изображения в полутоновое; выделение на изображении границ объектов (частиц слоя) методом Canny, параметры которого подбираются эмпирически на основании анализа тестовых изображений с известным распределением; заливка замкнутых областей на изображении и определение искомого распределений.

Для компьютерной реализации описанного алгоритма с использованием пакета Matlab разработано соответствующее программное обеспечение. В ходе численных экспериментов при обработке фотографических изображений были выделены интересующие объекты (частицы слоя) и найдено их распределение по размерам и по высоте слоя, показана адекватность предложенного алгоритма обработки изображений.

#### **Библиографический список**

1. Мизонов В.Е. Расчетно-экспериментальное исследование аппарата с двумерным псевдооживленным слоем /В.Е. Мизонов, А.В. Огурцов, А.В. Митрофанов, К. Тапнус //Вестник ИГЭУ.–2009.Вып.3.–С. 20-22.
2. Дьяконов В.П. MATLAB 6/5 SP1/7/7 SP1 + Simulink 5/6. Работа с изображениями и видеопотоками. –М.:СОЛОН-Пресс.–2005.

Осинов Д.А., студ.; рук. д.т.н., проф. Жуков В.П.  
(ИГЭУ, Иваново)

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБОАГРЕГАТОВ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ ТЭЦ

Представление энергетических характеристик оборудования ТЭЦ в компьютерном виде и решение с их помощью практических задач является актуальной задачей, стоящей перед энергетической отраслью.

Целью работы является разработка компьютерных моделей турбоагрегатов тепловых электрических станций и оптимизация на их основе режимов работы энергетического оборудования.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: разработка компьютерных моделей энергетических характеристик турбоагрегатов, позволяющих определять удельные затраты топлива на выработку электрической энергии; решение задачи оптимального распределения нагрузки между турбоагрегатами на основании разработанных компьютерных моделей оборудования ТЭЦ.

Одной из проблем при компьютерном представлении энергетических характеристик является корректное задание области допустимых нагрузок энергетического оборудования, которая часто имеет сложную многомерную структуру. Пример области допустимых нагрузок для теплофикационной турбины ПТ-80 представлен на рис. 1. Энергетические характеристики традиционно связывают удельные затраты тепловой энергии с нагрузкой турбины  $q_i(N_i, Q_{pi}, Q_{Ti})$ , где  $Q_p, Q_T$  – тепловая производственная и теплофикационная нагрузки соответственно;  $N$  – электрическая нагрузка турбоагрегата;  $q$  – удельный расход тепла брутто на выработку электроэнергии. При разработке компьютерной модели турбоагрегата сначала решается задача определения попадания точки с заданными значениями нагрузки на турбину ( $N, Q_T, Q_p$ ) в область допустимых значений. При условии попадания точки в рабочую область решается задача интерполяции, то есть определяется значение удельного расхода теплоты  $q$  для точки с заданными координатами  $N, Q_T, Q_p$ . Данная задача решена нами ранее [1] и здесь подробно не комментируется.

Полученные компьютерные модели турбоагрегатов позволяют сформулировать задачу по оптимальному распределению нагрузки между работающими турбоагрегатами ТЭЦ. Пусть задана суммарные нагрузки на станцию  $N, Q_T, Q_p$ , которые нужно оптимально распре-

лить между  $n$  турбоагрегатами с известными энергетическими характеристиками  $q_i(N_i, Q_{ni}, Q_{mi})$ . На рис. 1 приведена принципиальная схема включения пяти турбин тепловой станции с указанием потоков тепловой и электрической энергий. В рассматриваемом примере выбираются одинаковые турбины ПТ-80, рабочая область каждой из которых определена. Целевая функция оптимизации определяется как суммарное потребление всеми турбинами тепловой энергии, которое обеспечивает заданную нагрузку станции. При решении оптимизационной задачи определяются значения параметров оптимизации – тепловые и электрические нагрузки каждой турбины, которые обеспечивают минимальное значение целевой функции. Математическая формулировка задачи записывается следующим образом:

$$F_{ц} = \sum_{i=1}^n N_i * q_i(N_i, Q_{ni}, Q_{Ti}) \rightarrow \min_{N_i, Q_{ni}, Q_{Ti}},$$

где  $n$  – количество турбоагрегатов, участвующих в распределении нагрузки; индекс  $i$  – номер агрегата.

Суммарные значения тепловых и электрических нагрузок, которые необходимо распределить, заданы и записаны в виде ограничений:  $N = \sum_{i=1}^n N_i$ ;  $Q_{п} = \sum_{i=1}^n Q_{ni}$ ;  $Q_{т} = \sum_{i=1}^n Q_{Ti}$ . При этом ограничения нагрузок для каждой турбины определяются видом области допустимых значений  $N_i^{min} \leq N_i \leq N_i^{max}$ ;  $Q_{Ti}^{min} \leq Q_{Ti} \leq Q_{Ti}^{max}$ ;  $Q_{ni}^{min} \leq Q_{ni} \leq Q_{ni}^{max}$ .

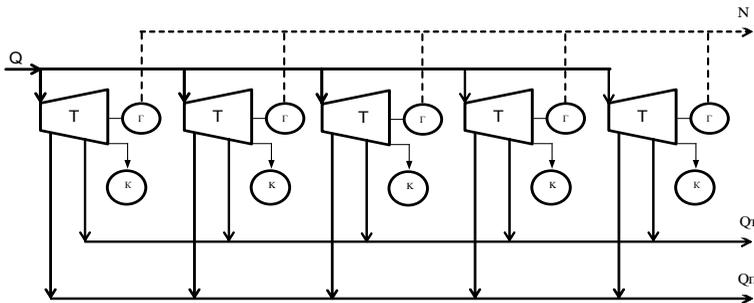


Рис.1. Схема энергопотоков для станции из пяти турбин ПТ-80: штриховой линией показаны потоки электрической энергии; сплошными линиями – потоки тепловой энергии, Т–турбина; Г–генератор; К – конденсатор

Решение оптимизационной задачи выполнялось в два этапа. На предварительном этапе на ограниченной области поиска значений нагрузок был протестирован ряд существующих методов оптимизации

с целью определения наиболее приемлемых методов. Отобранными на первом этапе методами на заключительном этапе решалась оптимизационная задача для всей рабочей области допустимых нагрузок.

На предварительном этапе решения для оптимизации распределения нагрузок пяти одинаковых турбоагрегатов РТ-80 были исследованы следующие методы: перебора; случайного поиска; Хука-Дживса; покоординатного спуска (на основе метода половинного деления); динамического программирования (по принципу оптимальности Беллмана) [2]. Практически одинаковые результаты решения оптимизационной задачи были получены всеми методами. Однако время, необходимое для решения задачи, для методов Хука-Дживса и динамического программирования оказалась на два порядка меньше по сравнению с остальными. На втором этапе оптимизации были использованы именно эти два метода.

Для каждого из выбранных методов подсчитаны временные затраты на получение решения, количество итераций и значение целевой функции в точке минимума. Суммарные распределяемые нагрузки составили:  $N=270$  МВт;  $Q_{п}=20$  Гкал/ч;  $Q_{т}=260$  Гкал/ч.

**Таблица.** Результаты решения задачи оптимального распределения нагрузки между турбоагрегатами ТЭЦ

| Обозначение       | Значение          |                                      |
|-------------------|-------------------|--------------------------------------|
|                   | Метод Хука-Дживса | Метод динамического программирования |
| $N_1$ , МВт       | 55.5              | 30                                   |
| $Q_{п1}$ , Гкал/ч | 8                 | 8                                    |
| $Q_{т1}$ , Гкал/ч | 55                | 60                                   |
| $N_2$ , МВт       | 54.75             | 36                                   |
| $Q_{п2}$ , Гкал/ч | 5.5               | 0                                    |
| $Q_{т2}$ , Гкал/ч | 53.5              | 44                                   |
| $N_3$ , МВт       | 54.75             | 52                                   |
| $Q_{п3}$ , Гкал/ч | 3.8               | 4                                    |
| $Q_{т3}$ , Гкал/ч | 52.5              | 52                                   |
| $N_4$ , МВт       | 54                | 68                                   |
| $Q_{п4}$ , Гкал/ч | 2.7               | 4                                    |
| $Q_{т4}$ , Гкал/ч | 50.5              | 52                                   |
| $N_5$ , МВт       | 51                | 84                                   |
| $Q_{п5}$ , Гкал/ч | 0                 | 4                                    |
| $Q_{т5}$ , Гкал/ч | 48.5              | 52                                   |
| F, Гкал/ч         | 364.559           | 370.602                              |
| Число итераций    | 9                 | 1156                                 |
| Время счета, с    | 00:20             | 42:49                                |

Анализ результатов численных экспериментов, приведенный в таблице, показал преимущества по числу итераций и значению целевой функции метода Хука–Дживса по сравнению с методом динамического программирования.

Решение данной задачи позволяет эффективно определять оптимальные нагрузки энергетического оборудования и обеспечивать реализацию технологий, связанных с энергосбережением.

#### **Библиографический список**

1. Осипов Д.А., Андреев А.А., Жуков В.П. К вопросу оцифровки энергетических характеристик оборудования для использования в программно-технических комплексах ТЭС/ Интеллектуальные энергосистемы: Труды II Международного молодежного форума. т. I. –Томск, 2014–С.346-347.
2. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. – М.: Дрофа, 2004. – 207 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

### Секция 20. Анализ и синтез систем электроприводов

|   |    |
|---|----|
| <i>Шмарин Я.А.; рук. Кодкин В.Л.</i> Экспериментальное исследование частотного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами.....                | 3  |
| <i>Замков В.А., Баганов И.Ю.; рук. Лебедев С.К.</i> Астатические регуляторы положения систем позиционирования электромехатронных модулей.....               | 5  |
| <i>Короткевич А.С., Зенкин Д.М.; рук. Лебедев С.К.</i> Статические регуляторы положения систем позиционирования электромехатронных модулей.....             | 7  |
| <i>Дережков Р.А.; рук. Колганов А.Р.</i> Программно-технический комплекс удаленного выполнения натуральных экспериментов.....                               | 9  |
| <i>Абрамов С.Н.; рук. Глазунов В.Ф.</i> Моделирование процесса деформации ткани в системе электропривода двухмашинного агрегата.....                        | 11 |
| <i>Морозов О.М., Титов И.С.; рук. Лебедев С. К.</i> Исследование основных элементов LEGO Mindstorms NXT 2.0 в лабораторном практикуме по робототехнике..... | 14 |
| <i>Зайцев Д.С.; рук. Куленко М.С.</i> Система управления электроприводом на основе нечёткого регулятора.....  | 15 |
| <i>Глебов Н.А.; рук. Виноградов А.Б.</i> Система беспоиcкового адаптивного векторного управления тягового электропривода.....                               | 17 |
| <i>Ушков А.С.; рук. Колганов А.Р.</i> Сравнение однофазных и многофазных корректоров коэффициента мощности.....   | 18 |
| <i>Сибирцев М.А.; рук. Виноградов А.Б.</i> Система управления электрической трансмиссией гусеничного трактора.....  | 20 |
| <i>Мамин С.А.; рук. Глазунов В.Ф.</i> Моделирование деформации основы и нити в системе электропривода сновальной машины.....                                | 22 |
| <i>Абакаров М.Ш., Герасимов А.И.; рук. Ширяев А.Н.</i> Электропривод и автоматика разрывной машины.....   | 25 |
| <i>Малинин Л.Е.; рук. Лебедев С. К.</i> Разработка индивидуальных заданий лабораторного практикума по основам Mathcad и Matlab.....                         | 27 |
| <i>Винокуров А.Д., Фурсал А.А.; рук. Ширяев А.Н.</i> Математическая модель нагружающего устройства разрывной машины.....                                    | 28 |
| <i>Хангулиев А.Х.; рук. Курнышев Б.С.</i> Анализ электромагнитных процессов в электроприводе.....   | 30 |
| <i>Гаак П.В.; рук. Пруднов А.В.</i> Анализ автоматизированных систем управления металлорежущими станками.....   | 31 |
| <i>Павлухин В.В.; рук. Захаров А.М.</i> Моделирование многоуровневого высоковольтного преобразователя частоты.....  | 33 |
| <i>Сахарова В.Е.; рук. Захаров А.М.</i> Аппаратура воздушного охлаждения газа компрессорной станции магистрального газопровода.....                         | 34 |
| <i>Шарапанов Е.С., Якубенко А.В.; рук. Курнышев Б.С.</i> Разработка программы для исследования асинхронного электропривода.....                             | 35 |

|   |    |
|---|----|
| <i>Серов Р.А.; рук. Захаров А.М.</i> Моделирование силовой ячейки многоуровневого высоковольтного преобразователя частоты.....            | 38 |
| <i>Старшов И.А., Шаров А.Е.; рук. Пруднов А.В.</i> Разработка элементов автоматизированной подготовки управляющих программ.....           | 39 |
| <i>Старшов И.А., Шаров А.Е.; рук. Пруднов А.В.</i> Разработка элементов модели перемещения рабочих органов станка с ЧПУ.....              | 41 |
| <i>Румянцев А.Ю.; рук. Спичков Ю.П.</i> Совершенствование системы управления натяжением транспортируемого трикотажа в поточной линии..... | 43 |

## Секция 21. Электромеханика и магнитожидкостные устройства

|  |    |
|--|----|
| <i>Ачитаев А.А. ; рук. Удалов С. Н.</i> Повышение запаса динамической устойчивости распределенных источников энергии с малой постоянной времени.....   | 45 |
| <i>Котов А.Б.; рук. Морозов Н.А.</i> Влияние напряжения питания на эксплуатационные параметры асинхронного двигателя.....  | 47 |
| <i>Бондаренко Ю.И.; рук. Казаков Ю.Б.</i> Расчётные исследования виброшумовых характеристик тягового асинхронного двигателя пери работе от преобразователя частоты с широтно-импульсной модуляцией напряжения..... | 49 |
| <i>Нестеров С.А.; рук. Казаков Ю.Б.</i> Численное моделирование взаимосвязанных физических полей в магнитожидкостном демпфирующем устройстве.....  | 53 |
| <i>Зверев Я.А.; рук. Казаков Ю.Б.</i> Анализ теплового состояния тягового асинхронного двигателя гибридного транспорта.....  | 55 |
| <i>Рогозин Р.М.; рук. Лапин А.Н.</i> Обзор методов и проблем электромагнитных расчётов силовых трансформаторов. Современные перспективы их решения.....  | 59 |
| <i>Корнилов Д.С.; рук. Казаков Ю.Б.</i> Совершенствование методики проектирования торцевого генератора с постоянными магнитами.....  | 61 |
| <i>Лапин А.Д.; рук. Шишкин В.П.</i> Анализ магнитного поля в однофазном асинхронном двигателе с пусковым конденсатором.....  | 62 |
| <i>Жуков С.В.; рук. Караулов В.Н.</i> Полевые расчёты гибридного шагового двигателя методом конечных элементов в ANSYS MAXWELL.....  | 64 |
| <i>Зайкин С.Н.; рук. Караулов В.Н.</i> Разработка тягового электрического двигателя электромеханической трансмиссии трактора.....  | 68 |
| <i>Коростылев К.А.; рук. Тихонов А.И.</i> Анализ точности цепных тепловых моделей обмоток трансформатора.....  | 71 |
| <i>Стулов А.В.; рук. Тихонов А.И.</i> Многоуровневый тепловой расчет масляных трансформаторов в процессе поиска оптимального решения.....  | 73 |

|   |    |
|---|----|
| <i>Еремин И.В.; рук. Тихонов А.И.</i> Техничко-экономическое обоснование производства распределительных трансформаторов с сердечником из аморфной стали.....          | 76 |
| <i>Трофимович И.В.; рук. Тихонов А.И.</i> Разработка САПР силовых распределительных трансформаторов.....  | 80 |
| <i>Рассолов С.Е.; рук. Страдомский Ю.И.</i> Устройство объемной очистки воды от нефтепродуктов.....   | 82 |
| <i>Волков М.Н.; рук. Страдомский Ю.И.</i> Настройка коммутации в электрических машинах постоянного тока.....  | 84 |
| <i>Профьев М.В.; рук. Страдомский Ю.И.</i> Конструкции синхронных двигателей для привода компрессоров.....  | 85 |
| <i>Гайворонская А.А.; рук. Шишкин В.П.</i> Вопросы расчета асинхронного двигателя с экранированными полюсами.....   | 86 |
| <i>Кузнецова А.В.; рук. Морозов Н.А.</i> Магнитожидкостная коническая муфта.....  | 89 |
| <i>Волкова Д.В.; рук. Камакин В.А.</i> Методы аппроксимации петель гистерезиса электротехнических сталей применительно к расчету параметрического трансформатора..... | 91 |

## Секция 22. Микроэлектронные и микропроцессорные информационно-управляющие системы

|   |     |
|---|-----|
| <i>В.И. Левин, студ.; рук. А.А. Анисимов</i> Использование искусственной нейронной сети для задачи идентификации и настройки системы с регулятором состояния..... | 93  |
| <i>Чадов М.А.; рук. Терехов А.И.</i> Логический анализатор.....   | 97  |
| <i>Р.Ж. Маидже</i> Датчики в охранных системах частных домов.....   | 100 |
| <i>Д. Спиридонова, Р. Горбенков</i> Терменвокс.....   | 102 |
| <i>А.О. Адаменко, И.Р. Парахневич</i> Системы контроля доступа транспортных средств.....  | 103 |
| <i>В.А. Усачева.; рук. Б.П. Силюянов</i> Датчик температуры в системе «умный дом».....  | 104 |
| <i>И.В. Алябин, А.А. Климашова; В.В. Аполонский.</i> История создания oled панелей.....   | 105 |
| <i>Д.С. Ермолов, студ.; рук. А.П. Карандашев</i> Устранение влияния паразитных эхо-сигналов в ультразвуковом уровнемере.....                                      | 107 |
| <i>О.А. Кузнецова; И.А. Мошкин</i> Наномоторы. Прошлое, настоящее, будущее.....   | 110 |
| <i>С. Швецов</i> Универсальная система двунаправленной связи.....   | 112 |
| <i>Е.Ю. Курьлин; рук. С.А. Капустин</i> Разработка модуля характеристикографа для исследования биполярных транзисторов.....                                       | 115 |

|  |     |
|--|-----|
| <i>Галанова Л.Д.; рук. Терехов А.И.</i> Применение квантовой электроники в медицине.....   | 118 |
| <i>А.А. Муравьева; рук. А.П. Бурков</i> Исследование методов синтеза цифровых фильтров частотной коррекции электроприводов переменного тока..... | 121 |
| <i>Герасимов А.А.; рук. Терехов А.И.</i> Процесс изготовления печатных плат.....   | 128 |
| <i>Некрасова Е.И.; рук. Терехов А.И.</i> Исследование преобразователя уровней.....   | 129 |
| <i>Некрасова Е.И.; рук. Терехов А.И.</i> Применение искусственных нейронных сетей.....   | 131 |
| <i>А.С. Чёренькая;рук. А.И. Терехов</i> Синтез системы управления импульсным преобразователем. Напряжения.....                                   | 132 |
| <i>Владимиров Д.Р.; рук. Фоминич Э. Н.</i> Электромагнитный терроризм, новая угроза для информационно-управляющих систем.....                    | 133 |
| <i>Серов А.Н.; рук. Шатохин А.А.</i> Влияние нелинейности функции преобразования АЦП на погрешность измерения действующего значения ..           | 135 |
| <i>Щобак А.А.; рук. Скрипачев М.О.</i> Устройство пофидерного контроля изоляции присоединений щитов постоянного оперативного тока.....           | 138 |
| <i>И.В.Вершинин; В.В.Тютиков</i> Синтез параметрически грубых систем модального управления.....  | 139 |

### Секция 23. Технология машиностроения

|   |     |
|---|-----|
| <i>Подольня А.А.; рук. Тымчик Г. С.</i> Экспериментальные исследования формирования акустической волны ЭМА преобразователем.....                    | 142 |
| <i>Голяс А.А.; рук. Полетаев В.А.</i> Упрочнение деталей электродуговым напылением.....   | 144 |
| <i>Решетников А.П.; рук. Чураев Р.Р.</i> Разработка и выбор параметров для оптимизации линейного генератора с неодимовыми магнитами.....            | 146 |
| <i>Булгачев Е.А., Мухин А.В.; рук. Колосов В.Н.</i> Обучение САПР ТП «ТехноПро» для автоматического проектирования технологических процессов.....   | 148 |
| <i>Тютюнников Ю.М.; рук. Третьякова Н.В.</i> Применение композиционных материалов в машиностроении.....   | 150 |
| <i>Крестьянинова О.В.; рук. Полетаев В.А.</i> Магнитно-абразивная обработка...152   | 152 |
| <i>Панченко К.Н.; рук. Степанова Т.Ю.</i> Расчет на износ металлической нити..154   | 154 |
| <i>Марусин А.П.; рук. Полетаев В.А.</i> Исследование поверхностей трения рабочего зазора магнитожидкостного устройства.....                         | 156 |
| <i>Шургин И.А., Иовлева О.А.; рук. Орлов А.С.</i> Современные тенденции конструирования станков в машиностроении.....                               | 158 |
| <i>Шпенькова Е.В.; рук. Полетаев В.А.</i> Полирование деталей сложной конфигурации.....   | 160 |
| <i>Калинин И.А.; рук. Киселев В.В., Зарубин В.П., Пучков П.В.</i> Разработка комбинированного смазочного комплекса для узлов пожарной техники...162 | 162 |
| <i>Федорова А.В.; рук. Полетаев В.А.</i> Визуализация поверхностей трения деталей машин.....  | 164 |

|  |     |
|--|-----|
| <i>Смирнов М.В.; рук. Топоров А.В., Киселев В.В., Коновалов А.С.</i> Разработка конструкции пирогенератора давления рабочей жидкости для гидравлического аварийно-спасательного инструмента..... | 167 |
| <i>Виноградов К.Г.; рук. Полетаев В.А.</i> Влияние смазочно-охлаждающих технологических сред на процесс магнитно-абразивного полирования.....  | 169 |
| <i>Мухин Ю.С.; Волков А.С.; рук. Орлов А.С., Долгих И.Ю.</i> Применение установок ТВЧ в машиностроении.....  | 171 |
| <i>Масляев М.А.; рук. Третьякова Н.В.</i> Анализ методов прессования полимерных композитов в формах.....   | 173 |
| <i>Лебедев Д.А.; рук. Коновалов А.С.</i> Возможность применения магнитных жидкостей в качестве уплотнителя в разъемных соединениях пожарных рукавов.....   | 175 |
| <i>Покровский А.А., Иванов В.Е. Мухин А.В.; рук. Полетаев В.А.</i> Упрочнение деталей машин нанесением гальванопокрытия из хрома с ультраалмазами.....   | 177 |
| <i>Поляков М.А.; рук. Казанцев С.Г., Топоров А.В.</i> Основные направления повышения стойкости быстроразъемных соединений пожарных рукавов к ударным нагрузкам.....                              | 179 |
| <i>Сошников А.П.; рук. Полетаев В.А.</i> Исследование коррозионной стойкости деталей.....  | 181 |
| <i>Гладченко Е.Д.; рук. Пучков П.В., Киселев В.В., Легкова И.А.</i> Анализ причин коррозионного разрушения металлоконструкций.....   | 183 |
| <i>Власов А.М., Голяс А.А. Цеценевская О.И.; рук. Полетаев В.А.</i> Применение программы ANSYS для теплового анализа.....  | 185 |
| <i>Гусев Л.А.; рук. Казанцев С.Г., Топоров А.В.</i> Разработка новой конструкции крышевой лестницы.....  | 187 |
| <i>Шпенькова Е.В.; рук. Полетаев В.А., Никаноров А.В.</i> Возможности применения терморасширенного графита.....  | 189 |
| <i>Зайцев А.М.; рук. Бекташов Д.А.</i> Влияние скорости резания на качество обрабатываемой поверхности при резании.....  | 191 |
| <i>Калинин И.А.; рук. Полетаев В.А.</i> Алмазное выглаживание.....   | 193 |
| <i>Коровкин А.А.; рук. Ведерникова И.И.</i> Исследование коррозионной стойкости упрочненной поверхности.....   | 195 |
| <i>Попова Е.О., Федоров И.В.; рук. Шурыгин А.М.</i> Имитационное моделирование приводных устройств в среде MATHCAD.....  | 197 |
| <i>Осипенко А.А.; рук. Копосов В.Н.</i> Обучение САПР ТП «ТехноПро» для расчета параметров технологических процессов.....  | 198 |
| <i>Попова Е.О., Федоров И.В.; рук. Шурыгин А.М.</i> Модель асинхронного двигателя в среде MATHCAD.....   | 199 |
| <i>А. А. Масловский.; рук. А. А. Киселев</i> Свойства и перспективы применения углеродных наноструктур.....  | 200 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Секция 24. Динамика, прочность, вибродиагностика</b>   |     |
| <i>М.Ф. Низамиев; рук. И.В. Ившин</i> Информационно-измерительное обеспечение измерительно-диагностического комплекса для диагностики энергетических установок..... | 203 |
| <i>А.В. Швед, О.Г. Бизяева; рук. Л.Б. Маслов</i> Конечно-элементный анализ рамы отсека крыла самолёта в среде MSC.PATRAN/NASTRAN.....                               | 205 |
| <i>Е.С. Шильцев; рук. Н.А. Сабанеев</i> Оптимизация поперечной балки пола фюзеляжа самолета.....  | 207 |
| <i>М.А. Воробьев, Е.С. Шильцев; рук. А.В. Круглов</i> Расчет на флаттер стреловидного крыла в дозвуковом потоке.....  | 209 |
| <i>К.И. Евграфова; рук. З.В. Зарубин</i> Исследование эффекта памяти формы при изгибе пластины.....   | 211 |
| <i>И. В. Иванова, Д. В. Корепов; рук. М.А. Ноздрин</i> Расчет на прочность модели кронштейна самолета.....  | 212 |
| <i>Е.Э. Ильина; рук. Л.Б. Маслов</i> Изучение изготовления продукта стеклопроизводства.....   | 214 |
| <i>В.Ф. Осай; рук. М.А. Ноздрин</i> Комплексный расчет композитной панели механизации крыла самолета.....   | 216 |
| <i>В.Е. Тунцев; рук. М.А. Ноздрин</i> Разработка динамической модели стойки шасси самолета.....   | 219 |
| <i>И.С.Цветков; рук. Л.Н. Крайнова</i> Динамический расчет лопатки последней ступени паровой турбины.....   | 222 |
| <i>А.М. Селезнев; рук. Ф.Б. Огурцов</i> Исследование чувствительности статистических методов вибродиагностики подшипников качения.....                              | 224 |
| <i>С. Е. Воробьев; рук. А.Б. Колобов</i> Расчет частотных диагностических признаков дефектов роторных машин.....  | 226 |
| <i>Е.А. Сидякина, К.Ю. Соколов; рук. В.А. Огурцов</i> Кинетика грохочения сыпучих материалов.....   | 228 |
| <i>А.А. Навдаев, И.Н. Гоглев; рук. В.А. Огурцов</i> Исследование процесса миграции частиц по виброоживленному слою.....   | 229 |
| <i>Д.С. Сидоров, Е.В. Богданов; рук. А.П. Алешина</i> Определение основных показателей фракционирования сыпучих строительных материалов на виброгрохотах.....       | 231 |
| <i>А.П. Алешина, М.А. Гриценко; рук. Е.Р. Брик</i> Исследование процесса фракционирования песчано-гравийных смесей.....   | 232 |
| <i>В.М. Седов; рук. Л.Б. Маслов</i> Параметрическое исследование структурной перестройки костной ткани.....   | 233 |
| <i>В.М. Седов; рук. Л. Б. Маслов</i> Определение собственных частот и форм колебаний конструкции фермеры.....   | 236 |
| <i>А. Харьковова; рук. Л.Н. Крайнова</i> Расчет виброизолирующего крепления авиационного двигателя на самолетах нового поколения.....                               | 238 |
| <i>Д. В. Корепов; рук. И.А. Белов</i> Разработка шестикомпонентного тензорезисторного датчика усилий.....   | 239 |
| <i>Бизяева О.Г.; рук. И.А. Белов</i> Расчёт резьбового соединения обсадной трубы.....   | 241 |

|  |     |
|--|-----|
| <i>А.В. Швед; рук. И.А. Белов</i> Исследование вибрационного состояния технологического трубопровода.....                              | 243 |
| <i>А.В. Белов; рук. А.Б. Колобов</i> Вибродиагностика роторного электромеханического оборудования.....                                 | 245 |
| <i>М.А. Воробьев; рук. А.Б. Колобов</i> Частотные характеристики дефектов электропривода.....  | 247 |
| <i>В.В. Иванова; рук. А.Б. Колобов</i> Вероятностный расчет прочности и определение частотных признаков дефектов зубчатых передач..... | 250 |

## Секция 25. Математические методы в технике и технологиях

|  |     |
|--|-----|
| <i>С.А. Лебедев; рук. В.Е. Мизонов</i> Ячеичная модель теплопроводности при температурозависимых свойствах среды.....  | 252 |
| <i>Плаксин А.В.; рук. Митрофанов А.В.</i> Моделирование межфазного теплообмена в кипящем слое.....   | 254 |
| <i>Херувимов С.А.; рук. Митрофанов А.В.</i> Моделирование межфазного влагопереноса в кипящем слое.....   | 256 |
| <i>Ермаков К.К.; рук. Шуина Е.А.</i> Математическая модель аэродинамической классификации порошков, построенная на основе теории цепей Маркова.....            | 258 |
| <i>Полищук И.В. ; рук. Бобков С.П.</i> Распараллеливание и векторизация клеточного автомата.....   | 260 |
| <i>Соколов В.Л.; рук. Бобков С.П.</i> Модификация модели решеточного газа.....   | 263 |
| <i>Небукин В.О.; рук. Липин А.Г.</i> Моделирование процессов тепломассопереноса при капсулировании частиц.....   | 266 |
| <i>Перов П.А.; рук. Елин Н.Н.</i> Моделирование и оптимизация режимов эксплуатации паропроводов перегретого пара.....  | 269 |
| <i>Королёв М.Г.; рук. Елин Н.Н.</i> Режимная оптимизация насосных станций в системе заводнения нефтяных пластов.....   | 272 |
| <i>И.А. Балагуров; рук. В.Е. Мизонов</i> Математическая модель процессов смешивания сегрегирующих сыпучих материалов различной крупности.....                  | 274 |
| <i>Сапига Д.А., Кравале И.А.; рук. Лезнова Н.Р.</i> Разработка виртуальной лаборатории исследования колебаний систем с одной степенью свободы.....             | 278 |
| <i>Сергунин Н.А.; рук. Шуина Е.А.</i> Оптимальное управление подачей сегрегирующего компонента в смесителе периодического действия.....                        | 280 |
| <i>Чернявская А.С.; рук. Бобков С.П.</i> Компьютерное моделирование теплопереноса в движущейся жидкости.....   | 283 |
| <i>А. А. Гайворонская; рук. В.П. Жуков</i> Определение температуры проводника с током при различных условиях теплообмена с окружающей средой.....              | 285 |
| <i>С.М. Коринченко; рук. В.П. Жуков</i> Алгоритм расчета распределения материала по высоте кипящего слоя с использованием пакета IMAGE PROCESSING TOOLBOX..... | 287 |
| <i>Осипов Д.А.; рук. Жуков В.П.</i> Компьютерное моделирование турбоагрегатов и оптимизация режимов работы оборудования ТЭЦ.....                               | 289 |

## **ЭЛЕКТРОМЕХАНОТРОНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

Десятая международная научно-техническая конференция  
студентов, аспирантов и молодых учёных  
**«ЭНЕРГИЯ-2015»**

### **МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ**

*Печатается в авторской редакции*

Составитель – к.т.н., доцент Ведерникова И.И.

Компьютерная верстка – Ведерников А.С.

Подписано в печать 4.04.2015. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Печать плоская. Усл. печ. л. 17,43.

Тираж 70 экз. Заказ № 117.

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический  
университет имени В.И. Ленина».

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.