

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Ивановский государственный энергетический университет  
имени В.И. Ленина»

---

# **ЭЛЕКТРОМЕХАНОТРОНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

## **«ЭНЕРГИЯ-2024»**

ДЕВЯТНАДЦАТАЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ  
(ОДИННАДЦАТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ)  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ  
И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

### **МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ**

**г. Иваново, 14 – 16 мая 2024 года**

**ТОМ 4**

**ИВАНОВО**

**ИГЭУ**

**2024**

УДК 62-1;62-5;621  
ББК 30.1; 30.2-5-05; 34.5

**ЭЛЕКТРОМЕХАНОТРОНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**//  
Девятнадцатая всероссийская (одиннадцатая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия–2024»: Материалы конференции. В 6 т. Т. 4. – Иваново: ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», 2024. – 116 с.

ISBN 978-5-00062-628-3  
ISBN 978-5-00062-626-9(Т.4)

Тезисы докладов 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 электромеханотроники и управления.

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

## **ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ**

**Председатель оргкомитета:** проректор по научной работе, д.т.н., проф. **В.В. ТЮТИКОВ**.

**Зам. председателя:** начальник управления НИРС и ТМ, к.т.н., доц. **А.В. МАКАРОВ**

**Члены оргкомитета по направлению:** декан электромеханического факультета – к.т.н. **Л.Н. Крайнова**, зав. кафедрой ЭиМС – к.т.н., доц. **И.А. Тихомирова**, зав. кафедрой ТМ – к.т.н., доц. **И.И. Ведерникова**, зав. кафедрой ЭиАПУ – к.т.н., доц. **М.С. Куленко**, зав. кафедрой ЭМ – к.т.н., доц. **С.А. Нестеров**, зав. кафедрой ТиПМ – д.ф.-м.н., доц. **Л.Б. Маслов**, зав. кафедрой ПМ – д.ф.-м.н., проф. **В.П. Жуков**, зам. декана ЭМФ по студенческой науке – к.т.н., доц. **В.В. Аполонский**.

**Ответственный секретарь:** к.т.н., доц. **Аполонский В.В.**

**СЕКЦИЯ 20**  
**АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИСТЕМ**  
**ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ**

Председатель –  
д.т.н., профессор **Колганов А. Р.**

Секретарь –  
старший преподаватель **Захаров М. А.**



*А.А. Кузьмин, студ.; К.К. Ермаков, асп.;  
рук. А.Б. Виноградов, д.т.н., доц. (ИГЭУ, Иваново)*

## **ОНЛАЙН ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ ОБСЛУЖИВАНИЯ ЭМТ КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ**

В горнодобывающей промышленности автопарк специальной техники нуждается в своевременном обслуживании и модернизации, без которой проигрывает конкуренцию новым образцам.

Во время ремонта техника простаивает из-за чего накапливается упущенная выгода. Компоненты электромеханической трансмиссии (ЭМТ) карьерного самосвала, разрабатываемые, в частности, в НТЦэ «Вектор» [1], подлежат периодическому обновлению программного обеспечения (ПО) и актуализации документации. У отечественных производителей ЭМТ карьерных самосвалов в публичном доступе нет таких информационных ресурсов в отличие от иностранных компаний, поэтому можно считать, что НТЦэ «Вектор» – пионер в открытой автоматизации сервисного обслуживания ЭМТ среди российских компаний.

Для создания ресурсов сервисной информации и повышения гибкости обслуживания были разработаны соответствующие цифровые инструменты: telegram-бот [2] (автоматизация доступа к актуальной документации, информационная рассылка для работников на местах); приложение EMTProg [3] (удаленное подключение к компонентам ЭМТ); FTP-сервер (хранение документации и удаленный доступ к ней); веб-страница [4] (создание универсальной учетной записи в системе).

По результатам полугодовой работы FTP-сервера ресурсного центра, было замечено, что подключение по протоколу FTP неудобно для чтения документации. Поэтому был разработан бот, который за 9 месяцев к моменту написания работы, зарегистрировал более 300 обращений к документации и 20 – редко используемые операции, (активация блоков КВУ и маскирование ошибок); остальные же команды, как и было задумано, используются наладчиками повседневно.

### **Библиографический список**

1. **Электромеханическая** трансмиссия карьерных самосвалов большой грузоподъемности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vectorgroup.ru/usages/dumptrucks/>, свободный (дата обращения: 18.04.2024).
2. **Кузьмин А. А., Ермаков К. К.** Бот для помощи в сервисном обслуживании электротрансмиссии карьерного самосвала. Москва, 2024. – С. 246.
3. **Виноградов А. Б., Ермаков К. К., Коротков А. А.** Удаленная работа с комплектом тягового электрооборудования карьерного самосвала. Иваново, 2023. – № 4. – С. 63-69.
4. **Ресурсный** центр НТЦ Электропривода «Вектор» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://resources.vectorgroup.ru/>, свободный (дата обращения: 18.04.2024).

*Д.А. Дюжев, студент; К.К. Ермаков, аспирант;  
рук. Н.Е. Гнездов, к.т.н., доцент ЭПиАПУ (ИГЭУ, Иваново)*

## **РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ДВИЖЕНИЯ СЕРВИСНОГО РОБОТА-ГИДА**

В соответствии с программой развития ИГЭУ в университете каждый год растёт число экскурсий, дней открытых дверей и т.п. При этом задействуется значительное число квалифицированных преподавателей, которые, в первую очередь, должны вести учебные занятия и научную деятельность. Для освобождения преподавателей предложено создать сервисного робота-гида «Горди», который должен сопровождать группы людей в помещениях университета и рассказывать им определённую информацию. Для этого робот должен быть оснащён: системой питания, приводом для перемещения, системой ориентирования в пространстве и системой коммуникации с человеком. На первом этапе выполнена разработка и наладка систем питания и перемещения «Горди». Движение робота осуществляется двумя электроприводами с вентильными двигателями номинальным напряжением 36 В. Для управления скоростью движения и выдачи напряжения на двигатели использован специализированный драйвер [1]. Для электропитания драйвера использованы три аккумулятора по 12В малых габаритных размеров, соединённые последовательно с помощью двух промежуточных реле. Для зарядки аккумуляторов с помощью собственной зарядной станции реле могут переключать цепь с последовательного соединения на параллельное. Управление роботом осуществляется с мобильного устройства, подключаемого к Wi-Fi/Bluetooth модулю робота. В качестве контроллера электропривода используется плата ESP32 [2]. На момент написания тезисов успешно завершены ходовые испытания «Горди» в помещении лаборатории. Идёт подбор оборудования и разработка алгоритмов для системы технического зрения и аудио воспроизведения робота. Также разрабатывается приложение для смартфона для управления роботом.

### **Библиографический список**

- 1. Регулятор** мотора техника 12V-36V двойной BLDC JUYI [Электронный ресурс]. <https://clck.ru/3A8XwL>
- 2. Описание** микроконтроллера ESP32 [Электронный ресурс]. <http://micpic.ru/home/proekty-na-esp32/194-opisanie-mikrokontrolleraesp32.htm>

*Н.С. Дыль.; П.Б. Менжинский; рук. А.Б. Менжинский к.т.н., доцент  
(Военная академия Республики Беларусь, г. Минск)*

## **СТРУКТУРА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ БЕСКОНТАКТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА**

В настоящее время в качестве перспективных электромеханических преобразователей рассматриваются синхронные электрические машины с постоянными магнитами (СЭМПМ) [1]. Синхронные электрические машины с постоянными магнитами различают по форме обратной электродвижущей силы (противо-ЭДС) [1]: электрические машины с противо-ЭДС трапецидальной формы; электрические машины с противо-ЭДС синусоидальной формы. Достоверность новых научных результатов, полученных в процессе исследования СЭМПМ, может быть проверена только при работе с реальным объектом. В связи с этим для исследования таких электрических машин представляется актуальным разработать программно-аппаратный комплекс (ПАК). В ПАК применялась СЭМПМ с противо-ЭДС трапецидальной формы – бесконтактная (бесколлекторная) электрическая машина постоянного тока (БЭМПТ). Одним из основных преимуществ БЭМПТ является отсутствие в конструкции щеточно-коллекторного узла [2].

Программно-аппаратный комплекс для исследования БЭМПТ реализуется на плате Arduino Uno на основе микроконтроллера ATmega328. Для разработки программного обеспечения ПАК использовалась среда программирования Arduino IDE. Также разработано математическое описание ПАК.

Отличительной особенностью разработанного ПАК для исследования БЭМПТ является модульная структура, позволяющая проводить исследования БЭМПТ в различных режимах работы (пуск, регулирование частоты вращения якоря, реверсирование, торможение). Кроме того имеется возможность реализации различных законов изменения нагрузочного момента. Предложенный ПАК может найти практическое применение в исследовательских лабораториях при исследовании БЭМПТ в различных режимах работы.

### **Библиографический список**

1. **Гаврилов, Р.С.** Управление синхронными машинами с постоянными магнитами: учебное пособие / Р.С. Гаврилов, Ю.Н. Мустафаев; Белгос. техн. ун-т. – СПб., 2019 – 78 с.
2. **Овчинников, И. Е.** Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность) / И. Е. Овчинников : Курс лекций. – СПб. : КОРОНА-Век, 2006. – 336 с. : ил.

*М.И. Холодков, студент; К.К. Ермаков, аспирант;  
рук. В.Л. Чистосердов, к.т.н., доцент (ИГЭУ, Иваново)*

## ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С РАЗЛИЧНЫМИ ИНТЕРФЕЙСАМИ

В современном мире, в сфере образования важное место при подготовке квалифицированных кадров занимает лабораторный практикум, который позволяет закрепить полученные теоретические знания и получить практические навыки работы с реально используемым промышленным оборудованием.

Для расширения базы лабораторного оборудования ИГЭУ была выполнена разработка учебного стенда «Вектор», основной задачей которого является обучение студентов работе с современными устройствами.

Многофункциональный стенд предназначен для изучения принципов организации коммуникации между модулями высоковольтного преобразователя частоты, освоения основ разработки НМІ интерфейса для графической панели объекта, программирования ПЛК модулей для работы внутри промышленной сети.

Стенд реализован на современной, преимущественно отечественной элементной базе, с применением наиболее перспективных средств разработки. В состав стенда входят: панельный промышленный персональный компьютер iRobo[1], программируемый логический контроллер (ПЛК) GCAN[2] или Fastwel (опционально), цифровой шестиканальный регулятор ТРМ136 ОВЕН[3], плата преобразователь для коммуникации через оптоволоконное соединение, блок индикации и аналогового управления.

В заключении можно отметить, что благодаря созданию данного стенда студенты смогут изучить взаимодействие компонентов промышленной сети в комплексе. Кроме того, обучающиеся получают практические навыки в разработке оболочек для графических панелей, программировании ПЛК модулей, освоении работы протоколов коммуникации.

### Библиографический список

1. **iROBO-5000-50A1T** Спецификация // iROBO  
URL:[https://irobo.ru/cdn/shop/files/Datasheet\\_iROBO\\_5000\\_50A1T\\_32986021.pdf](https://irobo.ru/cdn/shop/files/Datasheet_iROBO_5000_50A1T_32986021.pdf) (Дата обращения 17.04.2024)
2. **GCAN-PLC-511** Программируемый Логический Контроллер Руководство пользователя // Control-Tec URL: <http://www.control-tec.ru/images/gcan/gcan-plc-511.pdf?ysclid=lv3zyl3rpd455550049> (дата обращения: 17.04.2024).
3. **ТРМ136** Измеритель-регулятор универсальный шестиканальный Руководство по эксплуатации // Овен комплект автоматика  
URL:[https://www.owenkomplekt.ru/assets/files/TRM136/re\\_trm136\\_1-ru-46084.pdf?ysclid=lv4097kviw222229562](https://www.owenkomplekt.ru/assets/files/TRM136/re_trm136_1-ru-46084.pdf?ysclid=lv4097kviw222229562) (дата обращения 17.04.2024)

*И.М. Корешкова, студент; К.К. Ермаков, аспирант;  
рук. А.А. Коротков, к.т.н., доцент (ИГЭУ, Иваново)*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО МНОГОУРОВНЕВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) нашли широкое применение в области высоковольтных многоуровневых преобразователей частоты (ВМПЧ). ВОЛС обеспечивают стабильную высокоскоростную передачу информации между контроллерами преобразователя в условиях электромагнитных помех.

Структура 19-уровневого каскадного ВМПЧ представлена 27 однотипными Н-ячейками (по 9 в каждой фазе). Ячейка ВМПЧ состоит из неуправляемого мостового выпрямителя, ёмкостного фильтра и однофазного инвертора. Управление силовыми ключами и диагностика состояния ячейки осуществляются контроллером ячейки (КЯ). Связь центрального контроллера преобразователя частоты (КПЧ) со всеми КЯ организована по ВОЛС и построена по топологии «звезда». В этом случае требуется большое количество волоконно-оптических приемопередатчиков на стороне КПЧ. Альтернативным вариантом предлагается использовать на каждую фазу ВМПЧ один оптический приёмопередающий модуль и оптический разветвитель (FBT сплиттер), представляющий собой пассивное устройство, изготовленное методом сплавления оптических волокон между собой и позволяющее распределить мощность оптического сигнала в любых пропорциях [1].

Выполнен расчет элементов ВОЛС для ВМПЧ с учетом оптического бюджета (т.е. совокупности потерь оптического сигнала) оптоволоконных приемопередатчиков [2]. Проверка результатов расчета на плате КЯ, линия передатчика которой подключена ко входу приёмника, показала, что в случае последовательного соединения разветвителей с коэффициентом деления 10 на 90% сигнал теряется на 5-ой (из 9-ти) ячейке. Устойчивая связь со всеми ячейками обеспечивается, если исключить соединители (потери в которых составляют до 0,5 дБ), т.е. использовать один сплиттер на 9 абонентов.

### Библиографический список

1. **Оптел**, оптические коммуникации [электронный ресурс]. URL: [https://optel.ru/index.php?route=product/product&path=241\\_18\\_219&product\\_id=1053](https://optel.ru/index.php?route=product/product&path=241_18_219&product_id=1053) (дата обращения: 25.03.2024)

2. **Avago Technologies**: документация/ HFBR-0400Z, HFBR-14xxZ and HFBR-24xxZ Series/ США и др. 2010

*М. А. Копылова, Б. А. Шевченко, студ.; рук. А. А. Чепига, аспирант  
(МГТУ имени Н.Э. Баумана, ФГБОУ ВО «ДонНТУ»,  
ПАО «НПО «Алмаз» им. академика А.А. Расплетина)*

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАТЕЛЯ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА КОМПЛЕКСА ОБСЛУЖИВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ**

Создание и совершенствование математических моделей и алгоритмов для систем управления в комплексах обнаружения и сопровождения групп воздушных объектов, учитывая особенности управления поворотным устройством [1], повышает эффективность обслуживания наземных средств обслуживания пространственно-распределенных групп воздушных объектов (ПГВО). Цель работы: разработка модели и алгоритма управления поворотным устройством комплекса для оптимального сопровождения множества воздушных объектов.

Передача последовательности курсовых углов в систему управления позволяет реализовать перемещение поворотного устройства [2] при обслуживании группы воздушных объектов.

Проведенные имитационные эксперименты показали, что универсальный закон управления поворотным устройством комплекса обнаружения и сопровождения не оптимален во всем диапазоне углов от  $0^\circ$  до  $40^\circ$ . Для уменьшения времени перемещения между кластерами воздушных объектов была разработана математическая модель управления, синтезируемая методом градиентного спуска. Проведенное исследование показало, что новый подход сокращает время перемещения поворотного устройства в сравнении с универсальным законом управления. Наибольшее сокращение времени (35% на интервале  $1^\circ$ - $5^\circ$  и 40% на интервале  $10^\circ$ - $17^\circ$ ) достигается при использовании нового закона управления, при этом время перемещения практически не отличается от идеального значения на интервале  $1^\circ$ - $22^\circ$ .

### **Библиографический список**

1. **K. Helsgaun**, "An Effective Implementation of the Lin-Kernighan Traveling Salesman Heuristic," European Journal of Operational Research. 2000. № 121. P. 106–130.
2. **J.T. Isaacs, J.P. Hespanha**, "Dubins Traveling Salesman Problem with Neighborhoods: A Graph-Based Approach.," Algorithms. 2013. Vol. 6. P. 84–99.
3. **Кричигин А. В.** Алгоритмы многообзорного обнаружения траектории движущейся цели / А. В. Кричигин, Е. А. Маврычев // Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева.— 2010.— № 4.— С. 11—18

*Б. А. Шевченко, М. А. Копылова, студ.; рук. А. А. Чепига, аспирант (ФГБОУ ВО «ДонНТУ», МГТУ имени Н.Э. Баумана, ПАО «НПО «Алмаз» и.м. академика А.А. Расплетина)*

## **РАЗРАБОТКА НАБЛЮДАТЕЛЯ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ДЛЯ ПОВОРОТНОГО УСТРОЙСТВА КОМПЛЕКСА ОБСЛУЖИВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ**

За последнее десятилетие электропривод на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ) получил широкое применение в различных мехатронных системах. Механические параметры таких приводов, включая момент нагрузки  $M_n$  и момент инерции  $J$ , имеют важное значение для синтеза систем управления скоростью и положением вала. Однако эти параметры обычно неизвестны или меняются во времени, что затрудняет их аналитическое определение. Учеными были предложены методы определения этих параметров. Например, для определения момента нагрузки были использованы адаптивное управление при помощи эталонной модели (MRAC) [1], фильтр Калмана, наблюдатель пониженного порядка и адаптивный скользящий наблюдатель (SMO) [2].

Существующие методы определения момента инерции можно разделить на офлайн и онлайн методы. К офлайн методам относятся метод самовыбега и метод ускорения с ограниченным моментом, а онлайн методы включают в себя наблюдатели, фильтр Калмана, MRAC и рекурсивный метод наименьших квадратов (RLS). В этой работе для электропривода на базе СДПМ были разработаны наблюдатель момента нагрузки на базе SMO и два метода определения момента инерции: метод прямого расчета (ПР) и метод пропорционально-интегрального регулирования (ПИ). Эти методы показали высокую эффективность как в моделировании, так и в натурных экспериментах.

### **Библиографический список**

- 1. Dianguo Xu, Yang Gao**, "An approach to torque ripple compensation for high performance PMSM servo system," 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004, pp. 3256-3259 Vol.5
- 2. H. Kim, J. Son, J. Lee**, "A high-speed sliding-mode observer for the sensorless speed control of a PMSM," IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 58, no. 9, pp. 4069–4077, Sep. 2011.

Д. Сидорин, студ.; рук. П.В. Вилков, к.т.н., доцент  
(ИГЭУ, г. Иваново)

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МНОГОВИГАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГРЕБНОЙ УСТАНОВКИ

Одним из самых распространенных типов гребного электродвигателя является асинхронный двигатель (АД) с короткозамкнутым ротором [1].

К достоинствам применения АД можно отнести возможность работы во второй зоне, отработанная технология изготовления, возможность управлять намагниченностью магнитопровода.

Для разработки математической модели многодвигательного электропривода гребной установки рассматривается установка, в которой два АД, получающие питание от преобразователей частоты (ПЧ), соединены с гребным валом через редуктор [2] (рис. 1).

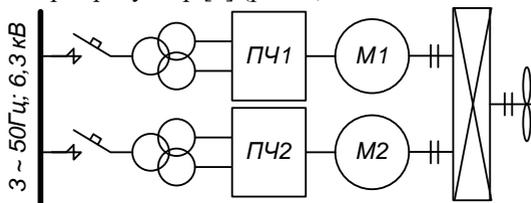


Рис.1. Структурная схема соединения двигателей с гребным валом

Основные параметры АД гребной установки: тип АМВ710L6, мощность 8000 кВт, напряжение 3,3 кВ, 50 Гц, скорость 900 об./мин.

Так как применение многодвигательного электропривода имеет ряд существенных недостатков, одним из которых является возможность неравномерного распределения нагрузки между двумя двигателями, работающими на один гребной вал, то для выравнивания нагрузки в математической модели предлагается использовать подчиненную систему управления с перекрестными связями. При этом математическая модель электропривода должна предусматривать работу АД во второй зоне.

### Библиографический список

1. Гельвер Ф.А. Гребные электрические установки судов большой мощности / Ф.А. Гельвер, И.В. Белоусов, В.Ф. Самосейко // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления – 2019. – №30 – С. 7 – 27.
2. Дарьенков А.Б. Гребные электрические установки/ А.Б. Дарьенков, Г.М. Мирясов, В.Г. Титов, М.Н. Охотников, Д.В. Умяров – Н.Новгород, изд-во НГТУ – 219 с.

**СЕКЦИЯ 21**  
**ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА**  
**И МАГНИТОЖИДКОСТНЫЕ УСТРОЙСТВА**

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

Секретарь –  
к.т.н., доцент **Нестеров С.А.**



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

## **ВЫЯВЛЕНИЕ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА РОТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА ПО КАРТИНЕ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

При проведении на кафедре электромеханики эксперимента по проявлению повреждений обмотки возбуждения синхронного генератора во внешнем магнитном поле (ВМП), было замечено, что в случае, когда все катушки работали исправно, поле все равно пульсировало, что можно объяснить наличием эксцентриситета ротора. Таким образом, по внешнему магнитному полю можно определить величину эксцентриситета. [1, 2, 3]

В настоящее время ведется работа по проведению экспериментального исследования ВМП синхронного турбогенератора при контролируемом статическом эксцентриситете ротора, чтобы более четко выявить влияния величины эксцентриситета на характер распределения ВМП как по окружности машины, так и по длине. Создана установка для моделирования смещения оси ротора относительно оси статора. В начальном положении ротор лежит на расточке статора, а затем при поднятии фиксаторов с помощью подкладок, меняется значение эксцентриситета.

Разработан более совершенный датчик, в котором уже запрограммирована обработка полученного сигнала. Он позволяет без ручной обработки данных сразу получить результаты внешнего магнитного поля для их оценки.

### **Библиографический список**

- 1. Ю.Б. Казаков, А.Н. Морозов, А.П. Океанский.** Диагностика электромагнитных несимметрий по внешнему полю электрических машин, ФГБОУ ВО «Тольяттинский гос. ун-т», Тольятти: Изд-во ТГУ, 2017. С. 376-380.
- 2. Океанский, А.П.** Диагностика электромагнитных несимметрий синхронных машин на основе анализа внешнего электромагнитного поля, М.: ООО «Центр полиграфических услуг Радуга», 2018. – С. 359.
- 3. Морозов, А.Н.** Коэффициент несимметрии поля при повреждениях обмотки возбуждения неявнополюсной синхронной машины, Иваново, 2021. – Т. 3. Электротехника. С. 196-198.

*В.Д. Бакланов, студ.; рук. С.А. Нестеров, к.т.н.,  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ В ЗАЗОРЕ ГЕРМЕТИЗАТОРА ДИНАМИЧЕСКИ ГЕНЕРИРУЕМОЙ МНОГОКОНТУРНОЙ СХЕМОЙ ЗАМЕЩЕНИЯ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ**

При проектировании магнитожидкостного герметизатора (МЖГ) для расчета удерживаемого критического перепада давления требуется значение перепада напряжённости магнитного поля в рабочем зазоре МЖГ. Для получения подобных зависимостей для предполагаемой конфигурации магнитной цепи, как правило, используются пакеты конечно-элементного расчета.

Современные пакеты конечно-элементного моделирования такие как ANSYS Electronics, COMSOL Multiphysics и им подобные обладают обширным набором библиотек и методов для решения самых разнообразных задач, не использующихся при проектировании МЖГ и являются избыточными. При всем богатстве встроенных библиотек свойства используемых магнитных жидкостей, постоянных магнитов и конкретных марок сталей, заносятся в программу вручную.

Предлагается использовать для расчета кривой магнитной индукции в зазоре МЖГ динамическую генерацию матриц для решения задачи контурных токов с последующим пересчетом величин согласно теории подобия магнитных и электрических цепей. Магнитная цепь заменяется эквивалентной сеткой электрических сопротивлений и источников ЭДС, которая описывается матрицами согласно матричному методу расчета задачи контурных токов. В качестве среды проведения проектного расчета используется Mathcad 15.

Получая таким образом: полный проектный расчет в одной программе без необходимости ручного переноса данных между программами и перестроения расчетной модели для каждой предполагаемой конфигурации магнитной цепи; снижение затрат на используемое программное обеспечение.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00156, <https://rscf.ru/project/22-79-00156/>

### **Библиографический список**

- 1. Голубев А. Н.** Теория линейных и нелинейных цепей / А. Н. Голубев. - 3-е изд., перераб. и доп. - Иваново, 2022. - 388 с.
- 2. Тихонов А.И.** Основы теории подобия и моделирования (электрические машины): Учеб. Пособие / ФГБОУВПО Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. – Иваново, 2011. – 132 с.

*Е.А.Курлаков, студ.; рук. В.Н.Караулов, к.т.н., доцент  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИНХРОННОМ РЕАКТИВНОМ ДВИГАТЕЛЕ С ТЛА- РОТОРОМ С УЧЕТОМ ДЕМПФЕРНОЙ ОБМОТКИ.**

В настоящее время синхронные реактивные двигатели применяются в малых приводах механизмов и системах автоматики. Интерес производителей к двигателям с анизотропной магнитной проводимостью ротора связан с их высокими энергоэффективностью и энергоемкостью. Главной отличительной особенностью синхронных реактивных двигателей является отсутствие у ротора обмотки и постоянных магнитов.

Машины большой мощности данного типа не могут запускаться напрямую, поэтому они снабжаются частотным преобразователем для осуществления частотного пуска. Для возможности выполнить прямой пуск, ротор двигателя оснащается алюминиевой демпферной обмоткой.

Задачей исследования является построение параметрической модели синхронного реактивного двигателя с ТЛА-ротором и демпферной обмоткой, а также нахождение значений ее параметров. В качестве промежуточных результатов рассчитаны рабочие характеристики на основе модели двигателя.

Актуальным вопросом данного исследования является определение параметров демпферной обмотки с учетом особенностей ТЛА-ротора.

### **Библиографический список**

**1. Тихомиров, О. И.** Синхронные реактивные электродвигатели для создания энергоэффективных решений класса IE5 / О. И. Тихомиров // Автоматизация в промышленности. – 2022. – № 1. – 2.

**2. Доржинкевич А.Ф.** Моделирование электромеханических процессов в синхронном реактивном двигателе с ТЛА-ротором. – Магистерская диссертация – ИГЭУ Иваново 2023

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

## УТОЧНЕННЫЙ АНАЛИЗ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРА АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Турбогенераторы (ТГ) для атомных электростанций (АЭС) являются одним из важных узлов. К ТГ АЭС существует множество требований по безопасности, сроку службы и надежности. ТГ АЭС – это передовые электрические машины, в которых сочетаются передовые и зарекомендовавшие себя конструкторские решения. Современное проектирование ТГ требует проведения анализа магнитного поля машины. Результаты проектирования должны проверяться как численными методами, так и методами расчета электромагнитного поля в электрической машине.

На основании методики [1] и с использованием [2,3] была разработана в расчетной подсистеме Mathcad численная модель ТГ с водородно-водяным охлаждением (ТВВ). На основе численной модели спроектирован трехфазный четырехполюсный ТГ серии ТВВ неявнополюсной конструкции мощностью 1000 МВт, частоты вращения 1500 об/мин, напряжением 24 кВ, коэффициентом мощности 0,9, отношением короткого замыкания 0,4, а также были определены конструктивные и обмоточные данные ТГ, рассчитаны характеристики холостого хода, угловые, U-образные, внешние и регулировочные характеристики, выходные электромагнитные параметры, энергетические и тепловые данные.

По полученным данным из численного метода в системе Maxwell была спроектирована модель ТГ, произведен полевой расчет модели в трехмерном пространстве, определены значения индукции магнитного поля, напряженности, и электромагнитных усилий. Полученные данные от полевой модели в системе Maxwell были сравнены с данными из численной модели в расчетной подсистеме Mathcad.

### Библиографический список

- 1. Константинов, Г.Г.** Турбогенераторы для тепловых и атомных электростанций: учебное пособие / Г.Г. Константинов. — Иркутск: ИРНИТУ, 2018. — 332 с.
- 2. Силин Л. Ф.** Электромеханика. Проектирование турбогенераторов: пособие по курсовому проектированию / Л. Ф. Силин; Сиб. федерал. ун-т. - Красноярск: ИПК СФУ, 2010. - 171 с.
- 3. Садохина М.А., Чекан М.А., Константинов Г.Г.** Особенности проектирования турбогенератора для АЭС и автоматизация электромагнитных расчетов // Электроэнергетика глазами молодежи – 2017: материалы VIII Международной научно-технической конференции (г. Самара, 2–6 октября 2017 г.). Самара: Изд-во СамГТУ. Т. 1. С. 70–73.

*О.В. Чванов, студ.; рук. Ю.Б. Казаков, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## РАБОТА ОБРАЩЕННОГО СИНХРОННОГО РЕАКТИВНОГО МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ

Магнитоэлектрические двигатели обращенной конструкции обеспечивают высокие показатели вращающего момента и полезной мощности при малых габаритах [1]. Особенности таких двигателей являются многополюсный внешний ротор с постоянными магнитами. Для электромеханической трансмиссии квадроциклов, снегоходов и другой малой транспортной техники разработан и исследован обращенный синхронный реактивный 16 полюсный магнитоэлектрический электродвигатель 16 кВт, 2700 об/мин с зубцовой обмоткой, размещенной в 18 пазах внутреннего статора [2].

Для управления частотой вращения и моментом электродвигателя по заданному алгоритму в системах электромеханической трансмиссии с такими двигателями может использоваться контроллер AT32UC3 (рис. 1) [3], работающий от аккумуляторной батареи 20S Li-Ion емкостью 700Вт\*ч и напряжением постоянного тока 48 В. По сигналам, поступающих от датчика положения рукоятки управления, оснащённого постоянным магнитом и биполярным элементом Холла, контроллер меняет частоту и величину питающего напряжения обмотки якоря, регулируя частоту вращения и момент электродвигателя. При изменении ручным образом положения рукоятки управления система изменяет режим работы электродвигателя, что позволяет поддерживать работу электродвигателя в оптимальном режиме.



Рис. 1. Контроллер AT32UC3

### Библиографический список

1. Осин И.Л., Шакарян Ю.Г. Электрические машины: Синхронные машины: Учеб. пособие для вузов по спец «Электромеханика» – М.: Высш. шк.; 1990. – 304 с.: ил.
2. Чванов О.В., Казаков Ю.Б. Уточненный полевой анализ обращенного магнитоэлектрического двигателя // Электромеханотроника и управление: Матер. 18 Всеросс. н.-техн. конф. «ЭНЕРГИЯ-2023» – Иваново, ИГЭУ, 2023. Т.4. С. 22.
3. Редькин П.П.: Микроконтроллеры Atmel архитектуры AVR32 семейства AT32UC3. Руководство пользователя. Москва: Техносфера, 2010. – 784 с.

*Д.С. Смирнов, магистрант; М.А Киселев, аспирант;  
рук. Ю.Б. Казаков, проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## ПОЛЕВОЙ АНАЛИЗ ОБРАЩЕННОГО МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ С МАГНИТОПРОВОДЯЩИМИ ЗУБЦАМИ НА РОТОРЕ

Интенсивное развитие малых электротранспортных средств, средств индивидуальной мобильности вызывает потребность в тяговых электродвигателях с повышенными показателями удельной мощности и момента [1]. Разработаны и исследованы в сравнении две конструкции магнитоэлектрического двигателя 300 Вт, 3000 об/мин с 10 полюсным внешним ротором и однозубцовой обмоткой на внутреннем 12 зубцовом статоре. В конструкции на внутренней цилиндрической поверхности внешнего ротора размещены сегментные магниты. В модифицированном варианте конструкции между магнитами на роторе установлены магнитопроводящие зубцы (рис. 1) [2].

Выполнено численное моделирование электромагнитных полей, сделан уточненный полевой анализ, определены характеристики двигателей в системе Ansys Maxwell. Определено, что добавление магнитопроводящих зубцов на роторе, вследствие возникающего реактивного момента, позволило увеличить максимальный электромагнитный момент двигателя на 3 %, но вызывает пульсации момента, вызванные взаимодействием зубцов статора и ротора (рис. 2).

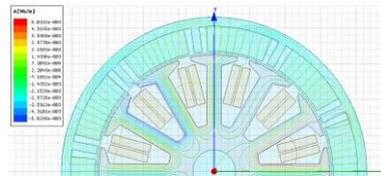


Рис. 1. Обращенный магнитоэлектрический двигатель с магнитопроводящими зубцами

Рис. 2. Графики момента

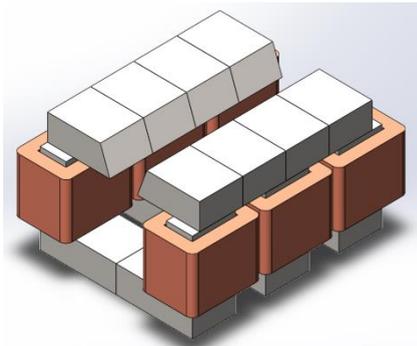
### Библиографический список

1. **О.В. Чванов, М.А Киселев, Ю.Б. Казаков.** Уточненный полевой анализ обращенного магнитоэлектрического двигателя // Электромеханотроника и управление: Матер. 18 Всеросс. н.-техн. конф. студ. и асп. «ЭНЕРГИЯ-2023» – Иваново, ИГЭУ, 2023. Т.4. С.22.
2. **Патент США US20160218571A1.** Вращающаяся электрическая машина с внешним ротором / Шин Кусасе. Патентообладатель Denso Corp. Заявка US15/003 887 от 2016.01.22. Оpubл. 2018.09.18.

*В.Е. Шоронов, студ.; рук. В.А. Филиппов, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК В СИСТЕМЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ МАГНИТОЖИДКОСТНОГО СЕПАРАТОРА

Магнитожидкостная сепарация – относительно новая технология разделения немагнитных материалов по плотности. Эта технология имеет ряд преимуществ в сравнении с традиционными методами сепарации [1]. На текущий момент промышленные образцы магнитожидкостных сепараторов (МЖС) проектируются на работу на постоянном токе.



*Рис. 1. 3D модель исследуемого прототипа МЖС*

Данная работа посвящена исследованиям возможности применения переменного тока в системе возбуждения МЖС. Переменный ток более доступен и распространён.

Создана работоспособная установка МЖС с шихтованной магнитной системой. На рисунке 1 представлена 3D модель установки. Разработана и реализована методика измерения силы, действующей на немагнитное тело в магнитной жидкости в зазоре МЖС. Разработаны численные модели в программном комплексе «COMSOL Multiphysics».

Используя результаты экспериментов, в настоящее время идёт работа по усовершенствованию численных моделей.

### Библиографический список

- 1. Филиппов, В.А.** Повышение эффективности электромагнитных магнитожидкостных сепараторов немагнитных материалов: специальность 05.09.01 "Электромеханика и электрические аппараты": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Филиппов Василий Александрович. – Самара, 2020. – 134 с. – EDN SKQOXP.
- 2. Морозов, Н.А.** Нанодисперсные магнитные жидкости в технике и технологиях / Н.А. Морозов, Ю.Б. Казаков. - Иваново: ФГБОУВПО ИГЭУ, 2011. - 264 с. ISBN 978-5-89482-772-8.
- 3. Страдомский, Ю.И.** Основы феррогидродинамики: учебное пособие / Ю. И. Страдомский. - Иваново: ИГЭУ, 2004. - 108 с.

*Е.Р. Соловьев, аспирант; рук. А.И. Тихонов, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА

Разработана имитационная модель трансформатора тока, с одним сердечником из аморфного сплава для определения угловой и токовой погрешности изделия по кривой гистерезиса  $B(H)$ . Модель строится на основе теоретических положений, изложенных в [1].

Кривая  $B(H)$  получена с помощью устройства УКМП 0,05-100.

Имитационная модель разработана с применением пакета Simulink в ПО MATLAB.

Оценена точность расчета погрешностей по средней кривой  $B(H)$  путем сравнения с погрешностями, полученными при измерении.

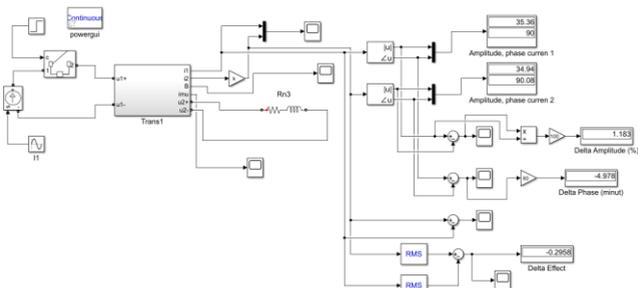


Рис. 1. Имитационная модель измерительного трансформатора тока.

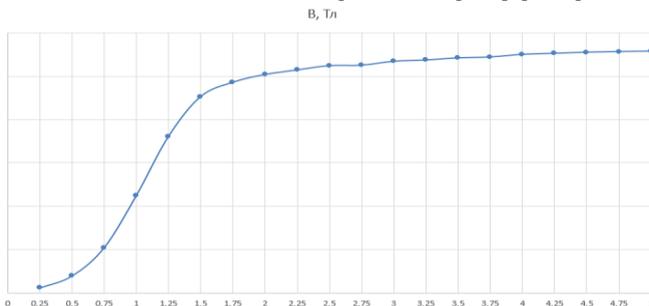


Рис. 2. Кривая  $B(H)$ .

### Библиографический список

1. Тихонов А.И., Каржевин А.А., Подобный А.В., Дрязгов Д.Е. Разработка и исследование динамической модели однофазного трансформатора с сердечником из аморфной стали. - Иваново: "Вестник ИГЭУ", 2019. – Вып. 2, с. 59 – 70.

Г.Л. Жбанов, студ.; рук. А.И. Тихонов, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)

## РАСШИРЕННЫЙ ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЁТ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В современных реалиях актуален расширенный поверочный расчёт трансформаторов, проведенный с использованием уточненных методик, что позволяет существенно сократить расходы по сертификации новых устройств.

На кафедре электромеханики ведется разработка уточненных методик теплового состояния трансформаторов с использованием электрических схем замещения тепловых процессов [1]. Поставлена задача создания подсистемы уточненного теплового расчета трансформатора в динамике в произвольных режимах работы.

Для расчёта используется электрическая схема замещения, выполненная тепловых процессов в среде MatLab Simulink SimPowerSystem. На рис. 1 приведен фрагмент электрической схемы замещения тепловой модели обмотки.

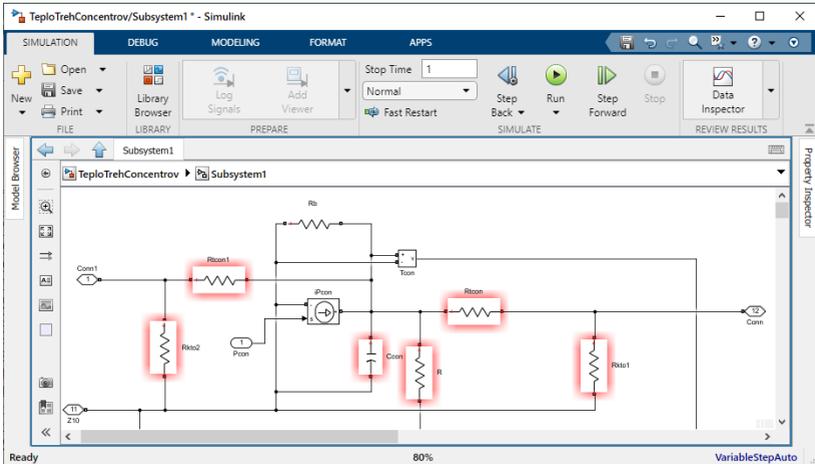


Рис. 1. Фрагмент электрической схемы замещения тепловой модели обмотки

### Библиографический список

1. А.В. Стулов - Разработка системы теплового анализа в САПР распределительных трансформаторах на основе уточнённых математических моделей: дис. ... канд. тех. наук :05.13.12 / Стулов Алексей Вадимович. - М., 2015. - 157с.

*А.А. Миронова, аспирант; рук. С.А. Нестеров к.т.н, доцент  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ В МНОГОЗУБЦОВОМ УПЛОТНЕНИИ С УЧЁТОМ ДЕФОРМАЦИИ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ В ЗАЗОРЕ**

Проведено исследование процессов в многозубцовом магнитожидкостном уплотнении (МЖУ) на параметрически перестраиваемом фрагменте уплотнения, состоящим из вала и трех зубцов – концентраторов магнитного поля, а также магнитной жидкости (МЖ) в зазоре между ними. Исследование выполнено в среде Comsol Multiphysics. Исследовано влияние типа зубца на такие характерные параметры, как перепад давления в динамическом режиме, создаваемый момент трения, оптимальное направление компенсируемого давления. Разность напряженности магнитного поля под площадкой зубцов и в межзубцовом пространстве определяется соотношением величин зазоров до вала и между ними [1]. При изготовлении устройства с соблюдением технологии производства всегда существует погрешность на отклонение размеров геометрии, также объём заправленной МЖ в уплотнение не гарантирует, что распределение его будет под каждым зубцом равномерным [2]. Исследовано влияние вариации геометрических параметров комбинации отдельно взятых зубцов, а именно размеров зубца, ширины площадки, угла скоса, зазора между зубцом и валом, перераспределение объёма магнитной жидкости между зубцами на эксплуатационные характеристики МЖУ [3]. В совокупности можно проследить за процессами и взаимном их влиянии на разных промежутках времени. Получены характеристики удерживаемого давления от частоты вращения, геометрии рабочей зоны, картины перераспределения давления между магнитожидкостными пробками и влияние центробежной силы на форму поверхности магнитной жидкости.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00156, <https://rscf.ru/project/22-79-00156/>

### **Библиографический список**

- 1. Орлов Д.В.** Магнитные жидкости в машиностроении / Д.В. Орлов, Ю.О. Михалёв, Н.К. Мышкин [и др]; под ред. проф Д.В. Орлова, проф. В.В. Подгоркова. – М.: Машиностроение, 1993. – 275 с.
- 2. Морозов Н.А.** Нанодисперсные магнитные жидкости в технике и технологиях / Н.А. Морозов, Ю.Б. Казаков. – Иваново : ФГБОУВПО "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина", 2011. – 264 с.
- 3. Radionov A.,** The Specific Features of High-Velocity Magnetic Fluid Sealing Complexes / A. Radionov, A. Podoltsev, G. Peczkis //Open Eng. — 2018. — Vol. 8. — P.539-544.

**СЕКЦИЯ 22**  
**МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ И**  
**МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ**  
**ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ**  
**СИСТЕМЫ**

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

Секретарь –  
к.т.н., доцент **Аполонский В. В.**



*А.А. Крылович, студ.; рук. А.Н. Серов, к.т.н. (НИУ МЭИ, г. Москва)*

## **КВАДРАТУРНАЯ ДЕМОДУЛЯЦИЯ КАК МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ СРЕДНЕКВАДРАТИЧЕСКОГО ЗНАЧЕНИЯ**

В настоящее время одним из наиболее информативных параметров сигналов электрических сетей является среднее квадратическое значение (СКЗ). Существует ряд цифровых методов для измерения этого параметра. Среди них самыми популярными методами можно считать метод, основанный на усреднении квадратов отсчётов и метод, основанный на низкочастотной фильтрации. Однако, применение данных методов позволяет выполнять измерение СКЗ в заданной полосе частот. Для измерения СКЗ отдельных гармоник применяют метод, основанный на ДПФ или метод квадратурной демодуляции.

Метод квадратурной демодуляции основан на идее последовательного извлечения частотных компонент из входного сигнала при помощи его перемножения с ортогональными гармоническими сигналами (опорными сигналами) и последующей низкочастотной фильтрацией. Основные источники погрешности в этом методе: неидеальность амплитудно-частотной характеристики выходного фильтра демодулятора и отличие частоты выделяемой спектральной компоненты от частоты опорных сигналов демодулятора.

Аналитическая формула погрешности измерения СКЗ для случая синусоидального сигнала с частотой  $\omega_1$ , начальной фазой  $\alpha$  имеет вид:

$$\delta_{x_m} = 0,25(H_2 / H_1)^2 (1 - \cos(4w_1n + 2\theta)) - (H_2 / H_1) \cos(2w_1n + \theta), \quad (1)$$

где  $\theta = 2\alpha + \varphi_{LP}(\Delta w) + \varphi_{LP}(w_1 + w_0)$ ,  $H_1$  – максимальная неравномерность в полосе пропускания,  $H_2$  – минимальное затухание в полосе заграждения,  $n$  – номер отсчёта.

Из формулы (1) видно, что для снижения погрешности можно использовать подстройку частоты генератора к частоте входного сигнала. Есть и другие подходы, например, снижение минимального затухания в полосе заграждения фильтра, подстройка параметров фильтра под значение частоты входного сигнала, пост-фильтрация для снижения переменной во времени компоненты погрешности, компенсация погрешности.

В работе с помощью программного пакета Simulink предложена имитационная модель измерительного преобразователя СКЗ на основе изложенного метода измерения. Выполнен анализ влияния параметров сигнала (частоты, начальной фазы) и измерительной системы (время измерения, частота дискретизации) на погрешность измерения СКЗ.

*С.А. Подобуев, студ.; рук. А.Н. Серов, к.т.н. (НИУ МЭИ, г. Москва)*

## ПРИМЕНЕНИЕ КВАДРАТУРНОЙ ДЕМОДУЛЯЦИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ ЭЛЕКТРОСЕТИ

Стабильность частоты электросети крайне важна в современных устройствах. Она влияет на точность измерения таких показателей качества электроэнергии, как среднеквадратическое значение, полная, активная и реактивная мощности. По этой причине точное измерение частоты является актуальной задачей.

В данной работе рассматривается применение квадратурной демодуляции для измерения частоты сигнала [1]. Суть данного метода заключается в следующем: производится умножение входного сигнала на опорные ортогональные по отношению друг к другу гармонические сигналы, подавляются лишние спектральные компоненты результирующих сигналов с помощью ФНЧ. Частота сигнала определяется с использованием частоты опорного генератора (приблизённо равной частоте сигнала) и вычисленных значений фазы сигнала в разные моменты времени. Результаты исследования показали, что для проведения точного (с относительной погрешностью не более 0,01%) измерения необходимо, чтобы граница полосы пропускания лежала в диапазоне [10-15] Гц, граница полосы заграждения равнялась номинальной частоте (50 Гц), коэффициент затухания был не выше -40 дБ. Источниками погрешности данного метода является несоответствие частот опорного генератора и входного сигнала и наличие конечного коэффициента затухания. Для повышения точности метода применяют подстройку характеристик ФНЧ и частоты входного генератора, а также прямую компенсацию погрешности. Также существует переменная составляющая погрешности, которую подавляют с помощью фильтрации, интегрирования или усреднения результата измерения.

Для исследования погрешности измерения метода, выявления влияющих величин и оценки степени их влияния на погрешность была построена имитационная модель с помощью программных пакетов Matlab и Simulink. Данная модель позволяет использовать цифровые фильтры различных типов, анализировать влияние шума и погрешности линейности АЦП на погрешность измерения. Также модель реализует два подхода снижения погрешности измерения.

### Библиографический список

1. **M.M. Begovic, P.M. Djuric, S. Dunlap, A.G. Phadke.** "Frequency tracking in power networks in the presence of harmonics," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, issue 2, 1993, pp. 480-486.

*И.А. Мякинин, студ.; рук. Е.А. Алексеев (к.т.н.)  
(ИГХТУ, г. Иваново)*

## **МИКРОКОНТРОЛЛЕРНАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ХИМИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ**

Одним из наиболее распространённых элементов химико-технологической системы является емкостной реактор. Цель функционирования данного аппарата заключается в получении продукта из исходных компонентов, вступающих во взаимодействие при определенном температурном режиме. Исследования в области синтеза и анализа эффективных систем управления технологическими параметрами химических реакторов являются актуальными.

В настоящей работе объектом исследования служит реактор идеального смешения, снабженный рубашкой и перемешивающим устройством. В рубашку подается жидкофазный теплоноситель. Цель работы заключается в синтезе и анализе микропроцессорной системы автоматического регулирования температуры содержимого реактора.

На первом этапе была получена полная математическая модель реактора, описывающая изменения материальных и энергетических потоков. Применяя данное описание была получена формализованная модель аппарата по каналам управления и возмущения.

Для регулирования температуры в работе предлагается использовать одноконтурную комбинированную систему на базе классического ПИ-регулятора. Для расчёта параметров регулятора был использован метод модального управления.

Рассматриваемая в работе система регулирования была реализована на программно-техническом комплексе (ПТК), состоящем из программируемого логического контроллера ОВЕН ПЛК 154 и рабочей станции оператора. Соединение контроллера и станции осуществляется по сети Ethernet. В основе работы ПТК заложен принцип программно-аппаратного моделирования, согласно которому моделируется работа технологических объектов, а алгоритмы управления, взаимодействие с оператором и визуализация процесса реализуются на реальных технических средствах автоматизации.

Методом компьютерного моделирования рассматриваемая система регулирования была исследована на инвариантность к действию возмущений и ковариантность с задающим воздействием. Полученные результаты подтвердили работоспособность рассматриваемой системы.

*А.В. Павлович, студ.; рук. А.Н. Серов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## СНИЖЕНИЕ РАСТЕКАНИЯ СПЕКТРА С ПОМОЩЬЮ ПЧД

В задачах определения спектра сигнала основной источник погрешности связан с так называемым эффектом «растекания спектра». В случае применения алгоритмов быстрого преобразования Фурье, одним из эффективных способов снижения погрешности является применение ПЧД.

Алгоритм рассматриваемого ПЧД должен вычислять значения отсчетов сигнала в новые моменты времени, расположенные между оригинальными отсчетами, где  $x[n]$  – входной сигнал, дискретные отсчеты которого с шагом  $T_{s1}$  поступают на вход ПЧД. На выходе ПЧД необходимо получить последовательность отсчетов  $y[m]$  с шагом  $T_{s2}$ . Текущий отсчет  $y[m]$  обычно вычисляется с помощью интерполяционного полинома порядка  $N$ . Для этого используется набор из  $(N + 1)$  оригинальных отсчетов и  $\mu_m$  – положение между отсчетами, т.е. доля исходного шага дискретизации  $T_{s1}$ .

Существует несколько форм представления интерполяционного полинома. Интерполяция Лагранжа – одна из форм полиномиальной интерполяции. Одно из основных преимуществ интерполяторов Лагранжа – наиболее плоская АЧХ на низких частотах. Интерполяция Лагранжа реализуется полиномиальными интерполяционными фильтрами и, следовательно, может быть реализована структурой Фарроу [1], так как её коэффициенты  $h(\mu_m)$  являются полиномами.

В качестве проверки данной реализации ПЧД была построена Simulink-модель на MATLAB с использованием интерполяции Лагранжа на модифицированной структуре Фарроу. Для того, чтобы минимизировать погрешность, вызванную девиацией частоты сигнала, и упростить реализацию был реализован метод измерения частоты, основанный на определении приращения фазы. При этом в качестве отсчёв спектра могут быть использованы результаты определения основной спектральной компоненты алгоритмом БПФ. Данный подход обеспечивает точное измерение частоты для синусоидального, и полигармонического сигналов.

В результате выполненной работы можно сделать вывод, что применение ПЧД на основе фильтров даже небольших порядков позволяет существенно снизить погрешность измерения спектра. Для упрощения реализации в качестве метода измерения частоты может быть применён подход, основанный на анализе приращения фазы.

### Библиографический список

1. **Farrow, C.W.** A continuously variable digital delay element / C.W. Farrow // IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Espoo, Finland, vol. 3, pp. 2641-2645, June 1988.

*И.А.Герасимов, магистрант; рук. Аполонский В.В.  
(ИГЭУ, Иваново)*

## СИНТЕЗ АСТАТИЧЕСКОГО ПОЛИНОМИАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ДВУХМАССОВОЙ СИСТЕМЫ С ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМ ТОРСИОНОМ

В станках с числовым программным управлением важную роль играют дополнительные координатные оси контурно-позиционного перемещения рабочих органов.

В подобных конструкциях для преодоления наибольшего момента при резании, а также обеспечения заданных динамических и статических характеристик движения исполнительного органа с большим моментом инерции зачастую применяются редукторы.

Использование редукторных устройств характеризуется наличием зазоров которые при определенных условиях, существенно усложняют регулирование координат электропривода (Рис.1).

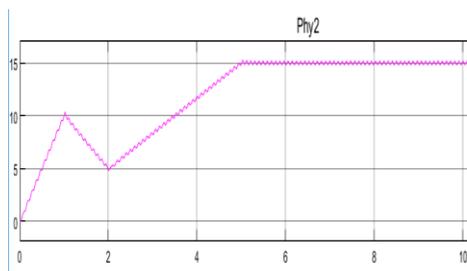


Рисунок 1 – Переходные характеристики двухмассовой электромеханической системы с зазором: а) вход б)выход

обеспечить необходимые статические и динамические характеристики.

В таких системах целесообразнее использование других видов регуляторов, например полиномиальный регулятор.

Данный регулятор можно синтезировать аналитически, используя различные программные комплексы, например Matlab.

Целью данной работы является разработка астатического полиномиального регулятора для системы контурно-позиционного управления редукторными электроприводами при наличии зазоров.

### Библиографический список

1. **Иванков В.А., Тарарькин С.В., Красильникъянц Е.В.** Системы контурно-позиционного управления редукторными электроприводами многоцелевых металлорежущих станков / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина».- Иваново,2009.-188 с.

Одним из способов выборки зазора является использование системы с электромеханическим торсионом.

Для управления торсионной системой необходимо синтезировать регулятор обеспечивающий нулевую статическую ошибку.

Хотя самыми распространенными регуляторами являются ПИД-регуляторы, в сложных системах они не способны

*Н.А. Скрёбов, студ., рук. С.О. Кожевников, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **РАЗРАБОТКА МИКРОКОНТРОЛЛЕРНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СМЕСИТЕЛЕМ ДЛЯ ЖИДКИХ СРЕД**

Качественное и производительное резание на металлообрабатывающих станках достигается применением смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ), позволяющих уменьшить трение в зоне контакта режущего инструмента и заготовки. СОЖ повышает качество обрабатываемой поверхности детали и увеличивает долговечность инструмента. Разработка новых составов СОЖ и техники для ее производства является актуальной задачей [1].

Для повышения потребительских свойств получаемой СОЖ разработана микроконтроллерная система управления смесителем. Система управления получения СОЖ позволяет контролировать температуру нагрева и уровень смеси в аппарате, подачу перемешиваемых компонентов и частотой вращения вала ротора смесителя.

Реализация управления смесителем для получения СОЖ выполнена на основе МК STM32F103C8T6, одного из самых распространенных МК серии STM32 [2]. В состав данного устройства вошли: клавиатурный модуль на 9 клавиш, жидкокристаллический индикатор на базе контроллера HD44780. Индикатор подключен к микроконтроллеру через I2C-адаптер на основе микросхемы расширителя портов PCF8574T. Также разработана схема управления ключами силового преобразователя, схема управления блоком реле. Кроме того, были подключены два источника внешних прерываний для обеспечения безопасности и защиты установки от аварий. Разработана программа, реализующая работу ШИМ-генератора. Разработанная программная часть, допускает дальнейшее совершенствование в случае расширения функциональных возможностей системы управления с возможностью добавления датчиков и исполнительных устройств. Также была выполнена трассировка печатного узла системы управления. Полученная система управления способна обмениваться данными с другими внешними устройствами посредством связи по интерфейсу RS-485.

### **Библиографический список**

- 1. Кожевников С.О.** Микроконтроллерная система управления аппаратом для получения СОЖ/Кожевников С.О., Кожевникова Л.В. XXI Бенардосовские чтения. Иваново, 2021. С. 140-143.
- 2. Кармин Новиселло.** Освоение STM32. Пошаговое руководство. пер. с англ. Карасев Д. 2018. – 826 с.

*Н.А. Скрёбов, студент, рук. С.О. Кожевников, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОМУЗЫКАЛЬНОГО ИНСТРУМЕНТА В СРЕДЕ MATLAB**

Уменьшение размеров полупроводниковых электронных радиоэлементов (ЭРЭ) и развитие микроэлектроники привело к тому, что микропроцессоры и ЭМИ вышли на новый уровень: появились малогабаритные и миниатюрные электронные синтезаторы. Для возможности реализации ЭМИ с использованием микроконтроллера необходимо разработать программное обеспечение для генерирования аналоговых сигналов. Микроконтроллеры семейства STM32 позволяют генерировать широтно-импульсную модуляцию (ШИМ), которую можно использовать в качестве программного цифро-аналогового преобразователя для вывода квазианалогового сигнала. Для генерации аналоговых сигналов можно использовать запись точек выборки формы сигнала из памяти в регистр захвата-сравнения ШИМ-контроллера (CCRх). Этот процесс делится на два основных этапа: создание таблицы поиска; запись данных из таблицы поиска в регистр CCRх. Таблица поиска представляет собой массив целых чисел, содержащий точки выборки требуемой формы сигнала на всем периоде (от 0 до  $2\pi$ ). Размер таблицы поиска или количество точек выборки  $N_s$  оказывают влияние на форму выходного сигнала, чем больше точек выборки за цикл, тем ближе к оригиналу сигнал на выходе. Для реализации данной модели ЭМИ, была синтезирована математическая модель в среде MATLAB, позволяющая получать аналоговый сигнал из ШИМ. Моделирование аналоговых сигналов выполнено со 128 точками выборки ( $N_s$ ). В результате моделирования была получена таблица поиска и вывода квазианалоговых сигналов. Получаемые в результате имитационного моделирования формы сигналов соответствуют аналоговым.

Разработанная математическая модель таблицы поиска позволит создать программу, реализуемую в дальнейшем на микроконтроллере семейства STM32 и выполнить дальнейшую разработку ЭМИ.

### **Библиографический список**

1. **Володин А.А.** Электронные музыкальные инструменты. Массовая радио библиотека (МРБ) выпуск 740. М. Энергия. 1970. 144 с.

*М.С. Дорожкин, магистрант; рук. В.В. Аполонский, к.т.н., доцент  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ С УПРУГИМИ КИНЕМАТИЧЕСКИМИ ЗВЕНЬЯМИ

Наличие упругих кинематических звеньев и соответствующих механических резонансов в области полосы пропускания современных мехатронных систем (МС) требует перехода к системам, основанным на базе регуляторов состояния (РС).

Традиционно мехатронные САУ постоянного и переменного тока с РС строятся с измерителем упругого момента (ИУМ) кинематической передачи. Но сложность установки, высокая стоимость и низкая надежность таких устройств делает их использование нерациональным.

При отсутствии ИУМ обратную связь по упругому моменту  $M_y$  можно заменить разностью угловых перемещений вала электродвигателя (ЭД) и рабочего органа (РО), приведенного к валу ЭД:

$$M_y = C_{12} \cdot (\varphi_1 - \varphi_2).$$

Но, важно отметить, что желаемое качество управления здесь будет обеспечиваться только при идеально точном приведении РО к валу ЭД.

При нарушении этих условий в процессе работы МС интеграторами будет накапливаться паразитная разность угловых перемещений РО и ЭД, которая приведет к полному останову ЭД или его разному. В итоге МС оказывается неработоспособной.

Альтернативным решением может быть МС, где реализуется обратная связь не по реальному  $M_y$ , а по его оценке, определяемой как:

$$M_y = M - J_1 \cdot d\Omega_1/dt.$$

Система оказывается работоспособной, но, из-за наличия производной по скорости в составе регулятора, приобретает повышенную чувствительность к помехам и, при определенных условиях, к вариациям внутренних параметров ОУ.

Вторым альтернативным решением МС может быть структура, полученная путем исключения  $M_y$  из состава измеряемых координат и использования расширенного вектора состояния в виде:

$$\mathbf{X} = [M, \Omega_1, \varphi_1, \Omega_1, \varphi_2].$$

Данная версия системы обладает астатическими свойствами, менее чувствительна к помехам и параметрическим возмущениям, но имеет повышенную сложность РС. Таким образом, использование того или другого варианта МС должно определяться разработчиком в зависимости от конкретных задач по управлению объекта.

*А.С. Горбенко, магистрант; рук. А.А. Анисимов, д.т.н., профессор  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ И НАСТРОЙКИ РЕГУЛЯТОРОВ СОСТОЯНИЯ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ С УПРУГОЙ КИНЕМАТИКОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ**

Идентификация параметров объекта управления является важным этапом при проектировании системы автоматического управления. Если параметры математической модели объекта значительно отличаются от параметров реального объекта, то это приведет к снижению качества управления.

Точная идентификация позволяет лучше фильтровать помехи и возмущения, значительно упрощает синтез регулятора. В настоящее время одними из лучших идентификаторов являются идентификаторы на основе искусственных нейронных сетей.

Основными достоинствами нейросетевых идентификаторов является высокая помехоустойчивость и точность идентификации. Также нейросетевые идентификаторы способны работать с объектами управления любой сложности.

В качестве объекта управления была выбрана мехатронная система с упругой кинематикой, для которой было необходимо определять параметры:  $J_1$ ,  $C_{12}$ ,  $J_2$ . В свою очередь нейросетевой идентификатор необходимо оптимизировать для лучшей обучаемости и повышения точности идентификации.

Оптимизация нейросетевого идентификатора производится посредством отношения сигнал – шум. Смысл отношения сигнал – шум заключается в нахождении наиболее информативных и менее зашумленных каналов, которые целесообразно использовать при идентификации параметров объекта управления. Для расчета отношения сигнал – шум рассчитываются невязки по всем каналам.

В конце для объекта управления с идентифицированными параметрами был синтезирован регулятор состояния. Достоинствами регулятора состояния является высокое быстродействие и простота его синтеза.

*Е.Н. Лукьянова, студ., рук. С.О. Кожевников, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПРОФИЛЯ ПАЙКИ НА КАЧЕСТВО ПОЛУЧАЕМОГО СОЕДИНЕНИЯ**

К современной электронной технике предъявляется большое количество требований, важным из которых является надежность функционирования. Современная аппаратура на 80% состоит из электронных блоков и компонентов, представляющих собой электронные узлы, выполненные на печатных платах (ПП) с электронными компонентами, смонтированными и припаянными по технологии поверхностного монтажа (ПМ).

При сборке печатных узлов основным методом получения паяных соединений является оплавление паяльной пасты, нанесенной при помощи трафарета. Соблюдение технологии пайки ПМ обеспечит высокую надежность готового изделия в целом. Важным условием достижения высокой надежности изделий электронной техники является создание оптимального температурного профиля (ТМП) пайки. Соблюдение ТМП позволит снизить дефекты возникающие в процессе пайки. На формирование ТМП пайки оплавлением, оказывают такие факторы: тип радиоэлементов, их габаритные размеры, масса, материал, вид и размеры печатной платы, марка паяльной пасты и имеющееся на производстве оборудование. Качество пайки зависит от ТМП и представляют собой изменение температуры во времени. Нами были выполнены исследования влияние на качество выполненной пайки двух ТМП: ступенчатого и линейного. Качество пайки выполнялось визуально. Пайка оплавлением осуществлялась в конвекционной печи LPKF ProtoFlow S с применением паяльной пасты Mechanic XG-50 Sn63/Pb37 и температурой плавления 183<sup>0</sup>С.

Исследования двух видов ТМП показали, что применение линейного профиля позволяет повысить скорость разогрева компонентов и печатной платы и быстрее выйти к зоне пайки, но при этом образуется дефект «шарики припоя». Ступенчатый профиль показал лучший результат и дефекты пайки отсутствовали.

Таким образом, показано, что качество получаемого паяного соединения достигается применением ступенчатого ТМП пайки. Для пайки ПМ элементов наиболее предпочтительным является ступенчатый профиль с постепенным прогревом и выдержкой температуры на ключевых стадиях.

*А.Э. Харинов, студ.; рук. А.Н. Серов, к.т.н. (НИУ МЭИ, г. Москва)*

## **ИЗМЕРЕНИЕ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ МЕТОДОМ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА С ПРИМЕНЕНИЕМ ОКОН**

В настоящее время для измерения активной мощности широко применяются цифровые методы измерения в частотной области. Спектральный анализ предполагает оценку частоты, амплитуды и фазового сдвига между сигналами тока и напряжения для последующего измерения активной мощности. При таком подходе возможна оценка активной мощности как основной компоненты, так и отдельных гармонических составляющих. При этом, ключевое влияние на погрешность измерения оказывает эффект «растекания спектра».

Для борьбы с данной проблемой широко применяются временные окна, например, окно Хеннинга [1]. Активная мощность отдельных гармоник  $m$  определяется действующими значениями сигналов тока и напряжения и разностью фаз между ними  $I_m, U_m, \varphi_m$ :

$$P_m = I_m U_m \cos(\varphi_m) \cdot \#(1)$$

При использовании окна Хеннинга, амплитуда и фазовый сдвиг могут быть восстановлены путем интерполяции спектральных амплитудных фазовых коэффициентов ДПФ с помощью известных аналитических соотношений [2].

С помощью Matlab была построена имитационная модель данного метода измерения активной мощности. Оценка погрешности производилась методом наихудшего случая, входные сигналы тока и напряжения полигармонической формы сгенерированы в соответствии с [3]. По полученным результатам моделирования были оценены:

- предельная относительная погрешность измерения активной мощности основной спектральной компоненты – 0,040 %;
- предельная приведенная погрешность измерения активной мощности гармонических составляющих – 0,042 %.

### **Библиографический список**

1. **D. Agrez**, "Fast measurement of power system frequency in the frequency domain," XVIII IMEKO world congress of Metrology for a Sustainable Development, 2006.
2. **D. Agrez**, "Weighted multi-point interpolated DFT to improve amplitude estimation of multi-frequency signal", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 51, pp. 282 – 292, April 2002.
3. **ГОСТ Р 54149-2010**. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения – М.: Стандартинформ. – 2012. – 16с.

*К.А. Иваненко, асп.; рук. А.Н. Серов, к.т.н. (НИУ МЭИ, г. Москва)*

## **ПРИМЕНЕНИЕ ДПФ В КАЧЕСТВЕ ПОЛОСОВОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ МЕТОДОМ ФИЛЬТРАЦИИ**

Реактивная мощность является одним из наиболее информативных параметров - показателей качества электроэнергии. Настоящее исследование посвящено измерению реактивной мощности отдельных спектральных компонент.

Суть методов измерения реактивной мощности во временной области заключается в выполнении фазового сдвига одного (тока или напряжения) или двух сигналов относительно друг друга на  $\pi/2$ . Реализовать это можно с помощью таких методов, как временной сдвиг, дифференцирование, интегрирование, интегрирование-дифференцирование, метод фильтрации.

В методе фильтрации для фазового сдвига на  $\pi/2$  может быть использовано два цифровых КИХ-фильтра второго порядка: один для сигнала тока, а другой – для сигнала напряжения. Данный метод применяется для измерения реактивной мощности отдельной гармоники. Для этого необходимо, чтобы один из фильтров являлся фильтром верхних частот (ФВЧ – для канала напряжения), а другой – нижних частот (ФНЧ – для канала тока). У данного метода есть существенное достоинство – простая реализация. А также недостаток: очень малое затухание АЧХ результирующего фильтра от полосы пропускания к полосе заграждения. Из-за этого недостатка нельзя точно выделить отдельную гармонику. Для решения этой проблемы существует несколько подходов. Первый – увеличение порядка используемых КИХ-фильтров. Второй – использование ДПФ. В настоящей работе предложено модифицировать метод фильтрации путем использования дискретного преобразования Фурье в качестве дополнительного цифрового полосового фильтра. Для реализации этого подхода необходимо для одного из сигналов перед цифровым фильтром применить блок ДПФ, а для другого сигнала – применить блок задержки, компенсирующий ФЧХ блока ДПФ.

Одним из источников погрешности при измерении реактивной мощности с помощью метода фильтрации является девиация частоты. Решить эту проблему предлагается с помощью предварительного измерения частоты и подстройки коэффициентов используемых фильтров. Реализация данного метода была проведена с помощью имитационной модели в программе Matlab/Simulink.

И.А. Сеницын, студ.; рук. В.В. Аполонский, доцент.  
(ИГЭУ, г. Иваново)

## ПРОГРАММНЫЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

Для распределения мощности между колесами ведущей оси в автомобилях с двигателями внутреннего сгорания применяется специальный механизм – дифференциал [1]. В электромобилях, благодаря особенностям тяговой установки, возможна установка как механического дифференциала, так и реализация его функций в виде определенного алгоритма в системе управления. Такая система реализуется, если на ведущей оси колеса не связаны между собой механически и вращаются каждое отдельным электродвигателем. Главным достоинством данного решения является наиболее эффективных расход электроэнергии аккумуляторных батарей при движении автомобиля по оптимальной траектории.

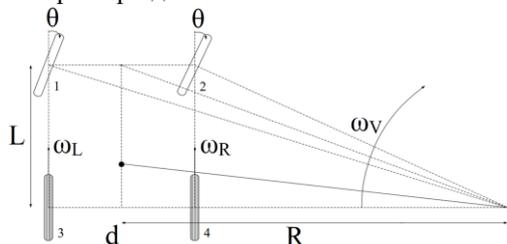


Рис.1 – Схема движения электромобиля

Алгоритм дифференциала в программе управления строится на основе математической модели движущегося в пространстве электромобиля (рисунок 1). Данная модель рассчитывает коэффициент распределения крутящего момента между электро-

двигателями на основе значения угла поворота колес или угла поворота рулевого колеса [2].

### Библиографический список

1. **Differential** (mechanical device) // Wikipedia: сайт – 2024 – URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Differential\\_\(mechanical\\_device\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Differential_(mechanical_device)) (дата обращения: 03.03.2024).
2. **Aggarwal, A.** Electronic differential in electric vehicles / A. Aggarwal // International Journal of Scientific & Engineering Research. - 2013. – Vol. 4, №11. – С. 1322-1326.

*А.С. Кичка, студ.; рук. А.Н. Серов, к.т.н. (НИУ МЭИ, г. Москва)*

## **ПРИМЕНЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ МЕТОДОМ ПО ПЕРЕХОДАМ ЧЕРЕЗ НУЛЬ**

Частота электросети является важным эксплуатационным параметром для безопасности, стабильности и эффективности энергосистемы. Для ее измерения широко используется метод по переходам сигнала через ноль. Данный метод является точным, понятным и простым в реализации, а также существуют некоторые модификации данного метода, которые позволяют повысить его точность. Проблема влияния шума на входе может быть решена с помощью применения фильтрации сигнала. Кроме того, правильно выбранный фильтр позволяет снизить влияние гармоник, что также позволяет повысить точность.

Сам метод состоит в определении интервала времени между моментами перехода через ноль (по фронту или по срезу сигнала). Чаще всего используются БИХ-фильтры, так как они имеют небольшой порядок и меньше зависят от квантования. В качестве цифрового фильтра в ряде реализаций используется дискретное преобразование Фурье. Номер выделяемой спектральной компоненты дискретного ряда Фурье определяется шагом дискретизации и числом выборок в предполагаемом периоде основной гармоники. Наиболее часто используемая модификация метода - линеаризация вблизи перехода через ноль. То есть в области пересечения нуля синусоидальная функция может быть представлена линейной функцией. Такой подход позволяет повысить точность измерения частоты. Основной проблемой данного метода является чувствительность к шуму, фликеру и гармоникам. Они могут быть решены путем применения полосовой фильтрации входного сигнала.

В результате проведенной работы была построена имитационная модель в программе MatLab Simulink. По результатам моделирования видно, что присутствие высших гармоник и шума вызывает появление дополнительной погрешности к измерению частоты, однако их удалось успешно устранить благодаря применению входной фильтрации.

### **Библиографический список**

**1. Domenicantonio Grillo, Nicola Pasquino, Leopoldo Angrizani.** "An Efficient Extension of the Zero-Crossing Technique to Measure Frequency of Noisy Signals," 2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2012.

*Д.С. Евтехова, студ.; рук. А.Н. Серов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ, ОСНОВАННОГО НА ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИИ ВХОДНОГО СИГНАЛА**

Методы измерения частоты сигнала имеют важное значение в современной технике и науке, где точность и надежность измерений играют ключевую роль. Один из эффективных подходов к измерению частоты сигнала основан на определении производной сигнала [1]. Данный метод позволяет определить частоту синусоидального сигнала на основе информации о скорости её изменения во времени.

Предложенный в статье метод позволяет измерять частоту и амплитуду синусоидальных сигналов в отсутствие в их составе помех (шумов, гармоник, фликера) за очень короткий промежуток времени – достаточно трёх отсчётов сигнала с погрешностью на уровне доли процента. Точность измерения зависит от соотношения значений выборок сигнала, используемых для вычисления производной, и составляет менее 0,1% для простейшего дифференциатора второго порядка по трём отсчётам [2].

Значение частоты у синусоидального сигнала определяется следующим образом:  $f = \sqrt{-u''[n]/u[n]}/(2\pi)$ , где  $u[n]$  – цифровой входной сигнал;  $u''[n]$  – вторая производная сигнала;  $n$  – номер отсчёта сигнала.

Для вычисления второй производной сигнала необходимо аппроксимировать исходный сигнал с использованием интерполяционных полиномов Лагранжа [1]. Передаточное уравнение простейшего дифференциатора по трём отсчётам имеет следующий вид [1]:  $u''[n] = (-2u[n] + u[n+1] + u[n-1])/T_s^2$ , где  $T_s$  – шаг дискретизации.

Для снижения влияния шумов и помех сигнала на общую погрешность измерения частоты, можно использовать фильтрацию. В работе с помощью программного пакета Simulink создана имитационная модель измерения частоты сигнала с использованием фильтров Баттерворда и скользящего среднего. Проанализировано влияние параметров сигнала на погрешность измерения частоты и оценена погрешность при применении различных дифференциаторов.

### **Библиографический список**

1. **A.M. Zayezdny; Y. Adler; I. Druckmann.** Short time measurement of frequency and amplitude in the presence of noise, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1992, 41, 3.
2. **Andrey N. Serov, Alexander A. Shatokhin, Sergey I. Gerasimov,** "The Impact of Power Harmonics and Noise on the Measurement Error of the Frequency by Derivative Technique", 2018 Renewable Energies, Power Systems & Green Inclusive Economy (REPS-GIE), pp.1-5, 2018.

*Д.В. Чистяков, магистрант; рук. В.В. Аполонский.  
(ИГЭУ, Иваново)*

## ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Идентификация объекта управления - это процесс поиска основных характеристик и параметров объекта управления с целью последующего контроля и воздействия на него. Для поиска параметров модели воспользуемся генетическим алгоритмом.

Генетический алгоритм эвристический алгоритм поиска, используемый для решения задач оптимизации и моделирования путём случайного подбора, комбинирования и вариации искоемых параметров с использованием механизмов, аналогичных естественному отбору в природе.

Можно выделить следующие этапы генетического алгоритма: задать целевую функцию (приспособленности) для особей популяции, создать начальную популяцию (Начало цикла), размножение (скрещивание), мутированные, вычислить значение целевой функции для всех особей, формирование нового поколения (селекция), если выполняются условия остановки, то (конец цикла), иначе (начало цикла).

Результат идентификации и график представлена в таблице 1 и рисунок 1 соответственно.

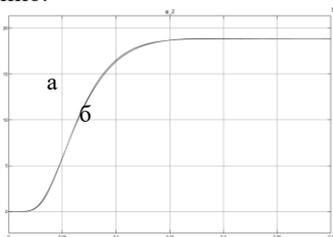


Рисунок 1. Результат идентификации (а-исходный, б-смоделированный)

Таблица 1. Результаты идентификации

Количество итераций	Результат	Искомые параметры
2054	$k1=13.0425; C12=6.4372e+03;$ $k2 =3.6407; D=3.9453$ Ошибка =1.2412	$K1=11.1; C=8000$ $K2=4.2; D=4.6$

### Библиографический список

1. Панченко, Т.В. Генетически алгоритмы: учебно-методическое пособие / под ред. Ю. Ю. Тарасевича. – Астрахань: Издательский дом «Астраханский университет», 2007. – 87 с;

*К.Э. Зайцев, студ., М.Ю. Красильников, студ.; рук. В.Н. Егоров, к.т.н.;  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛОЖЕНИЯ РОТОРА СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ**

В настоящее время в приводах подачи металлорежущих станков находят широкое применение синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ). Такие двигатели обладают малым моментом инерции, высоким КПД и малыми массогабаритными показателями.

Система управления электроприводом подачи в первую очередь должна обеспечивать высокую точность и быстродействие. Данные требования обеспечивает векторная система управления [1,2]. Для реализации векторного управления СДПМ необходима информация об электрическом положении ротора двигателя относительно статора, т.е. об электрическом угле положения ротора относительно, например, противо-ЭДС статора. Неточность в определении положения ротора может привести к значительному снижению точности контурных и позиционных перемещений. Также возможно появление положительной обратной связи по положению, которая приводит к потере управления двигателем.

В системах с инкрементальными датчиками положения при каждом запуске системы необходимо производить оценку положения ротора, поскольку данные о текущем положении ротора теряются после отключения питания датчика. При использовании абсолютных датчиков необходимо выполнить определение положения ротора только при первоначальной настройке датчика.

Были исследованы следующие методы определения электрического положения ротора СДПМ: “шаговый” алгоритм, определение положения с помощью сигналов с датчиков Холла, определение положения на основе эластичности тормоза двигателя. Эти методы были реализованы на контроллере движения IntServo [3]. В сервисном ПО ServoIDE был разработан инструмент, позволяющий проводить настройку каждого метода.

### **Библиографический список**

**1. Виноградов, А.Б.** Векторное управление электроприводами переменного тока / А. Б. Виноградов ; Федеральное агентство по образованию, ГОУВПО "Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина". Иваново, 2008. 320 с. ISBN 978-5-89482-579-3.

**2. Анучин А.С.** Системы управления электроприводов: учебник для вузов. - М: Издательский дом МЭИ, 2015. - 373. с.: ил. ISBN 978-5-383-00918-5

**3.** <http://inelsy.com/home/inelsy/inelsy.com/docs/>

*А.Е. Евсенкина, асп.; А.Н. Серов, к.т.н. (НИУ МЭИ, г. Москва)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА ОСНОВЕ ФИЛЬТРАЦИИ**

Измерение реактивной мощности играет ключевую роль в эффективном управлении электроэнергией и обеспечении надежности электроэнергетических систем. В настоящее время существует несколько методов измерения реактивной мощности, каждый из которых имеет свои преимущества и ограничения. К ним относятся: метод временного сдвига, метод дифференцирования, метод интегрирования, метод интегрирования-дифференцирования, метод, основанный на применении преобразователя Гильберта, метод интервального интегрирования, метод фильтрации.

Рассматриваемый в статье метод фильтрации относится к семейству методов анализа сигналов во временной области. В данном случае фазовращатель представляет собой пару фильтров: фильтр нижних частот (ФНЧ) и полосно-пропускающий фильтр (ППФ). Основным источником методической погрешности является отклонение частоты входного сигнала от номинального значения.

Для оценки методической составляющей погрешности, вызванной конечной девиацией частоты сигнала предложена имитационная модель, выполненная в пакетах Matlab и Simulink. Предлагаемая имитационная модель комбинированного фазовращателя состоит из цифровых БИХ-фильтров второго порядка типа ППФ и ФНЧ. Благодаря лучшим фильтрующим свойствам ППФ используется в канале измерения тока. Соответственно, ФНЧ используется в канале измерения напряжения. При разработке фильтров обоих каналов (получения их коэффициентов) были применены методы прямого синтеза. В работе показано, что измерение частоты позволяет существенно повысить точность измерения. Для выполнения измерения частоты был применен метод по переходу сигнала через нуль. Выбор данного метода обусловлен его высокой точностью для измерения частоты при относительной простоте его реализации. При этом в качестве измеряемого сигнала использован выходной сигнал ФНЧ канала измерения тока. Это позволяет снизить влияние неосновных гармоник и шумов.

Используемая модель позволила подтвердить высокую эффективность предлагаемой методики: не более 0,03% для случая измерения реактивной мощности основной спектральной компоненты при относительной девиации частоты сигнала, не превышающей 5%.

*К.Е. Соколов, асп.; рук. А.А. Анисимов, д.т.н., профессор,  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РОБАСТНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НАТЯЖЕНИЕМ МАТЕРИАЛА В ЗОНЕ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ**

В работе [1] предлагается итерационный метод синтеза робастных систем с регуляторами состояния (РС), на каждом шаге которого меняются сингулярные числа грамиана управляемости

$$G_c = \int_0^{\infty} e^{At} B B^T e^{A^T t} dt ,$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и – матрицы состояния, входа и выхода объекта, формируется скорректированная структура объекта и синтезируется основной регулятор методом модального управления.

Для реализации робастной системы управления натяжением материала в зоне транспортирования с грамианным регулятором состояния была разработана математическая модель в среде Simulink программного комплекса Matlab.

Экспериментальные исследования разработанной робастной системы управления проводились на базе 4-канального лабораторного стенда, содержащего двигателя постоянного тока, широтноимпульсные преобразователи, фотоимпульсные датчики положения и скорости. Для реализации цифровых управляющих устройств использовалась двухуровневая микропроцессорная система управления, состоящая из компьютера верхнего уровня и контроллера движения, совместимого с системой Turbo PМАС2 [2].

В результате экспериментов были получены переходные характеристики, которые показывают, что применение грамианных технологий позволяют увеличить размеры области робастной устойчивости при минимальных структурных изменениях объекта.

### **Библиографический список**

1. **Анисимов А.А.** Итерационный метод структурно-параметрического синтеза робастных систем с регуляторами состояния на основе грамианного подхода / Анисимов А.А., Тарарыкин С.В. // Известия РАН. Теория и системы управления, 2018, №4, с. 42-56
2. **Turbo PМАС/PMAC2.** Software Reference Manual / Delta Tau Data Systems, Inc, December 19, 2012. – 757 p.

*К.Е. Соколов, асп.; рук. А.А. Анисимов, д.т.н., профессор,  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РОБАСТНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВУХМАССОВЫМ МЕХАТРОННЫМ ОБЪЕКТОМ С РЕГУЛЯТОРОМ И НАБЛЮДАТЕЛЕМ СОСТОЯНИЙ

Системы автоматического управления, строящиеся на основе регуляторов с наблюдателями состояний (РНС), являются эффективным средством управления сложными мехатронными объектами [1]. Системы с РНС имеют более сложную структуру, что создает дополнительные факторы риска, связанные с робастностью не только относительно объекта управления, а также относительно самого наблюдателя.

В работе [2] предлагается метод формирования оптимальной структуры наблюдателя, основанный на сингулярном разложении грамианов управляемости  $G_c$  и наблюдаемости  $G_o$ :

$$G_c = \int_0^{\infty} e^{At} B B^T e^{A^T t} dt \quad \text{и} \quad G_o = \int_0^{\infty} e^{At} C C^T e^{A^T t} dt,$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и – матрицы состояния, входа и выхода объекта с размерностями  $n \times n$ ,  $n \times 1$ ,  $1 \times n$ .

Для реализации робастной системы управления двухмассовым мехатронным объектом с РНС на основе грамианного подхода была разработана математическая модель в среде Simulink программного комплекса Matlab.

Для проведения исследований на базе лабораторного стенда, оснащенного микропроцессорной системой управления, была реализована физическая модель мехатронного объекта с упругой связью между вращающимися массами, а также цифровое управляющее устройство, реализованное на базе контроллера движения, совместимого с системой Turbo РМАС2, с использованием операционной системы реального времени.

### Библиографический список

1. **Анисимов А.А.** Особенности синтеза параметрически грубых систем модального управления с наблюдателями состояния / А.А. Анисимов, С.В. Тарарыкин // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2012. - №5. - С. 3-14.
2. **Anisimov A.A.** Synthesizing Parametrically Robust Control Systems with State Controllers and Observers Based on Gramian method / S.V. Tararykin, A.A. Anisimov, A.A. Gerasimov // International Journals of Control, Automation and Systems. – 2019. – Vol. 17. – No. 10. – P.2490-2499.

*Е.А. Будкина, студ.; рук. А.Н. Серов, к.т.н., доц. (НИУ «МЭИ»)*

## **ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ СКЗ ПОЛИГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ**

В настоящее время одним из самых важных показателей качества электрической энергии является среднее квадратичное значение (СКЗ). Под СКЗ периодического сигнала понимается величина, равная квадратному корню от среднего значения квадрата входного сигнала. Для его измерения разработаны и используются различные цифровые методы. Общая идея методов измерения СКЗ в частотной области состоит в получении спектра сигнала с помощью дискретного преобразования Фурье и расчёт амплитудных значений тех спектральных компонент, которые требуются.

Известно, что основной проблемой получения спектра является так называемый эффект «растекания спектра». Существуют различные способы борьбы с данным явлением: применение окон, подстройка числа отсчётов, применение подстройки частоты дискретизации (ПЧД). Также есть различные варианты реализации ДПФ: по прямому определению, алгоритмы быстрого преобразования Фурье, ДПФ как дискретный фильтр и преобразователь Герцеля. В работе рассмотрены достоинства и недостатки каждого их подходов применительно к задаче измерения СКЗ отдельных гармоник и СКЗ в заданной полосе частот. Получено аналитическое соотношение, связывающее погрешность измерения СКЗ и девиацию частоты входного сигнала:

$$\delta(|\dot{U}[k]|)_{k=m} = -(\pi t \delta_f)^2 / 6,$$

где  $\delta_f$  — относительная погрешность частоты,  $k$  — номер спектральной составляющей,  $t$  — количество периодов основной компоненты, в которые укладываются ровно  $N$  отсчётов напряжения.

В работе были рассмотрены существующие методы измерения СКЗ в частотной области для случая входного синусоидального и полигармонического сигнала. В программных пакетах Matlab и Simulink были разработаны модели реализации метода с подстройкой числа отсчётов под текущее значение частоты входного сигнала. Доказана высокая эффективность предлагаемого подхода. В качестве метода измерения частоты был выбран подход, основанный на анализе приращения фазы сигнала. Данный подход обладает высокой точностью применительно к особенностям сигналов реальных электрических сетей.

*С. В. Куликов, студ.; рук. Л. Г. Копылова, к.т.н., доцент  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ПРИМЕНЕНИЕ АВТОМАТИЧЕСКИХ ПОГРУЗЧИКОВ В СОВРЕМЕННОЙ ЛОГИСТИКЕ**

Четвертая индустриальная революция (Индустрия 4.0) – переход на полностью автоматизированное цифровое производство, управляемое интеллектуальными системами в режиме реального времени в постоянном взаимодействии с внешней средой, выходящее за границы одного предприятия, с перспективой объединения в глобальную промышленную сеть вещей и услуг [1].

Не обошла данная тенденция и сферы, связанные с логистикой, и как следствие погрузочно-разгрузочное оборудование.

Погрузочно-разгрузочное оборудование – это механическое оборудование, используемое для перемещения, хранения, контроля и защиты материалов, товаров и изделий на протяжении всего процесса производства, распределения, потребления и утилизации.

Из всех видов современного подъемного оборудования погрузчики, оснащенные вилами, пользуются наибольшей популярностью. Вилочные погрузчики находят применение в различных хозяйственных сферах благодаря multifunctional характеристикам. Разнообразие модификаций позволяет широко использовать эти машины в зависимости от исходных технических условий.

Конструкция вилочного погрузчика состоит из множества движущихся деталей и узлов. Они образуют подъёмный механизм и позволяют ему работать по прямому назначению – брать и возить грузы разных размеров, доставать паллеты с различной высоты и т.п. В число таких деталей входят: мачта, подъёмный цилиндр, цилиндр наклона, каретка, вилы, спинка каретки, противовес, источник питания, шины и т.д. [2].

Из-за большого спроса в экономике в наше время актуальными являются вопросы по улучшению плавности поднятия грузов и стабилизации для данных устройств, а также оптимизации времени выполнения погрузочно-разгрузочных работ.

### **Библиографический список**

**1. Четвертая** промышленная революция. Популярно о главном технологическом тренде XXI века [Электронный ресурс]: <https://www.tadviser.ru/index.php>

**2. Вилочные** погрузчики для склада – принцип работы, виды и назначение, критерии выбора [Электронный ресурс]: <https://eurasia-group.ru/blog/articles/vilochnye-pogruzchiki-dlya-sklada-printsip-raboty-vidy-i-naznachenie-kriterii-vybora/>

*Г.М. Веселов, студ.; рук. А.Н. Серов, к.т.н. (НИУ “МЭИ”, г. Москва)*

## **ПРИМЕНЕНИЕ АППРОКСИМАЦИИ СИГНАЛА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ МЕТОДОМ ПО ПЕРЕХОДАМ ЧЕРЕЗ НУЛЬ**

Надёжность измерения частоты является актуальной задачей для обеспечения эффективной и безопасной работы электрических приборов и электросети. Во многих современных исследованиях предложены быстрые и точные методы оценки частоты сигналов, которые могут содержать помехи. Один из таких, метод по переходам через нуль. Целью данной работы является анализ источников погрешности измерения частоты данным методом, а также исследование влияния порядка аппроксимирующего полинома на погрешность.

Суть методики заключается в определении моментов времени, когда сигнал пересекает нулевой уровень. В идеальном случае данный интервал равен половине периода. Если время измерения содержит несколько полупериодов, удобно использовать все данные интервалы для получения более точной оценки. Основными источниками методической погрешности являются шумы, неосновные гармоники сигнала, фликер. Данные составляющие оказывают негативное влияние на точность измерения частоты и вызывают случайные колебания, искажение формы сигнала и изменения в частотном спектре с течением времени. Применение полиномов различных порядков для выполнения интерполяции позволяет аппроксимировать форму сигнала для более точного определения его перехода через нуль. В общем случае, с увеличением порядка многочлена следует ожидать уменьшение влияния шума на погрешность. Однако, чем больше порядок, тем больший объём вычислений он требует, что замедляет процесс измерения. На практике часто используют различные типы полиномов (например полиномы Лагранжа или полиномы Ньютона). Также существуют модификации данного метода, направленные на снижение погрешности измерения, такие как: метод наименьших квадратов, увеличение количества переходов через нуль за время измерения, использования фильтрации шумов в сигнале и другие.

Для изучения рассматриваемого метода была построена имитационная модель с помощью программного пакета Matlab, что для данной задачи является простым и эффективным решением.

В ходе данной работы был изучен один из эффективных и точных методов измерения частоты по переходам через нуль, а также его модификации, их достоинства и недостатки, произведён оценка методической погрешности. Кроме того, рассмотрена методика применения аппроксимирующих полиномов различных порядков и получена оценка конечной погрешности измерения частоты при применении рассматриваемого метода. С помощью разработанной имитационной модели, были получены оценки погрешности для входного синусоидального, полигармонического сигналов и сигнала, искаженного шумом.

*Р.В. Валиев, магистрант; рук. А.А. Анисимов (ИГЭУ, Иваново)*

## РАЗРАБОТКА ДРАЙВЕРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ НАСОСА В ТРУБОПРОВОДЕ С ДВУМЯ КЛАПАНАМИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ SIMATIC STEP 7

В производстве, готовую продукцию необходимо перекачивать в танки, что производится по трубопроводу с использованием насосов.

Рассматриваемая система представлена на рис. 1

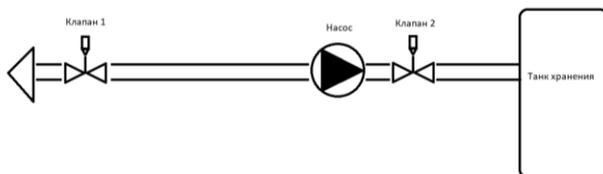


Рисунок 1. Система трубопровода с насосом и двумя клапанами

Для обеспечения взаимодействия между оператором, панелью управления и устройством необходимо разработать программу обработки сигналов. Драйвер служит универсальным блоком для обработки сигналов, упрощая создание программ для подобных систем. В данном случае, были разработаны драйвера на клапана и на насос для ПЛК Simatic s7 300-ой серии и соответствующая периферия.

Для правильной работы системы должны выполняться определённые условия, такие как: Замкнутый автомат, открыты оба клапана, не переполненный танк, корректная работа пускателей, условия безопасности

Несоблюдение вышеупомянутых условий, может привести к серьёзным неполадкам. Чтобы контролировать процесс, была разработана SCADA-система для панели управления.

От системы необходим следующий порядок действий: При появлении сигнала старта процесса → открыть оба клапана → запустить насос в соответствующем направлении.

Автоматическое управление работает по уровню Заполненностью танка: при достижении  $x > 60\%$  насос отключается, а при  $x < 20\%$  формируется запрос старта.

Испытания на стенде пройдены успешно

### Библиографический список

1. Ханс Бергер, Автоматизация посредством STEP 7 с использованием STL и SCL и программируемых контроллеров SIMATIC S7-300/400 / Эрлеган, 2001. – 776с.

Д.С. Корытов, маг., рук. С.О. Кожевников, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)

## ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ВОЛНОВОГО ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ГИРОСКОПА

Гироскопы широко применяются в системах управления движением мобильных устройств. Применение гироскопов в мобильных устройствах в качестве чувствительных элементов приводит к необходимости обеспечения высокой точности технических характеристик в заданных условиях эксплуатации. На этапе исследований перед созданием опытной конструкторской разработки необходим синтез имитационной модели с целью получения отклика резонатора ВТГ на перемещение стоячей волны. В общем виде амплитуда колебаний стоячей волны резонатора описывается уравнением

$$\alpha(\nu, \tau) = \alpha_0 \cdot \cos(\nu\tau), \quad (1)$$

где  $\alpha_0$  – перемещение стоячей волны,  $\tau$  – время колебаний,  $\nu$  – безразмерный коэффициент, который зависит от формы колебаний упругой стоячей волны к.

Имитационная модель ВТГ, соответствующая приведенной зависимости, приведена на рисунке 1.

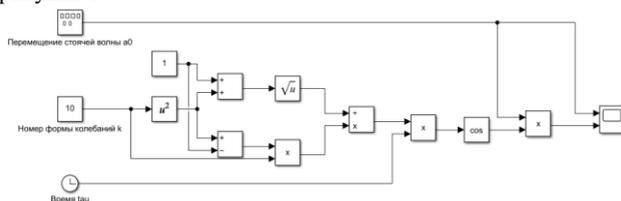


Рисунок 1 – Имитационная модель ВТГ

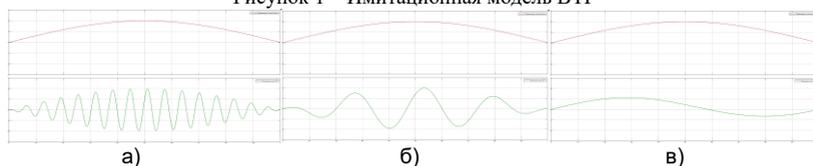


Рисунок 2 – Отклик модели ВТГ на перемещение стоячей волны от 0 до 2 и обратно за время 1 с при k равном: а) 10; б) 5; в) 2

Анализ рисунков 2 позволяет сделать следующий вывод: чем меньше номер формы колебаний упругой стоячей волны, тем больше времени требуется для получения отклика резонатора ВТГ на перемещение стоячей волны.

Таким образом, одним из способов повышения чувствительности резонатора ВТГ к перемещению упругой стоячей волны является увеличение номера формы колебаний упругой стоячей волны.

*О.Ю. Григорьев, магистрант; С.О. Кожневиков, к.т.н., доцент  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## РАЗРАБОТКА КОНТРОЛЛЕРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ КАЛОРИФЕРАМИ В ТЕПЛИЦЕ

В данном проекте разрабатывается система отопления в промышленной теплице под руководством НТЦ ARGO [1]. Теплица работает круглый год и отапливается теплыми полами. Поскольку теплые полы обладают большой инерционностью, для быстрого разогрева воздушной массы внутри теплицы разрабатывается система управления калориферами. Иерархия системы управления отоплением в теплице представлена на рисунке ниже.



Рисунок 1 – иерархия системы управления отоплением в теплице

Контроллер управления калориферами (КУК) работает следующим образом. Контроллер опрашивает датчики температуры посредством специального контроллера (КДТ) по протоколу ПКУ (разработан ARGO), шина RS-485. По этой же шине осуществляется управление приводами вентиляторов в калориферах (КСВ, контроллер скорости вращения) по протоколу Modbus. Также данный контроллер является slave-устройством по отношению к регистратору (КВУ), и передает значения температуры с датчиков по запросу.

При установке одного из КСВ в ручной режим, КУК приостанавливает его управление, пока при очередном опросе не установит, что КСВ снова переключен в автоматический режим.

### Библиографический список

1. НТЦ ARGO, Умная теплица [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rtc-argo.ru/niokr/smartgreenhouse.php>

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

## **СРАВНЕНИЕ ДВУХ ПОДХОДОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ**

Применение средств автоматической настройки в системах с полиномиальными регуляторами (ПР) входа-выхода, позволяет обеспечить высокое качество управления сложными мехатронными системами в условиях параметрической неопределенности [1, 2].

В связи с этим предлагается методика автоматической настройки системы управления с использованием искусственной нейронной сети (ИНС) для идентификации параметров объекта управления. На практике в системах электропривода мехатронных систем параметры двигателя и силового преобразователя известны достаточно точно и они медленно изменяются в процессе эксплуатации. Поэтому в процессе настройки рассматривается вариация параметров механической части объекта управления – моменты инерции  $J_1$  и  $J_2$ , коэффициент упругости  $C_{12}$  и коэффициент трения  $K_d$ .

В данном исследовании сравнивается идентификация двух типов параметров модели объекта управления: идентификация непосредственно параметров механической части объекта управления  $J_1$ ,  $J_2$ ,  $C_{12}$  и  $K_d$  и идентификация коэффициентов полиномов передаточной функции модели объекта управления. Соответственно, были разработаны две ИНС для идентификации соответствующих параметров объекта управления с использованием одного и того же обучающего набора данных.

Анализ показал, что идентификация коэффициентов полиномов передаточной функции модели объекта управления обеспечивает более высокую точность при низком уровне помех, а применение идентификации параметров механической части объекта управления обеспечивает более высокую помехоустойчивость.

### **Библиографический список**

- 1. Анисимов А.А., Тарарыкин С.В.** Структурно-параметрический синтез, оптимизация и настройка систем управления технологическими объектами. – Иваново, 2015. – 296 с
- 2. Гайдук А.Р.** Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления (полиномиальный подход). – ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 360 с



**СЕКЦИЯ 23**  
**ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

Председатель –  
к.т.н., доцент **Ведерникова И. И.**

Секретарь –  
к.т.н., доцент **Власов А. М.**



*М. Е. Куприянов, студ.; рук. И.И. Ведерникова, к.т.н., доц.,  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **УВЕЛИЧЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ИЗДЕЛИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПРИ ПОМОЩИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

В производстве нередки случаи, когда невозможно изготовить требуемое изделие, используя традиционные методы обработки такие, как точение, фрезерование, строгание и другие. В этой ситуации на помощь приходят аддитивные технологии.

Некоторые разновидности аддитивных технологий, такие как: селективное лазерное плавление (SLM) и прямое лазерное спекание металла (DMLS) – в отличие от традиционных формообразующих методов начали получать массовое распространение в промышленных производственных процессах сравнительно недавно. Разница между SLM и DMLS сводится к основам процесса образования полноценных связей между атомами металла.

Для повышения надежности и требуемых характеристик получаемых деталей, а также для получения возможности использовать данные изделия в качестве ответственных, предлагается несколько способов. Один из этих способов заключается в использовании специально подготовленного сердечника, полученного традиционными формообразующими методами, но подобные решения сложны в реализации из-за сложностей в спайке материалов, имеющих различные физико-химические свойства. Впоследствии применение данных операцийкратно увеличивают стоимость получаемого изделия.

Стоит отметить, что плотность готового изделия должна превышать плотность насыпных металлических гранул более чем в полутора раз, а для достижения данного эффекта необходимо применять следующие рекомендации по способам повышения надежности.

Для повышения надежности необходимо использование металлических гранул, приведенных почти к идеальной сферической форме, то есть снизить «Д» – отклонение формы; и снижение « $\sigma$ » (рассеяния гранул) фракции зерна в диапазон 5 мкм. То есть относительно идеальный вариант использовать металлический порошок, гранулы которого имеют окосферическую форму и фракция которого равна 20 – 25 мкм. Использование подобного материала позволяет снизить возможность возникновения пористости в готовом изделии.

*А.А. Каприльянц, студ.; рук. Н.Л. Павлюкова, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **СОЗДАНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ СБОРОЧНОЙ МОДЕЛИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ДВУХСТУПЕНЧАТОГО РЕДУКТОРА Ц2-400**

Благодаря современным САПР, появилась возможность создания не только электронной конструкторской и технологической документации, но и выполнять проекты 3D-моделей машин машиностроительных производств.

В программе Компас-3D была спроектирована трехмерная сборочная модель цилиндрического двухступенчатого редуктора Ц2-400 (рис. 1). За основу проекта были взяты: сборочный чертеж, спецификация, чертежи основных деталей редуктора, представленные в атласе конструкций «Редукторы и вариаторы», автора Л. С. Бойко и др. [1].

При проектировании был использован традиционный метод создания сборок «снизу-вверх», т.е. сначала на основе 2D-чертежей были созданы отдельные 3D-детали редуктора, а затем, при наложении связей между деталями, и сама сборка редуктора. При создании стандартных изделий (подшипников, болтов, гаек и др.) и зубчатых передач использовались специальные библиотеки Компас-3D.

Для создания анимации работы редуктора выполнено наложение вращательных связей между зубчатыми колесами и вал-шестернями. Кроме этого, для наглядности конструкции редуктора, выполнен разрез трехмерной модели и разнесенная сборка.

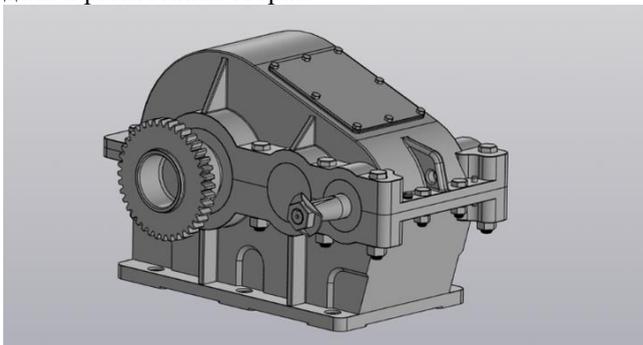


Рис. 1. Редуктор цилиндрический двухступенчатый Ц2-400

### **Библиографический список**

- 1. Редукторы и вариаторы:** атлас конструкций / Л. С. Бойко, [и др.].– Москва: Машиностроение, 1964.– 96 с.

*Е. В. Соловьева, асп.; рук. И.И. Ведерникова, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ**

В машиностроении качество поверхности деталей определяется технологическими методами обработки и геометрией обработанной поверхности. Шероховатость и волнистость при нормативных допусках влияют на размер и форму деталей. Методы обработки определяют шероховатость поверхности детали, так как считают микронеровности следом режущего клина инструмента. Режимы резания оказывают существенное влияние на величину, форму и направление микронеровностей. Известно, что шероховатость сокращает фактическую площадь контакта, который возникает лишь по отдельным участкам соединяемых поверхностей в районе линии выступов. Особенно это проявляется в местах сильного перепада сечений деталей. Поэтому шероховатость сказывается на контактной жесткости сопрягаемых деталей, на условиях смазки, трение, герметичности стыков и т.д.

В области одного метода обработки, например, при резании пластичных сталей на скорости 20-40 м/мин высота микронеровностей доходит до предельного значения. Это объясняется образованием на режущей кромке инструмента нароста, состоящего из частиц обрабатываемого материала. Неоднородная шероховатость получается при переменной жесткости в разных сечениях заготовки. При недостаточной жесткости технологической системы СПИЗ из-за большой амплитуды вибрации её элементов резко увеличивается микро- и макронеровности. На шероховатость обработанной поверхности оказывают влияние свойства материала заготовки, наличие СОЖ и ряд других факторов [1].

Установлено [1], что на шероховатость поверхности детали влияют подача, скорость резания и другие параметры технологического процесса. Шероховатость  $R_a$  и  $R_z$  увеличивается с увеличением скорости. Аналогичная зависимость наблюдается между силой резания и шероховатостью. Параметры шероховатости поверхности детали в основном зависят от подачи, глубины, температуры и силы резания. С увеличением подачи в 2 раза растет шероховатость и сила резания примерно в 1,5 раза.

### **Библиографический список**

**1. Рыкунов А. Н.** Технологические процессы в машиностроении: лабораторный практикум. — Рыбинск: Изд-во РГАТА, 2007. — 80 с.

*А.А. Жуков, асп., рук. А.М. Власов, к.т.н.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ЛАЗЕРОМ СО<sub>2</sub>**

Резка алюминиевых сплавов отличается от обработки других металлов технологическими особенностями. Работать с алюминием достаточно сложно ввиду его высокой теплопроводности, низкой температуры плавления и плохим поглощением лазерного излучения. Лазерный луч отражается от поверхности вместо того, чтобы поглощаться, что приводит к снижению производительности резки. Отраженный лазерный луч может представлять опасность, он может даже попасть в лазерную головку и значительно повредить лазерный модуль. Это отражение частично происходит от поверхности металла, но в основном от высокоотражающего расплава, представляющего собой оксидную пленку, которая образуется во время лазерной резки. По этой причине возможные скорости резания, должны быть на порядок ниже для алюминиевых сплавов. Лазерная резка алюминиевого листа также зависит от мощности лазерного источника, она может быть выше, чем при лазерной обработке других металлов аналогичной толщины. Алюминиевые листы так же покрывают краской или малярным скотчем, но это полностью не решает проблему отражающей природы материала. Обходным путем является добавление легирующих элементов, таких как магний, цинк, кремний и т.д., которые значительно снижают отражающие свойства алюминия. Для лазерной резки алюминиевых сплавов можно использовать вспомогательные газы, они позволяют бороться с отражающей природой алюминиевых сплавов. Они инициируют экзотермическую реакцию, выделяя тепло и кислород в металле. Эти газы часто представляют собой азот, аргон или сжатый воздух. Экспериментально установлено ключевое влияние рода вспомогательного газа на качество реза [1].

Альтернативный способ улучшения поглощения лазерного излучения на алюминиевых поверхностях состоит в покрытии поверхности металла антибликовым слоем. Это покрытие помогает уменьшить энергию, отраженную от материала, увеличивая поглощение и облегчая прорезывание лазером.

### **Библиографический список**

**1. Riveiro, A.,** Quintero, F., Lusquinos, F., Comesana, R., Pou, J. Parametric investigation of CO<sub>2</sub> laser cutting of 2024-T3 alloy. *Journal of Materials Processing Technology* 210 (2010) 1138–1152.

*М.Е. Куприянов, студ.; Д.Е. Жумай, студ.;  
рук. Н.Л. Павлюкова, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ 3D-МОДЕЛИ МОДУЛЯ ЗАХВАТА ДЛЯ БПЛА

В нашем мире растет спрос на беспилотные летательные аппараты (БПЛА), которые могут использоваться в энергетической отрасли, сельском хозяйстве, строительстве и др. Их применение особенно удобно, когда присутствие для человека опасно или невозможно. Часто БПЛА оборудуют дополнительными устройствами, например тепловизорами, видеокамерами, модулями для захвата груза.

Разработана модель захвата, который крепится к нижней части фюзеляжа БПЛА. Устройство позволяет захватывать, перемещать и сбрасывать груз в форме прямоугольного параллелепипеда с размерами сторон не более 50 мм.

Разработана конструкция губок схвата и корпуса (рис. 1). На губках предусмотрены сменные накладки с пружинящей поверхностью и насечкой для увеличения надежности крепления груза.

Проработан механизм захвата, удержания и сброса груза. Для этого в конструкции предусмотрен сервопривод (используется для разведения губок с помощью кулачкового механизма) и пружины (для автоматического сжатия, которое реализуется по сигналу ультразвукового датчика, расположенного на корпусе между губками схвата).

3D-модель разрабатывалась в САД-системе КОМПАС-3D. Выбраны материалы для изготовления модели с помощью 3D-печати (CarbonX (ASA+CF) для корпуса и губок, TPU – для сменных накладок губок схвата).

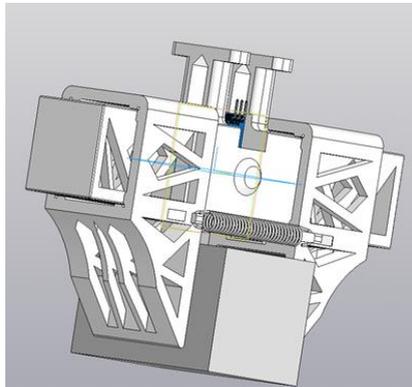


Рис. 1. Трехмерная модель захвата для БПЛА

*А.М. Филатов, в. асп.; рук. С.А. Егоров к.т.н. доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ В РАЗЛИЧНЫХ ОХЛАЖДАЮЩИХ СРЕДАХ**

Был проведен ряд экспериментов по исследованию температуры режущего инструмента в зависимости от применяемых способов охлаждения зоны резания. В качестве охлаждающих сред использовался воздух, полусинтетическая жидкость Ивнетикс и пар, полученный из полусинтетической жидкости Ивнетикс.

При скорости вращения обрабатываемой детали 200 об/мин увеличение температуры режущего инструмента происходит пропорционально увеличению подачи. При увеличении скорости до 630 об/мин и при дальнейшем увеличении скорости вращения увеличение подачи престаает играть значительную роль на изменение температуры режущего инструмента и большее влияние на температуру оказывает скорость вращения обрабатываемой детали. При охлаждении СОЖ и воздухом температура инструмента достигает своего максимума при 630 об/мин и при дальнейшем увеличении скорости вращения изменяется незначительно. При охлаждении паром температура, по мере увеличении скорости резания, возрастает равномерно и не достигает температурного значения, получаемого другими способами, что позволяет нам сделать предположение об эффективности охлаждения паром и при более высоких скоростях резания.

В ходе анализа экспериментальных данных было установлено, что охлаждение режущего инструмента путем подачи пара из полусинтетической СОЖ является наиболее эффективным методом, из всех рассматриваемых методов. Следовательно, является наиболее перспективным в применении.

Также установлено, что при использовании СОЖ методом полива в зоне контакта инструмента и обрабатываемой детали происходит усиленное выделение тепла, что приводит к образованию в зоне резания парового слоя, затрудняющего теплопередачу.

### **Библиографический список**

- 1. Егоров, С.А.** Механизм проникающего действия СОТС в паровой фазе в зону резания / С.А. Егоров, М.С. Обронов // Пожарная и аварийная безопасность. - №4. - 2022. - С. 19-23.

*Н.Н. Батанов, студ.; рук. И.И. Ведерникова, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **УВЕЛИЧЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ПУТЕМ ГАЛЬВАНИЗАЦИИ**

Одним из способов повышения надежности деталей является гальваностегия. На данный момент выделяют следующие виды гальванических покрытий: хромирование, меднение, цинкование, железнение, никелирование, латунирование.

Восстановление твердым хромированием применяют для достижения определенных характеристик поверхности: нечувствительности к давлению, получения высокой твердости, сопротивления ударам, толчкам и истиранию (применяют для калибров, пуансонов, штампов, деталей машин и так далее); низкого коэффициента трения скольжения: для валов, подшипников, протяжных инструментов, трущиеся поверхности цилиндров, поршневые кольца; плохой смачиваемости: для пресс-форм, литейных форм, пластмасс, стекла, искусственного волокна; большой жаростойкости: для форм для отливок, паровых машин, паровых турбин; высокой коррозионной стойкости двигателей внутреннего сгорания и других.

Существует несколько разных способов хромирования: электролитическое хромирование; диффузное хромирование; вакуумное хромирование; химическое хромирование; гидрофобизация.

Широко распространено электролитическое хромирование. Перед началом обработки деталь полностью очищают от загрязнений. Чистое изделие помещают в специальный резервуар, наполненный электролитом – обычно на основе шестивалентного хрома.

При диффузионном хромировании атомы хрома диффундируют (проникают) в поверхностный слой изделия и формируют прочное и долговечное покрытие.

Гидрофобизацию используют для того, чтобы покрытие из хрома сделать максимально коррозионно-стойким. На изделии адсорбируются молекулы используемого соединения. При этом покрытие становится гидрофобным. Капли, попадающие на обработанное изделие, легко стекают с него, что сильно понижает вероятность возникновения коррозии, в результате повышается надежность изделия.

Таким образом, гальваника, в том числе хромирование, играет важную роль в повышении надежности деталей за счет создания защитного слоя, который продлевает их срок службы и обеспечивает более эффективную работу в машиностроении.

*А.Р. Мукарашиев, студ.; И.З. Бебиашвили, студ.;  
рук. Н.Л. Павлюкова, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## ИННОВАЦИОННЫЕ СТАЛИ

Современное производство активно развивается, новые инновационные материалы играют важную роль в различных отраслях промышленности. Инновационные стали – это особые виды материалов, разработанные с применением передовых технологий, которые обладают уникальными свойствами, делающими их более прочными, устойчивыми к коррозии и износу, а также способными выдерживать экстремальные условия эксплуатации. Еще одно требование – это более экологичное производство сталей.

Для сталей уточняется и выбирается оптимальный состав, который обеспечивает наилучшие физико-механические свойства, разрабатываются новые способы легирования, термической обработки и др. Это позволяет создавать новые материалы и улучшать свойства уже известных [1].

Методы наноструктурирования позволяют получать специальные свойства стали с размером зерен порядка или менее 100 нм. Наноструктурирование можно выполнить с помощью получения сталей в среднечастотных индукционных печах при точном регулировании температуры сплава по всему объему и тщательном перемешивании, с помощью интенсивной пластической деформации в холодном состоянии, при высокотемпературной термомеханической обработке (темпформинг) [1].

Интересен подход улучшения свойств сталей без дорогостоящих легирующих добавок (никеля, титана), который позволяет снизить стоимость продукции, сохраняя ее качество. Наноструктурированию можно подвергнуть известные стали, например, низкоуглеродистую сталь 15Х2ГНМФБ. С помощью термической обработки (изотермической закалки на речечно-пластинчатый мартенсит) можно добиться прочности этой стали более 1500 МПа при ударной вязкости 1,0 МДж/м<sup>2</sup> [2].

### Библиографический список

1. Колесников В.А. Новые наноструктурированные высокоазотистые марганцевые стали // Мир техники и технологий, 2010. – № 6 – 7. – С. 31 – 33.
2. Наноструктурированные низкоуглеродистые стали со структурой пакетного мартенсита / А.А. Шацов, С.К. Гребеньков, С.К. Лаптев // Актуальные проблемы физического материаловедения сталей и сплавов: сборник тезисов докладов XXV Уральской школы металлосплавов-термистов (Екатеринбург, 3–7 февраля 2020 г.). – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2020. – С. 55 – 56.

*А.Е. Кадочкин, студ.; рук. В.Н. Копосов, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ВЫБОР МЕТОДА ЛИТЬЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ЗАГОТОВКИ КОРПУСНОЙ ДЕТАЛИ**

Литье - типовой процесс получения изделий, заключающийся в заполнении ёмкости, формирующей поверхность или часть поверхности изделия, жидким материалом с дальнейшим переходом жидкого материала в твёрдое агрегатное состояние.

Обоснованный выбор метода получения заготовки определяет такие показатели, как качество получаемых изделий и их стоимость.

Из всех методов литья можно выделить пять основных: литье в песчано-глинистые формы, в кокиль, под давлением, центробежное, литье в холодно-твердеющие смеси (ХТС).

Литье в песчано-глинистые формы. Сущность литья в песчано-глинистые формы заключается в использовании разборных форм, внутренней полости которых выполнена смесью на основе песка с добавлением связующих компонентов и максимально соответствует модели детали.

Литье под давлением - способ изготовления отливок, при котором сплав приобретает форму отливки, быстро заполняя пресс-форму, сплав под высоким давлением от 7 до 700 МПа формируется в нужную форму.

Центробежное литье. При этом литье постоянная форма непрерывно вращается с высокой скоростью (от 300 до 3000 об/мин) по мере заливки расплавленного металла. Расплавленный металл растекается по внутренней стенке формы, где затвердевает после охлаждения.

Литье в кокиль. Кокиль - металлическая форма, которая заполняется расплавом под действием гравитационных сил. В отличие от разовой песчаной формы кокиль может быть использован многократно. При этом способе литья совсем исключается применение песчаных смесей.

Литье в холодно-твердеющие смеси - процесс литья металла в формы, отвердевание в которых запускается без участия сушильных печей. В раствор вводят отвердители и связующие вещества, обеспечивающие самозатвердевание смесей в естественных условиях в течение 10-15 минут.

Таким образом мы можем сравнить эти пять методов литья. Метод литья с использованием ХТС является оптимальным вариантом для получения заготовок корпусного типа, так как он достаточно экономичен, экологичен и производителен.

*П.И.Синодеева, асп., рук. И.И. Ведерникова, к.т.д., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ПРЕИМУЩЕСТВА ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ**

Лезвийная обработка – это обработка резанием, которая осуществляется лезвийным инструментом. Выполнение операций по лезвийной обработке проходят на станках следующих групп: сверлильной; расточной; протяжной группы как обычного исполнения, так и с ЧПУ.

Лезвийная обработка металла является довольно производительной, поскольку она позволяет осуществлять самые различные процессы с высокой скоростью, также она энергосберегающая, что объясняет ее высокую популярность.

К преимуществам лезвийной обработки относят:

1. *Высокая точность и качество обработки.* Точность и качество обработки достигается из-за острого лезвия инструмента, что позволяет получать четкие и ровные поверхности, точные размеры и формы деталей.

2. *Минимальное воздействие на материал.* Лезвийная обработка не подвергают обрабатываемый материал к значительным тепловым или механическим деформациям, что является несомненным плюсом для качества продукции.

3. *Обработка различных материалов.* Лезвийная обработка предназначена не только для обработки металлов, также для обработки пластмасс, дерева и другого. Это позволяет быть универсальным методом обработки.

4. *Производительность и эффективность.* Так как лезвийная обработка обладает высокой точностью и качеством обработки, это даёт возможность для сокращения необходимых операций и времени обработки, что очень сильно позволяет повысить производительность процесса.

5. *Создание сложных форм и контуров.* Так как инструменты достаточно гибкие и точные, то появляется возможность для обработки деталей с различными геометрическими особенностями.

В целом, лезвийная обработка является эффективным и точным методом обработки материалов, который обладает рядом преимуществ по сравнению с другими методами. Она находит широкое применение в различных отраслях промышленности и позволяет достичь высокого качества и производительности процесса обработки деталей.

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

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СЕБЕСТОИМОСТИ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ НА РАННИХ СТАДИЯХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Прогнозирование себестоимости изделий машиностроения на ранних стадиях проектирования играет ключевую роль в эффективном управлении производственными затратами и обеспечении конкурентоспособности предприятия. Этот процесс является важным элементом стратегического планирования и позволяет предвидеть будущие расходы на производство, что способствует принятию обоснованных решений на ранних этапах разработки.

На сегодняшний день существует ряд методов прогнозирования себестоимости, включая аналитические модели, статистические подходы и использование специализированных программных продуктов. Однако, несмотря на разнообразие доступных инструментов, эффективное прогнозирование требует интеграции данных из различных источников, таких как исторические данные о затратах, технические характеристики изделий и текущие рыночные тренды.

Преимущества раннего прогнозирования себестоимости очевидны. Оно позволяет идентифицировать потенциальные риски и проблемы, связанные с производством, еще на этапе проектирования изделия. Кроме того, раннее прогнозирование обеспечивает возможность корректировки концепции продукта или выбора материалов с целью оптимизации затрат и повышения его конкурентоспособности.

Несмотря на многообразие методов прогнозирования себестоимости изделий их применение вызывает определенные затруднения. Они дают слишком большую погрешность прогнозирования (даже метод корреляционно-регрессионного анализа). По мнению автора наиболее удачным методом прогнозирования себестоимости изделий будет метод, построенный на базе нейросетевых технологий. Нейронные сети – мощный метод моделирования, позволяющий точно воспроизводить чрезвычайно сложные зависимости. Они позволяют справиться с решением задач прогнозирования в случае большого числа переменных. Нейронные сети, реализованные на компьютере, относительно просты в использовании и не требуют от проектировщика специальных знаний, например в области математической статистики.

*Д.Е. Жумай, студ., рук. И.И. Ведерникова, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **УВЕЛИЧЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ИЗДЕЛИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОБОГАЩЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛИ АЗОТОМ**

Азотирование металла – многоэтапный технологический процесс, основанный на принципах термохимического взаимодействия, предназначение которого заключается в обогащении поверхностного слоя детали молекулами азота. Суть метода заключается в повышении прочности, износостойкости, долговечности и устойчивости сплавов к коррозии. Так материал приобретает новые полезные свойства.

Каталитическое газовое азотирование является последней модификацией технологии газового азотирования. Средой для насыщения является аммиак, диссоциированный при температуре 400-600 °С на катализаторе в рабочем пространстве печи. Для управления структурой и механическими свойствами слоя при каталитическом газовом азотировании сталей применяют изменение потенциала насыщения. В целом применяются более низкие температуры, чем при газовом азотировании.

При насыщении азотом не исключают факта проведения дополнительного ряда сопутствующих мероприятий. Будущий продукт подвергают процедуре предварительного закаливания, выравнивают при помощи шлифовки, выполняют термическую обработку, после чего вновь шлифуют. Реализация жизненного цикла не нуждается в крупных вложениях и привлечении большого количества рабочей силы. Благодаря этому процедура востребована на производственных мощностях крупного, среднего и малого бизнеса.

Азотирование также может придать деталям противозадирные свойства. Этот процесс повышает устойчивость детали к адгезионному износу между металлами в результате скользящего контакта.

При высоких температурах слой закалки может начать терять свою твердость. Это обычно наблюдается при таких процессах, как науглероживание. Однако при азотировании скорость размягчения значительно ниже.

Таким образом, азотированные детали могут использоваться в высокотемпературных условиях без значительной потери своих характеристик.

*А.А. Новичихин, маг., П.И., Синодеева, асп.,  
рук. И.И. Ведерникова, к.т.н., доц., С.А. Егоров, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКА**

В настоящее время стеклопластик является перспективным материалом в машиностроении, так как в конструкциях машин он успешно заменяет черные и цветные металлы. Широкое применение он нашел в изготовлении деталей, к которым предъявляются требования высокой прочности, стабильности размеров во времени, повышенной влагостойкости, большой ударной вязкости.

Однако использование современных научно-технических достижений позволяет прогнозировать и уменьшать воздействие вредных факторов на обработке детали. С этой целью были проведены исследования по установлению зависимости между режимами резания и отклонением от круглости, шероховатости, а также износом режущего инструмента и определены выходные параметры процесса механической обработки.

Для проведения экспериментальных исследований разработан автоматизированный стенд сбора и обработки технологической информации, включающий токарно-винторезный станок модели 1К62, резец тензометрический, тензо-станцию УТ4-1; multifunctionальную плату ввода/вывода (АЦП) ЛА-70, компьютер.

Моделирование процесса резания стеклопластика выявило места основных напряжений в режущем лезвии. Пиковые напряжения, приводящие к интенсивному износу режущей кромки инструмента, возникают в местах перерезания стекловолокна. Помимо этого, было зафиксировано, что при резании изношенным инструментом (радиус при вершине 0,3 мм) стекловолокно разрывается и отслаивается от матрицы. Обработка результатов, полученных при моделировании, позволила установить зависимость силы резания от износа инструмента и скорости резания для чернового, получистового и чистового видов фрезерования.

### **Библиографический список**

1. Степанов А.А. Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов. - Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1987. -176 с., ил.
2. Руднев А.В., Королев А.А. Обработка резанием стеклопластиков. - М.: Машиностроение, 1969. -118 с.

*И.А. Сухов, маг.,  
рук. И.И. Ведерникова, к.т.н., доц., С.А. Егоров, к.т.н., доц. |  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **УВЕЛИЧЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА**

Все более широкое распространение получают многофункциональные покрытия для высокоскоростного сухого резания, включающие антифрикционные слои, на основе алмазоподобного аморфного графита (DLC,  $\alpha$ -WC:H), которые используют для сокращения количества используемой при обработке смазывающе-охлаждающей жидкости или полного отказа от ее применения при лезвийной высокоскоростной обработке.

Для функциональных покрытий, предназначенных для нанесения на режущий инструмент, чрезвычайно важен не только состав, структура, кристаллохимические и физико-механические свойства, архитектура покрытий, но и длительность работы покрытий на контактных площадках инструмента до момента их разрушения (долговечность) в процессе эксплуатации инструмента. Интенсивность микроизнашивания и макроразрушения зависят от твердости покрытия, соответствующего соотношения между вязкостью и твердостью, прочности адгезии между слоями, покрытием и субстратом в целом. Адгезионный подслоя должен обладать максимальным кристаллохимическим подобием по отношению к материалу субстрата (инструментальному материалу) и обеспечивать прочную адгезию между ними.

Предлагается изменение конструкции износостойкого покрытия, представляющее собой замену традиционно используемых адгезионных слоев на соединение с более высокими адгезионными свойствами при высоких температурах. Основной задачей исследования являлось выявление характеристик нанокomпозиционного покрытия с использованием нового адгезионного подслоя на основе соединения Нитрида гафния (III) – бинарного неорганического соединения металла гафния и азота с формулой HfN и сравнение с известными традиционно используемыми покрытиями.

### **Библиографический список**

1. Андреев, А.А. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия: монография / А.А. Андреев, Л.П. Саблев, В.М. Шулаев, С.Н. Григорьев // Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005. – 236 с.

**СЕКЦИЯ 24**  
**ДИНАМИКА И ПРОЧНОСТЬ СЛОЖНЫХ**  
**МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Председатель –  
к.т.н., доцент **Ноздрин М. А.**

Секретарь –  
к.т.н., доцент **Огурцов Ф. Б.**



*В.О. Герасимов, студ.; рук. М.А. Шилов, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ г. Иваново)*

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗНОСА МЕТАЛЛОВ ПРИ ТРЕНИИ ПАРЫ ПО СХЕМЕ «ШАР-ПЛОСКОСТЬ»

Износ является одной из главных причин нарушения эксплуатационных свойств конструкционных элементов и выхода из строя машин и механизмов. Уменьшение износа можно добиться подбором износостойких материалов, покрытий, смазочных материалов или профилирования поверхностей. Целью работы стало экспериментальное определение влияния внешних факторов на величину износа алюминиевого сплава при трении пары по схеме «шар-плоскость». Была разработана измерительная система, позволяющая изнашивать вращающийся диск в контакте с шаром (рис. 1,а). В нагрузочную балку вмонтировано металлическое динамометрическое кольцо с приклеенными на его поверхности тензометрическими ламелями. При деформации кольца под действием силы трения электрическое сопротивление тензометрических ламелей изменяется (рис. 1,б). Методика выполнения эксперимента включала в себя тарировку силоизмерителя, подготовку и очистку поверхностей трения, проведения испытаний.



Рис. 1. Измерительная система:  
а – схема контакта «шар-плоскость», б – силоизмеритель

Экспериментальные результаты включали в себя зависимости износа от варьирования скорости и нормальной нагрузки. Тесты начинались с легких режимов трения и заканчивались более жесткими. Поверхности трения подготавливались механически и химически, включая шлифовку, полировку и очистку ацетоном и спиртом. Были определены средние значения износа за 300 с. При оценке точности измерений динамического коэффициента трения учтены три типа погрешностей: ошибки измерений, разброс данных в сериях эксперимента и погрешности расчетов. Максимальная относительная погрешность составила около 7%.

### Библиографический список

1. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 352 с.
2. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 510 с., ил.

*Е.И. Герцева, студ.; рук. Ф.Б. Огурцов к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ВИБРАЦИИ ПОДШИПНИКОВ

Неисправности подшипников качения, особенно небольшой мощности, являются основной причиной сбоев в работе оборудования. Поэтому диагностика состояния таких подшипников, выявление дефектов и прогнозирование срока службы имеют большое значение в вибродиагностике.

Целью работы является сравнение и накопление базы данных новых и изношенных шариковых радиальных однорядных подшипников качения без смазки. Простейшая методика периодического контроля состояния подшипников качения основана на методе "ударных импульсов", разработанном шведскими специалистами в 1968г. [1].

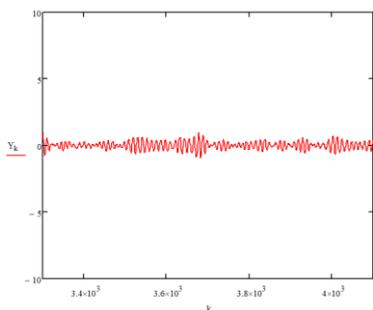


Рис.1 График амплитудных значений новых подшипников

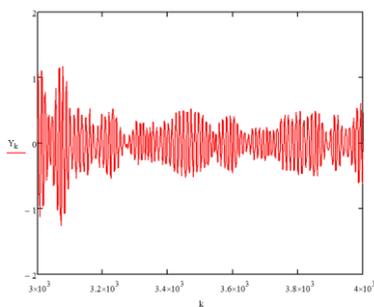


Рис.2 График амплитудных значений подшипников с дефектами

В процессе работы была собрана статистика: файлы с вибрационным процессом подшипников. Обработка данных проводилась на ПК с помощью программы MathCad. Графики были сравнены.

Результаты показали, что график (рис.1) новых подшипников характеризуется стабильным и плавным движением, без резких скачков и прерываний. В отличие от него, графика (рис.2.) дефектных подшипников были шумными и содержали нарушения, указывающие на неэффективное функционирование и возможные проблемы в работе механизма.

### Библиографический список

1. Патент США №311 284 Метод и аппаратура для определения механического состояния машин/Е.О. Сехоль. - Заявл. Швецией 29.02.68, № 709451. - Опубл. 12.01.71. Официальный бюллетень (США), т.882, № 2

Е.И. Герцева, студ.; М.А Ноздрин, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ г.Иваново)

## ПРОЧНОСТНОЙ РАСЧЁТ ПОДВИЖНОЙ ЧЕЛЮСТИ МЕХАНИЧЕСКОГО КРАШЕРА

Основная цель данной работы – расчет напряженно-деформированного состояния с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Проводится сравнение аналитического и численного расчетов с целью определения достоверности, точности и применимости в различных ситуациях. Достижение данной цели позволяет повысить эффективность и надежность конструкции. После задания граничных условий и определения материалов проводим анализ напряжений и перемещений в сборочной модели. В связи с этим, необходимо разработать модель, позволяющую проводить анализ различных параметров и условий. Приблизительно изображаем аналитическую модель подвижной челюсти в виде статически определимой плоской рамы (рис.2) и рассчитываем условие прочности по формуле:  $\sigma_{max} = \frac{M}{W_z} + \frac{N}{A} \leq [\sigma]$  [2]

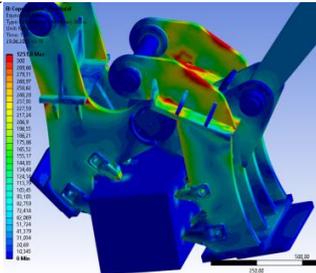


Рис.1 Эквивалентное напряжение крашера с кубом

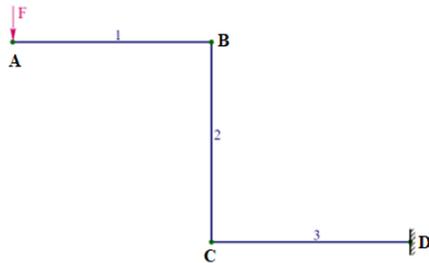


Рис.2. Приблизненное изображение аналитической модели подвижной челюсти

В ходе работы были рассмотрены различные условия работы механического крашера и выявлены их опасные напряжения: в расчёте сборочной модели механического узла – 735 МПа, в расчёте сборочной модели механического узла с кубом – 1251,8 МПа (рис.1), в оптимизированной модели механического узла с кубом – 521 МПа.

И в результате численного и аналитического расчётов подвижной челюсти механического крашера найдены напряжения 154 МПа и 1251 МПа, аналитический расчёт выполнен приближенно и вычисления отличаются от численного.

### Библиографический список

1. Маслов Л.Б., Сабанеев Н.А. Практикум по курсу вычислительной механики на базе современных программных средств численного анализа (ANSYS): Учеб. - метод. пособие / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина». – Иваново, 2009. – 76с.
2. Филатов, Ю. Е. Прочность и жесткость при прямом изгибе: Метод. указания / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина». – Иваново, 2011. – 72с

С.М. Городова, студ.; рук. Ф.Б. Огурцов, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)

## РАСЧЕТ КОМПОЗИТНЫХ СТВОРОК ОТСЕКА ВСПОМОГАТЕЛЬНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ САМОЛЕТА

Целью работы являлось провести прочностной расчет створок отсека ВСУ (вспомогательной силовой установки) самолета.

ВСУ позволяет поддерживать работоспособность самолётных систем и оборудования при выключенных двигателях в слабо оснащённых или необорудованных аэропортах. [1]

Была создана конечно-элементная модель (рисунок 1). Створки отсека и корпуса под замок разбиваются на плоские четырехузловые конечные элементы. Замки моделировались балочными элементами типа BEAM и абсолютно жесткими элементами RBE 2.



Рисунок 1 – Конечно-элементная модель

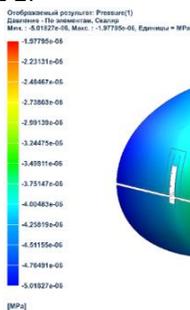


Рисунок 2 – Распределение давления на створки

Затем задали граничные условия и нагрузки. К граничным условиям относятся шарнирно-подвижные опоры, в которых задаем ограничения на все перемещения и повороты узлов створок по кромкам в направлениях X, Y, Z, кроме поворота относительно оси X. К нагрузкам относится давление, заданное распределением (рисунок 2).

В программном комплексе NX выполнен линейный анализ. Затем была проведена оценка прочности створок ВСУ по критерию Цая-Хилла. В результате, коэффициенты запаса прочности композитной конструкции  $SR_n > 1$ , поэтому ее прочность обеспечена. [2]

### Библиографический список

1. Уманский А.А. Строительная механика самолета. Москва: Оборонгиз, 1961. – 406 с.
2. В.И. Гришин, А.С. Дзюба, Ю.И. Дударьков. Прочность и устойчивость элементов и соединений авиационных конструкций из композитов. – М.: Издательство физико-математической литературы, 2013. – 272 с.

*Р. В. Гришанов студ.; рук М.А. Ноздрин к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФУНДАМЕНТА ПРОМЫШЛЕННОГО СООРУЖЕНИЯ

Промышленные объекты требуют прочный и надежный фундамент для обеспечения структурной целостности и безопасности эксплуатации. Промышленные предприятия подвергаются различным нагрузкам, включая нагрузки от самой конструкции, нагрузки от оборудования и людей, ветровые нагрузки и потенциально сейсмические нагрузки в зависимости от местоположения.

Формулируется задача расчёта прочности и сейсмостойкости фундамента сооружения Кольской АЭС, а также влияния на неё погодных факторов.

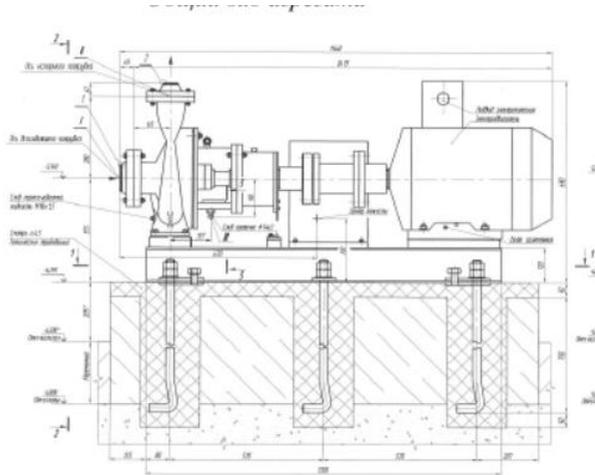


Рис.1 Общий вид сооружения

Стандартные расчётные величины оцениваются с использованием программного комплекса «Ansys». Полученные таким образом расчётные величины сравниваются с решением численным методом.

*Е.Э. Ильина, асп.; рук. Л.Б. Маслов, д.ф.-м.н., зав. каф. ТуПМ  
(ИГЭУ, Иваново)*

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ ПОРОУПРУГИХ СКАФФОЛДОВ ИЗ МЕТАМАТЕРИАЛОВ

В современной медицине остаётся актуальным вопрос восстановления сегментарных костных переломов с помощью скаффолдов. Частыми проблемами, возникающими при вживлении скаффолда пациенту, являются нестабильность процесса регенерации костной ткани в объеме пористого имплантата (скаффолда) и воспалительные реакции, возникающие в организме в месте трансплантации.

Для решения первой проблемы продолжаются разработки оптимальных конструкций скаффолда, исследуется отклик процесса заживления на изменение таких параметров имплантата, как геометрия импланта, размер и форма пор, объем пористости и кривизна поверхности [1]. Наиболее актуальными являются геометрические концепции проектирования пористых скаффолдов на основе трижды периодических минимальных поверхностей и градиентных структур (рис.1).

Для решения второй проблемы рассматриваются способы создания скаффолдов на основе конструктивных био-метаматериалов, которые позволят не только сделать процесс регенерации более «поддерживающим» благодаря уникальным физико-механическим свойствам метаматериалов, но и «стимулирующим» благодаря возможности размещения дополнительных лекарственных препаратов в объеме имплантата.

На основе последних достижений в области метаматериалов ведутся разработки конечно-элементных моделей (рис. 2) с целью изучения механические свойства скаффолдов, изготовленных с использованием технологий аддитивного производства, и процессов регенерации под управлением механического и биохимического стимулов.

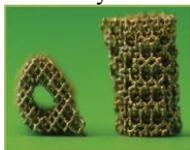


Рис. 1 Пример пористого имплантата [1]

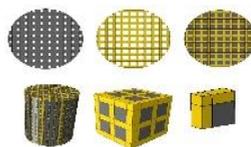


Рис. 2 Примеры численных моделей [2]

### Библиографический список

1. **Zadpoor A. A.** Bone tissue regeneration: the role of scaffold geometry // *Biomaterials science.* – 2015. – V. 3. – №. 2. – P. 231-245.

2. **Hassan M., Seung-Hwan C.** Effect of structural stiffness of composite bone plate-scaffold assembly on tibial fracture with large fracture gap // *Composite Structures.* – 2015. – V. 124. – P. 327-336.

У.О. Ларионова, студ.; рук. Л.Б. Маслов, д.ф.-м.н. доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)

## КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЯСНИЧНОГО ОТДЕЛА ПОЗВОНОЧНИКА ПРИ ИМПЛАНТАЦИИ

Рассмотрена актуальная проблема клинической биомеханики опорно-двигательного аппарата – оценка механического состояния системы «кость-имплантат» поясничного отдела позвоночника при операции спондилэктомии. В ходе работы выполнены следующие этапы: обработка файлов компьютерной томографии и построение геометрических моделей компонент системы (рис.1); разработка конечно-элементных моделей поясничного отдела позвоночника и имплантированных компонентов; исследование напряженно-деформированного состояния.

Подвижность позвоночника определялась как сгибание, разгибание, левый и правый боковой наклон и левое и правое осевое вращение. Нижний позвонок был зафиксирован, в то время как на верхний была приложена нагрузка 350 Н для моделирования веса верхней части тела и крутящий момент 7,5 Нм для создания эффекта мышечных усилий.

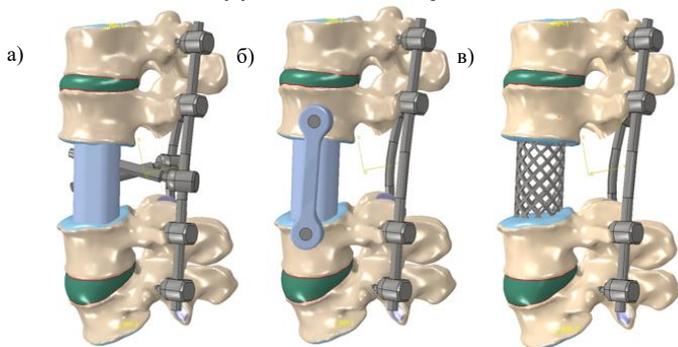


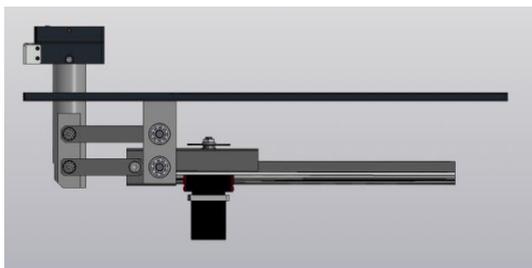
Рисунок 1 - Модели поясничного отдела позвоночника с тремя исследуемыми имплантатами: а) тип I имплантата; б) тип II имплантата; в) решетчатый скаффолд

В результате расчета определено, что максимальные напряжения, возникающие при контакте кости с имплантатом, наблюдаются в системе «кость – имплантат I» при наклоне вправо – 54,1 МПа; в системе «кость – имплантат II» при наклоне влево – 242 МПа; в системе «кость – скаффолд» при вращении вправо – 625 МПа. Можно сделать вывод, что менее травмирующим имплантатом для позвоночника является имплантат типа I, представляющий собой сплошное тело из полимерного материала при симметричном закреплении вдоль позвоночного столба.

*Д.Д. Лукин, студ.; рук. Н.А. Сабанеев, М.А. Шилов к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ НАГРУЖЕНИЯ ТРИБОМЕТРА

В работе представлено описание системы нагружения измерительной системы для определения фрикционных характеристик токопроводящих смазочных материалов различной природы. Прибор позволяет проводить испытания смазочных материалов с варьированием широкого спектра внешних воздействий. Способ перемещения индентора по плоскости - возвратно-поступательный или линейный), контакт деталей (шарик-плоскость), скорость перемещения варьируется в широком диапазоне, диапазон поддерживаемых температур от комнатной до 150°C. Отличительной особенностью измерительной системы является не только возможность получения ВАХ смазочного материала при трении, но и оригинальная система нагружения. На рис. 1. представлена схема системы нагружения трибометра.



**Рис. 1. Внешний вид системы нагружения трибометра**

Данная система позволяет варьировать усилие нагружения в процессе испытаний непрерывно, что дает возможность учитывать особенности фрикционного отклика изучаемых смазочных материалов. Нагрузка на образец варьируется от 0,1 до 70 Н. Максимальный шаг дискретизации записи нормальной нагрузки составляет 7 мс. Рабочий шаг записи нагрузки – 10 мс. Диапазон удельных давлений варьируется от 0,1 до 0,4 МПа. Нагрузка прикладывается непосредственно к рычагу. Измерение выполняется в соответствии со стандартом, что позволяет получить точные результаты. Тензодатчик измеряет силу, создаваемую во время испытания, одновременно выводит информацию о длине следа износа в режиме реального времени. С помощью программного обеспечения можно рассчитать коэффициент трения, используя полученные данные.

А.А. Михайлишина студ.; рук. М.А. Ноздрин к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)

## РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ТЕПЛООБМЕННИКА С ПОДВИЖНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Целью работы является создание теплообменного аппарата, способного утилизировать отработанное тепло для минимизации энергопотребления в текстильном производстве. Данная конструкция должна обрабатывать загрязненные жидкости непрерывно вращающимися центральными элементами [2]. Для расчета спроектирована модель (рис.1), техническое обслуживание для очистки которой практически не требуется. Создание геометрии и гидродинамический анализ реализуются в программном комплексе SOLIDWORKS Flow Simulation.

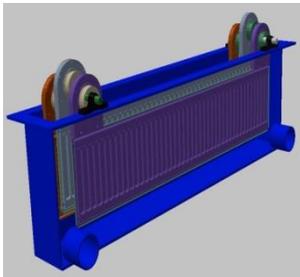


Рис.1. Внешний вид конструкции

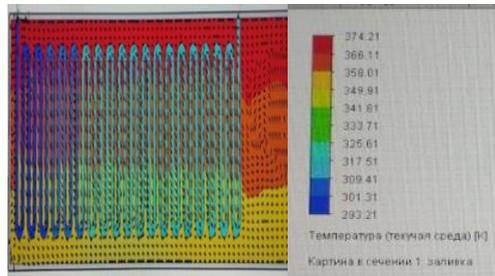


Рис.2. Распределение температур в сечении и направление потока

В расчетах при параллельных и последовательных соединениях змеевиков и пластин (рис.2) разработана оптимальная конструкция теплообменного аппарата методом МКЭ - четыре вертикальные подвижные пластины, параллельно попарно соединенные с максимальным перепадом температур для холодной воды 34,4 градуса и для горячей воды 54,3 градуса. Это позволит сэкономить 50,4 Гкал энергии в месяц, что в денежном эквиваленте составит 122,5 тыс. руб [1].

### Библиографический список

1. Лисиенко В. Г. Хрестоматия энергосбережения: справочник: в 2-х кн. / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, М. Г. Ладыгичев; ред. В. Г. Лисиенко. – М.: Теплоэнергетик, 2003.

2. Сайт производителя теплообменников с подвижными элементами <https://www.pozzienergy.it/>.

Д.Д. Молокова, студ.; рук. Л.Б. Маслов, д. ф-м. н.  
(ИГЭУ, г. Иваново)

## РАСЧЕТ ДЕМПФИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ТРАНСПОРТНО-УПАКОВОЧНОГО КОМПЛЕКТА

Целью работы является анализ деформированного состояния транспортно-упаковочного комплекта (ТУК) при моделировании удара пластины по верхней части ТУК. Согласно НП-054-04 [1] при испытаниях на механическое повреждение для проверки способности упаковок выдерживать аварийные условия перевозки на образец роняют груз массой 500 кг с высоты 9 метров со скоростью 13,3 м/с.

Расчетная конечно-элементная модель, подготовленная в среде ANSYS, состоит из двух демпферов, корпуса ТУК с крышками без опор, расположенная между двух пластин. Одна пластина моделирует стальную плиту, которая падает на контейнер, а другая – бетонную опору. Начальные и граничные условия представлены начальной скоростью абсолютно жесткой плиты, жестким закреплением нижней пластины; учитывается сила тяжести (рис.1). Задача решается в контактной упругопластической постановке явным решателем LS-DYNA.

Результаты расчета показали, что нижнее (опорное) демпфирующее устройство испытывает большие пластические деформации (рис.2). Максимальное усилие сжатия, испытываемое корпусом, составляет 0,5МН, что в 7 раз меньше усилия потери устойчивости корпусом ТУК. Демпфер не обеспечивает 100% поглощения энергии удара, что говорит о необходимости дальнейшей доработки конструкции демпферов.

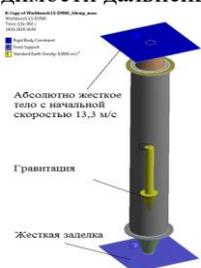
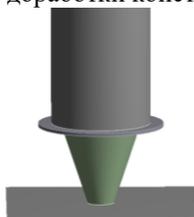
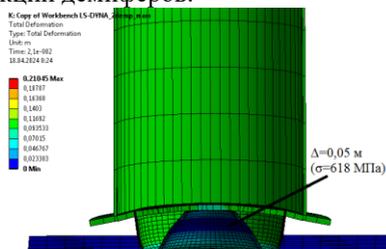


Рис. 1 – Расчетная модель с граничными условиями



А)

Рис. 2 – А) Недеформированное Б) Деформированное состояние нижнего демпфирующего устройства



Б)

### Библиографический список

1. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Нормы расчета на прочность элементов оборудования и трубопроводов для судовых атомных паропроизводящих установок с водо-водяными реакторами» (НП-054-04) / Москва : Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2004. - 27 с.

*А. С. Проскуров, студ.; рук. С. А. Егоров к.т.н.,  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОРПУСА ПНЕВМОЗАХВАТА

В эксплуатации машин и приборов для проведения физико-механических испытаний важной особенностью является прочность и минимальные перемещения при нагрузках в ответственных местах, так как при довольно больших перемещениях погрешность испытаний повышается. Одним из важных элементов универсальной разрывной машины является захват. В работе мы рассматривается пневматический универсальный клиновый захват для определения прочности образцов при растяжении ЗКУ-500П (рис.1).

Расчеты на прочность выполнялись с целью определения размеров и формы деталей машин, исключая возможность их поломок и недопустимых деформаций в условиях нормальной эксплуатации.

Целью данной работы является расчет деформаций при максимальных нагрузках и сравнение их с нормативными. По полученным результатам рассматривается возможность установки данных захватов на более мощные машины.

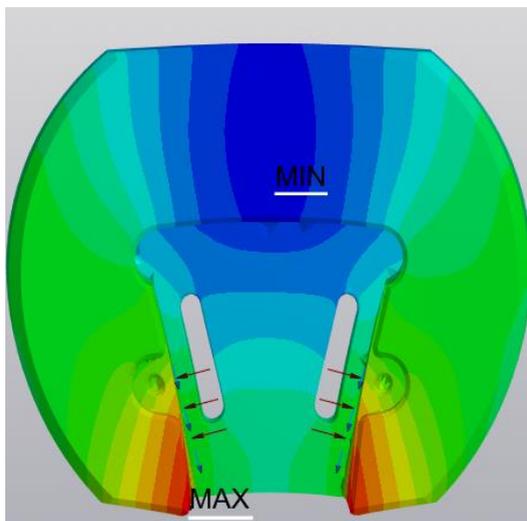


Рисунок 1. Перемещения корпуса ЗКУ-500П.

*Д.М. Птицын, студ.; В.И. Каравеев к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНДУКТИВНОГО ДАТЧИКА ПРИБЛИЖЕНИЯ**

Цель данной работы – проектирование и дальнейший расчет индуктивного датчика приближения. Датчик приближения – это датчик, способный обнаруживать наличие близлежащих объектов без какого-либо физического контакта. Датчик приближения часто излучает электромагнитное поле или пучок электромагнитного излучения и ищет изменения в поле или обратном сигнале.

В ходе работы проделано следующее:

- Изучен принцип работ индуктивного датчика приближения;
- Создана САД-модель для дальнейшего численного расчета и создания конструкторской документации;
- Произведен численный расчет модели на прочность.

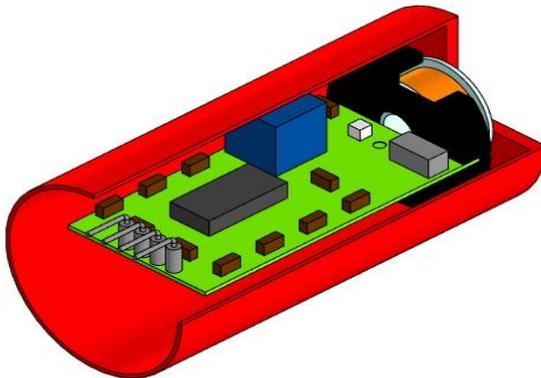


Рис.1. Модель датчика

Л.С. Рева, студ.; рук. М.А. Ноздрин, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)

## РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ДВУХСЕКЦИОННОЙ СТРЕЛЫ ОВОИДНОГО СЕЧЕНИЯ ДЛЯ АВТОКРАНА

В задаче рассматривается расчетный случай максимальной длины стрелы 16,2 м и вылете стрелы 14 м. В методе конечных элементов используются 2D элементы с 4-мя и 3-мя узлами. Основание стрелы и опора гидроцилиндра жестко закрепляются, а на краю стрелы прикладывается сосредоточенная нагрузка [1] (рис.1).

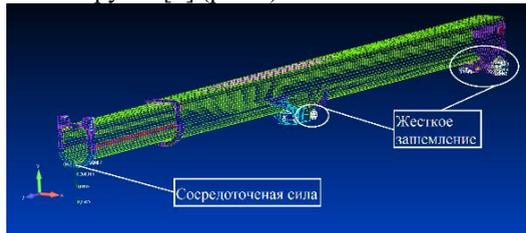


Рис. 1. Конечно-элементная модель стрелы овоидного сечения

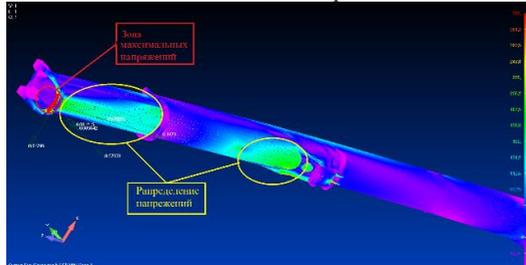


Рис. 2. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу

На рисунке 2 показано, что эквивалентные максимальные напряжения по Мизесу составляют 300 МПа. Это значение не превышает допустимого - 430 МПа [2].

### Библиографический список

1. РД НИИ Краностроения – 08 – 07 «Методические рекомендации. Краны стреловые самоходные. Металлические конструкции. Нормы расчета».
2. Гохберг М.М. Металлические конструкции подъемно-транспортных машин, Л., «Машиностроение» 1969

*К. Дудина, А.П.Челноков, С.В. Синёв, студ.;*  
*рук. В.И. Караваев, к.т.н, доцент (ИГЭУ, г. Иваново)*

## СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ДВИЖЕНИЯ ШАРОВ

Целью работы является создание трехмерной модели и чертежей для нарезки на ЧПУ станке и сборки стенда по изучению пространственного движения шаров, а также моделирование ударных нагрузок в корпусе стенда. Материал корпуса стенда – ПНД (Полиэтилен низкого давления). Диаметр шаров 40мм. Численный расчет напряженно-деформированного состояния стенда происходит в программном комплексе COMSOL. В качестве метода расчета был выбран МКЭ.

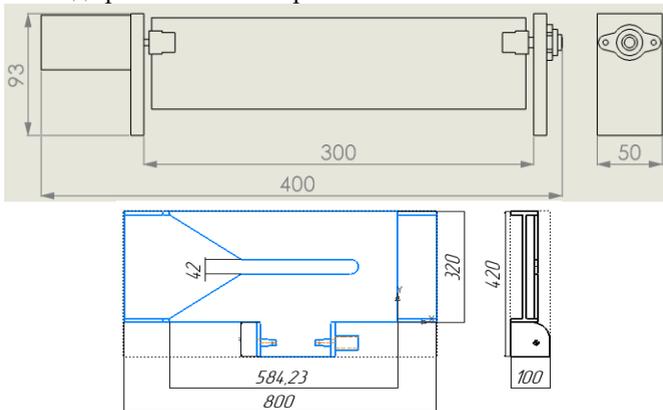


Рис. 1 Габаритные размеры начального и конечного накопителей для шаров соответственно  
Работа позволяет прогнозировать ударные нагрузки и пространственное движение шаров в пределах стенда.

### Библиографический список

1. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости.- М.:Наука, 1975. -576 с.
2. COMSOL Multiphysics Reference Guide

М.А. Скворцова, студ.; рук. М.А. Ноздрин к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕЛЮСТИ «ГРЕЙФЕРА ДЛЯ ЛЕСА»

Грейфер для леса - это грузозахватное приспособление для перемещения, сортировки, погрузки и разгрузки деревьев, хлыстов, сортиментов и другого леса на пасаках и лесозагрузочных пунктах [1].

В программном комплексе КОМПАС-3D создана и упрощена модель грейфера для леса. Модель перенесена в ANSYS Workbench, где ей был присвоен определенный материал для разных деталей, приложены нагрузки на тяги в виде силы и поставлены жесткие закрепления [2]. Построена эпюра нормальных напряжений  $\sigma_{\max}=232$  МПа (рис.1) и деформаций  $w=0.92$  мм (рис.2).

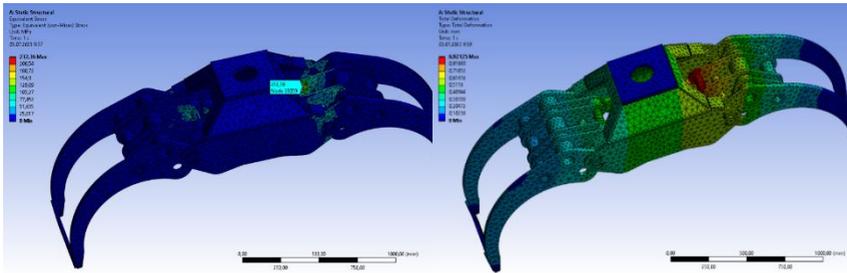


Рис.1. Нормальные напряжения

Рис.2. Деформации

### Библиографический список

1. Лой В. Н., Протас П. А., Завойских Г. И. Лесоскладское грузоподъемное оборудование: учебно-методическое пособие. Минск: БГТУ, 2005. 102 с.
2. Денисов М. А. Компьютерное проектирование. ANSYS: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. 77 с.

*М.А. Скворцова, студ.; рук. М.А. Ноздрин к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ПРОЧНОСТНЫЕ РАСЧЕТЫ КОНСТРУКЦИЙ ЗАХВАТОВ «ГРЕЙФЕРА ДЛЯ ЛЕСА»**

Целью работы является параметрическая оптимизация «Грейфера для леса» в программном комплексе Ansys. Для этого требуется минимизировать вес грейфера и отыскать оптимальные параметры толщин челюстей, которые не могут быть меньше 0,02 м и больше 0,03 м.

Вес модели составил 766,24 килограмм. Толщина челюстей – 0,03 м. Максимальное напряжение – 218 МПа.

В процессе работы создается конечно-элементная сетка модели, установка граничных условий и задание материалов. В созданной модели проведен численный расчет для определения напряженно-деформированного состояния и параметрическая оптимизация конструкции [1,2].

В результате исследования получена оптимизированная модель «Грейфера для леса», вес которой уменьшился на 60 кг, а толщина челюстей стала равной 0,02 м (рис.1). При этом сохранились прочностные и жесткостные характеристики.

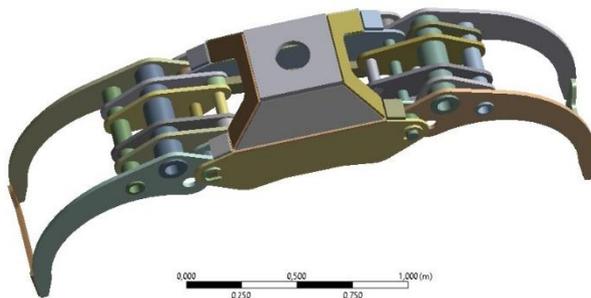


Рис.1. Модель после проведения параметрической оптимизации

### **Библиографический список**

1. **Леоненко О. В.**, САПР средств оптимизации: учебно-методическое пособие. Могилев: БРУ, 2019. 42 с.
2. **Денисов М. А.** Компьютерное проектирование. ANSYS: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. 77 с.

*В.О. Герасимов, студ.; рук. М.А. Ноздрин к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, Иваново)*

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УДЛИНЕННОЙ СТРЕЛЫ ЭКСКАВАТОРА

Удлиненные стрелы на экскаваторах представляют собой особый тип рабочего оборудования, который позволяет значительно увеличить радиус действия и глубину копания. Они широко применяются в строительстве, горнодобывающей и дорожной промышленности, а также при проведении различных инженерных работ. [1].

В программном комплексе КОМПАС-3D создана и упрощена модель рабочего оборудования. Модель перенесена в ANSYS Workbench, где ей был присвоен определенный материал для разных деталей, приложена нагрузка в место, куда крепится гидроцилиндр для подъема и опускания стрелы [2]. Построена эпюра нормальных напряжений  $\sigma_{\max}=470.45$  МПа (рис.1) и деформаций  $\omega=8.9596$  мм (рис.2).

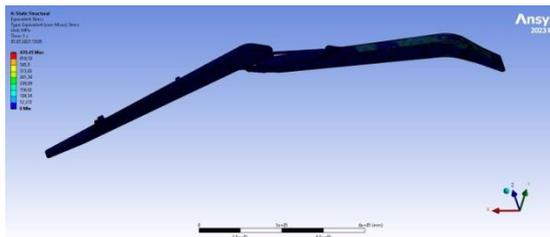


рис.1. Нормальные напряжения

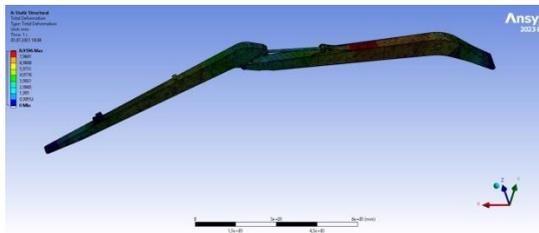


Рис.2. Деформации

### Библиографический список

1. Стрела для экскаватора: ключевая запчасть, обеспечивающая мощность и точность. URL:<https://kanoner.com/2023/07/18/175872/> (дата обращения 2.12.2023)
2. Басов, К. А. ANSYS: справочник пользователя / К. А. Басов. – М. : ДМК Пресс, 2005. 468

*А.Р. Тихомиров, студ.; рук. М.А. Ноздрин, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ КОРПУСА ПУНКТА УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

При создании физической модели использовался 3D принтер Flying bear ghost 4. Размеры модели в два раза меньше реального объекта, для экономии пластика и проверки работы принтера. Первые экспериментальные модели были напечатаны с большими ошибками из-за неправильной настройки принтера, но это помогло улучшить настройки печати (температура сопла и температура стола) [1].

После настройки был напечатан физический объект реальных размеров из белого пластика для предотвращения лишнего нагрева от солнца (рис.1).

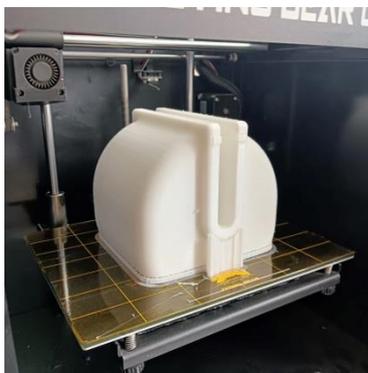


Рис.1 Физическая модель верхней части АТКУЭ

Корпус представляет из себя резервуар длиной 130 мм, шириной 142мм для установки в него электрических приборов.

Физический объект используется для экспериментального стенда.

### **Библиографический список**

1. **Технологии** и материалы 3D-печати [Электронный ресурс]: учеб. пособие / А.Е. Шкуро, П.С. Кривоногов. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2017.

*Д.И. Худов, студ.; рук. С.Ф. Смирнов, д.т.н., доц.  
(ИГЭУ г. Иваново)*

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОГИДРОУДАРА В УСТАНОВКЕ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ**

Явление электрогидроудара заключается в образовании высокого гидравлического давления в процессе осуществления искрового разряда высокого напряжения в открытой или закрытой ёмкости с жидкостью.

Одним из направлений использования энергии электрогидроудара является поверхностное упрочнение металлов как плоских, так и сферических поверхностей. Особенно важно его применение для упрочнения поверхности внутренних полостей.

Для оценки возможности его применения для поверхностного упрочнения деталей машин в ФГБОУ ВО «Верхневолжский государственный агробиотехнологический университет», г. Иваново была разработана лабораторная установка.

Одной из главных задач по применению лабораторной установки, ее эффективности, является определение давления электрогидроудара.

В литературе по электрогидроудару приводятся различные теоретические оценки ударных волн гидроудара, в которые входят электрические параметры установки (электрическая емкость, индуктивность), а также длина разрядного промежутка и т.д., которые сложно определить в экспериментах.

Для опытного исследования давления ударных волн, например, применялся «пластиграфический» метод изучения электрогидравлических ударов при воздействии на объекты из пластилина. Данный метод исследования давления электрогидроудара является неоднозначным, зависящим от формы применяемого элемента (диск, цилиндр).

Было предложено оценивать величину давления электрогидроудара по деформации упругой, жестко защемленной пластины в момент прохождения ударной волны от единичного электрического разряда. Величина деформации измерялась щупом с шагом по толщине 0,05 мм.

Была разработана конструкция и схема измерения прогиба от давления. При определенном прогибе от давления пластина касается электрода и сигнал поступает на вход Arduino – электронного конструктора, затем записывается диаграмма сигнала на компьютере, которая позволяет фиксировать замыкание электрической сети.

В программном комплексе ANSYS была составлена модель жестко защемленной пластины, проведена верификация модели и произведен численный расчет давления, соответствующий экспериментально полученной при электрогидроударе деформации пластины 2,5 мм. Величина соответствующего давления составила 0,16 МПа.

Предложенный способ измерения давления будет применяться в дальнейших исследованиях по поверхностному упрочнению деталей.



**СЕКЦИЯ 25**  
**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ**  
**В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ**

Председатель –  
д.т.н., профессор **Жуков В. П.**

Секретарь –  
д.т.н., доцент **Беляков А.Н.**



*А.С. Шмелёв, асп.; рук. А.В. Огурцов, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **МЕТОДИКА СОВМЕСТНОГО СВЕДЕНИЯ МАТЕРИАЛЬНОГО И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСОВ ПРИ РАСЧЕТЕ ТЕПЛОВОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК**

При расчете фактических и номинальных значений показателей тепловой экономичности агрегатов и установок ТЭС обязательным является сведение материальных и энергетических балансов по данным, получаемым от систем коммерческого и технического учета показателей работы оборудования [1].

За основу взято решение задачи совместного сведения материальных и энергетических балансов применительно к оборудованию паросилового цикла [1]. Предлагается проведение процедуры сведения балансов на основе концепции регуляризации Тихонова [2].

Разработанная методика совместного сведения материального и энергетического балансов газотурбинных установок позволяет учитывать предельно допустимую суммарную невязку балансов по массе и энергии, а также максимальное отклонение скорректированных по результатам балансировки значений параметров от их исходных значений, обусловленное нормируемыми метрологическими характеристиками средств измерения.

Результаты расчётов могут быть использованы при решении задач мониторинга и диагностики технического состояния (предиктивной аналитики) оборудования.

### **Библиографический список**

**1. Алгоритмы** сведения материальных и энергетических балансов при расчетах технико-экономических показателей оборудования ТЭС на основе метода регуляризации некорректных задач / Ледуховский Г.В., Жуков В.П., Барочкин Е.В. [и др.] // Теплоэнергетика. 2015. №8. С.72–80.

**2. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.** Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1979. – 285 с.

*М.В. Макаров, асп. (ИВГПУ, г. Иваново); рук. А.В. Огурцов, к.т.н., доц. (ИГЭУ, г. Иваново)*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МИГРАЦИИ ЧАСТИЦ В УСЛОВИЯХ ВИБРООЖИЖЕННОГО СЛОЯ

Построение математического описания процесса миграции частиц сыпучего материала в виброожигенном слое основано на вероятностном подходе, использующем аппарат теории цепей Маркова [1-2]. Предложенная математическая модель универсальна для моделирования процессов фракционирования или смешивания сыпучих материалов, подверженных воздействию со стороны виброклассификатора или вибросмесителя. Физическим содержанием процессов является движение ансамбля частиц по поверхности сита при фракционировании или по дну смесителя при смешивании, периодические контакты частиц между собой и с вибрирующей поверхностью. Отличие фракционирования от перемешивания предполагает прохождение мелких частиц через отверстия вибрирующего сита.

Модель процессов представлена в матричной форме. Слой материала в аппарате разделен на ячейки конечного размера. Распределение частиц ключевого компонента сыпучей смеси по ячейкам представлены вектор-столбцом. Матрица переходных вероятностей зависит от текущего вектора состояния. При условии наличия свободного объема в нижних ячейках возможны переходы в них из верхних ячеек цепи, что приводит к нелинейности модели. Для количественной оценки процессов фракционирования или смешивания сыпучих материалов необходимо расчетно-экспериментальное определение стохастических коэффициентов модели. Учитывая ее универсальность, можно проводить тестовые опыты по фракционированию и смешиванию одних и тех же сыпучих смесей при одинаковых параметрах колебаний классификатора и смесителя, что позволит повысить точность определения коэффициентов сегрегации и макродиффузии и адекватность математического описания кинетики процессов.

### Библиографический список

- 1. Ячеечная** модель смешивания в технологии производства сухих строительных смесей / В.А. Огурцов, Ю.В. Хохлова, Е.Р. Брик, А.М. Фатахетдинов, А.В. Огурцов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: «Материалы. Конструкции. Технологии», №1 (17), Йошкар-Ола. 2021. С. 62 – 69.
- 2. Разработка** модели вибросепарации мелкодисперсных материалов через ситовые тканые полотна при их многостажной компоновке / В.А. Огурцов, А.П. Алешина, Ю.В. Хохлова, А.В. Огурцов, А.Н. Артемьев // Изв. Вузов. Технология текстильной промышленности, 2022, № 6. С. 166 – 171.

*Д.В. Колодочка, студ.; рук. А.Н. Беляков, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ АБИТУРИЕНТОВ**

Выбор направления подготовки абитуриентом при поступлении в высшее учебное заведение оказывает большое влияние на дальнейшую судьбу выпускника, на его трудоустройство и заинтересованность приложения полученных знаний на практике.

Анализ существующих систем тестирования абитуриентов показал направленность их на определение типа личности и предрасположенность к определенным профессиям. Однако, они не дают рекомендации по выбору конкретной специальности, не учитывают такой показатель как удовлетворенность выбранным направлением подготовки выпускниками и студентами старших курсов, который является индикатором правильного выбора специальности на этапе поступления.

В работе рассматривается профессиональное ориентирование абитуриентов в ИГЭУ. Одной из выявленных проблем является отсутствие инструмента персональной помощи будущим студентам в выборе специальности, в связи с чем ставится задача создания информационной системы профориентирования.

Для получения математического описания разрабатываемой рекомендательной системы преобразуем ее в задачу классификации, где классами будут выступать специальности, а исходной информацией – данные анкет студентов и выпускников. Для решения подобных задач хорошо себя зарекомендовали методы машинного обучения. Выбор в пользу наиболее подходящего метода предлагается делать на основе анализа стандартных метрик оценки качества моделей машинного обучения, таких как точность (Accuracy), полнота (Recall), точность (Precision), F-мера (F1-score) и средняя квадратичная ошибка (MSE), с учетом типа входящих данных, так как не все модели позволяют обрабатывать качественные показатели.

### **Библиографический список**

- 1. Искусственные** нейронные сети: Теория и практика / В. В. Круглов, В. В. Борисов. - 2. изд. – М: Горячая линия - Телеком, 2002.
- 2. Нейронные** сети. STATISTICA Neural Networks: Методология и технологии современного анализа данных / Под редакцией В. П. Боровикова. - 2-е изд., перераб. и доп. – М: Горячая линия - Телеком, 2008. - 392 с.

*И.Ю. Тютюкин, асп.; рук. В.П. Жуков, д.т.н., проф. (ИГЭУ, Иваново)  
Д.С. Бараковских, к.т.н., доц. (УФУ, Екатеринбург)*

## **ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ В СТРУЙНОЙ МЕЛЬНИЦЕ СМЕСИ МАТЕРИАЛОВ ОСЛАБЛЕННЫХ ТЕРМОНАПРЯЖЕНИЯМИ**

В химической и в смежных отраслях промышленности измельчение сыпучих материалов в струйной мельнице применяется для получения промежуточного или готового продукта с заданной крупностью при минимальном загрязнении продуктами износа мелющих тел [1-2]. Предлагается совершенствование моделирования струйного измельчения с учетом термического напряжения в компонентах смеси материалов.

Рабочий процесс в установке струйного измельчения включает подачу дисперсного материала за счет эжектирования, разгон частиц до необходимой скорости, ударное разрушение в помольной камере и классификацию с целью отделения готового продукта и возврата крупки. Описание теплообмена между частицами компонентов и потоком газа позволяет учитывать неравномерный нагрев частиц смеси материалов и возникающие термонапряжения, которые могут приводить к селективному измельчению различных компонентов.

Целью исследования является моделирование процесса селективного измельчения разнопрочных компонентов с учетом понижения их прочности за счет термонапряжений.

Моделирование разрушения каждой фракция компонентов выполняется независимо в рамках матричной методологии [1], а общее решение задачи ищется линейной комбинацией решений, полученных при измельчении компонентов смеси. Влияние термонапряжений на результаты измельчения учитывается через снижение удельной энергии разрушения данного компонента. Для численного решения задачи моделирования разработан алгоритм, построенный на синтезе аналитического решения задачи для измельчения монофракции с заданным энергоподводом и решения задачи оптимального распределения энергии по фракциям компонента, обеспечивающего максимальное значение энтропии.

### **Библиографический список**

- 1. Mizonov V.E., Zhukov V.P., Bernotat S.** Simulation of Grinding: New Approaches. Ivanovo: ISPU Press. 1997. 108 p.
- 2. Ревнивцев В.И.** Селективное разрушение минералов. М.:Недра. 1988. 286 с.

*К.Н. Бубнов, асп.; рук. В.П. Жуков, д.т.н., проф. (ИГЭУ, Иваново)*

## ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Совершенствование процессов теплообмена в регенеративных подогревателях турбоустановок тепловых электрических станций позволяет существенно повысить эффективность работы энергетического оборудования. Диагностика состояния поверхностей нагрева регенеративных подогревателей высокого давления (ПВД) является актуальной научной и практической задачей.

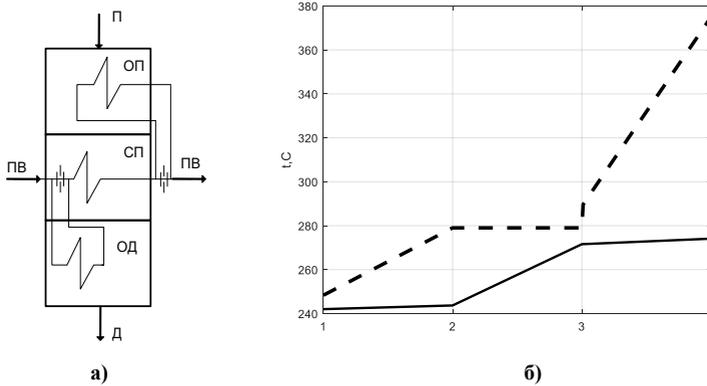


Рис. 1. Схема потоков теплоносителей в подогревателе (а), зависимость изменения температур пара (штриховая линия) и питательной воды (сплошная линия) вдоль поверхностей нагрева ПВД (б); ОД – охладитель дренажа; СП – собственно подогреватель; ОП – охладитель пара; П – пар; ПВ – питательная вода; Д – дренаж

Для моделирования процессов теплопередачи в многоступенчатой теплообменной системе, представленной на рис. 1(а), используется методология матричной формализации моделирования процессов теплообмена [1]. Результаты расчета в виде изменения температуры теплоносителей вдоль поверхностей нагрева ПВД представлены на рис.1(б), сопоставление которых с замеренными значениями позволяет диагностировать состояние поверхностей нагрева по отклонению замеренных значений от нормируемых.

### Библиографический список

1. Жуков В.П., Барочкин Е.В. Системный анализ энергетических теплообменных установок. – Иваново, 2009. – 176 с.

*Н.А. Кувенева, студ.; К.Н. Бубнов, асп.;  
рук. А.Н. Беляков, д.т.н., доц. (ИГЭУ, г. Иваново)*

## **К ОПРЕДЕЛЕНИЮ МЕТОДА ОБРАБОТКИ АРХИВНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ**

Раннее выявление дефектов работы паровой турбины обеспечивает надежность и экономичность генерирующего оборудования. Системы предсказательной аналитики строятся на основе обработки накопленных архивных данных технологических параметров работы оборудования, а также выявленных неисправностях, повлиявших на отклонение показателей от нормы.

В качестве исходных данных для анализа на основе модели [1] сгенерированы наборы технологических параметров работы паровой турбины. Данные сгруппированы по классам, моделирующие такие дефекты как абразивный износ твердыми частицами сопловых лопаток и образование отложений в сопловых сегментах ступени, а также режим работы турбины без дефектов. Общее количество исходных параметров составило 37.

Анализ результатов парной корреляции всех параметров относительно показателя вырабатываемой мощности турбины позволил сократить число исходных данных для построения системы предсказания дефектов до 5.

Ставится задача построения кластеров дефектов на плоскости. В качестве координат предлагается использовать расстояние в евклидовом пространстве входных векторов и косинусную меру относительно нормального состояния (без дефектов). Результаты показали плохую разделимость рассматриваемых классов. Различные варианты нормировки исходных данных и выбора точек отсчета относительных расстояний также не дали положительных результатов.

Для увеличения точности кластеризации необходимо применять и исследовать различные методы машинного обучения.

### **Библиографический список**

**1. Бубнов К.Н., Жуков В.П.** Математическая модель статических режимов паровой турбины // Материалы XVII всеросс/ (IX межд) науч. техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2022», 11-13 мая 2022г., Иваново – Иваново: ФГБОУ ВО Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2022. – Т.4. – С.111

*М.А. Кузнецов, студ., М.Д. Фомичев, асп.,  
рук. В.П. Жуков, д.т.н., проф.(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ КОНДЕСАТОРА ПАРОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ**

Снижение потерь тепла в окружающую среду для энергетических установок является одним из основных путей энергосбережения. С конденсаторами турбоустановок связаны существенные резервы повышения эффективности работы оборудования [1, 2].

Для разработки модели конденсатора со встроенным теплофикационным пучком использована методология матричной формализации описания тепло- и массообменных процессов [1]. Разработанная модель, после проверки ее адекватности, используется для решения обратной задачи диагностики состояния поверхностей основного и встроенного пучков труб конденсатора.

Считается, что состояние поверхности нагрева характеризуется коэффициентом теплопередачи. Поверхность основного пучка искусственно «загрязнили», задавая заниженный коэффициент теплопередачи, и выполнив прямой расчет. Эти данные были использованы как «экспериментальные» для диагностики состояния в рамках решения обратной задачи, которая формулируется в виде оптимизационной задачи, где в качестве целевой функции выбрано рассогласование «экспериментальных» и рассчитанных значений температур насыщения, циркуляционной и сетевой воды на выходе конденсатора. Параметрами оптимизации выступают коэффициенты теплопередачи для основного и встроенного пучков. Максимальная относительная погрешность найденных значений по сравнению с заданными составила 0,1%. Таким образом, при решении обратной задачи удалось диагностировать загрязнение поверхности основного пучка и показать возможность использования модели для диагностики его состояния.

### **Библиографический список**

**1. Решение** обратной задачи теплопередачи в конденсаторе турбоустановки со встроенным теплофикационным пучком / В.П. Жуков, Г.В. Ледуховский, М.Д. Фомичев и др. // Вестник ИГЭУ. – 2024. – №. 1. – С. 85-91. DOI: 10.17588/2072-2672.2024.1.085-091

**2 Бродов Ю.М., Савельев Р.З.** Конденсационные установки паровых турбин: учебное пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 288 с.

К.А. Лётин, студ.; рук. А.В. Огурцов, к.т.н., доцент;  
Е.К. Торопова, ст. преп. (ИГЭУ, г. Иваново)

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ИСТИРАНИЯ ЧАСТИЦ В АППАРАТАХ С КИПЯЩИМ СЛОЕМ

Построение модели преобразования крупности частиц в кипящем слое выполняется на основе теории цепей Маркова. Истирание частиц в кипящем слое представим как процесс с дискретным шагом по времени и по размеру частиц. Для реактора кипящего слоя вектор, составленный из массовых долей частиц разной крупности, характеризует состояние загрузки аппарата. Дальнейшее моделирование процесса истирания сводится к определению матрицы переходных вероятностей, элементы которой показывают вероятность перехода из одной ячейки вектора состояния в другую [1]. Для частиц в кипящем слое введем три события:  $A$  – столкновение,  $B$  – разрушение,  $E$  – образование осколка.

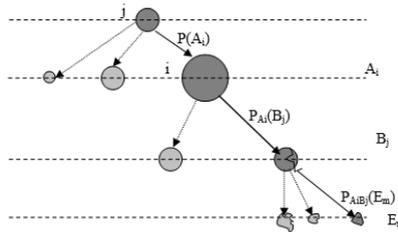


Рис.1 Схематичное представление последовательности событий

Матрицу переходов, элементы которой показывают вероятность перехода частиц, представим через селективную и распределительную функции:

$$P = \begin{bmatrix} 1-s_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ s_1 b_{21} & 1-s_2 & 0 & \dots & 0 \\ s_1 b_{31} & s_2 b_{23} & 1-s_3 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_1 b_{n1} & s_2 b_{n2} & s_3 b_{n3} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

Следует отметить, что матрица переходов  $P$  зависит от фракционного состава материала, поэтому связь между векторами состояния становится нелинейным.

### Библиографический список

1. Mizonov V.E., Zhukov V.P., Bernotat S. Simulation of Grinding: New Approaches. Ivanovo: ISPU Press. 1997. 108 p.

*Г.А. Собакин, студ., И.А. Кокулин, асп.; рук. В.П. Жуков, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, Иваново)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ КАПЕЛЬНОГО УНОСА ВЛАГИ В ИСПАРИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ**

Испарительные установки широко используются в промышленных технологиях для получения очищенной воды или концентрата, растворенных в ней веществ. Многоступенчатые испарительные установки мгновенного вскипания (МИУ МВ) по тепловой эффективности относятся к одному из наиболее перспективных видов испарительного оборудования.

Попадание перегретой воды в грязный отсек ступени с пониженным давлением приводит к ее мгновенному вскипанию, которое сопровождается интенсивным парообразованием. Вместе с паром в чистый отсек ступени может уноситься влага в виде капель. При этом капельный унос влаги сопровождается переходом примесей, содержащихся в каплях, из грязного отсека в чистый, что приводит к загрязнению и снижению качества дистиллята. Предложенная ранее модель ступени испарительной установки [1] не учитывает капельного уноса влаги с паром, а сепаратор капель, установленный между грязным и чистым отсеками, считается идеальным. Очевидно, что учет в модели капельного уноса существенным образом повышает прогностическую ценность модели.

В рамках известного подхода к расчету сепараторов [2] с использованием вероятностей выноса капель в чистый отсек предлагается модель сепаратора, которая позволяет определить долю улавливаемых в нем капель. С учетом известной модели [1] разработана модель для измерения концентрации примесей в минерализованной воде и для построения зависимости солесодержания в дистилляте от капельного уноса влаги в чистый отсек и предельно допустимое солесодержание в дистилляте при неидеальной сепарации капель. Это всё позволяет проектировать и строить режимные карты многоступенчатых испарительных установок.

### **Библиографический список**

**1. Жуков В. П., Кокулин И.А., Виноградов В.Н., А.Е. Барочкин.** Моделирование капельного уноса в многоступенчатых испарительных установках мгновенного вскипания. ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА. 2023. № 11.

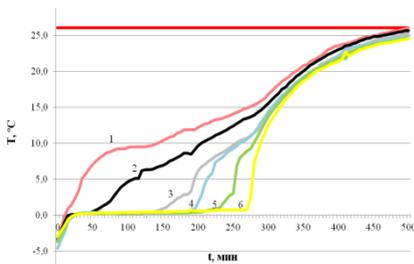
**2. Мизонов В.Е., Ушаков С.Г, Барочкин Е.В.** Аэродинамическая классификация порошков. Иваново, 2014, 260с.

*Е.В. Басова, асп.; рук. А.Н. Беляков, д.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В МНОГОСЛОЙНОЙ СРЕДЕ С ФАЗОВЫМИ ПЕРЕХОДАМИ

В работе [1] на основе математического аппарата теории цепей Маркова предложена модель переходных тепловых процессов в многослойной среде с фазовыми переходами. Для проверки ее работоспособности и параметрической идентификации ставится задача проведения экспериментального исследования многослойной теплопроводности с учетом изменения агрегатного состояния вещества в слое.

Экспериментальная установка представляет собой герметичный теплоизолированный лоток, разделенный на шесть одинаковых по размеру ячеек. Первая и четвертая ячейки выполнены из дюралевых пластин, а остальные заполнены водой или льдом. Для исключения перемешивания соседние ячейки по воде разделены тонкой жестяной перегородкой, которая не оказывает существенного влияния на процесс теплопроводности. В каждую ячейку помещен цифровой датчик температуры. Перед проведением эксперимента установка охлаждалась до отрицательных температур, тем самым обеспечивая переход воды в твердое состояние. Постоянный тепловой поток подводился к открытой части дюралевой пластины первой ячейки, показания температуры снимались с периодичностью 5 минут. Результаты изменения температуры в ячейках представлены на рис.1.



слоях.

Цифры соответствуют номеру ячейки

Хорошо видны участки с постоянной температурой, соответствующие процессу плавления воды. Полученные результаты будут использованы для параметрической идентификации математической модели.

Рисунок 1. Распределение температуры в

### Библиографический список

**1. Теоретическое** исследование нелинейной теплопроводности в многослойной среде с фазовыми переходами в слоях / В. Е. Мизонов, А. В. Митрофанов, Е. В. Басова, Е. А. Шуина // Вестник ИГЭУ. – 2020. – № 1. – С. 53-59.

П.А. Антонов, асп.; рук. А.Н. Беляков, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)

## ЗАДАЧА ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ В СИСТЕМАХ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

Решается транспортная задача оптимального распределения потоков энергоносителей конечным потребителям с точки зрения минимума понесенных затрат на обеспечение заданной нагрузки. В общем случае рассматривается система, включающая  $n$  источников и  $m$  потребителей энергии, связанных между собой электрическими, тепловыми и газовыми сетями.

Положим, что для потребителя важно получать только тепловую и электрическую энергии. Тепловую энергию можно получить по тепловым сетям, а также с помощью сжигания газа и преобразования электрической энергии. Тогда тепловая  $Q_j^{out}$  и электрическая  $N_j^{out}$  нагрузки  $j$ -го потребителя определяются следующим образом

$$Q_j^{out} = \sum_{i=1}^n (k_{ij}^N N_{ij}^Q + k_{ij}^Q Q_{ij} + k_{ij}^B B_{ij}), N_j^{out} = \sum_{i=1}^n (k_{ij}^N N_{ij}^N),$$

где элементы  $k_{ij}$  равны 1, если есть связь между  $i$ -ым источником и  $j$ -ым потребителем, и равны 0, если связь отсутствует, верхний индекс указывает тип потока,  $N_{ij}^Q$  – поток электрической энергии, которая идет на преобразование в тепловую энергию,  $N_{ij}^N$ ,  $Q_{ij}$ ,  $B_{ij}$  – потоки электрической, тепловой энергии и первичной энергии газового топлива соответственно. В свою очередь источники должны обеспечить следующую нагрузку с учетом максимальных ограничений

$$N_i^{inp} = \sum_{j=1}^m k_{ij}^N (N_{ij}^N + N_{ij}^Q) < N_i^{\max}, Q_i^{inp} = \sum_{j=1}^m k_{ij}^Q Q_{ij} < Q_i^{\max}, B_i^{inp} = \sum_{j=1}^m k_{ij}^B B_{ij} < B_i^{\max}.$$

С учетом ограничений функция оптимизации примет вид

$$F = \sum_{i,j} (c_{ij}^N k_{ij}^N (N_{ij}^N + N_{ij}^Q) + c_{ij}^Q k_{ij}^Q Q_{ij} + c_{ij}^B k_{ij}^B B_{ij}) \rightarrow \min_{N_{ij}^N, N_{ij}^Q, Q_{ij}, B_{ij}},$$

где  $c_{ij}^N$  – удельные затраты электрической,  $c_{ij}^Q$  – тепловой и  $c_{ij}^B$  – первичной энергии топлива.

Решение сформулированной задачи позволяет определить оптимальную схему и распределение потоков энергоносителей в энергетических системах.

### Библиографический список

1. Оптимальная выработка и передача энергии в тепловых и электрических сетях / В. П. Жуков, Е. В. Барочкин, Д. А. Уланов [и др.] // Теплоэнергетика. – 2011. – № 8. – С. 8-12.

*И.Д. Аксаковский, асп.; рук. В.П. Жуков, д.т.н., проф.  
А.В. Огурцов, к.т.н., доц. (ИГЭУ, Иваново)*

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УРАВНЕНИЯ БОЛЬЦМАНА ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЯЧЕЕЧНЫХ МАРКОВСКИХ МОДЕЛЕЙ**

Ячеечные модели на основе теории цепей Маркова, в силу их универсальности и простоты реализации расчетных алгоритмов, широко используются для описания различных технологических процессов в химической, строительной и энергетической отраслях промышленности [1]. При этом в качестве параметров идентификации модели используются приведенные коэффициенты макродиффузии и скорости конвективного переноса материала для выбранных условий протекания процесса. Данные коэффициенты зависят от целого ряда технологических параметров, для определения которых требуется проведение дополнительных экспериментальных исследований или привлечение экспериментальных данных из литературных источников. Модели более высокого иерархического уровня, в которых для получения конечных результатов используются только справочные данные, позволяют существенно уменьшить объем необходимых экспериментальных исследований для идентификации и верификации модели. Однако такие модели требуют более высокой квалификации разработчиков и пользователей, а также значительных вычислительных ресурсов. Очевидно, что существует оптимальное соотношение вычислительных и экспериментальных ресурсов, которые позволяют обеспечить получение заданной точности результатов. Разработка таких расчетных методов, в которых оптимально сочетаются простота построения модели и точность получаемых результатов, является актуальной задачей научных исследований.

В предлагаемом исследовании представлен подход к идентификации ячейной модели реактора кипящего слоя с использованием данных, полученных на основе решения дискретных моделей уравнения Больцмана. Анализ полученных результатов показал адекватное описание процессов в реакторах кипящего слоя ячейными моделями, построенными на основе теории цепей Маркова и идентифицированными на основе результатов, полученных в рамках дискретных моделей уравнения Больцмана.

### **Библиографический список**

**1. Mizonov V.E.** et al. Application of multi-dimensional Markov chains to model kinetics of grinding with internal classification, *Albi/ Int. J. Miner. Process.* 74S (2004) S307–S315.



# СОДЕРЖАНИЕ

## Секция 20. Анализ и синтез систем электроприводов

<i>Кузьмин А.А., Ермаков К.К.</i> Онлайн инструменты для обслуживания ЭМТ карьерных самосвалов; рук. Виноградов А.Б. ....	5
<i>Дюжев Д.А., Ермаков К.К.</i> Разработка системы движения сервисного робота-гида; рук. Гнездов Н.Е. ....	6
<i>Дыль Н.С., Менжинский П.Б.</i> Структура программно-аппаратного комплекса для исследования бесконтактных электрических машин постоянного тока; рук. Менжинский А.Б. ....	7
<i>Холодков М.И., Ермаков К.К.</i> Лабораторный стенд системы управления с различными интерфейсами; рук. Чистосердов В.Л. ....	8
<i>Корешкова И.М., Ермаков К.К.</i> Исследование волоконно-оптической линии связи высоковольтного многоуровневого преобразователя частоты; рук. Коротков А.А. ....	9
<i>Копылова М.А., Шевченко Б.А.</i> Математическая модель формирователя траектории движения поворотного устройства комплекса обслуживания воздушных судов; рук. А.А. Чепига.....	10
<i>Шевченко Б.А., Копылова М.А.</i> Разработка наблюдателя момента инерции для поворотного устройства комплекса обслуживания воздушных судов; рук. А.А. Чепига.....	11
<i>Сидорин Д.</i> Разработка математической модели многодвигательного электропривода гребной установки; рук. Вилков П.В. ....	12

## Секция 21. Электромеханика и магнитожидкостные устройства

<i>Грачев И.А.</i> Выявление эксцентриситета ротора турбогенератора по картине внешнего магнитного поля; рук. Морозов Н.А. ....	15
<i>Бакланов В.Д.</i> Расчет магнитной индукции в зазоре герметизатора динамически генерируемой многоконтурной схемой замещения магнитной цепи; рук. Нестеров С.А. ....	16

<i>Курлаков Е.А.</i> Математическое моделирование электромеханических процессов в синхронном реактивном двигателе с ТЛА-ротором с учетом демпферной обмотки; рук. Караулов В.Н.....	17
<i>Сергеев А.С.</i> Уточненный анализ магнитного поля турбогенератора атомной электростанции; рук. Казаков Ю.Б. ....	18
<i>Чванов О.В.</i> Работа обращенного синхронного реактивного магнитоэлектрического двигателя в системе электромеханической трансмиссии; рук. Казаков Ю.Б. ....	19
<i>Киселёв М.А., Смирнов Д.С.</i> Полевой анализ обращенного магнитоэлектрического двигателя с магнитопроводящими зубцами на роторе; рук. Казаков Ю.Б. ....	20
<i>Шоронов В.Е.</i> Переменный ток в системе возбуждения магнитоэлектрического сепаратора; рук. Филиппов В.А.....	21
<i>Соловьёв Е.Р.</i> Разработка имитационной модели измерительного трансформатора тока; рук. Тихонов А.И. ....	22
<i>Жбанов Г.Л.</i> Расширенный поверочный расчёт трансформаторов; рук. Тихонов А.И. ....	23
<i>Миронова А.А.</i> Анализ процессов в многозубцовом уплотнении с учётом деформации магнитной жидкости в зазоре; рук. Нестеров С.А. ....	24

## **Секция 22. Микроэлектронные и микропроцессорные информационно-управляющие системы**

<i>Крылович А.А.</i> Квадратурная демодуляция как метод измерения среднеквадратического значения; рук. Серов А.Н. ....	27
<i>Подобуев С.А.</i> Применение квадратурной демодуляции для измерения частоты электросети; рук. Серов А.Н. ....	28
<i>Мякинин И.А.</i> Микроконтроллерная система регулирования температуры в химическом реакторе; рук. Алексеев Е.А.....	29
<i>Павлович А.В., Серов А.Н.</i> Снижение растекания спектра с помощью ПЧД; рук. Серов А.Н. ....	30

<i>Герасимов И.А.</i> Синтез астатического полиномиального регулятора для двухмассовой системы с электромеханическим торсионом; рук. Аполонский В.В. ....	31
<i>Скрёбов Н.А.</i> Разработка микроконтроллерной системы управления смесителем для жидких сред; рук. Кожевников С.О. ....	32
<i>Скрёбов Н.А.</i> Синтез математической модели электромзыкального инструмента в среде MATLAB; рук. Кожевников С.О. ....	33
<i>Дорожкин М.С.</i> Особенности управления состоянием мехатронных систем с упругой кинематикой; рук. Аполонский В.В. ....	34
<i>Горбенко А.С.</i> Разработка методов идентификации и настройки регуляторов состояния мехатронных систем с упругой кинематикой с использованием искусственной нейронной сети; рук. Анисимов А.А. ....	35
<i>Лукьянова Е.Н.</i> Влияние температурного профиля пайки на качество получаемого соединения; рук. Кожевников С.О. ....	36
<i>Харинов А.Э.</i> Измерение активной мощности методом спектрального анализа с применением окон; рук. Серов А.Н. ....	37
<i>Иваненко К.А.</i> Применение ДПФ в качестве полосового фильтра для измерения реактивной мощности методом фильтрации; рук. Серов А.Н. ....	38
<i>Синицын И.А.</i> Программный дифференциал в системе управления электромобиля; рук. Аполонский В.В. ....	39
<i>Кичка А.С.</i> Применение фильтрации для снижения погрешности измерения частоты методом по переходам через нуль; рук. Серов А.Н. ....	40
<i>Евтехова Д.С.</i> Метрологические аспекты метода измерения частоты, основанного на дифференцировании входного сигнала; рук. Серов А.Н. ....	41
<i>Чистяков Д.В.</i> Применение генетических алгоритмов для идентификации параметров электромеханических систем; рук. Аполонский В.В. ....	42

<i>Зайцев К.Э., Красильников М.Ю.</i> Определение электрического положения ротора синхронных двигателей с постоянными магнитами; рук. Егоров В.Н.....	43
<i>Евсенкина А.Е., Серов А.Н.</i> Исследование метода измерения реактивной мощности на основе фильтрации.....	44
<i>Соколов К.Е.</i> Экспериментальные исследования робастной системы управления натяжением материала в зоне транспортирования; рук. Анисимов А.А. ....	45
<i>Соколов К.Е.</i> Экспериментальные исследования робастной системы управления двухмассовым мехатронным объектом с регулятором и наблюдателем состояний; рук. Анисимов А.А. ....	46
<i>Будкина Е.А.</i> Особенности измерения СКЗ полигармонических сигналов в частотной области; рук. Серов А.Н.....	47
<i>Куликов С.В.</i> Применение автоматических погрузчиков в современной логистике; рук. Копылова Л.Г. ....	48
<i>Веселов Г.М.</i> Применение аппроксимации сигнала для повышения точности измерения частоты методом по переходам через нуль; рук. Серов А.Н. ....	49
<i>Валиев Р.Н.</i> Разработка драйвера для управления насоса в трубопроводе с двумя клапанами при использовании SIMATIC Step 7; рук. Анисимов А.А. ....	50
<i>Корытов Д.С.</i> Исследование модели волнового твердотельного гироскопа; рук. Кожевников С.О.....	51
<i>Григорьев О.Ю.</i> Разработка контроллера для управления калориферами в теплице; рук. Кожевников С.О.....	52
<i>Куприн И.В.</i> Сравнение двух подходов идентификации параметров модели объекта управления; рук. А.А. Анисимов .....	53

### **Секция 23. Технология машиностроения**

<i>Куприянов М. Е.</i> Увеличение долговечности изделий, изготовленных при помощи аддитивных технологий; рук. Ведерникова И.И.....	57
--	----

<i>Каприльянц А.А.</i> Создание трехмерной сборочной модели цилиндрического двухступенчатого редуктора Ц2-400; рук. Павлюкова Н.Л. ....	58
<i>Соловьева Е.В.</i> Влияние режимов резания на шероховатость поверхности; рук. Ведерникова И.И. ....	59
<i>Жуков А.А.</i> Особенности обработки алюминиевых сплавов лазером CO <sub>2</sub> ; рук. Власов А.М. ....	60
<i>Куприянов М.Е., Жумай Д.Е.</i> Проектирование 3D-модели модуля захвата для БПЛА; рук. Павлюкова Н.Л. ....	61
<i>Филатов А.М.</i> Исследование температуры инструмента при токарной обработке в различных охлаждающих средах; рук. Егоров С.А. ....	62
<i>Батанов Н.Н.</i> Увеличение долговечности деталей путем гальванизации; рук. Ведерникова И.И. ....	63
<i>Мукарамшоев А.Р., Бебиашвили И.З.</i> Инновационные стали; рук. Павлюкова Н.Л. ....	64
<i>Кадочкин А.Е.</i> Выбор метода литья при изготовлении заготовки корпусной детали; рук. Копосов В.Н. ....	65
<i>Синодеева П.И.</i> Преимущества лезвийной обработки; рук. Ведерникова И.И. ....	66
<i>Волков А.В.</i> Прогнозирование себестоимости изделий машиностроения на ранних стадиях проектирования; рук. Копосов В.Н. ....	67
<i>Жумай Д.Е.</i> Увеличение долговечности изделий, изготовленных с применением обогащения поверхности детали азотом; рук. Ведерникова И.И. ....	68
<i>Новичихин А.А., Синодеева П.И.</i> Математическое моделирование процесса резания стеклопластика; рук. Ведерникова И.И., Егоров С.А. ....	69
<i>Сухов И.А.</i> Увеличение долговечности режущего инструмента; рук. Ведерникова И.И., Егоров С.А. ....	70

## Секция 24 Динамика и прочность сложных механических систем

- Герасимов В.О.* Экспериментальное определение износа металлов при трении пары по схеме «шар-плоскость»; рук. Шилов М.А. .... 73
- Герцева Е.И.* Экспериментальные исследования высокочастотной вибрации подшипников; рук. Огурцов Ф.Б. .... 74
- Герцева Е.И.* Прочностной расчёт подвижной челюсти механического крашера; рук. Ноздрин М.А. .... 75
- Городова С.М.* Расчет композитных створок отсека вспомогательной силовой установки самолета; рук. Огурцов Ф.Б. .... 76
- Гришанов Р.В.* Исследование прочностных характеристик фундамента промышленного сооружения; рук. Ноздрин М.А. .... 77
- Ильина Е.Э.* Перспективы разработки поропругих скаффолдов из метаматериалов; рук. Маслов Л.Б. .... 78
- Ларионова У.О.* Конечно-элементное моделирование поясничного отдела позвоночника при имплантации; рук. Маслов Л.Б. .... 79
- Лукин Д.Д.* Моделирование системы нагружения трибометра; рук. Сабанеев Н.А., Шилов М.А. .... 80
- Михайлишина А.А.* Разработка конструкции теплообменника с подвижными элементами; рук. Ноздрин М.А. .... 81
- Молокова Д.Д.* Расчет демпфирующего устройства транспортно-упаковочного комплекта; рук. Маслов Л.Б. .... 82
- Проскуров А.С.* Расчет напряженно-деформированного состояния корпуса пневмозахвата; рук. Егоров С.А. .... 83
- Птицын Д.М.* Проектирование индуктивного датчика приближения; рук. Караваев В.И. .... 84
- Рева Л.С.* Расчет на прочность двухсекционной стрелы овоидного сечения для автокрана; рук. Ноздрин М.А. .... 85
- Дудина К., Челноков А.П., Синёв С.В.* Стенд для исследования пространственного движения шаров; рук. В.И. Караваев. .... 86

<i>Скворцова М.А.</i> Исследование напряженно-деформированного состояния челюсти «грейфера для леса»; рук. Ноздрин М.А. ....	87
<i>Скворцова М.А.</i> Сравнительные прочностные расчеты конструкций захватов «грейфера для леса»; рук. Ноздрин М.А. ....	88
<i>Герасимов В.О.</i> Исследование напряженно-деформированного состояния удлиненной стрелы экскаватора; рук. Ноздрин М.А. ....	89
<i>Тихомиров А.Р.</i> Разработка модели корпуса пункта учета электроэнергии; рук. Ноздрин М.А. ....	90
<i>Худов Д.И.</i> Экспериментально-расчетное исследование давления электрогидроудара в установке для упрочнения поверхности металлов; рук. Смирнов С.Ф. ....	91

## **Секция 25. Математические методы в технике и технологиях**

<i>Шмелёв А.С.</i> Методика совместного сведения материального и энергетического балансов при расчете тепловой экономичности газотурбинных установок; рук. Огурцов А.В. ....	95
<i>Макаров М.В.</i> Моделирование процесса миграции частиц в условиях виброоживленного слоя; рук. Огурцов А.В. ....	96
<i>Колодочка Д.В.</i> Разработка информационной системы профессионального ориентирования абитуриентов; рук. Беляков А.Н. ....	97
<i>Тютюкин И.Ю.</i> Измельчение в струйной мельнице смеси материалов ослабленных термонапряжениями; рук. Жуков В.П., Бараковских Д.С. ....	98
<i>Бубнов К.Н.</i> Диагностика состояния регенеративных подогревателей высокого давления; рук. Жуков В.П. ....	99
<i>Кувенева Н.А., Бубнов К.Н.</i> К определению метода обработки архивных данных для диагностики технического состояния паровой турбины; рук. Беляков А.Н. ....	100
<i>Кузнецов М.А., Фомичев М.Д.</i> Математическое моделирование и диагностика состояния конденсатора паротурбинной установки; рук. Жуков В.П. ....	101

<i>Лётин К.А., Торопова Е.К.</i> Разработка модели истирания частиц в аппаратах с кипящим слоем; рук. Огурцов А.В. ....	102
<i>Собакин Г.А., Кокулин И.А.</i> Исследование капельного уноса влаги в испарительных установках; рук. Жуков В.П. ....	103
<i>Басова Е.В.</i> Экспериментальное исследование теплопроводности в многослойной среде с фазовыми переходами; рук. Беляков А.Н. ....	104
<i>Антонов П.А.</i> Задача оптимального распределения энергоносителей в системах энергоснабжения; рук. Беляков А.Н. ....	105
<i>Аксаковский И.Д.</i> Использование уравнения Больцмана для идентификации ячеечных марковских моделей; рук. Жуков В.П., Огурцов А.В. ....	106
<b>СОДЕРЖАНИЕ</b> .....	108

# ЭЛЕКТРОМЕХАНОТРОНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

ДЕВЯТНАДЦАТАЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ  
(ОДИННАДЦАТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ)  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ  
И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ  
«ЭНЕРГИЯ-2024»

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Том 4

*Составители: Макаров А.В., Аполонский В.В.  
Компьютерная верстка: Аполонский В.В.  
Печатается в авторской редакции*

Лицензия ИД № 05285 от 4 июля 2001 г.  
Подписано в печать .2024. Формат 60x84 1/16 .  
Печать офсетная. Усл. печ. л. .  
Тираж экз. Заказ № .  
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический  
университет имени В.И. Ленина»  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ