



# ЭЛЕКТРОМЕХАНОТРОНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

## ЭНЕРГИЯ-2025

ДВАДЦАТАЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ  
(ДВЕНАДЦАТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ)  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ  
И МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ

17-19 марта 2025 г.  
г. Иваново

ТОМ 4

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-2025»**

**XX ВСЕРОССИЙСКАЯ  
(XII МЕЖДУНАРОДНАЯ)  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ  
И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ**

### **МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ**

**г. Иваново, 17 – 19 марта 2025 года**

**ТОМ 4**

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

**ЭЛЕКТРОМЕХАНОТРОНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**//  
XX всероссийская (XII международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия–2025»: Материалы конференции. В 6 т. Т. 4. – Иваново: ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», 2025. – 102 с.

ISBN 978-5-00062-678-8

ISBN 978-5-00062-672-6 (Т.4)

Тезисы докладов студентов, аспирантов и молодых учёных, помещённые 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:** Тютиков В.В. проректор по научной работе ИГЭУ.

**Зам. председателя:** Филатова Г.А. начальник управления НИРС и ТМ.

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

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

**СЕКЦИЯ 19**  
**АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИСТЕМ**  
**ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ**

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

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



*Н.М. Козлов, студ.; рук. А.Н. Ширяев, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## ЭЛЕКТРОПРИВОД ВЕНТИЛЯТОРОВ АППАРАТА ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ГАЗА

В настоящее время на объектах магистрального транспорта газа для стабилизации температуры газа после компримирования в системах воздушного охлаждения происходит интенсивное внедрение частотно-регулируемого электропривода.

В докладе рассматривается частотно-регулируемый электропривод вентиляторов аппарата воздушного охлаждения (АВО) природного газа компрессорной станции магистрального газопровода.

Типовая конструкция АВО с тремя блоками вентиляторов приведена на рис.1.

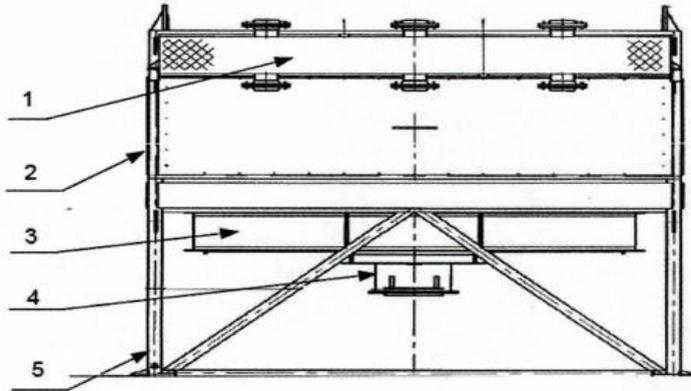


Рис. 1. Типовая конструкция аппарата воздушного охлаждения:  
1 – теплообменная секция (трубный пучок); 2 – корпус АВО; 3 – диффузор и коллектор всасывания воздуха; 4 – электродвигатель вентилятора; 5 – опорные стойки АВО

Для привода вентиляторов АВО, подающих охлаждающий воздух в теплообменные секции, используется частотно-регулируемый электропривод с электродвигателем взрывозащитного исполнения ВАСО4-15-12УХЛ1 ( $P_n = 15$  кВт,  $I_n = 30$  А,  $n_n = 500$  об/мин).

В программной среде «Matlab Simulink» разработана модель асинхронного электропривода с вентиляторным моментом нагрузки, на основе которой исследованы динамические характеристики электропривода.

*Н.Н. Иванова, студ.; рук. М.С. Куленко, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ЗАДАЧИ ДИАГНОСТИКИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Асинхронные двигатели (АД) являются одними из наиболее распространенных электродвигателей в промышленности благодаря своей надежности, простоте конструкции и низкой стоимости. Однако, как и любое оборудование, они подвержены износу и выходу из строя. Своевременная диагностика параметров АД позволяет предотвратить аварии, снизить затраты на ремонт и увеличить срок службы оборудования.

Диагностика параметров АД является важным этапом в обеспечении его надежной и эффективной работы. Современные методы диагностики, такие как вибродиагностика, акустическая диагностика, анализ электрических параметров, тепловизионный контроль позволяют своевременно выявлять дефекты и предотвращать аварии. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и области применения, что делает их взаимодополняющими в комплексной диагностике.

Вибродиагностика и акустическая диагностика особенно эффективны для выявления механических неисправностей, таких как износ подшипников, неуравновешенность ротора и несоосность валов. Анализ электрических параметров, включая токи, напряжения и сопротивление изоляции, позволяет оценить состояние обмоток и магнитной системы двигателя. Тепловизионный контроль помогает выявить перегрев, вызванный перегрузками или плохими контактами.

Комбинация различных методов диагностики позволяет получить наиболее полную картину состояния АД, минимизировать риски внезапных отказов и снизить затраты на ремонт и простои. Регулярный мониторинг и анализ данных обеспечивают не только повышение надежности, но и оптимизацию эксплуатационных расходов.

Внедрение современных методов диагностики в практику эксплуатации АД является необходимым условием для повышения их долговечности и эффективности. Это особенно актуально в условиях возрастающих требований к энергоэффективности и надежности трубопроводной электроприводной арматуры.

### **Библиографический список**

1. **Матвеев А.В.** Диагностирование арматуры с электроприводом при помощи носительных электрических параметров // Арматуростроение, № 3 (60), 2009.
2. **Петухов В.С.** Диагностика электродвигателей. Спектральный анализ модулей векторов Парка тока и напряжения // Новости ЭлектроТехники. № 1, 2(49, 50), 2008.

*В.Д. Аронова, студ.; И.А. Тихомирова, к.т.н., доц.;  
рук. М.С. Куленко, к.т.н., доц. (ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ ДРАЙВЕРА СИЛОВЫХ КЛЮЧЕЙ**

Для освоения профессиональных компетенций, соответствующих проектно-конструкторскому типу задач, при подготовке специалистов в области электроники, электропривода и микропроцессорных систем необходимо, наряду с освоением схмотехники и правил выполнения печатного монтажа, внедрение в учебный план практических занятий по изучению современного программного обеспечения по проектированию печатных плат, являющихся элементами нижнего уровня в конструктивной иерархии сложного электромеханического устройства.

Несмотря на множество технологий изготовления печатных плат, основные этапы цикла производства четырехслойной печатной платы (на примере производителя печатных плат "Резонит") включают в себя следующие операции: фотолитография внутренних слоев; травление; оптическая инспекция; оксидирование и прессование внутренних слоев; вскрытие базовых отверстий; сверление сквозных отверстий; первая металлизация; фотолитография внешних слоев; гальваническое меднение; травление внешних слоев; оптическая инспекция; формирование масочных слоев; маркировка; финишное покрытие; электротестирование; механическая обработка [1].

Проектирование плат выполняется в системе автоматизированного проектирования Altium Designer. В процессе проектирования выполняются следующие этапы: разработка библиотеки условных графических обозначений; разработка библиотеки посадочных мест; проектирование схмотехники; проектирование печатной платы; создание мультиплаты; выгрузка документации для производства платы (Gerber-файлы и файлы сверловки). Кроме того, Altium Designer позволяет визуализировать плату и оценить ее габариты и совместимость с элементами следующего конструктивного уровня.

В качестве примера практического задания выполнена пошаговая разработка печатных плат драйвера IGBT-транзисторов и платы микропроцессорной системы управления драйвера преобразователя частоты, включая проектирование схмотехнического решения, самой печатной платы и подготовка конструкторской документации.

### **Библиографический список**

1. Международный стандарт IPC-2221A «Проектирование печатных плат. Общие технические условия».

*А.А. Соколов, студ.; рук. С. К. Лебедев, к.т.н. доцент  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ФОРМИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ В ЭЛЕКТРОМЕХАТРОННОМ МОДУЛЕ С ПИ(Д)-РЕГУЛЯТОРОМ**

С каждым годом требования к скорости и точности перемещения подвижных частей манипуляторов, прокатных станов, станков и других устройств, увеличиваются. И в связи с этим растет необходимость рассмотрения и совершенствования систем электромехатронных моделей позиционирования (ЭМП), которые отвечают за совершение высокоточных движений, происходящих с определенной скоростью за необходимое для этого времени.

В статье разработана функциональная схема ЭМП с ПИ(Д)- регулятором положения, произведен его синтез, обеспечивающий динамики по Бесселю и Ньютону [1], получены временные и частотные характеристики ЭМП при синтезе, была произведена оценка пренебрежения инерционностью контура момента при синтезе, исследованы характеристики при вариации инерционных свойств механики[2], в зависимости от видов динамик при максимальном значении коэффициента инерции и при изменении этого коэффициента на максимум/минимум для динамики Бесселя.

Результаты данной статьи является получение ЭМП с ПИ(Д)-регулятором с различными видами динамики с помощью программы Mathcad[3], рассмотрение различий между двумя видами динамики в различных состояниях, а также моделирования формирователя траектории второго порядка[4] с помощью программы Matlab-Simulink.

### **Библиографический список**

1. **Лебедев С.К.** Управление движением промышленных манипуляторов: Учебник / Лебедев С.К., Колганов А.Р. – ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2018. – 348 с.
2. **Лебедев С.К.** Кинематика и динамика электромехатронных систем в робототехнике: Учебное пособие / Лебедев С.К., Колганов А.Р. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. – 352 с.
3. **Денисенко В.А.** ПИ(Д)-регуляторы: принципы построения и модификации / Современные технологии автоматизации, №4, 2006, С. 66 – 74.
4. **Лебедев С.К., Колганов А.Р., Гнездов Н.Е.** Электромехатронные системы позиционирования с наблюдателями нагрузки / ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2016. – 340 с.

*И.А. Жуков, студ.; А.Р. Воронин, студ.; К.К. Ермаков, асп.;  
рук. А.Б. Виноградов, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, Иваново)*

## **РАЗРАБОТКА СТЕНДА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОВЕРКИ ЭЛЕМЕНТОВ ШКАФА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ КАРЬЕРНОГО САМОСВАЛА**

Для сокращения времени, затрачиваемого на выполнение автономных испытаний основных элементов шкафа преобразователей и систем управления (ШПСУ) карьерного самосвала разработан автоматизированный стенд. Основное назначение – обеспечение выходного контроля качества изготовленных блоков системы управления (СУ) и модулей силовой части электромеханической трансмиссии [1]. В качестве дополнительного функционала – частичная реализация группы проверок для диагностики вышедших из строя блоков СУ, контроля работоспособности модулей, прошедших ремонтные (восстановительные) работы. В процессе разработки стенда выполнены следующие этапы: анализ методик проверки печатных плат и блоков на рабочем месте; подбор оборудования; проектирование каркаса стойки и компоновка основных элементов стенда; разработка программного обеспечения (ПО) контроллера стенда и графического ПО стендового персонального компьютера (ПК); наладка элементов стенда и канала коммуникации ПК-Контроллер стенда. Использование стенда для тестирования элементов ШПСУ позволило сократить время проведения процедур проверки с 2 часов до 20 минут (сокращение временных затрат более 80%). Для повышения уровня автоматизации процедур проверок ведется доработка разделов ПО в области фиксации показаний от внешних контрольно-измерительных приборов (мультиметр, цифровой осциллограф), а также автоматического формирования отчетных документов о выполненных проверках.

### **Библиографический список**

1. Модернизация электротрансмиссии карьерных самосвалов по результатам длительной эксплуатации / А. Б. Виноградов, Н. Е. Гнездов, В. Л. Чистосердов, А. А. Коротков // Горный журнал. – 2022. – № 4. – С. 106-112. – DOI 10.17580/gzh.2022.04.16. – EDN GPPXPH.

*Е.М. Синельщиков, студ.; рук. М.С. Куленко, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ СТЕНДА С БЕГОВЫМИ БАРАБАНАМИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ МОТОТЕХНИКИ НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ**

В настоящее время автомобильная промышленность нашей страны находится на стадии структурного изменения и, в некоторой степени, перерождения. Многие предприятия Российской Федерации, которые входили в такие альянсы, как, например, АО «АвтоВАЗ», Renault и Nissan, оказались в ситуации, когда зарубежные партнёры стремительно покинули страну вместе со всей наработанной системной методической базой по испытаниям, предварительно разрушив традиционный отечественный подход и не успев полностью внедрить новый. Одновременно с этим отсутствует возможность сотрудничества с европейскими инжиниринговыми компаниями, опыт которых всегда был полезен для развития. Но, если компетенции в области проектирования и испытания автомобильной техники все же остались в России в большом количестве, то если рассмотреть область испытаний мототехники, ситуация оказывается более сложная.

В настоящее время ФГУП «НАМИ» занимается разработкой нового проекта – мотоцикла для гражданского применения и сопровождения кортежей первых лиц государства. В рамках этой работы исследовательскому центру продукции автомобилестроения поставлена задача разработать стенд и методологию испытаний мототехники для оценки усталостной долговечности несущей конструкции [1].

В связи с высокими затратами на закупки элементов управления подобными стендами, систему управления было решено реализовать с помощью недорогостоящих программируемых инструментов, позволяющих выполнять условия методики испытаний.

В настоящий момент разработана и исследована система управления стенда на базе программируемого реле Siemens Logo, в связке с частотными преобразователями ОВЕН ПЧВ-3. Разработана программа для программируемого реле Siemens Logo на языке FBD. Сняты характеристики изменения скорости вращения барабана при различных условиях нагрузки, имитирующей неровности дорожного покрытия.

### **Библиографический список**

1. Кузьмин А.О., Мещеряков Д.Е. Создание стенда с беговыми барабанами для испытания мототехники на усталостную прочность // Труды НАМИ. – 2024. – № 2 (297). – С. 66–77. DOI: 10.51187/0135-3152-2024-2-66-77.

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

## **МОДЕРНИЗАЦИЯ СЕРВИСНОГО РОБОТА-ГИДА**

Роботы всё чаще используются в сферах деятельности, доступных ранее только человеку. Например, в последние годы бурно растёт применение автоответчиков, ботов, интерактивных роботов для помощи, информирования, общения с клиентами [1]. В СНТО «Вектор» ИГЭУ создан сервисный робот-гид по имени «Горди», который предназначен для сопровождения посетителей в зданиях университета и презентации факультета абитуриентам [2].

После проведения ходовых испытаний выявлены недостатки в системе питания, охлаждения, привода основного движения и системах навигации робота. Выполнены доработки аппаратной части: установлены дополнительные аккумуляторные батареи и алюминиевые радиаторы с принудительным воздушным охлаждением; разработаны и реализованы устройства балансировки напряжения ячеек АКБ; в систему ориентирования интегрированы ультразвуковые датчики и веб-камера; установлены колонки и микрофон. В результате повышен запас хода, повышено использование ёмкости элементов питания, исключён перезаряд или глубокий разряд АКБ, существенно улучшены алгоритмы ориентирования и возможности коммуникации робота. Программная поддержка новых способностей робота потребовала перехода на новый, более мощный, контроллер управления, который в свою очередь позволил организовать более удобный HMI интерфейс для пользователей.

Проведена работа по проектированию рук-манипуляторов для робота. В настоящее время активно ведутся работы по оптимизации систем пространственной ориентации и взаимодействия с пользователями, а также реализация манипуляторов для повышения возможностей робота.

### **Библиографический список**

1. **Юревич Е. И.** Основы робототехники: учеб. пособие для студентов вузов / Е. И. Юревич ; Евгений Юревич. – 2-е изд., перераб. и доп.. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 401 с. – (Учебное пособие). – ISBN 5-94157-473-8. – EDN QMOVXN.
2. **Дюжев Д. А.** Разработка системы движения сервисного робота-гида / Д. А. Дюжев, К. К. Ермаков // Электромеханотроника и управление: Материалы конференции. В 6-ти томах, Иваново, 14–16 мая 2024 года. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2024. – С. 6. – EDN CZNWCA.

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

## **ЭЛЕМЕНТЫ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА МАНИПУЛЯТОРОВ С ТЕХНИЧЕСКИМ ЗРЕНИЕМ**

Автоматизация сельскохозяйственных процессов становится всё более актуальной задачей, особенно в контексте увеличения спроса на продукцию и сокращения трудовых ресурсов. Одной из задач является разработка роботов-манипуляторов с техническим зрением, способных выполнять операции по сбору плодоовощной продукции. Эти устройства должны сочетать в себе высокие технические характеристики, интеллектуальную систему обработки изображений и надёжность, необходимую для работы в сложных условиях открытого пространства.

В частности, роботы-манипуляторы должны быть защищены от влаги, пыли и грязи, а также сохранять работоспособность в широком диапазоне температур. В полевых условиях возможны удары, вибрации и другие физические воздействия, поэтому манипуляторы должны обладать достаточной прочностью и надёжностью. Также в отдалённых районах может отсутствовать доступ к электросети, поэтому важно обеспечить автономность разрабатываемых устройств.

Анализ существующих решений [1] показал, что ключевыми элементами в структуре данных манипуляторов являются механические элементы, сенсорная система, программное обеспечение.

К механическим элементам относятся манипулятор и основание, которое служит опорой для всей конструкции и может включать дополнительные приводы для перемещения самого робота вдоль производственной линии или рабочей зоны.

На аппаратном уровне основной элемент сенсорной системы – это одна или несколько камер, установленных либо на манипуляторе, либо вне его. Вспомогательными элементами сенсорной системы являются лазерные дальномеры и ультразвуковые датчики.

Под программным обеспечением робота-манипулятора подразумеваются алгоритмы обработки данных сенсорной системы, которые позволяют системе технического зрения анализировать полученное изображение и выделять нужные объекты.

### **Библиографический список**

1. **Рыбаков А.В.** Перспективы использования мобильных роботов с системами технического зрения в сельском хозяйстве / А.В. Рыбаков, З.М. Ходарова // Симметрии: теоретический и методический аспекты: сборник научных трудов VII Международной научно-практической конференции. – 2018. – С. 39–46.

*Е.А. Варигин, студ.; Д.О. Перевезенцева, студ.; К.К. Ермаков, асп.;  
рук. В.Л. Чистосердов, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, Иваново)*

## **РАЗРАБОТКА АДАПТЕРА АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ДВС КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ**

Современное горнодобывающее производство, в том числе тяжелый карьерный транспорт, требует модернизации оборудования для повышения универсальности [1]. Серийные электромеханические трансмиссии (ЭМТ) совместимы с современной сетью J1939, но не поддерживают работу с устаревшими контроллерами двигателей внутреннего сгорания (ДВС), использующими аналоговое управление и протоколы J1708/J1587. Для решения проблемы совместимости разработан адаптер-шлюз, обеспечивающий трансляцию сигналов управления и состояния между сетями, что упрощает интеграцию ДВС с ЭМТ. За счет простой схмотехники и удобства установки, адаптер имеет экономическое преимущество перед существующими аналогами.

Адаптер построен на плате ESP32 Devkitv1. Стабильное питание микроконтроллера организовано посредством использования CN3903, трансформирующего бортовое напряжение 24 В (стандартное для карьерной техники) в 5 В. Данные о состоянии принимаются от ДВС по протоколу J1708/J1587 через устойчивый к электромагнитным помехам интерфейс RS-485, и транслируются в сеть CAN J1939, подключенную к системе управления ЭМТ. Также адаптер реализует канал управления частотой или крутящим моментом ДВС, принимая сигнал задания по сети CAN J1939 и преобразуя его в аналоговый сигнал посредством встроенного в ESP32 цифро-аналогового преобразователя (ЦАП). Для достижения требуемого уровня напряжения выходной сигнал усиливается с помощью платы PWMtoDAC10V, что обеспечивает корректную работу ДВС. Для гарантии стабильного соединения при воздействии вибраций, ударных нагрузок и агрессивных сред в адаптере используются разъемы типа Deutsch. Дальнейшие работы включают разработку ПО и проведение испытаний прототипа.

Адаптер уменьшит расходы на модернизацию карьерной техники, обеспечив эффективную интеграцию ДВС с ЭМТ, что способствует сокращению зависимости отрасли от импортных компонентов.

### **Библиографический список**

1. Смирнов, В. А. Современные методы управления силовыми агрегатами карьерного транспорта / В. А. Смирнов, Д. П. Иванов // Вестник горной техники. – 2021. – № 3. – С. 112-118.

*М.Д. Худяков, студ., рук. П.В. Вилков, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА ПО ПРОГРАММНОМУ УПРАВЛЕНИЮ СТАНКАМИ**

В настоящее время с развитием микропроцессорной техники применение в современных системах управления металлорежущими станками числового программного управления (ЧПУ) позволяет многократно повысить потенциальные возможности сложного технологического оборудования.

В связи с созданием в ИГЭУ при поддержке АО “Концерн РосЭнергоАтом” лаборатории промышленной робототехники и мехатронных устройств и появлением в ней современного оборудования с ЧПУ возникает потребность в разработке лабораторного практикума по дисциплине “Электропривод и программное управление станками”.

Лабораторный практикум нужен для подготовки специалистов, обладающих как теоретическими, так и практическими навыками в освоении тонкостей программирования, настройки и наладки металлорежущих станков с ЧПУ.

Лабораторные работы в рамках данного практикума будут проводиться на 5-осевом фрезерно-гравировальном универсальном станке HY-6040 CNC [1] с системой ЧПУ серии MNC800 и станочными электроприводами MTDrive компании Мехатроника.

Практикум включает выполнение следующих видов лабораторных работ:

- изучение возможностей, структуры и интерфейса программного обеспечения системы ЧПУ MNC800, элементов управления и средств визуализации;
- разработка управляющих программ контурной обработки детали в декартовых и полярных координатных системах;
- изучение работы с инструментом и применение коррекции на радиус и длину инструмента;
- изучение постоянных токарных, сверлильных и фрезеровальных циклов;
- изучение работы поворота стола станка в двух плоскостях.

### **Библиографический список**

**1. Цифровой** станочный электропривод [Электронный ресурс] Режим доступа: [https://www.chinacnczone.com/ru/chinacnczone-hy-6040-smalldesktop-diy-машина-5-ось-cnc-для-фрезерно-грави\\_l324\\_p171.html](https://www.chinacnczone.com/ru/chinacnczone-hy-6040-smalldesktop-diy-машина-5-ось-cnc-для-фрезерно-грави_l324_p171.html).

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

## **ПРИМЕНЕНИЕ АДАПТИВНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ**

Нейросетевые регуляторы все чаще применяются в системах управления электроприводами. Искусственные нейронные сети способны моделировать сложные зависимости между входными и выходными параметрами, что делает их аналогами работы человеческого мозга. Они состоят из множества простых процессоров, которые взаимодействуют, позволяя эффективно решать задачи управления динамическими объектами. В отличие от традиционных алгоритмов, нейросетевые регуляторы обучаются на данных, что улучшает адаптивность систем управления.

Ключевым преимуществом нейросетевых регуляторов является их способность адаптироваться к изменяющимся условиям работы. Нейросетевые регуляторы способны улучшить качество настройки коэффициентов ПИД-регулятора, адаптируя их параметры в условиях неопределённости. Процесс обучения нейросетевых регуляторов позволяет минимизировать ошибку и добиться высокой точности регулирования, что делает их особенно эффективными в динамических системах.

Несмотря на преимущества, нейросетевые регуляторы имеют и недостатки. Они разрабатываются и настраиваются под конкретные объекты, что ограничивает их универсальность. Также требуется предварительное обучение, требующее значительных ресурсов, и отсутствуют чёткие критерии выбора структуры нейронной сети.

Исследования показывают, что нейросетевые регуляторы могут предложить улучшенные показатели точности по сравнению с традиционными методами [1]. Это открывает новые возможности их применения в реальных задачах, таких как преобразователи частоты и электромеханические устройства.

Таким образом, перспективы использования нейросетевых регуляторов в системах управления электроприводами остаются высокими. Стремительное развитие технологий обещает их широкое внедрение, однако для этого необходимо решить ряд практических задач.

### **Библиографический список**

1. **Чернодуб А.Н.** Обзор методов нейруправления / Чернодуб А.Н., Дзюба Д.А. // Проблемы программирования. 2011. 2, 79 – 94.

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

## **АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ANFIS-СИСТЕМ В УПРАВЛЕНИИ СДПМ**

Электроприводы с синхронными двигателями на постоянных магнитах (СДПМ) становятся все более популярными благодаря своей высокой эффективности и надёжности. Для повышения точности и эффективности управления такими системами перспективным решением является применение адаптивных нейро-нечётких систем (ANFIS), которые обеспечивают высокую адаптивность в динамической среде.

ANFIS-система сочетает нейронные сети и нечёткую логику, что позволяет моделировать сложные нелинейные зависимости и оптимизировать алгоритмы управления. В контексте СДПМ ANFIS-система способствует автоматической настройке алгоритмов, таких как векторное управление, повышая точность и реакцию на изменения.

Ключевым преимуществом ANFIS-систем является способность учиться на исторических данных, что позволяет адаптироваться к изменяющимся условиям эксплуатации и упрощать программную настройку. Исследования показывают, что ANFIS-система сокращает время настройки и улучшает устойчивость систем в динамических условиях.

Однако внедрение ANFIS-системы связано с определёнными трудностями. Сложность выбора структуры сети и настройки требует высоких компетенций, а процесс обучения занимает время.

Многочисленные исследования подтверждают высокую эффективность ANFIS-систем по сравнению с традиционными методами управления СДПМ, указывая на улучшение динамических характеристик и сокращение временных задержек [1].

Таким образом, ANFIS-система представляют собой перспективное направление для управления синхронными двигателями на постоянных магнитах. Их способности к самообучению делают ANFIS-системы привлекательными для повышения эффективности управления и могут привести к созданию более интеллектуальных систем, что повысит производительность электроприводов.

### **Библиографический список**

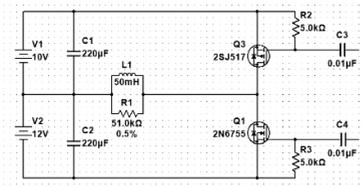
1. **Singh S.** Analysis and simulation of vector controlled PMSM drive using SVPWM inverter / Singh S., Tiwari A. // Conference: 2017 2nd International Conference for Convergence in Technology (I2CT). 2017. doi: 10.1109/I2CT.2017.8226221.

*И.М. Кореишкова, студент; Д.А. Дюжев, студент;  
рук. А.А. Коротков, к.т.н., доцент (ИГЭУ, Иваново)*

## РАЗРАБОТКА БАЛАНСИРА НАПРЯЖЕНИЯ ЯЧЕЕК АККУМУЛЯТОРА СЕРВИСНОГО РОБОТА-ГИДА

Студентами научно-технического общества «Вектор» ИГЭУ разработан сервисный робот-гид «Горди». В задачи робота входит сопровождение посетителей в зданиях университета и демонстрация презентационных материалов на массовых мероприятиях вуза [1]. Система питания робота состоит из трех последовательно соединённых аккумуляторных батарей (АКБ), ёмкости которых хватает на 3 часа автономной работы. После проведения испытаний робота был выявлен недостаток в работе системы заряда – ячейки АКБ разряжаются неравномерно.

Система питания робота представляет собой три ячейки АКБ, соединённые последовательно. В режиме зарядки – за счет работы коммутационных реле выполняются соединения ячеек в параллельную схему и заряд всех ячеек АКБ от сети одновременно через плату контроля напряжения. Рабочем режиме важно поддерживать одинаковый уровень заряда всех ячеек, т.к. неравномерное распределение заряда снижает эффективность использования и может привести к глубокому разряду или перезаряду отдельных ячеек и их выходу из строя [2]. Для обеспечения равномерного распределения заряда выполнена разработка активного балансира напряжения (БН), обеспечивающего контроль и выравнивание напряжения на отдельных ячейках АКБ. Выполнен подбор компонентов устройства и разработана схема, разведена



плата БН и выполнен монтаж балансира в систему питания робота. Проверка схемы выполнена методом математического моделирования в программе Multisim.

Монтаж БН в систему питания робота позволит увеличить время автономной работы, распределить нагрузку на ячейки АКБ, что в долгосрочной перспективе приведёт к снижению затрат на техническое обслуживание и замену элементов питания.

### Библиографический список

1. Дюжев, Д. А. Разработка системы движения сервисного робота-гида / Д. А. Дюжев, К. К. Ермаков // Электромехатроника и управление: Материалы конференции. ИГЭУ им. В.И. Ленина, 2024. – С. 6. – EDN CZNWCA.
2. Мельничук О. В., Фетисов В. С. Особенности заряда и разряда литиевых аккумуляторных батарей и современные технические средства управления этими процессами // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2016. №2. URL: <https://lyl.su/ZHW9> (дата обращения: 07.03.2025).



**СЕКЦИЯ 20**  
**ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА**  
**И МАГНИТОЖИДКОСТНЫЕ УСТРОЙСТВА**

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

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



А.С. Глумов, студ.; рук. А.И. Тихонов, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ г. Иваново)

## РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НЕТИПОВОЙ КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ АНАЛИЗА РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПРОЕКТИРУЕМОГО ДВИГАТЕЛЯ

В настоящее время наблюдается тенденция вытеснения экспериментальных методов исследования опытных образцов электрических машин численным экспериментом с использованием точных математических моделей на основе теории поля и цепей. Поставлена задача построения уточненных имитационных моделей АД и СД нетиповой конструкции, а также их адаптация для торцевого исполнения машин и внедрение в САПР и АСНИ для численного исследования машин во всех режимах работы, в том числе переходных.

Используемая методика изложена и апробирована в монографии [1]. Она основана на использовании серии численных расчетов магнитного поля машины при варьировании составляющих намагничивающих сил по осям координат в пределах, которые охватывают все возможные режимы работы машины. При этом

$$\left. \begin{aligned} F_{xj} &= \sum_{k=1}^{Ns_j} F_{xjk} = \sum_{k=1}^{Ns_j} i_j W_{kj} \cdot \cos(p\phi_{kj}) = i_j K_{xj} \\ F_{yj} &= \sum_{k=1}^{Ns_j} F_{yjk} = \sum_{k=1}^{Ns_j} i_j W_{kj} \cdot \sin(p\phi_{kj}) = i_j K_{yj} \end{aligned} \right\},$$

где  $i_j$  – ток в  $j$ -й обмотке;  $W_{kj}$  – число витков в  $k$ -й секции  $j$ -й обмотки;  $\phi_{kj}$  – угол наклона нормали  $k$ -й секции  $j$ -й обмотки,  $N_{s_j}$  – число секций  $j$ -й обмотки статора;  $p$  – число пар полюсов машины.

Нелинейная имитационная модель машины строится в среде MatLab Simulink. Особенность модели в том, что параметры матрицы индуктивностей являются функциями составляющих  $F_x$  и  $F_y$ , которые строятся по результатам серии численного расчета магнитного поля.

### Библиографический список

1. Булатов Л.Н., Тихонов А.И. Численные методы моделирования динамических режимов асинхронных машин / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2013. – 120 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 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 обмотки возбуждения на роторе.

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, которая располагается в немагнитных пазах ротора.

Задачей исследования является выбор метода определения параметров демпферной обмотки, выполнение полевых и аналитических расчетов. В качестве промежуточных результатов были проведены опыты однофазного питания двух фаз и однофазного питания трёх фаз для определения параметров демпферной обмотки. Опыты воспроизводят протекания токов обратной последовательности по продольной и поперечной осям ротора. Обмотка статора питается пониженным напряжением, измеряются фазное напряжение, ток, мощность. Также выполнен расчет процесса пуска двигателя с помощью параметрической модели на основе уравнений Парка – Горева, проведены полевые и инженерные расчеты несимметричных режимов работы двигателя.

Актуальными вопросами данного исследования являются моделирование переходных процессов, происходящих в синхронном реактивном двигателе и обработка результатов исследования.

### **Библиографический список**

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

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

*Ю.С. Сурага; П.Б. Менжинский; рук. А.Б. Менжинский к.т.н., доцент  
(ВА РБ, г. Минск)*

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

В настоящее время электрические машины постоянного тока (ЭМПТ) находят широкое применение в электромеханических системах различного назначения, промышленности, транспорте и робототехнике [1]. Достаточно широкое применение коллекторных ЭМПТ с постоянными магнитами обусловлено рядом их преимуществ [2]. В [3] для исследования ЭМПТ разработана структура программно-аппаратного комплекса (ПАК). Отличительной особенностью ПАК является модульная структура, позволяющая проводить исследования ЭМПТ в двигательном и генераторном режимах работы. Электромеханическая часть ПАК представляет собой совокупность исследуемой и нагрузочной ЭМПТ. Исследуемая электрическая машина (ЭМ) – двигатель постоянного тока (ДПТ), а нагрузочная ЭМ – генератор постоянного тока. Исследуемая и нагрузочная ЭМПТ механически соединены между собой с помощью муфты. Рассматриваемые режимы работы ЭМПТ сопровождаются переходными процессами (ПП), анализ которых весьма важен при исследовании таких ЭМ. Также, важной задачей, при исследовании ЭМПТ, является анализ магнитных потоков (МП) в магнитной системе (МС) исследуемой ЭМ. В связи с этим представляется актуальным доработать предложенный в [3] ПАК. Для чего разработаны: структурная схема и физическая модель ДПТ, при постоянном МП, на базе ПИД-регулятора с отрицательной обратной связью по частоте вращения вала, учитывающие влияние температуры на сопротивление обмотки якоря, позволяющие исследовать ПП в ЭМ; двумерная конечно-элементная модель (ДКЭМ) магнитного поля МС ЭМПТ, позволяющая с высокой степенью адекватности определять типовые МП в МС исследуемой ЭМ.

### **Библиографический список**

- 1. Хлопцов, А. С.** Совершенствование методики и средств диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла машин постоянного тока : дис. канд. техн. наук : 05.09.01 / А. С. Хлопцов – Омск, 2016. - 154 с. : ил.
- 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.
- 3. Структура программно-аппаратного комплекса для исследования электрических машин постоянного тока. Часть 1 / А. Б. Менжинский [и др.] // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2024. – Т. 69, № 3. – С. 225–232.**

*И.В. Новиков, асп.; рук. Ю.Б. Казаков, д.т.н., проф.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **СНИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ШУМА И ВИБРАЦИЙ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МАГНИТОМЯГКИХ МАТЕРИАЛОВ**

К асинхронным двигателям (АД) предъявляются высокие требования по уровню шума и виброактивности. Одним из способов снижения виброшумовых показателей АД является применение в их конструкции магнитомягких материалов. Магнитострикционная деформация магнитопровода АД определяется, в том числе, магнитной характеристикой электротехнической стали [1]. Магнитострикция обратно пропорционально содержанию кремния Si в стали. Специальная изотропная электротехническая сталь, содержащая 6 масс Si, имеет пренебрежимо малую магнитострикцию и обеспечивает сниженные уровни вибраций и шума АД.

Применение разных марок электротехнических сталей приводит к изменению размеров магнитопровода, которые уменьшаются при использовании электротехнической стали с высоким содержанием Si. Изменение размеров магнитопровода дополнительно изменяет виброшумовые характеристики АД. Выполнены расчёты и проведено сравнение шумов АД при использовании разных марок электротехнической стали.

Уровень звукового давления определялся как

$$L = 20 \cdot \lg \left( \frac{D_k}{2} |f_0| \cdot A \right) - L_{p2} - L_{p3} - 20 \cdot \lg(l_i \cdot 10^{-3} + 1) + 68.$$

Уровень звукового давления спектра магнитного шума снижается на 4 дБ или 5 % при допустимом уровне шума 77 дБ для двигателя RA160 [2] с 4 полюсами в случае использования стали с высоким содержанием кремния.

Таким образом электромагнитный шум АД можно частично снизить применением магнитомягких материалов с высоким содержанием кремния. В качестве недостатка следует отметить высокую цену такой стали.

### **Библиографический список**

1. Вибрации и шум электрических машин, трансформаторов и реакторов: учеб. пособие / В.Т. Медведев, В.Я. Геча, В.С. Малышев и др.; под ред. В.Т. Медведева. – М.: Издательство МЭИ, 2018. – 428 с.
2. Электронный ресурс: [eldin.ru/catalog-2024\\_03\\_05.pdf](http://eldin.ru/catalog-2024_03_05.pdf) (дата обращения: 10.02.2024).

*В.Г. Драбинович, студ.; рук. С. В. Пантелеев, к.т.н  
(ВАРБ, г. Минск)*

## **ОЦЕНКА ВИБРОШУМОВЫХ ПАРАМЕТРОВ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН**

Основной проблемой синхронных электрических машин с дробными зубцовыми обмотками (СЭМ с ДЗО) является существенная зависимость электромагнитной силы (ЭМС) от положения ротора, следствием чего является электромагнитная вибрация. Причина этого заключается в содержании широкого спектра высших гармоник индукции в магнитном поле, обусловленных конструкцией СЭМ с ДЗО. Поэтому решение задачи установления связей между конструктивными параметрами СЭМ с ДЗО и характеристиками ЭМС в СЭМ с ДЗО для последующего поиска технических решений упомянутой проблемы весьма актуально.

В результате математического моделирования установлен характерный для СЭМ с ДЗО гармонический состав индукции магнитного поля в воздушном зазоре. Кроме того, определена степень влияния на него геометрических параметров магнитной системы, схемы и параметров обмотки. Для анализа ЭМС в электрической машине применяется теория тензора напряжений Максвелла, посредством которой определены и систематизированы составляющие ЭМС доминирующие гармоники, природа их появления и их параметры. В результате анализа полученных результатов установлено, что конфигурация дробной зубцовой обмотки обуславливает появление гармоник ЭМС, в том числе и низкого порядка; из-за эффекта модуляции зубцами статора ЭМС высокого порядка может быть преобразована в ЭМС низкого порядка; для минимизации гармоник ЭМС низкого порядка необходимо внести изменения в методику оптимального проектирования СЭМ с ДЗО [1], в частности, скорректировать критерий выбора рациональных соотношений количества зубцов и полюсов, и критерий выбора рациональных герметических параметров магнитной системы.

Практическая значимость результатов исследования заключается в совершенствовании ранее разработанных методик электромагнитного расчета и оптимального проектировании СЭМ с ДЗО [1].

### **Библиографический список**

1. **Пантелеев, С. В.** Улучшение энергетических и массогабаритных показателей системы «синхронный электрический генератор с девятифазной дробной зубцовой обмоткой – активный выпрямитель напряжения»: дис. канд. техн. наук: 05.09.03 / С.В. Пантелеев. – Минск: БГАТУ, 2023. – 256 с.

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

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ЗАЗОРЕ МАГНИТОЖИДКОСТНОГО СЕПАРАТОРА

Современные программные комплексы для моделирования, такие как “Ansys” и “COMSOL Multiphysics”, давно применяются для решения инженерных задач, где требуется учитывать взаимное влияние нескольких физических явлений.

Проблема моделирования процессов в магнитожидкостных устройствах с помощью подобных программных комплексов заключается в сложности объединения электромагнитных и гидродинамических явлений.

Данная работа посвящена созданию модели зазора магнитожидкостного сепаратора, заполненного магнитной жидкостью в программном комплексе “COMSOL Multiphysics” с целью определения основных рабочих показателей.

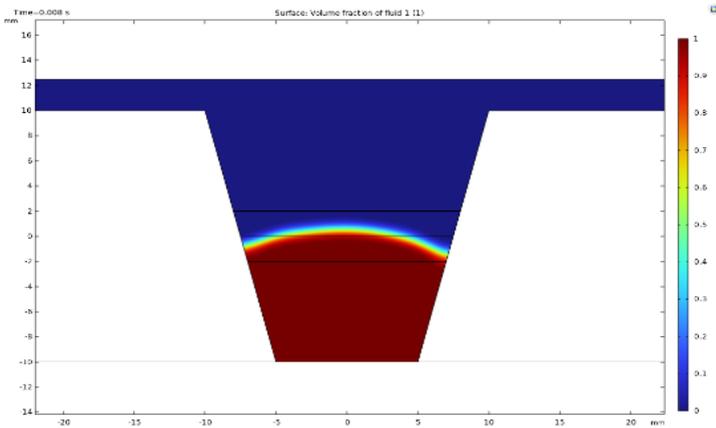


Рисунок 1 – Распределение магнитной жидкости в зазоре сепаратора при воздействии постоянного магнитного поля

### Библиографический список

1. Розенцвейг, Р. Феррогидродинамика: Пер. с англ. // М.: Мир, 1989. - 356 с.
2. Казаков, Ю.Б. Расчет силы, действующей на немагнитное тело в магнитной жидкости в присутствии неоднородного магнитного поля / Ю.Б. Казаков, Ю.И. Страдомский, В.А. Филиппов // Сборник научных трудов междуна. н.-т. конф. "Состояние и перспективы развития электротехнологии" - Иваново: ИГЭУ, 2011. Том 3. С. 158-161.

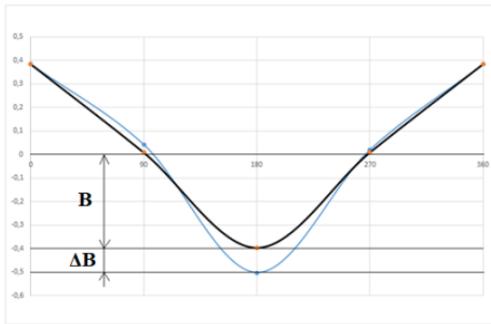
*И.А. Грачев, аспирант; рук. Н.А. Морозов, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## УСТАНОВЛЕНИЕ ЭКСЦЕНТРИСИТЕТА РОТОРА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПО КОЭФФИЦИЕНТУ СМЕЩЕНИЯ ПОЛЯ

Метод диагностики повреждений электрических машин на основе анализа распределения внешнего магнитного поля (ВМП) является многообещающим, так как не требует доступа внутрь машины [1]. В ИГЭУ были проведены исследования, посвященные диагностике электрических машин с использованием картины ВМП [2].

Экспериментальные данные продемонстрировали, что изменение в распределении ВМП позволяет обнаруживать эксцентриситет синхронных турбогенераторов. Для этого был создан специализированный трёхкоординатный датчик, который фиксирует компоненты магнитного поля. Задачей стало соотносить распределение ВМП с конкретными значениями эксцентриситета.

В этой связи можно использовать коэффициент смещения поля, представляющий собой отношение



разности индукции при наличии и отсутствии эксцентриситета к значению индукции при отсутствии эксцентриситета. Визуально это представлено на рисунке 1.

Анализ картины распределения ВМП позволяет не только установить повреждение обмотки возбуждения, но и выявить эксцен-

Рисунок 1 – Определение коэффициента смещения поля

триситет ротора.

### 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. Морозов, А.Н. Коэффициент несимметрии поля при повреждениях обмотки возбуждения неявнополюсной синхронной машины, Иваново, 2021. – Т. 3. Электротехника. С. 196-198.

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

## СИНХРОННЫЙ РЕАКТИВНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ALA-РОТОРОМ

Ротор современных СРД может выполняться на основе двух технологий: продольной шихтовки пакета ротора (ALA – Axially Laminated Anisotropic) и поперечной шихтовки пакета ротора с немагнитными барьерами (TLA – Transversally Laminated Anisotropic).

К настоящему времени для СРД с TLA-ротором уже разработана параметрическая модель, рассчитаны её параметры и исследованы некоторые режимы работы.

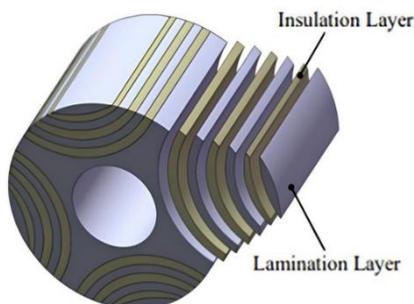


Рисунок 1 – ALA-РОТОР СРД

На основе имеющихся научных работ по данной тематике [1,2], в том числе и по СРД с TLA-ротором, будет проведена аналогичная исследовательская работа по СРД с ALA-ротором с использованием существующих параметрических моделей и расчетных сред, таких как Elcut и Ansys Maxwell.

Рассматриваемая тема может быть интересна в целях определения оптимальной конструкции ротора СРД и составления предварительной методики расчета для возможного последующего развития данного направления. Также интерес может обуславливаться повышенной энергоэффективностью СРД в сравнении с асинхронными двигателями.

### Библиографический список

1. Доржинкевич А.Ф., Моделирование электромеханических процессов в синхронном реактивном двигателе с TLA-ротором – Магистерская диссертация - И.:ИГЭУ Иваново 2023 – 52 с
2. Волков М.Н., Моделирование и исследование процессов в синхронном реактивном двигателе – Магистерская диссертация – И.:ИГЭУ Иваново 2019 – 80 с
3. Тихомиров О.И., Синхронные реактивные электродвигатели для создания энергоэффективных решений класса IE5 / О. И. Тихомиров // Автоматизация в промышленности. – 2022. – № 1. – 2

П.А. Лицов, студ.; рук. В.Н. Караулов, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЕРВОДВИГАТЕЛЕЙ

Серводвигатели применяются в областях, где требуется точное управление положением, скоростью и крутящим моментом. Они используются в различных отраслях, включая: промышленную автоматизацию, робототехнику и моделирование, энергетику, сельское хозяйство, автомобилестроение, медицинскую технику, авиацию и космос, бытовую электронику, оружейные системы.

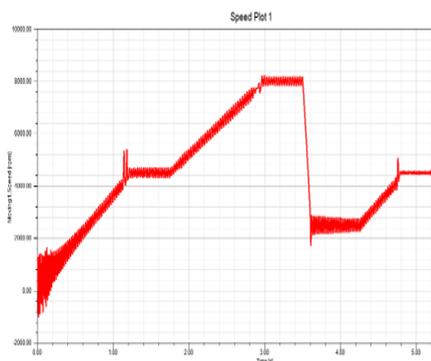


Рисунок 1 – График скорости вращения синхронного серводвигателя при частотном управлении

Основой моей бакалаврской работы было ознакомление с вышеуказанным типом электродвигателей, а конкретно с синхронным серводвигателем. В процессе были выявлены некоторые особенности в их проектировании, требования к характеристикам, а также некоторые способы управления ими. Будут представлены ключевые моменты по данной работе.

В расчетной среде Ansys Maxwell с использованием вышеуказанных результатов работы будет рассмотрена возможность исследования способов управления в условиях специальных режимов работы серводвигателей.

### 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. Лицов П.А. Проектирование синхронного серводвигателя 3,8 кВт, 4500 об/мин, 380 В) – ИГЭУ Иваново 2024

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

## **ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОБЩУЮ МЕХАНИЧЕСКУЮ НАГРУЗКУ**

В тяговых электромеханических трансмиссиях электротранспорта с использованием мотор-колес, ленточно-транспортных и некоторых других устройствах приводные асинхронные электродвигатели работают параллельно на общую механическую нагрузку. Параллельная работа нескольких электродвигателей повышает надежность установки, при низких механических нагрузках возможно отключение некоторых электродвигателей с экономией электроэнергии. Однако в случае различия двигателей, отличия их параметров механическая нагрузка может распределяться между двигателями неравномерно – одни двигатели нагружаются больше, чем другие. В предельных случаях некоторые двигатели могут переходить в генераторный или даже тормозной режим.

Целесообразна выработка условий эффективной параллельной работы электродвигателей на общую механическую нагрузку, оценка влияния различия номинальных мощностей и параметров электродвигателей на распределение нагрузки. Рассмотрена параллельная работа двух стандартных [1], но отличающихся в два раза по мощности, асинхронных двигателя. В расчетной подсистеме разработки асинхронных двигателей, реализованной в системе Mathcad на основании [2], рассчитаны параметры схем замещения электродвигателей. В подсистеме Matlab Simulink разработана имитационная схема двухдвигательной системы. Полученные результаты распределения механической нагрузки между двигателями далее планируются к сравнению с результатами с взаимосвязанных расчетов полевых моделей этих двигателей в системе Maxwell.

### **Библиографический список**

1. **Асинхронные** двигатели серии 4А: Справочник/ А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с., ил.
2. **Проектирование** электрических машин: учебник для вузов / под ред. И.П. Копылова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2011. – 767 с., ил.

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

## **ВЛИЯНИЕ РАДИАЛЬНОГО СМЕЩЕНИЯ ВАЛА НА РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТОЖИДКОСТНОГО ГЕРМЕТИЗАТОРА**

Как правило в любой механической системе с ростом наработки, в результате естественного износа, происходит отклонение величин размеров от размерных цепей, заложенных при проектировании.

В системах, использующих технологию магнитожидкостной герметизации (МЖГ) следствием износа, является тенденция к увеличению эксцентриситета герметизируемого зазора.

Если рассматривать применение МЖГ в паре с общепромышленным электродвигателем, как вариант перспективной модернизации последнего, встает вопрос совместимости предельных отклонений этих систем. Допустимый для двигателя эксцентриситет, обеспечивающий нормальную работу, из-за кратной разности размеров стандартных зазоров, также кратно влияет на удерживаемый МЖГ перепад давлений. Увеличение радиального смещения уплотняемого зазора приводит к уменьшению критического давления МЖГ. Вариантом опережающего воздействия предлагается учет эксцентриситета уплотняемого зазора и его увеличение в результате естественного износа на этапе проектирования МЖГ.

Исследование распределения магнитного поля системы с МЖ уплотнением в системах компьютерного моделирования необходимо выполнять в трехмерной постановке.

Полученные результаты говорят о том, что МЖГ остается работоспособным при эксцентриситете до 80% от величины рабочего зазора. Получены безразмерные зависимости для применения на этапе проектирования. В системах с неизбежной значительной несносностью следует прибегать к увеличению рабочего зазора МЖГ и использованию современных высококоэрцитивных магнитов.

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

### **Библиографический список**

**1. Нестеров С.А** Effect of Motor Shaft Eccentricity on the Performance of High-Speed Magnetic Fluid Sealer / Нестеров С.А., Бакланов В.Д. // PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE, Problems of the Regional Energetics. – 2024. – No. 1(61). – P. 26-33. – DOI 10.52254/1857-0070.2024.1-61.03.

А.А. Миронова, асп.; рук. С.А. Нестеров, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)

## ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ РОТОРА В СИНХРОННОМ РЕАКТИВНОМ ДВИГАТЕЛЕ

Исследовано влияния конструкции ротора синхронного реактивного двигателя РД-180-500 предназначенного для создания крутящего момента на приводе механизма рабочего органа аварийной защиты (РО АЗ), удержания кассеты аварийной защиты в подвешенном состоянии и сброса её в активную зону для быстрого снижения нейтронной мощности реактора в аварийных ситуациях реакторной установки. Двигатель рассчитан на реверсивную работу с регулированием скорости вращения.

Для каждой конструкции должны соблюдаться следующие условия:

- Сердечник активной стали двигателя с обмоткой должен быть герметизирован от проникновения воды с помощью гильзы из нержавеющей стали, которая приваривается к статору аргонодуговой сваркой.
- Корпус двигателя сварной и выполнен из нержавеющей стали
- Вал внутри полый, чтобы можно было разместить штанги для удержания кассеты РО АЗ.

Ротор синхронно-реактивного двигателя рассматривается по двум технологиям: поперечно-расслоенный ротор с каналами и с явно выраженными полюсами не используя шихтовку (рисунок 1). Каждая модель рассматривается как с применением гильзы в воздушном зазоре, так и без нее.

В процессе исследования проведён сравнительный анализ влияния различных конструкций ротора на ток короткого замыкания, кратность максимального момента, КПД, получены скоростных характеристики и предложены способы увеличения диапазона регулирования выше от номинальной частоты вращения.

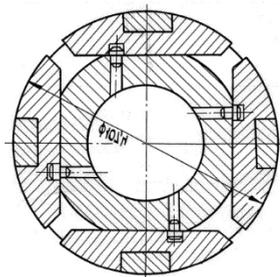


Рисунок 1 – Ротор РД-180-500 с явно выраженными полюсами.

### Библиографический список

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

**СЕКЦИЯ 21**  
**МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ И**  
**МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ**  
**ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ**  
**СИСТЕМЫ**

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

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



*О.С. Егоров, студ; рук. С.О. Кожевников, к.т.н., уч. доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ПОДКЛЮЧЕНИЕ TFT ДИСПЛЕЯ НА БАЗЕ ST7796S К МИКРОКОНТРОЛЛЕРУ ESP - 8266**

Современные проекты автоматизированными системами управления различными технологическими процессами и регистрацией данных тесно связано с выводом служебной информации на дисплей. Управление параметрами технологического процесса также удобно осуществлять с экрана сенсорного дисплея, за счет применения специального интерфейса. Промышленностью выпускается множество дисплеев, оснащенных сенсорным интерфейсом и основанными на чипах: Pi9341, ST7735, S6D02A1 и других [1]. Основной проблемой применения таких дисплеев заключается в отсутствии необходимых библиотек для различных отладочных плат, например ESP - 8266. При подключении дисплея на базе ST7796S возникают две задачи, требующие решения: первая это отсутствие библиотек для вывода корректного изображения, а вторая – подключение сенсорного интерфейса. Поиск и анализ библиотек показал, что в распространенной на сегодня библиотеке Adafruit, отсутствует дисплей на базе ST7796S [2].

Первая задача решилась модернизацией существующей библиотеки, но под другую отладочную плату – Arduino UNO.

Вторая задача заключается в подключении сенсора, которая и является наиболее трудоемкой. Микроконтроллер и сенсорный интерфейс связаны по протоколу SPI. Существующая библиотека для большинства сенсорных интерфейсов XPT2046\_Touchscreen, которая рассчитана на отладочную плату Arduino UNO [3]. Чтобы сенсорная панель корректно функционировала требуется объект SPIClass в котором содержится вся необходимая информация о портах MOSI, MISO, CS, SK. Но, с микроконтроллерами семейства ESP данная библиотека при попытке загрузки во Flash-память выдаёт ошибку. Решение второй задачи было достигнуто за счет написания и калибровки библиотеки SPI под микроконтроллер ESP – 8266.

Таким образом, были решены задачи вывода изображения и управления с TFT экрана, оснащенного сенсорным интерфейсом.

### **Библиографический список**

1. Adafruit-GFX-Library: [сайт] URL: <https://github.com/adafruit/Adafruit-GFX-Library> (дата обращения 11.02.2025).
2. Техническое описание ST7796S [сайт] URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1775165/SITRONIX/ST7796S.html> (дата обращения 11.02.2025).
3. Arduino: [сайт] URL: <https://www.arduino.cc/> (дата обращения 11.02.2025).

*М.Ю. Красильников, студ., К.Э. Зайцев, студ.;*  
*рук. С.О. Кожеевников, к.т.н., доц. (ИГЭУ, г. Иваново)*  
**РАЗРАБОТКА ДИНАМИЧЕСКИ РАСШИРЯЕМОГО  
КОНЕЧНОГО АВТОМАТА НА БАЗЕ STM32**

Конечные автоматы широко используются в системах управления, однако традиционные решения ограничены фиксированной структурой состояний и переходов. Разработка динамически расширяемого конечного автомата (РКА) позволяет преодолеть эти ограничения, обеспечивая гибкость и масштабируемость системы.

В работе представлен алгоритм расширяемого конечного автомата (РКА) для управления двигателем постоянного тока (ДПТ) на базе микроконтроллера STM32. Алгоритм позволяет динамически изменять структуру конечного автомата без необходимости перезаписи прошивки, что расширяет возможности адаптации системы к изменяющимся условиям эксплуатации.

Разработанный алгоритм реализован на языке C с использованием среды разработки STM32CubeIDE. В основе метода лежит хранение состояний и переходов в динамических структурах данных (например, списках или массивах), что позволяет добавлять новые состояния и переходы в реальном времени. Обработчик событий анализирует входные сигналы, изменяет текущее состояние автомата и инициирует соответствующие действия.

Предложенный алгоритм расширяемого конечного автомата обеспечивает гибкость и адаптивность систем управления ДПТ на базе МК STM32. Дальнейшие исследования будут направлены на оптимизацию работы с памятью и разработку графического интерфейса для конфигурирования автомата.

#### **Библиографический список**

- 1. Кармин Новилло.** Освоение STM32. Пошаговое руководство. пер. с англ. Карасев Д. 2018. – 826 с
- 2. Кузнецов О.П.** Дискретная математика для инженеров. 3-е изд., перераб. и доп. – СПб: Издательство «Лань», 2004. – 400 с.
- 2. Description of STM32F4 HAL and low-layer drivers - User manual**  
**3.** <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus/documentation.html>

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

## **РАЗРАБОТКА МЕТОДА КОМПЕНСАЦИИ ОШИБОК РЕВЕРСА ПРИВОДА ПОДАЧИ МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО СТАНКА**

В настоящее время на металлорежущих станках и обрабатывающих центрах производятся детали для автомобильной, аэрокосмической, атомной, медицинской и других отраслей. Постоянно растущие требования к качеству продукции требуют обеспечения высокой точности при обработке деталей на станках, но наличие трения и люфта в механической передаче могут привести к появлению значительных отклонений от заданной траектории движения. Наибольшим образом это проявляется в моменты изменения направления вращения двигателя.

Целью работы является разработка метода компенсации ошибок, возникающих при реверсе. В качестве системы управления приводами подачи используется векторная система управления с подчинённым регулированием координат. Такая система управления позволяет обеспечить высокую точность и быстродействие, а различные варианты построения регуляторов позволяют использовать упреждающие связи, осуществляющие форсирование задания для уменьшения ошибок слежения [1].

Исследован метод компенсации, заключающийся в формировании дополнительного задания по скорости определенной формы [2, 3]. Данный метод реализован на контроллере движения IntServo [4]. При этом в каждом отдельном случае дополнительное задание может принимать различную форму и величину в зависимости от характеристик механической передачи станка. В сервисном ПО ServoIDE разработан инструмент, позволяющий осуществлять настройку параметров компенсации.

### **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. Power** PMAC User's Manual, 050-PRPMAC-0U0. Delta Tau Data Systems, Inc, April 11, 2016
- 3. FANUC AC SERVO MOTOR  $\alpha$ -B/ $\alpha$ i series FANUC AC SERVO MOTOR  $\beta$ i-B/ $\beta$ i series FANUC LINEAR MOTOR LiS-B/LiS series FANUC DD MOTOR DiS-B/DiS series PARAMETER MANUAL** [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.cnepros.com/media/pdf/Old\\_Service\\_Files/Fanuc%20Info/18i%20-%2016i/B-65270EN\\_06.pdf](https://www.cnepros.com/media/pdf/Old_Service_Files/Fanuc%20Info/18i%20-%2016i/B-65270EN_06.pdf)FANUC CORPORATION, 2001
- 4.** <http://inelsy.com/home/inelsy/inelsy.com/docs/>

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

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ В ALTUM DESIGNER**

В настоящее время активно развивается электронная промышленность. База компонентов становится всё более миниатюрной и требовательной к конструированию печатных узлов. Современные решения на рынке в области электроники, в первую очередь, опираются на компактность. Все эти факторы приводят к большому затрату времени на разработку устройства. Необходимо дополнительно затрачивать время на проработку концепции и просчёт наиболее оптимального решения. Помимо этого, множество устройств следуют концепции мехатронных устройств, что приводит к синергетическому объединению узлов точной механики с электронными компонентами. Благодаря современным системам ECAD, например, Altium Designer, многие аспекты удаётся оптимизировать и уменьшить время на создание электронного устройства.

Будут рассмотрены следующие методы по оптимизации процесса проектирования п/п:

- 1) Оптимизация библиотеки электронных компонентов посредством введения строковых переменных
- 2) Использование сквозного проектирования ECAD-MCAD
- 3) Использование вариантов электронного устройства
- 4) Автоматизированное преобразование УГО в формате ЕСКД с помощью инструментария Symbol Wizard
- 5) Прямой контроль вскрытия маски и трафаретных апертур на посадочном месте для снижения брака при производстве.

С помощью использования данных методов понижается общее время на разработку устройства, повышается уровень взаимодействия между командой разработчиков и общая эффективность.

### Библиографический список

1. **Документация** Altium Designer: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.altium.com/ru/documentation>. (Дата обращения: 10.02.2025)

*А.Е. Игнатьева, студ.; Д.В. Кириллов, студ.; В.П. Ключкина, студ.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТОЛЩИНЫ ПАССИВИРУЮЩЕГО СЛОЯ МИКРОСХЕМ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ТЯЖЕЛЫМИ ЗАРЯЖЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ СРЕДСТВ**

Для оценки стойкости микросхем, применяемых в космической аппаратуре, проводят моделирующие испытания. Для достоверности результатов испытаний необходимо оценить влияние пассивирующего слоя интегральных микросхем на линейные потери энергии тяжелых заряженных частиц при их прохождении сквозь пассивирующий слой микросхемы, который состоит из оксида кремния.

Для решения этой задачи было проведено моделирование эксперимента, которое заключалось в облучении микросхем с разной толщиной пассивирующего слоя (5 мкм и 12 мкм) пучком тяжелых заряженных частиц  $\text{Xe}^{132}$  с энергией 522 МэВ, попадающим на микросхему с пассивирующим слоем. Для расчета использовалось программное обеспечение GEANT4.

Согласно расчетным данным, максимальное падение энергии частиц составляет более 45% (от 522 до 283 МэВ). Энергия ионов сильно снизилась, линейные потери энергии снизились не значительно (от 69 до 65 МэВ/(г/см<sup>2</sup>)). Таким образом, толщина пассивирующего слоя не оказывает большого влияния на результаты испытаний.

### **Библиографический список**

1. К.И. Таперо, В.Н. Улимов, А.М. Членов. **Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения.** – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 304 с. : ил.
2. **Радиационная стойкость изделий ЭКБ:** Научное издание / Под ред. д-ра техн. наук, проф. А.И. Чумакова М.: НИЯУ МИФИ, 2015. – 512 с.

К.А. Колпаков, студ., рук. С.О. Кожевников, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ ТРЕНИРОВКИ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ИНДИКАТОРОВ

В настоящее время широкое применение получили часы на ГРИ ИН-12, ИН-14 и ИН-18 с применением микроконтроллеров и часов реального времени. Также существуют модели с синхронизацией времени по Wi-Fi и GPS. Для управления индикаторами применяется динамическая индикация. Коммутация необходимой цифры выполняется специально разработанной для ГРИ высоковольтный дешифратор К155ИД1 [2].

На рис. 1 приведена принципиальная схема устройства для восстановления и тренировки отравленных катодов ГРИ.

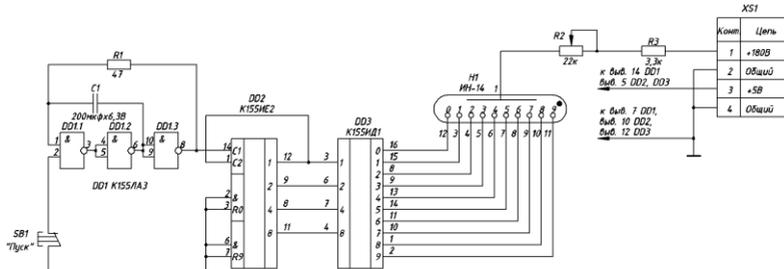


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема устройства

Устройство выполнено на трех ИМС и функционально состоит из следующих частей: генератора, счетчика и дешифратора. Генератор выполнен на ИМС К155ИА3 и частото задающей RC-цепочки. Счетчик выполнен на ИМС К155ИЕ2, а коммутацию катодов осуществляет дешифратор К155ИД1. Нажатие на кнопку SB1 приводит к запуску генератора и на индикаторе Н1 осуществляется перебор цифр от 0 до 9. Вращением ручки переменного резистора R2 подбирается ток в анодной цепи ГРИ. Собранное устройство позволит "оживить" отравленные катоды ГРИ.

### Библиографический список

1. Часы на ГРИ и Arduino v2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://alexgyver.ru/nixieclock\\_v2/](https://alexgyver.ru/nixieclock_v2/) свободный – (09.02.2025).
2. Бирюков, С.А. Цифровые устройства на интегральных микросхемах. - М.: Радио и связь, 1987. - 152 с.

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

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Вентильные двигатели, они же бесщеточные двигатели постоянного тока, пользуются большой популярностью в промышленности и в быту. Они обеспечивают высокую эффективность и требуют меньших затрат на техническое обслуживание, поэтому во многих областях они заменили обычные двигатели постоянного тока с щеточным приводом.

С помощью математической модели (рисунок 1) можно исследовать характеристики вентильного двигателя. Также модель можно использовать как подсистему для моделирования более сложных проектов.

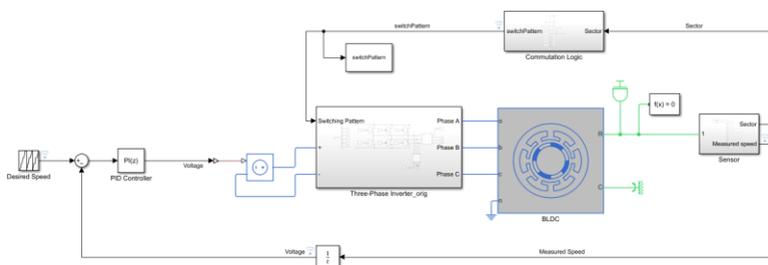


Рисунок 1 – Модель вентильного двигателя в среде Matlab

Математическая модель включает в себя следующие подсистемы: инвертор, датчик положения, блок коммутационной логики. Инвертор необходим для преобразования постоянного тока в трехфазный, поступающий на обмотки двигателя. Датчик положения имитирует работу трех датчиков Холла, которые обычно располагают внутри двигателя. Они передают информацию о том в каком из шести секторов находится ротор. Данные о положении ротора приходят на блок коммутационной логики. Он определяет какие ключи инвертора нужно открыть в данный момент, чтобы обеспечить непрерывное вращение двигателя.

### Библиографический список

1. Introduction to Brushless DC Motor Control [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/campaigns/offers/next/introduction-to-brushless-dc-motor-control.html>
2. Training Project on Implementing a BLDC Motor Controller with Simscape Electrical and Stateflow [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/icub-tech-iiit/training-matlab-bldc-controller/blob/main/README.md>

*М.А.Беляев, Е.Н. Лукьянова, студ.; рук. А.И. Терехов, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ЭЛЕКТРОННЫЙ ЗАМОК С ДАТЧИКОМ ОТПЕЧАТКА ПАЛЬЦА**

Задача придания устройствам охраны новых функций идентификации в настоящее время достаточно актуальна. После анализа современных технических решений, защищенных патентами на полезную модель [1, 2], предлагается оснастить существующий замок возможностями съема и анализа информации о рисунке папиллярных узоров датчиком, информация с которого сравнивается с большим количеством хранимых в памяти микроконтроллера ранее снятых отпечатков. В состав устройства входят плата Arduino UNO, датчик отпечатка пальца, электромагнитный замок, силовой ключ, LCD-дисплей со встроенным модулем I<sup>2</sup>C, кнопки, светодиоды, излучатели звуковых сигналов и другие периферийные элементы, позволяющие значительно расширить функционал устройства.

Управляющая программа написана и отлажена в среде Arduino IDE с привлечением возможностей библиотек.

### **Библиографический список**

**1. Патент** № 226122 Российская Федерация, МПК E05B 47/00, Электронный дверной замок , заявка 2023123911, заявл. 15.09.2023, опубл. 21.05.2024 /Заявитель ЗАО «Стройресурс» 4 с.: ил. //ФИПС, <https://fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=31dc2944dcc5d-e03b8f4b86abac022cf> Режим доступа, свободный. (Дата обращения: 18.02.2025 г.)/

**2. Патент** № 209980 Российская Федерация, МПК E05B 47/00, Полуавтоматический Электронный дверной замок с датчиком отпечатка пальца , заявка 2021132996, заявл. 12.11.2021, опубл. 24.03.2022 / Кузнецов Е.А. 4 с.: ил. //ФИПС, <https://fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=9a28fe8f8a44e-2ff9297dd3179a0a928> Режим доступа, свободный. (Дата обращения: 18.02.2025 г.)/

*А.С. Павловская, Смирнов М.А., студ.; рук. А.И. Терехов, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ АППАРАТОМ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КИСЛОРОДНЫХ КОКТЕЙЛЕЙ**

При изготовлении кислородных коктейлей система автоматического управления осуществляет анализ информации, передаваемой от технологических датчиков, формирование сигналов на исполнительные механизмы, проверку правильности выполнения команд. Для разработки аппаратно-программных решений был выбран вариант технологической установки [1,2], в составе которой можно выделить следующие исполнительные элементы:

- электродвигатель смесителя;
- дозатор смеси;
- электромагнитные клапаны;
- индикаторная панель.

Информация о состоянии объекта управления передается на управляющее устройство со следующих датчиков:

- датчики уровня заполнения дозирующей емкости и емкостей компонентов;
- датчик давления кислородного баллона;
- клавиатура;
- аварийные датчики.

Функции управления возложены на микроконтроллер ATmega328P, являющийся ядром платформы разработки электронных прототипов и макетов Arduino UNO R3. Управляющая программа написана и отлажена в среде Arduino IDE с привлечением возможностей библиотек.

### **Библиографический список**

**1. Патент** № 98835 Российская Федерация, МПК G07F 13/00, Автомат по приготовлению кислородного коктейля, заявка 2010125513, заявл. 22.06.2010, опубл. 27.12.2010 /Заявитель Лёза В.В., Автор Лёза В.В 4 с.: ил. //ФИПС, <https://fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=d207c5f1f438539243abf7f0dab298ec> Режим доступа, свободный. (Дата обращения: 18.02.2025 г.)/

**2. Патент** № 106088 Российская Федерация, МПК A47O 43/042, Настольный миксер для приготовления кислородного коктейля, заявка 2011111128, заявл. 24.03.2011, опубл. 10.07.2011 / Корденков М.В.. 4 с.: ил. //ФИПС, <https://fips.ru/iiss/document.xhtml?faces-redirect=true&id=83a95e48b0cafeda4c79cfdb740fac40> Режим доступа, свободный. (Дата обращения: 18.02.2025 г.)/

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

## **ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ШУНТА**

В состав практически любого электронного счётчика входит одна или несколько специализированных вычислительных микросхем, выполняющие основные функции по преобразованию и измерению. На вход такой микросхемы поступает информация о напряжении и силе тока с соответствующих датчиков в аналоговом виде. Внутри микросхемы данная информация оцифровывается и преобразуется определённым образом. В результате, на выходе микросхемы формируются импульсные сигналы, частота которых пропорциональна текущей потребляемой мощности нагрузки, подключенной к счётчику. Импульсы поступают в микроконтроллер и отображаются на ЖК дисплее [1].

Одним из важных элементов измерения потребленной энергии является аналоговый датчик. Есть несколько альтернативных вариантов датчиков тока: трансформатор тока, шунт. Шунты измеряют ток по падению напряжения на своем сопротивлении, тогда как трансформаторы тока используют индукцию для создания пропорционального тока на вторичной обмотке. Шунты могут обеспечивать высокую точность при низких токах, но их точность может снижаться при высоких токах из-за нагрева. Трансформаторы тока более устойчивы к высоким токам, но могут быть менее точными на низких уровнях. Шунты компактнее и дешевле трансформаторов тока, что делает их более удобными для интеграции в малогабаритные устройства. [2].

Основными параметрами шунта являются электрическое сопротивление. Сопротивление шунта вычисляется по формуле [3]

$$R = \rho \cdot L / S, \quad (1)$$

где  $\rho = 435 \cdot 10^{-6}$  Ом·мм<sup>2</sup> / мм; L – длина шунта, мм; S – поперечное сечение в мм<sup>2</sup>

Для выбора оптимальной конструкции шунта были выполнены экспериментальные исследования на нагрев с использованием тепловизора марки «Guide Sensmart T120V». В эксперименте использовались марки разных производителей.

### **Библиографический список**

1. Оборудование для учета электроэнергии. Группа компаний ARGO [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://argoivanovo.ru/oborudovanie/> (Дата обращения: 20.02.2025 г.).
2. Обзор и устройство современных счетчиков [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/articles/421653/> (Дата обращения: 20.02.2025 г.).
3. Тараканов, В.П. Информационно-измерительная техника и электроника. Электрические измерения в системах электроснабжения : учеб.-метод. пособие / В.П. Тараканов, М.С. Макеев. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2013. – 88 с.

*В.М. Васильев, студ.; рук. В.В. Аполонский, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ЗАДАЧАХ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Идентификация параметров объектов управления (ОУ) заключается в процессе вычисления значений параметров математической модели объекта на основе наблюдаемых данных. Однако традиционные методы идентификации часто сталкиваются с проблемами, связанными с зашумленностью сигнала, нелинейностью реальных объектов [1].

Одним из перспективных инструментов для решения задачи идентификации параметров является использование искусственных нейронных сетей (ИНС). ИНС обладают высокой гибкостью, могут эффективно работать с неполными или зашумленными данными и способны моделировать нелинейные зависимости. Это позволяет значительно улучшить процесс идентификации параметров в системах с изменяющимися параметрами или условиями эксплуатации [2].

Несмотря на хорошие перспективы ИНС, существует ряд проблем, таких как необходимость в большом количестве обучающих данных, риск переобучения сети и высокие вычислительные затраты. Для улучшения этих аспектов исследуются методы регуляризации, использование гибридных моделей и развитие вычислительных технологий [2].

Идентификация параметров объектов управления с помощью искусственных нейронных сетей представляет собой перспективное направление в автоматизации технологических процессов. Это позволяет повысить точность, гибкость и устойчивость систем управления в условиях изменения внешних факторов [2].

### **Библиографический список**

1. Семенов А. Д., Артамонов Д. В., Брюхачев А. В. Идентификация объектов управления: Учебн. пособие. - Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2003. - С. 21.
2. Шумихин А.Г., Бояршинова А.С. Параметрическая идентификация управляемого объекта в режиме его эксплуатации с применением технологии нейронных сетей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электро-техника, информационные технологии, системы управления. 2018. № 26. - С. 29.



**СЕКЦИЯ 22**  
**ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

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

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



*А.В. Романов, А.С. Абахтимова, студ.;  
рук. И.И. Ведерникова, к.т.н., доц. (ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ВЛИЯНИЕ ПЛЕНКООБРАЗУЮЩИХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ДЕТАЛЕЙ**

Основной способ смазки червячного зацепления – окунание червяка или колеса в масляную ванну картера редуктора. Масляная ванна должна иметь достаточную ёмкость во избежание быстрого старения масла и перемещения продуктов износа и осадков в зацепление и опоры валов. В быстроходных червячных редукторах большой мощности применяют циркуляционную смазку. В ходе эксперимента было получено распределение частот колебаний вращающего момента быстроходного вала по доле в общем спектре колебаний при использовании синтетического, минерального и минерального с присадкой масел.

В результате проведенных экспериментов на износостойкость редукторов типа 5ЧР-80 была выявлена закономерность, которая является достаточно характерной для случаев использования пленкообразующих смазочных материалов. Подобная зависимость представляет собой параболу со смещенным относительно начала координат минимумом, причем величина смещения по оси давления ( $p$ ) указывает на область давления  $P_0$ , в окрестностях которого пленкообразование проходит критическое значение давления, выше которого по мере роста давления процесс пленкообразования оказывается все более затрудненным.

Был проведен эксперимент по измерению КПД червячной передачи, в ходе которого было выявлено, что барботажные потери мощности и потери в манжетах (они не учитываются теоретически) снижают КПД по сравнению с теоретическим на 5-7%. Потерь мощности в подшипниках можно избежать, путем применения подшипников закрытого исполнения. Учитывая вышесказанное, можно сделать вывод, что общие потери мощности передачи в основном зависят от потерь мощности в результате трения в зацеплении. Исходя из графиков распределения частот колебаний вращающего момента быстроходного вала по доле в общем спектре колебаний, доля мощности, приходящаяся на колебания на доминирующей частоте, составляет порядка 80 % от общих потерь мощности на колебания.

*И.Ч. Муртазина, П.И. Синопеева, студ.;  
рук. И.И. Ведерникова, к.т.н., доц. (ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ПРИМЕНЕНИЕ СОТС НА ОПЕРАЦИЯХ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ**

При обработке различных материалов в процессе резания инструмент быстро изнашивается. Для улучшения условий процесса резки и увеличения срока службы режущего инструмента используются смазочно-охлаждающие жидкости. Возможность повышения производительности механической обработки и улучшения качества обработанных деталей во многом зависит от состава и техники применения смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС), от степени их воздействия на физические, физико-механические и механо-химические процессы, протекающие при обработке заготовок лезвийными и абразивными инструментами.

Использование СОЖ обычно приводит к экономии инструментов, становится легче соблюдать жесткие допуски и сохранять свойства поверхности заготовки без повреждений. Существуют различные преимущества применения СОЖ, такие как увеличение срока службы инструмента, сокращение времени обработки и улучшение качества поверхности. Однако есть и недостатки СОЖ, такие как высокие затраты на хранение, подготовку, фильтрацию и переработку, загрязнение окружающей среды. Из-за проблем с окружающей средой и здоровьем были найдены некоторые альтернативы для минимизации расхода СОЖ при механической обработке. В процессах механической обработки были предложены различные методы, такие как нанесение распылением, сухая обработка и внутреннее охлаждение. Однако существуют также ситуации, когда необходимо использовать СОЖ, например, при изготовлении зубчатых колес, протяжке и хонинговании.

Применение СОЖ в области машиностроения имеет давнюю историю и играет жизненно важную роль в эффективности обработки и качестве поверхности деталей. Среди них на СОЖ на водной основе приходится более 90% потребления СОЖ. Однако длительная переработка СОЖ на водной основе может легко привести к износу, а размножение бактерий может привести к выходу из строя СОЖ, увеличению производственных затрат и даже поставить под угрозу здоровье рабочих.

*И.Ч. Муртазина, К.Е. Попов, студ.;  
рук. И.И. Ведерникова, к.т.н., доц. (ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТОЧНОСТИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

Форма и точность поверхности при токарной обработке играют важную роль в обеспечении качества и надёжности изделий. От этих параметров зависит не только внешний вид детали, но и её функциональные характеристики, такие как прочность, износостойкость, герметичность и другие. В работе разработан метод анализа с помощью оценки вибросигнала от инструмента с помощью мощности и корреляционной энтропии К. По полученным графикам зависимостей был сделан вывод, что они внешне соответствуют классической форме кривой износа.

Для простых поверхностей достаточно вычислить силу резания по простым формулам, не используя приборов для отслеживания сигналов. При обработке изделий на станках с ЧПУ в их системах уже внедрены системы для автоматического отслеживания точности обработки. Для определений параметров точности изделия разработано большое множество методов, экспериментальных установок и моделей процесса резания. Все эти способы желательно объединить в один для точного понимания процессов, возникающих при резании. В современных реалиях можно воспользоваться помощью нейросистем для прогнозирования результатов.

Для решения этой проблемы необходимо использовать современные методы и инструменты для измерения и анализа вибраций, а также применять различные способы их снижения.

Это может включать в себя оптимизацию режимов резания, использование виброгасящих приспособлений и применение систем числового программного управления (CNC) с функциями контроля и коррекции вибраций. Выбор конкретных методов и инструментов зависит от специфики производственного процесса, типа обрабатываемого материала и требований к качеству продукции.

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

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРОВЕРКИ И РЕГЕНЕРАЦИИ КАТАЛИЗАТОРА РЕКОМБИНАТОРОВ ВОДОРОДА**

Пассивные каталитические рекомбинаторы водорода предназначены для беспламенного сжигания (рекомбинации) водорода в герметичных помещениях АЭС, а также в помещениях защитных оболочек реакторных установок АЭС малой мощности, атомных судов и плавучих сооружений при авариях, включая послеаварийный период.

Для обеспечения герметичности установки и соблюдения конструкторской документации была поставлена задача разработать новый разъем для подключения гелиевого течейскаателя.

Пороговая чувствительность течейскаателей характеризуется минимальным потоком пробного вещества, который течейскаатель может зарегистрировать. Пороговая чувствительность гелиевых течейскаателей должна быть не менее  $1,3 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3 \cdot \text{Па/с}$  ( $1 \cdot 10^{-6} \text{ л} \cdot \text{мм рт. ст./с}$ ). Пороговая чувствительность способа контроля характеризуется минимальным потоком или количеством пробного вещества, который фиксируется в схеме проведения контроля.

Если пороговая чувствительность способа контроля ниже указанных значений, то изделие или партия изделий должны подвергаться повторному контролю.

Признаком наличия сквозного дефекта является увеличение показаний прибора над средними фоновыми показаниями на величину, равную разности максимального и минимального значений фона в схеме испытаний. Эта величина не должна превосходить 50 мВ для всех способов контроля (кроме способа щупа) и 100 мВ для способа щупа.

На основе анализа было принято решение перенести разъем для подключения течейскаателя в верхнюю часть установки. Так же было принято решение о замене одного из угловых фитингов установки на т-образный (один из выходов которого и будет новым разъемом) с заглушкой.

Для удобства монтажа течейскаателя и датчика давления был проведен анализ и было принято решение об установке на т-образный фитинг несъемного переходника, подходящего для обоих устройств.

*А.А. Каприльянц, С.В. Гориков, студ.;  
рук. И.И. Ведерникова, к.т.н., доц. (ИГЭУ, г. Иваново)*  
**ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИЙ ГИБКИ**

В процессе гибки металл подвергается одновременному воздействию растягивающих и сжимающих усилий. На наружной стороне детали в месте изгиба волокна металла растягиваются, и длина их увеличивается; на внутренней же, наоборот, волокна сжимаются, и длина их укорачивается. И только нейтральный слой, или, как принято называть, нейтральная линия, в момент сгиба, полагают, не испытывает ни сжатия, ни растяжения, и поэтому длина нейтральной линии после изгиба детали не изменяется. При гибке металла приходится преодолевать силы упругости заготовки из металла.

Отверстия и пазы в непосредственной близости к линиигиба часто деформируются. Их следует располагать на расстоянии не менее 2-3 толщин металла от начала радиуса изгиба до края отверстия. Но для заказчика было критично менять расположения отверстий, либо менять габарит. В результате конструктор решил добавить радиальные прорезы вокруг отверстия для уменьшения напряжений при гибке. Деталь «Уголок» изготавливается из стали 08Х13 ГОСТ 5632-2014. Деталь изготавливается из листовой заготовки толщиной  $S=1$  мм.

Радиусы гибки у данной детали больше, чем минимально допустимые радиусагиба листовых деталей. Расположение линиигибки при штамповке данного материала безразлично (вдоль или поперек линии прокатки), т.к.  $r>S$ . Наименьшая высота отгибаемой полки в 20 раз превосходит толщину детали, т.е.  $h\geq S$ , что удовлетворяет требованиям к конструкции изогнутых листовых деталей. Из этого следует, что данная деталь «скоба» является технологичной и может быть изготовлена операцией «гибка». Для определения правильности размеров были проведены расчеты заготовки теоретическим путем.

Определение размеров заготовки (развертки) для деталей, изготавливаемых гибкой, производится по нейтральному слою, длина которого до и после деформации остается неизменной. Для тонких материалов ( $S<2$  мм) при расчетах условно принимается, что нейтральным слоем проходит посередине сечения заготовки.

При проведении всех расчетов стало очевидно, что принятые усилия при гибке не превышают допустимых значений.

*А.А. Каприльянци, С.В. Гориков, студ.;  
рук. И.И. Ведерникова, к.т.н., доц. (ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛА**

Одной из проблем, которая возникает в процессе пластической деформации металла, является «утягивание отверстий» при гибке из-за образования высоких напряжений.

Для наших расчётов выберем статическое исследование, поскольку расчёт проводится продолжительное время, статическое исследование является более простым и проходит по допущению линейности. Спроектируем приближенные пуансон и матрицу, подставим исследуемую деталь и проведем расчёт. Создание сетки – очень важный этап в анализе конструкций. Автоматический создатель сетки в программе создает сетку на основе глобального размера элемента, допуска и характеристик локального управления сеткой. Управление сеткой позволяет задать разные размеры элемента для компонентов, граней, кромок и вершин.

Уже при составлении сетки видно, что напряжения концентрируются не только в месте сгиба, но и около самого отверстия.

Теория утверждает, что пластичный материал начинает повреждаться в местах, где напряжение по Мизесу становится равным предельному напряжению. В большинстве случаев, предел текучести используется в качестве предельного напряжения. Однако программа позволяет использовать предельное растяжение или задавать свое собственное предельное напряжение.

На основании этого теста видно, что при гибке напряжения неравномерно распределяются, при этом появляются деформации материала в области отверстий. Это всё происходит из-за того, что отверстие расположено очень близко к зонегиба, края его смещаются в сторону действия растягивающего напряжения. Эту проблему и было необходимо решить.

Результаты исследования показали, что использование прорезей, в том числе радиальных – решение для повышения качества и долговечности металлических деталей. Практическая реализация данной технологии в производственных процессах позволяет снизить затраты, улучшить характеристики изделий, обеспечить их надёжность в эксплуатации, а также уменьшить брак при производстве.

*Д.Е. Жумай, студ.; рук. С.А. Егоров, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ**

Эксплуатация трубопроводов, сопряженная с коррозионным разрушением, которое протекает в различные периоды и требует ремонта разрушенных частей путем устранения не исправных участков, наложением хомутов, завариванием мест или замена всего участка.

Производство ремонтных работ дефектных участков производится с периодичностью от полугода до двух лет. Замена трубопровода может происходить через пять лет так и более. Коррозионное разрушение зависит от состава воды, которой подается по трубопроводу и от металлических частей трубопровода.

Трубопроводы подача охлаждающей воды атомных станций может изготавливаться из нержавеющей сталей или углеродистых сталей. В зависимости от материала, возникают разные виды коррозии: сплошная, местная, межкристаллитная, равномерная, селективная, питтинговая, язвенная, подпленочная, шелевая.

Существуют следующие методы защиты от коррозии. Нанесение внешнего защитного слоя гальваническим покрытием, битумными лентами, лакокрасочными покрытиями, внутреннего защитного слоя, гальваническим или полимерным покрытием, электрохимическая защита трубопровода.

В морской воде наблюдается электрохимическая коррозия. Металл трубопровода не однородные. Имеются участки с разным электрическим потенциалом. На одних участках происходит электрохимическое восстановление, а на других электрохимическое растворение. Этот процесс зависит от показателя рН.

Предлагается электрохимический метод защиты, путем установки защитных протекторов. В виде магниевых анодов, которые обладают наиболее отрицательным потенциалом, чем микрогальвано-пары присутствующие в данном трубопроводе. За счет протекания процесса электролиза, происходит электрохимическое разрушение анода и восстановление трубопровода.

*В. К. Соловьев, студ.; рук. С. А. Егоров, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **РАСЧЕТ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПОДШИПНИКА НАСОСНОГО АГРЕГАТА**

Расчет долговечности подшипника производится по ГОСТ 18855-2013 [1]. Данный расчет производится с целью обеспечения ресурса подшипника.

При расчетах учитывается нагрузка, габариты, частота вращения, периодичность использования оборудования, грузоподъемность, тип смазочного материала, способ охлаждения и другие технические требования, зависящие от особенностей рассматриваемого механизма.

На долговечность подшипника может повлиять тип смазочного материала, способ смазывания, наличие загрязнений. Смазочный материал повышает долговечность подшипника, так как режим работы подшипника может быть граничный, полужидкостной и гидродинамический.

Для обеспечения гидродинамического режима трения необходимо разделение трущихся поверхностей смазочным материалом, этот режим может обеспечиваться на разных частотах вращения смазочным материалом с разной вязкостью.

При низкой частоте вращения необходим высоковязкий смазочный материал, а при высоких скоростях вращения используют маловязкий смазочный материал. Поэтому выбор смазочного материала определяется скоростными характеристиками использования подшипника.

Для условий эксплуатации насосов подходит смазочный материал с кинематической вязкостью от 20 до 40 сСт. Обычно используют турбинное масло типа Тп-22С, но в некоторых случаях рабочая температура может быть выше 70°C. В этом случае можно предложить замену турбинному маслу, например ОМТИ. Для турбинного масла ОМТИ вязкость при 50°C составляет не менее 23 мм<sup>2</sup>/с, для масла Тп-22С при 50°C составляет 20-23 мм<sup>2</sup>/с. Смазывание производится циркуляционным способом.

Расчет показывает, что при данной скорости вращения подшипника и грузоподъемности долговечность возрастет на 2%.

### **Библиографический список**

**1. ГОСТ 18855-2013.** Подшипники качения. Динамическая грузоподъемность и номинальный ресурс. М.: Стандартинформ, 2014. - 56 с.

Д.Д. Лукин, асп.; рук. М.А. Шолов, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)

## К ВОПРОСУ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПАРАМЕТРОВ СТЕПЕННОЙ МОДЕЛИ ИЗНОСА ПРИ ТРЕНИИ ПАРЫ «ШАРИК-ПЛОСКОСТЬ» В ПРИСУТСТВИИ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА

В качестве испытательной была выбрана схема «шарик-плоскость», реализуемая в подшипниковых узлах трения. Для разработки модели совместно решали три основополагающие соотношения (*алгебраическое условие непрерывности контакта, уравнение равновесия контактирующих тел, уравнение износа в дифференциальной форме*):

$$u_e(x, y, s) + u_{ш}(x, y, s) = u(x, y),$$

$$P = \int_A p(x, y, s) dA, \quad (1)$$

$$\frac{du_w}{ds} = f(p, s),$$

где  $u(x, y, s)$  - упругие нормальные контактные перемещения обоих тел;  $x, y$  - координаты,  $s$  - путь трения,  $P$  - общая нагрузка, действующая на тела (проекция нагрузки на вертикальную ось);  $p(x, y, s)$  - проекция контактных давлений на одну ось;  $A$  - площадь контактной поверхности,  $u_w$  - высота износа. Принимаем форму изношенной поверхности образца в виде кругового сектора с радиусом профиля  $a$  (рис. 1).

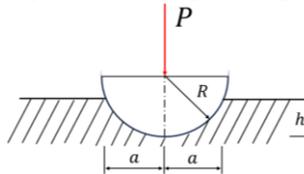


Рис. 1. Схема контакта «шарик-плоскость»:  $P$  - нагрузка;  $a$  - полуширина контакта;  $R$  - радиус шарика

При совместном решении уравнений (1), получили интегральный вид модели износа шара:

$$u_w(s) = f_{тр} C_w \int_0^s \left( \frac{p(s)}{HB} \right)^n \left( \frac{v_{ск} R^*}{v} \right) ds \quad (2)$$

В работе представлена разработанная математическая модель, позволяющая прогнозировать величину износа в зависимости от внешних факторов (нормальной нагрузки, скорости перемещения, материалов пары трения и др.).

*М.С. Веденеев, асп.; рук. М.А. Шилов, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ НАПРАВЛЯЮЩИХ СТАНКОВ**

Для решения задач, связанных с производством деталей сложной геометрии, к современным металлорежущим станкам предъявляют повышенные требования по точности позиционирования, виброустойчивости, надежности и долговечности. Одним из способов взаимного перемещения элементов конструкции станков является использование направляющих, изготавливаемых из полимерных материалов (ПМ). При расчете конструкции станков на собственные частоты, прочность, жесткость, устойчивость, износостойкость особое внимание уделяют «правильному» выбору (ПМ). В связи с выше изложенным, актуальной является задача обоснованного выбора материалов пары трения чугун-полимер для обеспечения высокой износостойкости изготавливаемых направляющих, способных выдерживать высокие нагрузки при скольжении. Следует отметить, что использованию чугунов как материалов пары трения посвящено много работ, в которых показаны различные методы их упрочнения, позволяющие снизить поверхностные напряжения. Однако до сих пор эта задача является практически значимой.

В настоящее время при изготовлении направляющих, как правило, используют не сами ПМ, а полимерные композиционные материалы (ПКМ), который обладает лучшими прочностными и износостойкими характеристиками. В ПКМ в качестве матрицы используют ПМ, а в качестве армирующего элемента другие материалы. Перспективными в этом направлении являются армирующие элементы на основе углеродных наноструктур, получаемые путем нагревания смеси порошков углерода (глюкозы и целлюлозы) и окислителя до 200 – 300 °С (разработанные в ИТМО) или на основе малослойных графитовых фрагментов, получаемые из рисовой шелухи (разработанные в МГУ).

Таким образом, технологически и экономически обоснованный подход к выбору материалов пар трения направляющих станков, позволит повысить не только их эксплуатационные характеристики, но и сократить время простоя станков при обслуживании и ремонте.

З.В. Зарубин, асп.; рук. М.А. Шилов, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНОСА ПАРЫ ТРЕНИЯ МЕТАЛЛ-ПОЛИМЕР С УЧЕТОМ ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ

Износ контактирующих поверхностей зависит от многих факторов, одним из которых является тепловой. При трении скольжения тепловая энергия может рассеиваться главным образом за счет трех процессов: нагревания, образования частиц износа и других изменений энтропии, связанных с преобразованием материала на границе раздела. Как правило, основная часть энергии трения будет преобразована в тепловую энергию. В настоящее время вклад влияния теплопроводности на износ до сих пор не был оценен. В связи с этим актуальной является задача определения взаимосвязи интенсивности изнашивания и тепловой энергии, выделяемой при трении и учитывающей путь трения, триботехнические свойства материала и рассеянную энергию трения. Рассмотрим тепловую контактную задачу о взаимодействии вращающегося кольца (1) и закрепленного диска (2) в трехмерной постановке. Схема контакта представлена на рис. 1. На кольцо, площадь контактной поверхности которого –  $S$ , действует вертикальная распределенная  $q$  сила. При их взаимодействии выделяется тепло. Требуется определить как диссипация энергии влияет на интенсивность изнашивания при трении скольжения без смазочного материала.

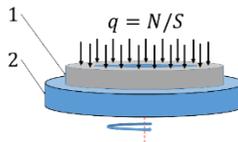


Рис. 1. Схема нагружения

В результате математического моделирования получили итоговую формулу для нахождения зависимости интенсивности объемного изнашивания от трибологических и физических свойств контактирующих материалов:

$$J_V = \frac{\Delta V}{L} = \dot{w}^* \cdot \frac{\Delta E(1 - m)}{L}, \quad (1)$$

где  $\dot{w}^*$  – объемная потеря материала в единицу энергии,  $\text{мм}^3/\text{Дж}$ ;  $\Delta E$  – энергия диссипации при трении скольжения за фиксированное время, Дж;  $L$  – путь трения, км;  $m$  – мера оценки распределения рассеянной энергии трения.

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

## СОЗДАНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ СБОРОЧНОЙ МОДЕЛИ РЕДУКТОРА ВКН-280 ВЕРТИКАЛЬНОГО КРАНОВОГО

Благодаря современным системам автоматизированного проектирования (САПР) стало возможна разработка электронной конструкторской и 3D-модели изделий, облегчая труд проектировщика, в данной статье будет показано эффективное использования САПР Компас 3Д на примере создания модель редуктора ВКН-280 вертикального кранового, предназначенного для перемещения механизмов кранов.

При создании модели был использован традиционный метод создания сборок «снизу-вверх», при этом основной упор делался на использование встроенных библиотек и приложений, так, например при создании деталей типа тел вращения использовалось приложение валы и механические передачи 2-D. В этом же приложении был проведен проверочный расчет шпоночного соединения. Так же использовалась библиотека стандартных изделий.

Для создания анимации работы редуктора выполнено наложение вращательных связей между зубчатыми колесами и вал-шестернями (рис. 1, а).

Создав все детали сборки, была создана сборочная модель. Для реалистичной визуализации редуктора было использовано приложение Artisan Rendering (рис. 1, б).



Рис. 1. Некоторые этапы проектирования редуктора ВКН-280: а – валы механической передачи; б – трехмерная сборка

### Библиографический список

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

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

## **ПАТЕНТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ПЛАСТИКОВ**

Загрязнения пластиком окружающей среды – это современная экологическая проблема. Для борьбы с загрязнением необходимо организовывать его сбор и переработку для повторного использования. Измельчение пластмасс перед вторичной переработкой требует разработки производительного технологического оборудования. В работе проведен патентный поиск и анализ патентов, в которых представлены различные машины для измельчения пластмасс.

Проанализировано около десяти патентов для измельчения таких видов пластмасс, как тонколистные и пленочные отходы (мешки, ленты, шнуры и жгуты из пластмасс), тонкостенная тара (бывшие в употреблении бутылки, одноразовая посуда), гранул полиэтилена и др. Общим в конструкциях измельчителей пластмасс является наличие рабочей камеры с ротором и различными видами ножей. Например, в патенте RU 2235019 С2 в качестве ножей предлагается использовать дисковые фрезы [3], в патенте RU 38302 U1 – ножи-диски, а также калибрующая решетка [1]. Машина из патента RU 21866 С1 дополнительно содержит загрузочный бункер с дозатором [2]. Основными недостатками изученных устройств является большая энергоемкость, низкая производительность, невозможность измельчить все части бутылки одновременно, наматывание «мягких» полимеров, забивание зоны резания. Поставлена задача сконструировать машину для измельчения пластика большей производительностью, в которой сырье предварительно сминается или ломается перед основной обработкой с помощью шнека. Предусмотрено несколько режимов обработки для разных видов пластмасс.

### **Библиографический список**

**1. Патент № 38302** РФ МПК В02С 18/06. Измельчитель пластмасс / Константинов Д.В., Жарков С.И., Коробков В.А., Жевелев О.Ю.- заявл: 2002.09.24. Оpubл: 2004.06.10. Патентообладатели: Открытое акционерное общество "Кузполимермаш".

**2. Патент № 2186624** РФ МПК В29В 17/04. Измельчитель пластмасс / Дворецкий Г.В., Карев В.А., Попов В.П., Фадеев В.С., Чебыкин В.В.- заявл: 2000.12.28. Оpubл: 2002.08.10. Патентообладатели: Государственное унитарное предприятие "Электростальское научно-производственное объединение "Неорганика".

**3. Патент № RU 2235019** С2 РФ МПК В29В 17/04. Измельчитель роторный для тонкостенных пустотелых отходов из пластмасс / Сычев Г.М., Шумаков Н.Г., Свитка Н.И.- заявл: 2002.11.11. Оpubл: 2004.08.27. Патентообладатели: ОАО "ПКБ ПЛАСТМАШ".

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

## **МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКОЙ**

Алюминиевые сплавы широко применяются в высокотехнологичных отраслях промышленности благодаря легкости, коррозионной стойкости и высокой удельной прочности. Для улучшения этих показателей необходима модификация поверхностного слоя.

В алюминиевых литейных сплавах модификация структуры, такая как разрушение кремниевых шипов, критически важна для прочности и трещиностойкости. После литья и механической обработки сплавы часто подвергают дисперсионной закалке. Для повышения долговечности на поверхность наносят тонкие слои TiN, Ni или SiC, что защищает от износа и фрикционной микросварки. Анодирование используется для создания прочного слоя  $Al_2O_3$ , повышающего твердость поверхности [1].

Исследование [2] посвящено поиску оптимальных параметров лазерной обработки для повышения твердости и однородности состава поверхностного слоя. Температура подповерхностных слоев при лазерной обработке зависит от количества энергии, подводимой к материалу, которое определяется плотностью мощности луча и временем воздействия. Вариация этих параметров позволяет реализовать различные процессы обработки: поверхностную закалку, отпуск, плакирование, легирование, сварку, резку и создание тонких слоев.

### **Библиографический список**

- 1. Kiyoshi Funatani.** Emerging technology in surface modification of light metals. Surface and Coatings Technology. – 2000. - PP. 264-272
- 2. K. Bartkowiak, J. Borowski, A. Woynski, L. Foltynowicz.** Surface layer modification of AlSi6Cu4 aluminium alloy via CO2 laser treatment. Proceedings of the 25th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics. -2006. - paper 1606

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

## **РАЗРАБОТКА ГУСЕНИЦ СЕРВИСНОГО РОБОТА-ГИДА**

Сервисный робот-гид разрабатывается на электромеханическом факультете ИГЭУ. Студенты кафедры технологии машиностроения разработали для робота гусеничный ход, который улучшил его функционал и проходимость.

Работа состояла из нескольких этапов, первый из которых – решение проблемы проходимости. Изначальная конструкция на колесном приводе сталкивалась с трудностями при передвижении по сложным поверхностям (порог, бордюр). Переход на гусеничный привод стал логичным решением для повышения передвижения робота по поверхности с препятствиями. Также для повышения проходимости в конструкцию был добавлен одноступенчатый редуктор с передаточным числом два к одному, для повышения крутящего момента, получаемого от электродвигателя ведущим катком.

На втором этапе проекта для адаптации робота к неровным поверхностям, было предложено добавить систему компенсации центра массы. Это позволило роботу быть устойчивым в условиях реальной среды, при преодолении препятствий, поворотах и разворотах.

Следующим этапом проекта было 3D-моделирование и печать. Создание 3D-моделей основных компонентов позволило визуализировать и оптимизировать конструкцию. При изготовлении деталей гусеничного хода был выбран метод FDM печати, как наиболее доступный способ трехмерной печати пластиками, оптимальный для изготовления прототипа изделия и производства деталей робота.

В качестве материалов деталей гусеничного хода были выбраны такие пластики, как PLA и Flex. Из PLA выполнены детали каркаса элементов гусеничного хода, т.к. этот материал достаточно прочный, недорогой и технология печати из него достаточно проста. Из Flex, который объединяет свойства резины и пластика, выполнена часть конструкции, которая обеспечивает контакт с поверхностью, что обеспечивает высокую износостойкость при движении по достаточно грубой поверхности, такой как асфальт, исключает возможность проскальзывания при движении по гладким поверхностям, таким как линолеум, мрамор, керамогранит.

Выполненный опытный образец гусеничного хода робота-гида в настоящее время проходит испытания. Коллективная работа студентов электромеханического факультета над данным проектом продолжается.

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

## **МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Трехмерная печать с использованием металлических порошков представляет собой одну из самых перспективных технологий аддитивного производства. Метод позволяет создавать сложные металлические детали и конструкции с высокой точностью и минимальными отходами материала.

Номенклатура металлических порошков постоянно расширяется. Чаще всего применяют:

- нержавеющую сталь (ПР-Х15Н5Д4Б, ПР-08ХН53БМТЮ, ПР-07Х18Н12М2, ПР-Х16Н6Д4Б, ПР-12Х18Н10Т и др.) - обладают коррозионной стойкостью и механической прочностью, детали из них применяются в аэрокосмической промышленности, машиностроении, судостроении, медицине, пищевой промышленности.;

- хромо-никелевые порошки (ПР-Х15Н5Д4Б, ПР-Х16Н6Д4Б и др.) - применяются для деталей, которые работают при высоких температурах, агрессивных средах, таких как авиационная, космическая отрасль,

- кобальт-хромовые порошки (ПР-КХ28М6) - имеют высокие механические свойства, устойчивы к коррозии, термостойчивы, чаще применяются в медицине и двигателестроении;

- титановые порошки (ВТ1-00, ВТ6 и др.) - имеют высокую прочность при низком весе, высокую коррозионную стойкость, они широко применяются в аэрокосмической и медицинской отраслях, например, для изготовления имплантатов;

- бронзовые порошки (ПР-БрХ, ПР-БрХЦр) применяются для деталей машиностроения, электротехники, энергетики, электроники;

- порошки на основе алюминия (например, AlSi10Mg) – легкие, обладают хорошими механическими свойствами, используются в автомобильной промышленности и для производства деталей, требующих высокой прочности при низком весе.

Порошки возможно изготавливать различных фракций, например 20-45 мкм, 20-56 мкм, 40-100 мкм. Часто порошки применяются как самостоятельные материалы, но возможно применение и мультиматериалов, при этом необходимо учитывать коэффициент теплового расширения и взаимодействие между ними. Приведенные марки отечественных порошков позволили импортозаместить аналогичные материалы стоимость которых на несколько порядков выше.

**СЕКЦИЯ 23**  
**ДИНАМИКА И ПРОЧНОСТЬ СЛОЖНЫХ**  
**МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

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

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



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

## ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ДЕТАЛИ «КАЧАЛКА» В САМОЛЕТЕ

**Качалка** — это деталь системы управления, предназначенная для обеспечения взаимного расположения подшипников относительно главной оси и передачи усилия на гидравлическую систему управления самолета. Данная деталь предоставлена в программном комплексе SIEMENS NX 12. В этом же ПО проведена замена материала с MA14T1 (ОСТ1 90010-70) на АК6Т1 (ГОСТ 21488-76), после чего выполнялась проверка прочностных характеристик исходной геометрии. С целью уменьшения веса детали с сохранением прочностных характеристик, в программе Altair Inspire созданы несколько топологически оптимизированных моделей путем добавления новых и увеличения старых облегчающих отверстий. Полученные детали подверглись анализу на прочность в программном комплексе SIEMENS NX 12 (рис.1).

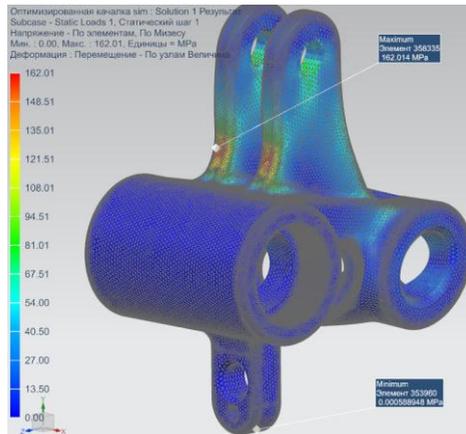


Рис.1 Эпюра напряжений оптимизированной детали «Качалка» (МПа)

Сравнивая полученные данные, выбрали наилучшую модель, сочетающую оптимальное соотношение массы и прочностных свойств [1]. Благодаря применению топологической оптимизации, удалось снизить массу материала на 8 грамм.

### Библиографический список

1. **Авиационные** правила. Нормы летной годности самолетов транспортной категории. Часть 25 / Межгосударственный авиационный комитет, 2004.

К.А. Шумилов, студ.; рук. Т.В. Шмелева к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, Иваново)

## ДЕТАЛИРОВКА ОПОРЫ ПРИЗМАТИЧЕСКОЙ С ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ТРЕБОВАНИЯМИ

Деталировка модели – создание чертежа по модели. Вся работа проводится в программном обеспечении NX. Хранение, документация и сортировка моделей и чертежей проводится в программном обеспечении Team Center.

После создания вида следует проставление размеров, допусков, технических требований и т.д. по стандартам ЕСДП [1].

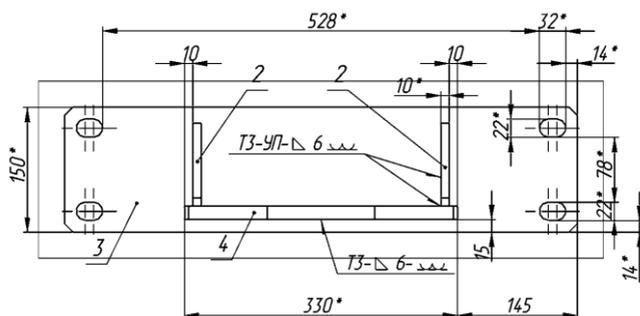


Рис. 1. Пример вида сборки после расставления обозначений

Здесь должны быть указаны габаритные размеры и изменения, внесенные в готовую сборку (в данном примере создаются отверстия для закрепления); размеры положения деталей, при необходимости также указываются шероховатости. Также указаны номера позиций (рис. 1) и сварка деталей (рис. 2).

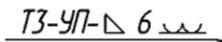


Рис. 2. Параметры сварки

Сварка имеет тавровое двухстороннее соединение без скоса кромок, проводится в углекислом газе и его смеси с кислородом плавящимся электродом с катетом 6 миллиметров. Наплывы и неровности шва обрабатывать с плавным переходом к основному металлу.

### Библиографический список

1. Анурьев В.И., Справочник конструктора – машиностроителя т.1 / В.И. Анурьев. – 9-е изд., перераб. и доп. под ред. И.Н. Жестковой. – М.: Машиностроение 2006 – 928 с.

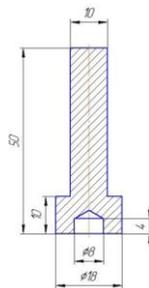
Д.С. Антипин, студ.; М.А. Шолов, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗНОСА ПРИ ТРЕНИИ ПАРЫ СТАЛЬ 45 – СТАЛЬ 40Х В МОДЕЛЬНОМ СМАЗОЧНОМ МАТЕРИАЛЕ

Определению триботехнических характеристик пластичных смазочных материалов (ПСМ) посвящено много работ, в которых показан положительный эффект от введения присадок различной природы и пространственной организации. Как правило, исследователи использовали доступные коммерческие ПСМ, состав которых не известен. Сравнить свойства новых ПСМ с изучаемыми присадками с другими ПСМ нельзя. К тому же триботехнические тесты проводят на не гостированном оборудовании. Для устранения имеющихся противоречий нами была проведена серия испытаний по установлению наилучших и наихудших антифрикционных и противоизносных присадок углеродных наноструктур в вазелиновом масле (модельном ПСМ) на «машине МТУ-01» с применением стандартной методики по схеме «кольцо - диск» (рис. 1). Поверхности пары трения притирали при нагрузке, составляющей 70-80 % от запланированной в эксперименте. В эксперименте нагрузку прикладывали ступенчато через каждые 10 Н. Начальная шероховатость всех образцов составляла  $R_a = 1,25$  мкм, твердость 62 HRC.



а



б

Рис. 1. Установка МТУ-01: а – фотография установки, б – образец

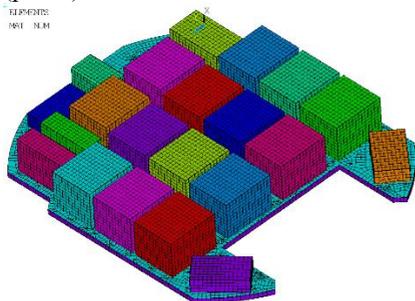
Полученные результаты свидетельствуют о том, что тесты проведены в гидродинамическом режиме смазки. На следующем этапе полученные данные будут проанализированы с применением планирования эксперимента. С целью валидации результатов разработана математическая модель, учитывающая повышенные нагрузки в гидродинамическом режиме смазки.

Л.С. Рева, студ.; рук. Л.Б. Маслов, д.ф.-м.н, доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)

## РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ТЕРМОСТАТИРУЕМОЙ ПАНЕЛИ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

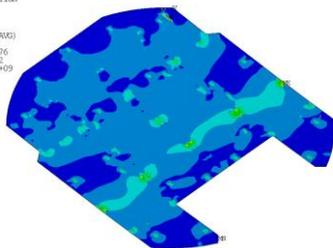
Термостатируемая панель представляет собой трёхслойную панель с алюминиевым сотовым наполнителем и алюминиевыми окладными листами, на которую устанавливается блоки оборудования [1]. В методе конечных элементов используются элементы типа Beam188, Shell181, Combine14, Mass21 [1] (рис.1). Панель закрепляется посредством элемента типа combine14 с жесткостью  $5,5 \cdot 10^5$  Н/м, расположенных в 23 узлах крепления. К центру масс конструкции прикладывается ускорение 100, 50, 0 г по осям координат XYZ. Определяется НДС в конструкции (рис.2).

ELEMENTS  
188 181



LOCAL RESULTS

STEP=1  
STEP =1  
TIME=0  
SLOPE (AVG)  
S1C1 = 0.17176  
S1C2 = -0.13442  
S1C3 = -2.30E+09



372442 .259E+08 .515E+08 .770E+08 .103E+09 .128E+09 .154E+09 .179E+09 .205E+09 .230E+09

Рис. 1. Конечно-элементная модель

Рис. 2. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу на обшивке

Максимальные эквивалентные напряжения в обшивке равны 230 МПа. Они сосредоточены в точках крепления. В основном напряжения распределяются от 51 до 180 МПа. Максимальное напряжение приводит к текучести материала, но не его разрушению.

### Библиографический список

1. **Полимерные** композиционные материалы: учебное пособие / Л.И. Бондалетова, В.Г. Бондалетов; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 111 с.
2. **Thompson, Mary Kathryn, and John M. Thompson.** 2017. Introduction to ANSYS and Finite Element Modeling., 1–9. doi:10.1016/b978-0-12-812981-4.00001-0.

К.М.Филиппова, студ.; рук. Н.А.Сабанеев ст.преп.  
(ИГЭУ, Иваново)

## ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТОВ КОНСТРУКЦИЙ

Принцип работы неразрушающего контроля (НРК) с угловым лучом (рис.1) заключается в преобразовании продольной (компрессионной) волны, посылаемой датчиком, в преломленную сдвиговую (поперечную) волну в образце. Затем сдвиговая волна отражается от дефектов в объекте контроля. По сравнению с продольными волнами, сдвиговые волны имеют более низкое затухание и более короткую длину волны, что делает их способными обнаруживать более мелкие дефекты [1,2].

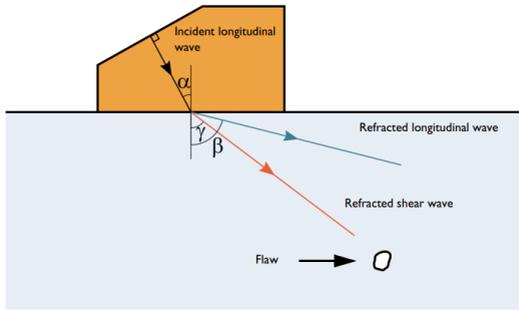


Рис. 1. Преломление волны на границе клина и испытуемого образца.

Решалась задача определения дефектов сварных швов в конструкциях из пластин с толщиной стенки 20 мм. Использовался прямой контактный датчик с частотой 10 МГц. Контроль проводился по методу эхо-сигнала. Обработывались продольные волны.

В пяти из двадцати проверенных конструкций обнаружены дефекты. В трех случаях - поверхностные трещины глубиной до 3 мм, в двух — пористость размерами до 2 мм в диаметре. Все выявленные дефекты не критичны для работоспособности конструкций согласно стандартам, заложенным предприятием.

*К.В.Шляпников, студ.; рук.Т.В.Шмелева к.т.н.,доц.  
(ИГЭУ, г.Иваново)*

## **РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ “ПЛИТА ПЕРЕХОДНАЯ ДЛЯ ВИБРОСТОЛА”**

Вибростенд имитирует условия эксплуатации, включая воздействие различных факторов, таких как вибрация, удары и тепловые нагрузки. Вибростенды широко используются в авиационной, автомобильной, энергетической и других отраслях для оценки прочности и надёжности материалов и компонентов[1]. В программном комплексе Siemens NX разработана модель плиты переходной для вибростенда(рис.1).

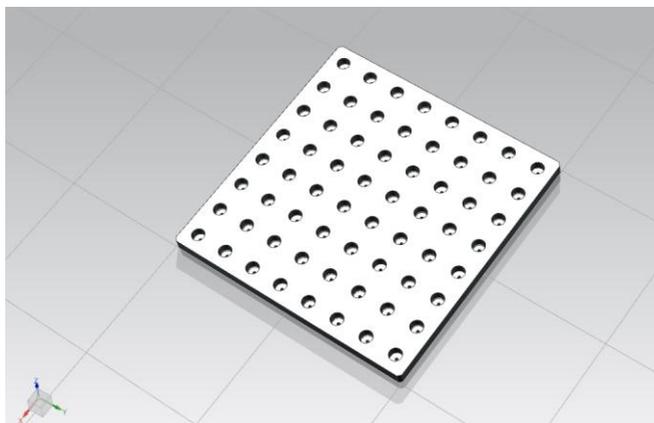


Рис.1 Модель плиты переходной в программном комплексе Siemens NX.

Плита представляет собой пластину размером 150x150 с толщиной 15 мм. Отверстия в количестве 64 штук диаметром 12 мм расположены с шагом 17 мм. Объект используется для экспериментального стенда.

### **Библиографический список**

1. NX для конструктора-машиностроителя / М. Ю. Ельцова, П. С. Гончарова — М: ДМК-Пресс, 2019. — 502 с.

*Д.П. Толстяков, студ.; рук. М.А. Ноздрин к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, Иваново)*

## **ДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ПАССАЖИРСКОГО КРЕСЛА ВЕРТОЛЁТА**

Разработка современных вертолетов предъявляет повышенные требования к безопасности пассажиров. Одним из ключевых элементов, обеспечивающих безопасность в случае аварийной ситуации, является пассажирское кресло. Оно должно не только быть комфортным, но и выдерживать значительные динамические нагрузки при аварийной посадке или столкновении.

Проведен динамический расчет вертолетного пассажирского кресла с целью оценки его прочностных характеристик в условиях аварийной посадки. Используя программные комплексы Altair HyperMesh и LS-Dyna, создана конечно-элементная модель кресла (рис.1). Нагрузки моделировались в соответствии с требованиями авиационных норм, предусматривающими перегрузку 30 g [1].

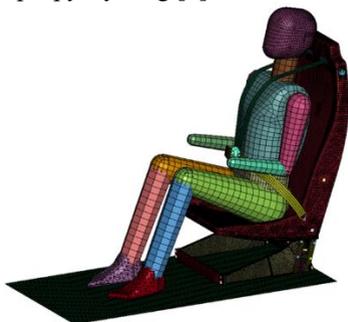


Рис.1 Расчётная модель кресла

Расчётные напряжения в каркасе превысили предел прочности материала. Коэффициент прочности равен 0.95. Для каркаса предложено увеличение толщины его элементов. В кронштейнах выявлена недостаточная жесткость на кручение.

### **Библиографический список**

**1.Авиационные** правила. Часть 29. Нормы летной годности винтокрылых аппаратов транспортной категории: официальное издание: утверждено постановлением 22-й сессии Совета по авиации и использованию воздушного пространства от 15.03.2018: введены в действие 15.03.18. — М: межгосударственный авиационный комитет, 2018. — 175 с.

*Е.С.Шпаков, студ; рук. Т.В.Шмелева к.т.н, доц  
(ИГЭУ, г.Иваново)*

## **АНАЛИЗ ТВЕРДОСТИ ДЕТАЛЕЙ ГИДРОМОЛОТОВ**

Пикой называется ударная часть гидромолотов, которые применяются в горной промышленности для разрушения горной породы. Процесс проверки твердости проводится с помощью переносного твердомера. На установленной на подложке пике (рис.1) зачищаются две площадки для измерения-на наконечнике и хвосте.



Рис.1 Пики, подготовленные для проверки

На каждой из площадок проводится минимум 5 измерений по шкале Викерса [1]. Допустимый разброс между максимальным и минимальным значениями две целых единицы. Полученные измерения заносятся в базу данных на планшете. В случае если данные не соответствуют требованиям, пики отправляются на повторную зачистку или термообработку. Допустимыми для пик считаются значения от 50 до 54 единиц твердости по Викерсу.

### **Библиографический список**

1. Савкин А.Н., Водопьянов В.И., Белов А.А. Твердость материалов: методические указания. Волгоград: ВГТУ, 2004. 16 с.

*И.А. Каныгин, студ.; А.Е. Моисеев, студ.;  
рук. М.А. Ноздрин к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, Иваново)*

## ПРОЧНОСТНОЙ РАСЧЕТ НЕСУЩЕГО КРОНШТЕЙНА НА КВАДРОЦИКЛА

В программном комплексе SolidWorks созданы несколько вариантов исполнения конструкции кронштейна, удерживающего электроусилитель руля на раме квадроцикла. Произведен численный расчет моделей в расширении SolidWorks Simulation [1], где к каждой из них приложены сосредоточенные силы и изгибающий момент [2]. Построены эпюры напряжений, деформации и перемещений. На основе полученных данных выбрано лучшее техническое предложение (рис.1), которое отличается от остальных наличием усилений в виде двух поперечных полок в передней части детали, а также увеличенной толщиной листового металла с 3 мм до 4 мм.

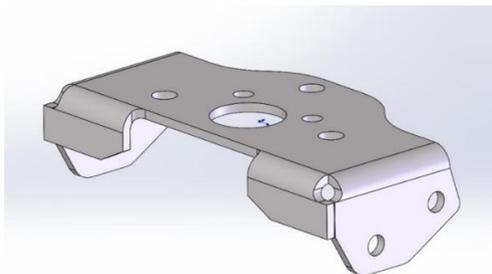


Рис.1 Техническое предложение исполнения кронштейна.

Согласно эпюре напряжений максимальные напряжения в конструкции модели достигали 109 МПа при допустимых напряжениях 160 МПа.

### Библиографический список

1. **SolidWorks Simulation** / А.А. Алямовский. — М: ДМК-Пресс, 2015. — 562 с.
2. **Сопротивление материалов** / В. И. Феодосьев. — М: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. — 592 с.

А.Е. Моисеев, студ.; рук. М.А. Шолов, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЬНОГО ПОЛУКОЛЬЦА ПРИ РАДИАЛЬНОМ РАСТЯЖЕНИИ

Моделирование напряженно-деформированного состояния полукольца, жестко закрепленного с одного конца и подверженного одноосному радиальному растяжению является сложной задачей, которая имеет аналитическое решение лишь для сильно упрощенных случаев [1]. Поиск новых методов решения этой задачи является актуальной и важной задачей теории пластин и оболочек. Одним из методов решения поставленной задачи является метод конечных элементов [2]. Для валидации конечно-элементной разработанной модели была создана экспериментальный прототип стального полукольца (рис. 1). Геометрические характеристики полукольца: толщина – 3,5 мм, радиус – 147,5 мм.

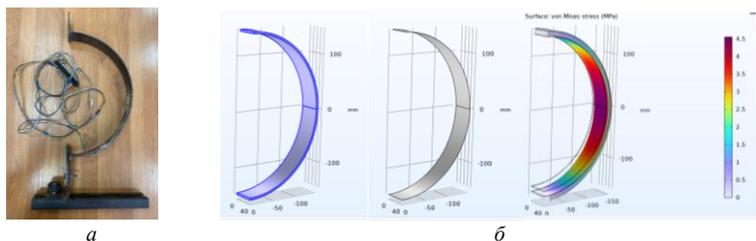


Рис. 1. Модель полукольца: *а* – экспериментальный прототип, *б* – конечно-элементная оболочечная модель

Получены результаты конечно-элементного моделирования одноосного растяжения. На следующем этапе планируется валидация этой модели путем сравнения данных полученных в результате эксперимента и с помощью компьютерного моделирования.

*А.П. Челноков студ.; рук. Ф.Б. Огурцов к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРАЦИОННОГО СИГНАЛА ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ**

Целью работы является исследование вибрационного сигнала подшипников 6-310, 6-307, 6-207 и 6-113 на стенде входного контроля подшипников качения СП-180М.

Производится оценка состояния подшипников и определяется тип дефекта [1].

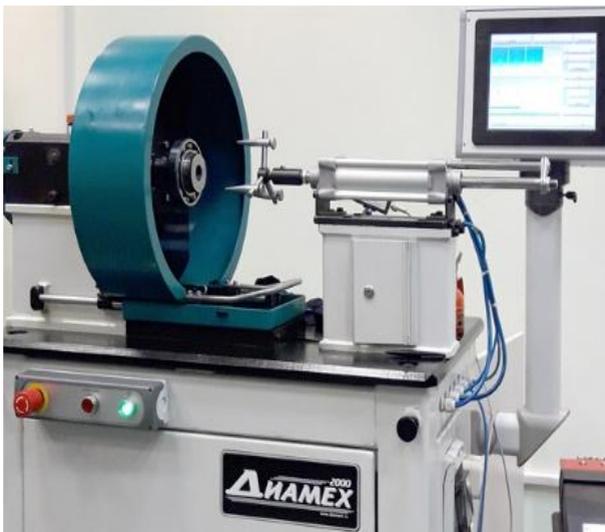


Рисунок 1 – Стенд входного контроля подшипников качения СП-180М

### **Библиографический список**

1. Колобов А.Б. Вибродиагностика: Теория и практика: учебное пособие; - М.: Инфра-Инженерия, 2019. -252 с.

К. Дудина, студ.; рук. Л.Б. Маслов, д.ф.-м.н, доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЛЕБЕДКИ ТЛ-2

Целью работы является исследование напряженно-деформированного состояния типовой лебедки марки ТЛ-2. Одной из перспективных задач исследования будет улучшение массогабаритных показателей, что необходимо для упрощения транспортировки и облегчения эксплуатации оборудования.

Лебедка ручная ТЛ-2 предназначена для вертикально-горизонтального перемещения грузов при монтаже и разгрузке-погрузке на открытой местности [1]. Чертеж лебедки ТЛ-2 [2] в двух проекциях представлен на рис. 1. Лебедка состоит из корпуса, который представляет из себя две щеки, жестко соединенные между собой шпильками. В корпусе установлены рабочий механизм, состоящий из трех параллельных валов, на которых находятся четыре шестерни, через которые передается вращательное движение на барабан. Кроме того, смонтирован грузопорный тормоз, состоящий из собачки и храповика, тормозного диска, тормозной ленты, тормозного рычага.

В результате выполнения работы получены трехмерные компьютерные геометрические модели основных деталей и узлов. Построены конечно-элементные модели «стенок» лебедки для последующего численного анализа напряженно-деформированного состояния конструкции. Проведена оценка значений сил и моментов, действующих в механической системе лебедки ТЛ-2.

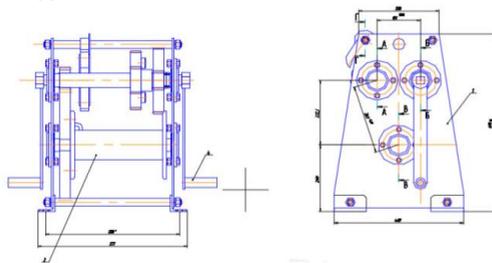


Рис. 1. Чертеж лебедки ТЛ-2

### Библиографический список

1. Кудрявцев, Е.М. Комплексная механизация строительства / Е.М. Кудрявцев – М.: АСВ, 2005. – 424 с.
2. Чертеж детали [электронный ресурс]. Новосибирск 2021. URL: <https://vmasshtabe.ru/mashinostroenie-i-mehanika/lebedka-tl-2.html> (дата обращения 20.02.2025)

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

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОРИСТЫХ СКАФФОЛДОВ НА ОСНОВЕ ТРИЖДЫ ПЕРИОДИЧЕСКИХ МИНИМАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Биоинженерия является стремительно развивающимся направлением науки, одним из самых наглядных примеров которой остаётся восстановление сегментарных костных переломов с помощью пористых скаффолдов.

Производство индивидуального скаффолда для пациента сопряжено с рядом проблем, одной из которых является создание его сложной геометрии. Для успешного процесса вживления имплантата специалистам требуется соблюдать размер и форму пор, объем пористости и кривизну поверхности. Также нужно учитывать структуру кости – пористость материала и его физико-механические характеристики меняются по сечению при переходе от одного типа ткани к другому (рис. 1).

Наиболее актуальным решением обозначенных выше проблем является проектирование геометрии скаффолдов с помощью градиентных структур и трижды периодических минимальных поверхностей (TPMS), основанных на скелетных схемах кристаллографических решеток [1]. Опираясь на математические модели примитивной (P, рис. 2а), алмазной (D, рис. 2б) и гироидной (G, рис. 2в) TPMS, можно создать элементы, имитирующие пористость. На рисунке 2 приведены примеры элементов, состоящих из одной ячейки. На их основе в дальнейшем будут разрабатываться пористые скаффолды требуемой геометрической формы с необходимым распределением пор по объему.

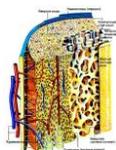
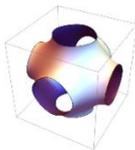
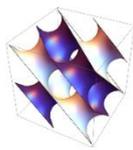


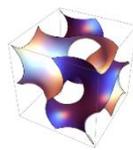
Рис.1 Строение  
трубчатой кости [2]



а) P-TPMS



б) D-TPMS



в) G-TPMS

Рис. 2 Элементы, созданные с помощью поверхностей

### Библиографический список

1. Schoen A.H. Triply-periodic minimal surface by Alan H. Schoen: [Электронный ресурс]. 2018. URL: <http://schoengeometry.com/e-tpms.html> (Дата обращения: 12 апреля 2019)
2. Ступко М. Гидроксилапатит – самый главный из фосфатов кальция [Электронный ресурс] // «БИО/МОЛ/ТЕКСТ-2013». URL: <https://biomolecula.ru/articles/gidroksilapatit-samyi-glavnyi-iz-fosfatov-kaltsiia> (Дата обращения: 17 октября 2013)

С.В. Синёв студ; рук. С.Ф. Смирнов д.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)

## РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОСАДКЕ МАХОВИК-ВЕНЕЦ ПРИ КАПИТАЛЬНОМ РЕМОНТЕ ДВИГАТЕЛЯ Д-240

Целью расчета напряжений в посадке маховика-венца при капитальном ремонте двигателя Д-240 заключается в обеспечении надежности и долговечности соединения между маховиком и коленчатым валом, используя теорию упруго-пластических деформаций [1]. Численный расчет посадки маховик-венец будет производиться в программном комплексе ANSYS Workbench [2] с помощью метода конечных элементов [3]. После создания конечно-элементной сетки будут задаваться граничные условия и нагрузки. Нагрузка будет возникать из-за посадки с натягом. Затем проводится статический расчет. Венец маховика под номером 1, маховик — 2.



Рисунок 1 –Маховик и венец маховика

Расчет позволит более точно определить напряжения в сопрягаемых деталях посадки и обеспечить надежность работы двигателя при его эксплуатации после ремонта.

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

## РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ДИНАМИЧЕСКОГО ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА

Целью работы является создание теплообменника с подвижными элементами, способного утилизировать отработанное тепло загрязнённых сточных вод. На основе расчета МКЭ спроектирована модель (рис.1), имеющая четыре непрерывно вращающиеся вертикальные панели [1]. Модель 3D реализуется в программном комплексе SOLIDWORKS.

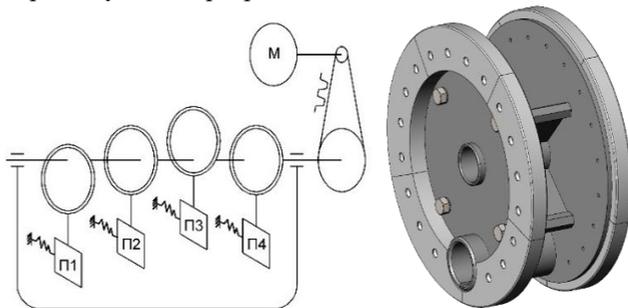


Рис.1. Кинематическая схема Рис.2 Конструкция колеса

Качение кронштейнов с теплообменными панелями, техническое обслуживание для очистки которых практически не требуется, происходит на колесе со смещенным центром (рис. 2). Вал устанавливается на две опоры (подшипники скольжения). На нем размещены колеса при помощи шпоночного соединения [2]. Колесо имеет обод из материала с низким коэффициентом трения (фторопласт). За пределами опор расположено зубчатое колесо, за счет которого вал приводится в движение с помощью зубчато-ременной передачи. Из экономической целесообразности элементы скольжения по краям втулок качения сконструированы в виде сегментов. Кроме этого, для гашения колебаний установлены пружины на каждую панель. Конструкция также содержит двигатель и пластиковую ванну.

*Д.С. Антипин, студ.; рук. М.А. Ноздрин к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, Иваново)*

## МОДИФИЦИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИОННОГО КРЕПЛЕНИЯ В АВТОКРАНЕ

Решается задача создания крепления между баком и стенкой крана. Условия закрепления - сварное соединение между баком и швеллером (рис.1) и такое же сварное соединение между “ушами” швеллера и стенкой. Граничные условия выбирались исходя из максимальных нагрузок: сила тяжести, действующая на сам бак и на топливо в нем; ускорение при прямолинейном движении; ускорение, вызванное заносом; вертикальное ускорение при движении по пересеченной местности. Для проектирования использовался стандартный швеллер толщиной 7 мм.

Первой модификацией конструкции стало изменение типа закрепления, а именно отказ от болтового соединения и замена его на пазловое. Такое решение сместило максимальные напряжения с резьбы на “уши” - сварные крепления швеллера к стенке бака. Вторая модификация - изменение геометрии “ушей” с целью снижения максимальных напряжений и отвода их от мест сварки на растянутые волокна радиуса “уха”. Третьей модификацией стало изменение общей толщины профиля швеллера для обеспечения запаса прочности [1].

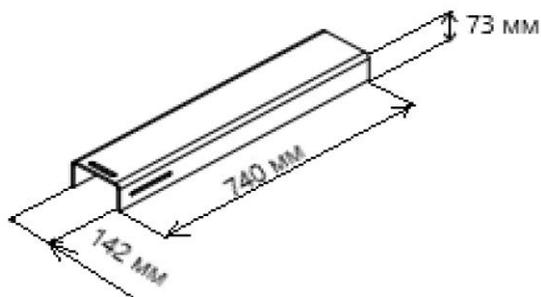


Рис.1 Модель корпуса швеллера после 3 модификации

В окончательной модификации напряжения оказались на 50,2% меньше, чем в исходной модели, перемещение уменьшилось на 18,9%.

### Библиографический список

1. **Иванов, В. И.** Подъемно-транспортные машины: учебник для вузов / В. И. Иванов. — 5-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 2010. — 480 с.: ил.

К.М. Филиппова, студ.; М.А. Шолов, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В настоящее время широко используют методы неразрушающего контроля (МНК) для проверки сварных соединений, основного металла и других элементов механических конструкций. Среди широко распространенных МНК одним из наиболее трудных для подготовки дефектоскописта является метод ультразвукового контроля (УЗК). Обусловлено это отсутствием шаблонов идентификационных карт, по которым можно определить тип дефекта.

При использовании метода УЗК возможно определить вертикальные трещины, которые нельзя найти другими МНК. В основе метода УЗК лежит преобразование продольной волны, посылаемой преобразователем, в преломленную поперечную волну в испытуемом образце, которая, достигая дефектов, отражается от них и возвращается к преобразователю. По сравнению с продольными волнами, поперечные имеют меньшее затухание и более короткую длину волны, что позволяет с их помощью обнаруживать дефекты меньшего размера.

В работе представлены результаты 2D моделирования методом конечных элементов процесса УЗК образца с трещиной (рис. 1). Показано,

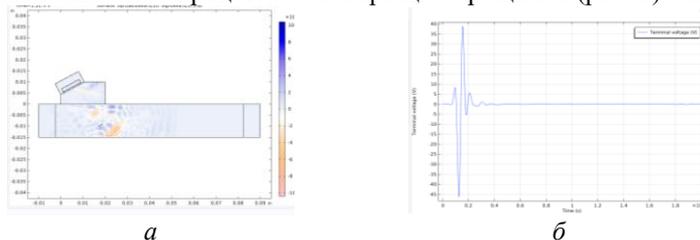


Рис. 1. Модель УЗК пластины с трещиной: *a* – распространение поперечной упругой волны от преобразователя к дефекту в образце, *б* – временная зависимость напряжения отклика

что для задачи распространения волны в твердом теле выполнимые результаты достигаются, когда сетка разрешает длины распространяющихся волн, которые, в свою очередь, зависят от скорости звука в материале. Таким образом, материалы с более низкой скоростью звука требуют более мелкой сетки, чем материалы с более высокой скоростью звука. Использование неконформной сетки в этой работе позволило сократить время решения задачи.

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

## **ВИБРОДИАГНОСТИКА СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ДЕФЕКТОВ В ПОДШИПНИКАХ КАЧЕНИЯ**

Подшипниковые опоры испытывают большие нагрузки и подвержены сильному износу. Их состояние напрямую влияет на работоспособность машины.

В целях исследования дефектов подшипника проведен эксперимент на лабораторном стенде, изображенном на рисунке 1.



Рис.1. Лабораторный стенд.

Стенд предназначен для обучения основам вибромониторинга и вибродиагностики. На правом конце стенда расположена консоль, в которую закрепляется исследуемый подшипник. Сверху на подшипнике закрепляется тензодатчик, который в результате вибрации генерирует электрический сигнал и передает его на систему измерительного оборудования. Система измерительного оборудования представляет из себя виброметр аналогового типа, фиксирующего значения виброускорения, аналого-цифровой преобразователь и ноутбук с необходимым программным обеспечением и интерфейсом вывода временного дампа сигнала.

На стенде исследовались подшипники со следующими сосредоточенными дефектами: дефекты внутреннего кольца, наружного кольца, дефекты тел качения.

В дальнейшем будет проведен спектральный анализ, выявлены места расположения дефектов.

*Д.М. Птицын, маг.; М.А. Шолов, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **К ВОПРОСУ ОБ ОБОСНОВАНИИ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ИЗНОСА ПОЛИМЕРНОЙ ВТУЛКИ СТРЕЛЫ КРАНА**

Конструирование деталей машин и механизмов на современном уровне развития моделирования сокращает не только время их проектирования, но и время изготовления. Расчеты на прочность и жесткость как элементов, так и всей конструкции позволяют заранее прогнозировать такие характеристики, как усталость, трещиностойкость и другие механические характеристики. Однако, при моделировании подвижных сопряжений, в большинстве программных комплексов конечно-элементного моделирования предложено учитывать фрикционные связи через статический и динамический коэффициенты трения и не позволяют учитывать износ. Это приводит к снижению точности прогнозирования ресурса подвижных элементов конструкции и необоснованному выбору конструкционных материалов, а также их совместимости. Ярким примером такой ситуации служит возникновение повышенного износа при трении втулки стрелы крана, изготовленной из полимерного композиционного материала (ПКМ). При выборе ПКМ при подборе втулки было проведено много дорогостоящих экспериментов на реальной конструкции, которые до сих пор продолжаются.

На основании изложенного, нами предложено перейти от экспериментов к конечно-элементному моделированию износа, с помощью которого возможно подобрать требуемые механические и триботехнические характеристики втулки. На первом этапе в качестве математической модели нами использована модель износа Арчарда, с помощью которой была оценена величина износа ПКМ, используемого в настоящее время. Моделировали линейный контакт между двумя искривленными поверхностями с равными полуширинами контакта. Задачу решали в трехмерной постановке. На первом шаге рассчитывали напряжения, возникающие в контакте, а на втором шаге сдвигали одну поверхность относительно другой. Поверхности трения предполагались гладкими, коэффициент трения между ними. При моделировании материалов пары трения были учтены только их упругие характеристики, поэтому погрешность расчета составила 20 %. Используемая модель износа не учитывала следующие факторы: величину адгезии пары трения металл-ПКМ, шероховатости для металла и волнистости для ПКМ, термомеханические свойства ПКМ. Таким образом, последовательное усложнение модели износа позволит нивелировать величину невязки.



**СЕКЦИЯ 24**  
**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ**  
**В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ**

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

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



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

## **АНАЛИЗ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ БАШЕННОЙ ГРАДИРНИ ПРИ ВЕТРОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

Градирни являются ключевыми элементами систем оборотного охлаждения (СОО) на тепловых и атомных электростанциях. Эффективность их работы во многом зависит от равномерности распределения по сечению градирни потоков воды и воздуха. Внешние ветровые нагрузки могут приводить к неравномерному распределению воздушных потоков, появлению застойных зон и снижению теплообменной эффективности системы. Моделирование влияния скорости и направления ветра позволяет диагностировать возможные эксплуатационные характеристики и минимизировать потенциальные риски. В работе с использованием программного комплекса ANSYS FLUENT проведено численное исследование влияния скорости ветра на распределение воздушных потоков в гиперболической градирне площадью орошения 4000 м<sup>2</sup> и разработаны рекомендации по минимизации негативного влияния внешних ветровых нагрузок на СОО.

Выводы и достигнутые результаты

1. Исследовано влияние скорости и направления ветра на распределение воздушных потоков внутри градирни.
2. Определены области возможного возникновения застойных зон и турбулентных областей при различных погодных условиях.
3. Выявлены критические скорости ветра, при которых эффект неравномерности становится наиболее выраженным.
4. Разработаны рекомендации по уменьшению неравномерности воздушных потоков за счет управления степенью открытия фрамуг.

### **Библиографический список**

1. **FLUENT** Incorporated, FLUENT Users Guide Release 12, Lebanon, New Hampshire, USA, 2009.
2. **Majumdar A.**, Singhal A., Reilly H., Bartz J., Numerical modelling of wet cooling towers Part 2: application to natural and mechanical draft towers, Journal of Heat Transfer 105 (1983) 736–743.
3. **Majumdar A.**, Singhal A., Spalding D. Numerical modelling of wet cooling towers Part 1: mathematical and physical models, Journal of Heat Transfer 105 (1983) 728–735.

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

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПАРИТЕЛЯ EXERGER FVE

Термообессоливающие установки (TDU) играют ключевую роль в обеспечении высококачественной обессоленной воды, которая необходима для многих промышленных процессов, включая химическую, энергетическую и фармацевтическую отрасли. Обессоленная вода используется для предотвращения образования накипи и коррозии оборудования и обеспечения стабильной работы технологических систем. Использование TDU позволяет эффективно удалять соли и другие примеси из воды, что особенно важно в регионах с ограниченными ресурсами пресной воды или высоким уровнем её загрязнения.

В рамках работы разработана модель установки Exerger FVE-40-16, входящая в состав TDU ООО «Рейннolz». Испаритель Exerger FVE-40-16 – двухкорпусный шестнадцатиступенчатый аппарат. Корпуса соединены последовательно. Каждый корпус имеет свой контур циркуляции. Внешний вид установки и схема потоков в испарителе представлена на рис.1.

Разработанная модель позволяет определить эффективную организацию и оптимизацию процессов теплообмена в испарительных установках различного назначения. Это формирует основу для определения оптимальных режимных параметров водоподготовительных установок с применением испарительных установок, что способствует повышению их производительности и экономической эффективности.

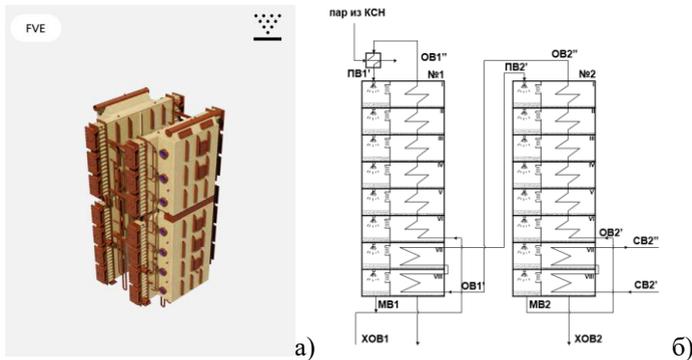


Рисунок 1. Внешний вид (а) и принципиальная схема потоков (б) испарителя Exerger FVE

*А.С. Шмелев, асп., К.А. Лётин, студ.;  
рук. А.В. Огурцов, к.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО МНОГОСТУПЕНЧАТОГО ГРАВИТАЦИОННОГО КЛАССИФИКАТОРА

Для фракционирования полидисперсной песчаной смеси была разработана экспериментальная установка (рис.1). Установка создана методом FDM 3D-печати, что обеспечило гибкость проектирования и снижение затрат. Состоит из модульных секций, каждая из которых оснащена регулируемыми направляющими. Секции расположены каскадом, что позволяет последовательно разделять смесь по гранулометрическому составу. Материал направляющих – термопластик (PLA), обеспечивающий износостойкость и легкость модификации.

Разделение частиц происходит за счет гравитационного осаждения и изменения траектории движения в зависимости от их размера и плотности [1]. Угол наклона направляющих регулируется, что позволяет управлять скоростью потока и эффективностью сепарации. В каждой секции формируется отдельный продукт, который извлекается с помощью специальных контейнеров.

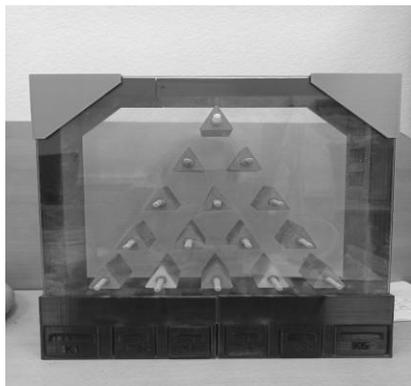


Рисунок 1 - Установка многоступенчатых гравитационных классификаторов многопродуктового типа

### Библиографический список

1. Мизонов В.Е., Ушаков С.Г. Аэродинамическая классификация порошков. М.: Химия, 1989. 158 с.

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

## **ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ В MATLAB**

Уравнения математической физики (УМФ) являются мощным инструментом для моделирования и анализа широкого спектра физических явлений, от распространения тепла и колебаний до электромагнитных волн и гидродинамических процессов. Их изучение занимает важное место в подготовке специалистов в области физики, математики, инженерии и информационных технологий. Однако, аналитическое решение УМФ возможно лишь в ограниченном числе случаев. В большинстве практических задач приходится прибегать к численным методам, позволяющим получить приближенное решение с заданной точностью.

Проведенный анализ охватывает основные типы уравнений (уравнение теплопроводности, волновое уравнение, уравнение Лапласа) и распространенные численные методы (метод конечных разностей, метод конечных элементов). Каждая задача, рассматриваемая в работе, включает в себя постановку задачи, подробное описание численного метода, рекомендации по реализации.

Был выполнен перевод физической задачи на язык математики, разработана алгоритмизация построения алгоритмов решения задачи с использованием численных методов, создана технология программной реализации численных методов с использованием современных сред программирования. Совместно проведен анализ данных и обработка (интерпретация) результатов численного моделирования, произведена оценка точности и погрешности сравнения и выбора методов, оценки преимуществ и недостатков различных численных методов для решения конкретных прикладных задач.

Дальнейшее развитие в области численных методов решения УМФ может быть связано с изучением более сложных схем и алгоритмов, адаптивных методов, методов распараллеливания вычислений, а также с применением специализированного программного обеспечения для конечно-элементного анализа.

### **Библиографический список**

1. **Тихонов А.Н., Самарский А.А.** Уравнения математической физики. 8-е изд., испр. и доп. М.: Издательство ЛКИ, 2009. 720 с.
2. **Дьяконов В.П.** MATLAB. Полный справочник и примеры применения. М.: ДМК Пресс, 2016. 768 с.

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

## **ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ АЭС**

Потери тепловой энергии с циркуляционной водой на современных атомных электрических станциях составляют порядка 60 % от располагаемой энергии. Дефекты и неисправности в системе теплообменного оборудования технологических систем оборотного охлаждения (СОО) могут приводить к увеличению указанных потерь. Зачастую дополнительные потери тепловой энергии связаны с неравномерным распределением потоков воды или воздуха по сечению градирни, с загрязнением поверхностей теплообмена в конденсаторе турбины или с неправильным выбором режима работы циркуляционных насосов (ЦН). Уменьшение указанных потерь за счет совершенствования теплообменного оборудования технологических систем оборотного охлаждения позволяет получить существенные экономические выгоды путем увеличения выработки электрической и тепловой энергии. Сказанное обуславливает актуальность проведения исследований по совершенствованию теплообменного оборудования технологических систем оборотного охлаждения.

Для решения поставленной задачи применительно к градирне использовались методы численного моделирования в рамках матричной формализации. Для проверки адекватности модели выполнены специальные расчетные исследования по влиянию начальной влажности воздуха на процесс охлаждения циркуляционной воды в башенной градирне. Сопоставление результатов вычислительных экспериментов согласно модели [1] и экспериментальных данных [2] показали адекватность предложенной модели. Максимальное расхождение этих данных не превышает 2°C, что следует признать приемлемым при проведении инженерных расчетов.

### **Библиографический список**

- 1. Моделирование** и расчет процесса тепломассообмена в башенных градирнях систем оборотного охлаждения ТЭС и АЭС / **В.П. Жуков, М.Д. Фомичев** // Вестник ИГЭУ. 2022. № 3. С. 57-63.
- 2. Калатузов В.А.** Повышение располагаемой мощности тепловых электростанций с градирнями / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Иваново, 2003. 113 с.

*С.А. Смирнов, асп.; рук. А.Н. Беляков.; д.т.н., доц.  
(ИГЭУ, г. Иваново)*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ПЕННОМ СЛОЕ БАРБОТАЖНОЙ СТУПЕНИ АТМОСФЕРНОГО ДЕАЭРАТОРА**

Важную роль при деаэрации воды в барботажной ступени деаэратора играет площадь межфазной поверхности, которая во многом обуславливает интенсивность тепло- и массообменных процессов. Значительного увеличения площади поверхности можно добиться за счет организации и поддержания стабильного слоя пены на барботажной тарелке деаэратора [1]. В пенном режиме за счет высокой скорости обновления поверхности существенно возрастает коэффициент массопередачи. Однако настройка режимных параметров работы деаэратора требует наличие адекватных методов расчета, поэтому построение математических моделей процессов межфазного переноса в пенном слое является актуальной задачей.

Для построения модели предлагается использовать кинетическое уравнение Больцмана [2], которое позволяет описывать эволюцию плотности распределения вещества по выбранным фазовым координатам при совместном протекании двух и более процессов. В качестве фазовых координат выбираются высота слоя, размеры пузырьков и агрегатное состояние вещества: вода, пар, газ в паровой фазе и газ в воде.

Выбранное фазовое пространство разбивается на конечное число ячеек, для каждой из которых на основе описания происходящих физических процессов определяются вероятности переходов в другие ячейки. Решение осуществляется численно с помощью методов компьютерной поддержки. В результате решения получаем эволюцию вектора состояния по выбранным фазовым координатам в дискретные моменты времени.

### **Библиографический список**

- 1. Процессы** и аппараты химической технологии, учебное пособие для вузов/ **Ю.А. Комиссаров**, Л.С. Гордеев, Д.П. Вент; Под ред. Ю.А. Комиссаров. М.: Химия, 2011. 1230 с.
- 2. Жуков В.П.**, Барочкин Е.В., Ненаезников А.Ю., Беляков А.Н., Росляков А.Н. Эволюция межфазной поверхности тепломассообмена в барботируемом слое // Вестник ИГЭУ. 2012. вып.4. С.12-16.

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

## **ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ЗАДАЧИ МНОГОПОТОЧНОГО МНОГОСЛОЙНОГО ТЕПЛОМАССООБМЕНА**

Нелинейные задачи теплопроводности и диффузии в многослойном теле обусловлены изменением свойств материала при изменении температуры или содержания ключевого компонента вдоль определяющей координаты. В этой связи особый интерес представляют технологии моделирования совместного протекания процессов массо- и теплопередачи в материале, при которых процесс диффузии может оказывать влияние на коэффициент теплопроводности, а тепловое состояние материала влиять на коэффициенты диффузии в данной точке тела.

В ряде технологий, например, пищевой промышленности, такое влияние может оказаться существенным при оптимизации технологических процессов, что необходимо учитывать при моделировании совмещенных процессов.

Примером такого влияния может служить копчение плавленых сыров. Продукты обрабатываются в коптильной камере дымовыми газами с повышенной температурой. Для описания копчения используются совместно уравнения теплопроводности и диффузии. Передача тепла реализуется от поверхности к центру. Влага, находящаяся в продукте, диффундирует к периферии и испаряется с поверхности продукта, а дым в коптильной камере начинает диффундировать от поверхности внутрь продукта, придавая изделию специфический вкус. Описанные четыре процесса протекают одновременно и от их эффективной организации зависят органолептические и потребительские свойства копченого сыра, а также производительность установки.

Математическое описание и решение поставленной задачи построено на использовании теории цепей Маркова [1].

### **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 Ивановского государственного энергетического университета. 2020. № 1. С. 53-59.

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

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ В СИСТЕМАХ ИСТОЧНИКИ-ПОТРЕБИТЕЛИ**

Современные города сталкиваются с растущим потреблением электроэнергии, что требует поиска инновационных подходов к управлению энергетическими ресурсами [1]. В условиях глобального перехода к концепции «умных» городов важно не только удовлетворять энергетические потребности, но и обеспечивать энергоэффективность, устойчивость и экологичность инфраструктуры. В рамках данного подхода решается задача оптимального распределения электрической энергии между источниками и потребителями. Однако в качестве энергетических потоков целесообразно рассматривать не только электроэнергетические, но и тепловые и газовые.

Цель исследования заключается в разработке математической модели, позволяющей определять источники энергетических ресурсов, которые не только наиболее эффективно интегрируются в городскую среду, но и в целом способствуют рациональному использованию ресурсов и снижению углеродного следа в системах источник-потребитель [2].

Для достижения поставленной цели формулируется ряд оптимизационных задач, направленных на нахождения наиболее эффективных способов распределения энергетических ресурсов между источниками и потребителями. Такой вид задач относится к задачам линейного программирования и, обычно решается набором стандартных методов: вычеркивания (метод двойного предпочтения); северо-западного угла; минимального элемента; аппроксимации Фогеля. В настоящей работе для решения сформулированной нелинейной транспортной задачи предлагается использовать методы Монте-Карло и генетического алгоритма.

### **Библиографический список**

**1. Трофимов В.Г.** Современные подходы к управлению энергетическими ресурсами в условиях урбанизации // Энергетика и экология. 2022. №4. С. 34–41.

## СОДЕРЖАНИЕ

### СЕКЦИЯ 19 АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Н.М. Козлов, Электропривод вентиляторов аппарата воздушного охлаждения газа .....	5
Н.Н. Иванова, Основные проблемы и задачи диагностики асинхронных двигателей.....	6
В.Д. Аронова, И.А. Тихомирова, Проектирование печатной платы драйвера силовых ключей.....	7
А.А. Соколов, Формирование траектории позиционирования в электромехатронном модуле с ПИ(Д)-регулятором.....	8
И.А. Жуков, А.Р. Воронин, К.К. Ермаков, Разработка стенда для автоматизации проверки элементов шкафа преобразователей и систем управления карьерного самосвала.....	9
Е.М. Синельщиков, Автоматизация стенда с беговыми барабанами для испытания мототехники на усталостную прочность.....	10
Д.А. Дюжев, А.А. Кузьмин, Модернизация сервисного робота гида.....	11
Д.С. Корытов, Элементы структурно-параметрического синтеза манипуляторов с техническим зрением.....	12
Е.А. Варигин, Д.О. Перевезенцева, К.К. Ермаков, Разработка адаптера аналоговых сигналов для ДВС карьерных самосвалов.....	13
М.Д. Худяков, Разработка лабораторного практикума по программному управлению станками.....	14
Д.С. Зайцев, Применение адаптивных регуляторов в системах управления электроприводами.....	15
Д.С. Зайцев, Анализ и перспективы использования ANFIS-систем в управлении СДПМ.....	16
И.М. Корешкова, Д.А. Дюжев, Разработка балансира напряжения ячеек аккумулятора сервисного робота-гида.....	17

### СЕКЦИЯ 20 ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И МАГНИТОЖИДКОСТНЫЕ УСТРОЙСТВА

А.С. Глумов, Разработка имитационной модели асинхронного двигателя нетиповой конструкции для анализа режимов работы проектируемого двигателя.....	21
Е.А. Курлаков, Математическое моделирование электромеханических процессов в синхронном реактивном двигателе с учетом демпферной обмотки.....	22

Ю.С. Сурага; П.Б. Менжинский, Структура программно-аппаратного комплекса для исследования коллекторных электрических машин постоянного тока .....	23
И.В. Новиков, Снижение электромагнитного шума и вибраций асинхронных электродвигателей при использовании магнитомягких материалов .....	24
В.Г. Драбинович, Оценка виброшумовых параметров синхронных электрических машин .....	25
В.Е. Шоронов, Моделирование процессов в зазоре магнитожидкостного сепаратора .....	26
И.А. Грачев, Установление эксцентриситета ротора синхронного генератора по коэффициенту смещения поля .....	27
Н.А. Козлов, Синхронный реактивный двигатель с АЛА-ротором .....	28
П.А. Лицов, Особенности проектирования серводвигателей .....	29
М.А. Голубев, Параллельная работа асинхронных двигателей на общую механическую нагрузку .....	30
В.Д. Бакланов, Влияние радиального смещения вала на рабочие характеристики магнитожидкостного герметизатора .....	31
А.А. Миронова, Влияние конструкции ротора в синхронном реактивном двигателе .....	32

#### СЕКЦИЯ 21 МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ И МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

О.С. Егоров, Подключение TFT дисплея на базе ST7796S к микроконтроллеру ESP - 8266 .....	35
М.Ю. Красильников, К.Э. Зайцев, Разработка динамически расширяемого конечного автомата на базе STM32 .....	36
М.Ю. Красильников, К.Э. Зайцев, Разработка метода компенсации ошибок реверса привода подачи металлорежущего станка .....	37
А.С. Корнев, Оптимизация процесса проектирования печатных плат в Altium Designer .....	38
А.Е. Игнатьева, Д.В. Кириллов, В.П. Ключкина, Оценка влияния толщины пассивирующего слоя микросхем при облучении тяжелыми заряженными частицами с использованием программно-аппаратных средств .....	39
К.А. Колпаков, Устройство для тренировки газоразрядных индикаторов .....	40
О.Ю. Григорьев, Исследование математической модели вентильного двигателя .....	41

М.А.Беляев, Е.Н. Лукьянова, Электронный замок с датчиком отпечатка пальца.....	42
А.С. Павловская, Смирнов М.А., Разработка системы автоматического управления аппаратом для изготовления кислородных коктейлей.....	43
А.С. Махлычев, Выбор параметров шунта.....	44
В.М. Васильев, Применение искусственных нейронных сетей в задачах идентификации параметров объектов управления.....	45

## СЕКЦИЯ 22 ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

А.В. Романов, А.С. Абахтимова, Абахтимова А.С. Влияние пленкообразующих смазочных материалов на износостойкость деталей.....	49
И.Ч. Муртазина, П.И. Синопеева, Применение СОТС на операциях лезвийной обработки.....	50
И.Ч. Муртазина, К.Е. Попов, Измерение параметров точности при изготовлении деталей машин.....	51
М.Е. Куприянов, А.А. Масляев, Проектирование установки для проверки и регенерации катализатора рекомбинаторов водорода.....	52
А.А. Каприльянц, С.В. Горшков, Исследование усилий гибки.....	53
А.А. Каприльянц, С.В. Горшков, Исследование механических нагрузок при пластической деформации металла.....	54
Д.Е. Жумай, Повышение надежности трубопроводов атомных станций.....	55
В. К. Соловьев, Расчет долговечности подшипника насосного агрегата.....	56
Д.Д. Лукин, К вопросу об определении параметров степенной модели износа при трении пары «шарик-плоскость» в присутствии смазочного материала.....	57
М.С. Веденеев, К вопросу о выборе полимерных материалов для направляющих станков.....	58
З.В. Зарубин, Математическое моделирование износа пары трения металл-полимер с учетом тепловыделения.....	59
А.А. Каприльянц, Создание трехмерной сборочной модели редуктора ВКН-280 вертикального кранового.....	60
А.А. Каприльянц, Патентные исследования технологического оборудования для измельчения пластиков.....	61
А.А. Жуков, Модификация поверхностного слоя алюминиевых сплавов лазерной обработкой.....	62
М.Е. Куприянов, Д.Е. Жумай, Разработка гусениц сервисного робота-гида.....	63

Э.Э. Абдыкапаров, Металлические материалы для аддитивных технологий.....	64
--	----

### СЕКЦИЯ 23 ДИНАМИКА И ПРОЧНОСТЬ СЛОЖНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

П.А. Воробьев, Топологическая оптимизация детали «качалка» в самолёте .....	67
К.А. Шумилов, Деталировка опоры призматической с производственными требованиями .....	68
Д.С. Антипин, Экспериментальное определение износа при трении пары 45- сталь 40Х в модельном смазочном материале .....	69
Л.С. Рева, Расчет на прочность термостатируемой панели методом конечных элементов .....	70
К.М. Филиппова, Моделирование процесса неразрушающего контроля методом конечных элементов .....	71
К.В. Шляпников, Разработка модели « Плита переходная для вибростола» .....	72
Д.П. Толстяков, Динамический расчёт пассажирского кресла вертолёт.....	73
Е.С. Шапов, Анализ твёрдости деталей гидромолотов .....	74
И.А. Каньгин, А.Е. Моисеев, Прочностной расчет несущего кронштейна квадроцикла .....	75
А.Е. Моисеев, Моделирование напряженно- деформированного состояния стального полукольца при радиальном растяжении.....	76
А.П. Челноков, Исследование вибрационного сигнала подшипников качения .....	77
К. Дудина, Исследование механического состояния лебедки ТЛ-2.....	78
Е.Э. Ильина, Перспективы проектирования пористых скаффолдов на основе трижды периодических минимальных поверхностей .....	79
С.В. Синёв, Расчет напряжений в посадке маховик-венец при капитальном ремонте двигателя Д-240.....	80
А.А. Михайлишина Разработка конструкции динамического теплообменного аппарата.....	81
Д.С. Антипин, Модифицирование конструкционного крепления в автокране .....	82
К.М. Филиппова, Применение ультразвуковых датчиков для контроля дефектов конструкции .....	83
И.А. Каньгин, Вибродиагностика сосредоточенных дефектов в подшипниках качения .....	84

Д.М. Птицын, К вопросу об обосновании метода конечных элементов к моделированию износа полимерной втулки стрелы крана.....	85
--	----

## СЕКЦИЯ 24 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ

М.Д. Фомичев, Анализ неравномерности воздушных потоков в поперечном сечении башенной градирни при ветровом воздействии .....	89
И.А. Кокулин, Моделирование испарителя Exerger FVE.....	90
А.С. Шмелев, К.А. Лётин, Разработка лабораторного многоступенчатого гравитационного классификатора .....	91
К.А. Лётин С.А. Лебедева, Е.К. Торопова, Численное моделирование уравнений математической физики в Matlab .....	92
М.Д. Фомичев, К.А. Кулемин, Оценка возможности повышения эффективности теплообменного оборудования технологических систем АЭС.....	93
С.А. Смирнов, Моделирование процесса тепломассопереноса в пенном слое барботажной ступени атмосферного деаэраторе .....	94
Е.В. Басова, Задача многопоточного тепломассобмена в многослойном теле .....	95
В.Е. Макаров, Математическая модель оптимального энергоснабжения в системах источник-потребители .....	96
СОДЕРЖАНИЕ .....	97

# **ЭЛЕКТРОМЕХАНОТРОНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

**XX ВСЕРОССИЙСКАЯ  
(XII МЕЖДУНАРОДНАЯ)  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ  
И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ  
«ЭНЕРГИЯ-2025»**

**МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ**

**Том 4**

*Печатается в авторской редакции*

*Составитель: Аполонский В.В.  
Компьютерная верстка: Аполонский В.В.*

Подписано в печать 25.04.2025. Формат 60x84 1/16 .  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 5.93  
Тираж электронное издание.  
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический  
университет имени В.И. Ленина»  
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ