

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

**ЭЛЕКТРОМЕХАНОТРОНИКА И
УПРАВЛЕНИЕ
«ЭНЕРГИЯ-2014»**

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

г. Иваново, 15-17 апреля 2014 года

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

ТОМ 4

ИВАНОВО

ИГЭУ

2014

УДК 62-1 + 62-5 + 620 + 621

ББК 30.1 + 30.2-5-05 + 34.4

ЭЛЕКТРОМЕХАНОТРОНИКА И УПРАВЛЕНИЕ // Девятая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2014»: Материалы конференции. В 7 т. Т. 4 – Иваново: ФГБОУ ВПО Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2014. – 356 с.

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

Сборник предназначен для студентов, аспирантов и преподавателей вузов, интересующихся вопросами электромеханотроники и управления.

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

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

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

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

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

Ответственный секретарь: Маршалов Е.Д. – зам. декана ИВТФ.

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

Координационная группа: Смирнов Н.Н., Иванова О.Е., Ильченко А.Г., Ведерникова И.И., Филатова Г.А.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

СЕКЦИЯ 20

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

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

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

*В.В. Гуляев, С.С. Котов, студ.; рук. И.С. Саватеева, к.т.н., доц.
(Филиал МЭИ в г. Смоленске)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕНТИЛЬНО-ЕМКОСТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Электропривод постоянного тока, при котором питание якоря происходит от устройства, обладающего свойствами источника тока (ИТ), обладает рядом весьма полезных качеств: позволяет регулировать в широких пределах момент, скорость, мощность, а также формировать механические характеристики практически любого вида, обеспечивает ограничение механических перегрузок оборудования, дает возможность построить рациональные структуры многодвигательного привода и т.д. Вместе с тем, технические возможности привода ограничены способом управления по инерционному каналу – цепи возбуждения, а также относительно невысоким значением предельного момента двигателя при неуправляемом ИТ [1].

Очевидно, что реализация полезных свойств привода по системе ИТ-Д в многочисленных случаях, где присущие ему ограничения не существенны, возможна при наличии технически и экономически совершенных источников тока. Наиболее предпочтительными являются параметрические источники тока, к которым относятся вентильно-емкостные преобразователи (ВЕР).

ВЕР представляют собой диодно-конденсаторные схемы, работающие в режиме, близком к короткому замыканию цепи нагрузки. Широкому применению ВЕР в качестве параметрического источника тока для питания машин постоянного тока способствует предельная простота исполнения, высокий КПД, емкостной коэффициент мощности, что позволяет использовать ВЕР помимо выполнения основной

функции – стабилизации тока в нагрузке, также и в качестве компенсаторов реактивной мощности.

В настоящее время известно большое многообразие трехфазных схем ВЕП. На рис.1 приведены варианты схем для анализа [2].

Целью данной работы является анализ различных вариантов схем трехфазных ВЕП, их стабилизирующих свойств, массогабаритных и энергетических показателей, пульсаций выпрямленного тока в нагрузке.

В пакете прикладных программ Matlab Simulink с использованием пакета расширения SimPowerSystems разработаны модели схем рис.1. На рис.2 в качестве примера представлена схема модели для ВЕП рис.1,в.

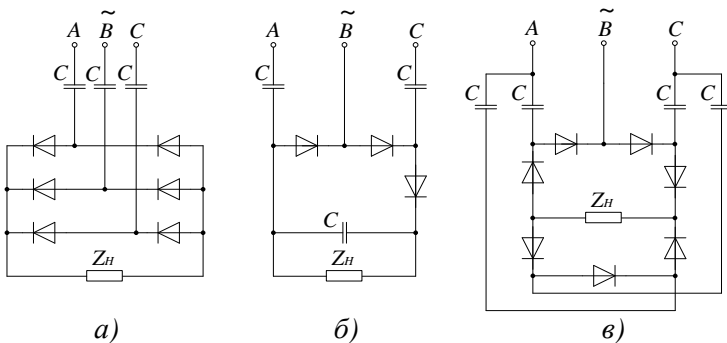


Рис.1. Варианты трехфазных схем ВЕП

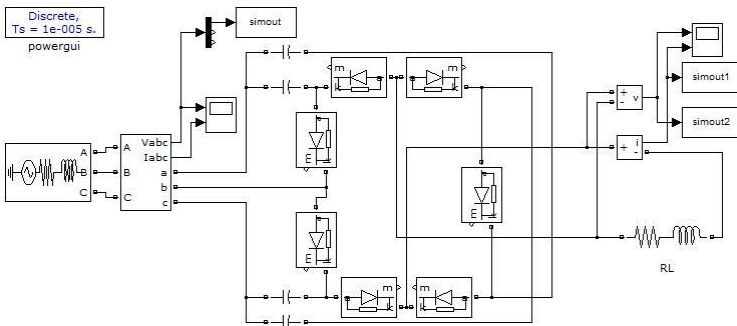


Рис.2. Схемы моделей ВЕП в пакете Matlab

График тока в нагрузке приведен на рис.3.

Из графиков тока следует, что схема б) в отличие от мостовой схемы а) обладает большими пульсациями выпрямленного тока в нагрузке за счет меньшего количества элементов (три диода вместо шести) и

составляют 25% от установившегося значения. Схема *в*, имея наибольшее число элементов, имеет пульсации выпрямленного тока около 7%. Однако данная схема обеспечивает наибольший уровень тока в нагрузке, в 3,2 раза превышающий таковой для схемы *а* и в 2,4 раза – для схемы *б*, при одинаковых параметрах установленных элементов и том же напряжении сети.

Для анализа стабилизирующих свойств были сняты внешние характеристики преобразователей рис.4.

Как видно из графиков, наибольший диапазон изменения нагрузки, при котором погрешность стабилизации тока не превышает 20 %, обеспечивается в первой схеме.

Коэффициент мощности во всех схемах является емкостным.

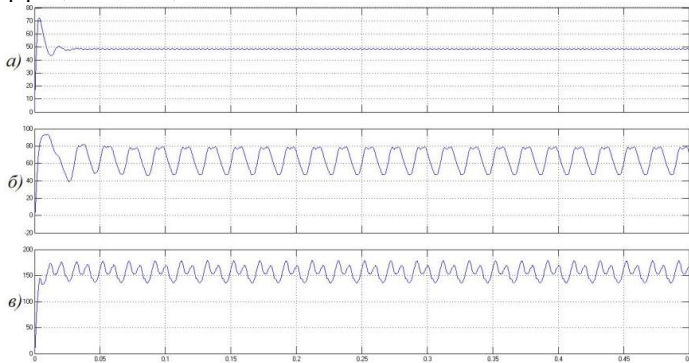


Рис.3. График тока в нагрузке для трехфазных схем ВЕП

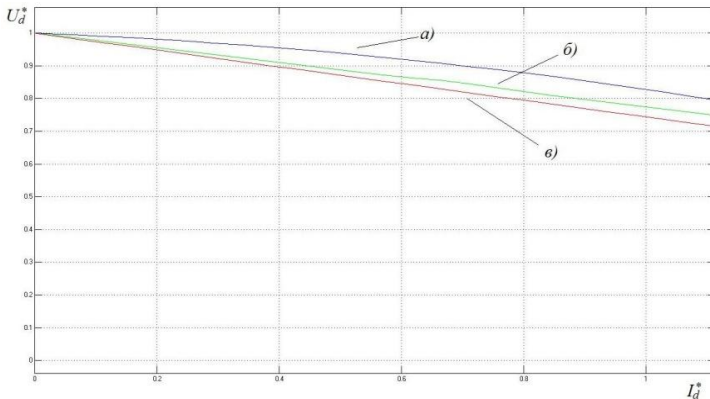


Рис.4. Внешние характеристики трехфазных ВЕП

Исследования, проведенные на модели, показали, что наиболее предпочтительной является схема ВЕП с тремя включенными в фазы конденсаторами и мостовым выпрямителем на выходе (схема *a*). Она обладает наименьшими пульсациями тока в нагрузке, обеспечивает хорошие стабилизирующие свойства и выигрывает по массогабаритным показателям.

Библиографический список

1. **Ильинский Н.Ф.** Электропривод в современном мире: В кн. Труды V международной конференции по автоматизированному электроприводу. – СПб, 2007. с.17-19.
2. **Системы стабилизации в электроприводах с источниками тока.** Петров В.П., Лабовский В.И./Под ред. П.Е. Данилова. – М.: Моск. энерг. ин-т, 1986. – 80 с.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ХАРАКТЕРИСТИК LEGO MINDSTORMS NXT 2.0

Использование интеллектуального конструктора Lego Mindstorms NXT 2.0 в лабораторном практикуме по робототехнике при подготовке по профилю «Электропривод и автоматика» позволит дополнить палитру компетенций знаниями и навыками работы с программными, аппаратными и конструктивными компонентами, достаточно приближенными к компонентам, применяемым в промышленных роботах и манипуляторах. В пользу внедрения конструктора в учебный процесс говорит его экономические показатели на фоне образцов лабораторных стендов отечественной разработки.

Авторы детально изучили возможности конструктора и его компоненты на практике, выполнили поиск материалов в Internet, что позволило не только детально описать робототехнические компоненты конструктора для методического обеспечения лабораторного практикума, но и реализовать на базе конструктора оригинальный проект робота, автоматически собирающего известную головоломку «Кубик Рубика».

Приводятся конструктивные особенности интерактивного сервопривода, которых в составе конструктора имеется три штуки, что позволяет реализовать широкий спектр механических конструкций. Описываются механические характеристики сервопривода при питании, как от батареи, так и аккумулятора.

Рассмотрены все датчики, которые используются в конструкторе: сенсор нажатия (тактильный датчик); сенсор цвета, обеспечивающий распознавание цветов; может работать в режиме датчика освещенности и цветовой сигнализации; ультразвуковой сенсор позволяет измерять расстояния до предмета и реализовать на движение объектов.

Представлены видеоматериалы, описывающие основные фазы создания, загрузки программ в контроллер NTX, тестирование исполнения и успешного функционирования робота по автоматической сборке «Кубика Рубика».

Планируется развертывание на основе Lego Mindstorms лабораторный практикум по основам робототехники, который входит в состав дисциплины «Управление движением промышленных манипуляторов» профиля подготовки «Электропривод и автоматика» бакалавриата по направлению «Электроэнергетика и электротехника».

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

НАБЛЮДАТЕЛИ МЕХАНИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

Электромехатронные системы с двигателями переменного тока, преобразователями частоты и микропроцессорным управлением позволяют задать статику и динамику процессов, широкую полосу пропускания, обеспечить технологическое оборудование конкурентоспособными характеристиками

Особенно актуально применение систем с электромехатронными модулями в системах позиционирования для станков и промышленных роботов. В этом случае характерным фактором влияния на характеристики каждой оси является наличие существенных кинематических и динамических связей между осями в виде механических нагрузок различной природы.

Традиционно системы управления электроприводом формировались преимущественно с использованием принципа регулирования по отклонению. В рамках этого принципа снижения слияния возмущений на характеристики добивались введением с помощью структуры и параметров регулятора выходной переменной астатизма, то есть отсутствия установившейся ошибки регулирования при той или иной форме возмущения. Такой подход к построению систем управления требовал повышения порядка астатизма для достижения высокого качества ха-

рактических по возмущению и приводил к весьма сложным в реализации структурам регуляторов. Альтернативой является принцип регулирования по возмущению и построение комбинированных систем управления. Но на практике этот принцип не применялся из-за сложности реализации связи по возмущению, необходимости измерения мгновенных значений механических нагрузок, действующих на электромеханотронный модуль системы.

Реализация компенсирующей связи по возмущению на основе использования наблюдателей нагрузки с микропроцессорной реализацией на *DSP* контроллерах позволяет перейти к практическому использованию комбинированного управления в электромеханотронных системах.

Предлагается структура электромеханотронной системы с комбинированным управлением, в которой максимальным образом задействованы оба принципа управления. Применяем астатические регуляторы положения для обеспечения качества регулирования по управлению и отсутствия статической ошибки по возмущению. Вместе с этим применяем наблюдатели нагрузки для компенсации возмущений произвольной формы в структуре комбинированной системы.

Рассмотрены варианты построения комбинированной системы позиционирования с регуляторами положения различного типа (статические, астатические, с астатизмом второго порядка, модифицированные). В качестве наблюдателей нагрузки предлагается использование астатических наблюдателей состояния механической части электропривода с фильтрацией сигнала нагрузки и использованием оценки скорости изменения нагрузки.

Выполнен теоретический анализ динамики вариантов построения комбинированной системы по каналу возмущения при различных формах изменения механической нагрузки: постоянная нагрузка, линейное, параболическое изменение. С использованием инструментов линейного анализа *Simulink* получены логарифмические характеристики системы между возмущением и ошибкой регулирования, позволившие выполнить количественное сравнение вариантов системы по степени снижения влияния возмущения на качество характеристик позиционирования. Получены соотношения, позволяющие выполнить инженерный расчет основных элементов комбинированной системы: регуляторов положения различного вида и наблюдателей нагрузки.

Даны практические рекомендации по использованию при синтезе распределений корней характеристического уравнения по Бесселю и биному Ньютона. Выполнено сравнение переходных процессов при позиционировании при разных формах распределений корней.

Теоретические положения, принятые за основу при построении систем, прошли проверку средствами имитационного моделирования.

Основные результаты предполагается использовать в учебном процессе при подготовке магистров по направлению 140400, профиль «Электропривод и автоматика». В дальнейшем планируется работа по изучению возможности реализации предложенных структур систем с наблюдателями нагрузки в *DSP* контроллерах и введения в контур компенсации производных механической нагрузки.

*Ю.А. Родионов, студент; рук. А.А. Репин, ст. преп.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

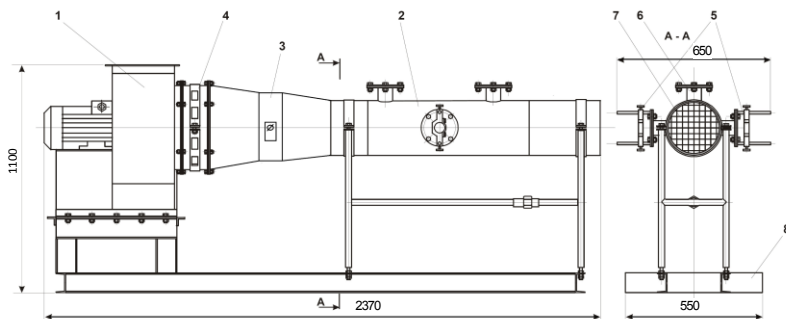
ПРОЕКТ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА «ЭЛЕКТРОПРИВОД И АВТОМАТИКА СИСТЕМ ВЕНТИЛЯЦИИ»

Автоматизация систем вентиляции чрезвычайно важна как для производственных зданий, так и для бизнес-центров, развлекательных и торговых центров, и других помещений с высокой посещаемостью и проходимостью. В настоящее время элементы систем автоматики кондиционирования и вентиляции воздуха широко применяют также в современных жилых многоквартирных комплексах и индивидуальных коттеджах. Качество, надежность и безопасность работы системы вентиляции зависят в первую очередь от уровня подготовки специалистов, отвечающих за правильный выбор оборудования, его грамотную установку и ввод в эксплуатацию.

Анализ результатов распределения выпускников профиля «Электропривод и автоматика» позволяет сделать вывод о том, что инженерам-приводчикам очень часто приходится решать задачи монтажа и пуско-наладки современного вентиляционного оборудования. В этой связи актуальной является разработка лабораторного оборудования, позволяющего будущим специалистам в рамках преподаваемых учебных дисциплин «Элементы систем автоматики», «Электропривод типовых производственных механизмов», «SCADA-системы» освоить принципы функционирования как отдельных узлов электрооборудования и вентиляционной автоматики, так и общие алгоритмы управления системами вентиляции и кондиционирования воздуха.

Проект разрабатываемого нами лабораторного стенда, общий вид которого представлен на рис. 1., предполагает знакомство со следующими элементами систем автоматики:

- электродвигатель АДЧР63 специального исполнения, предназначенный для питания от преобразователя частоты;
- преобразователь частоты *Vesper E2-8300*, регулирующий скорость вращения рабочего колеса вентилятора;
- программируемый логический контроллер *Pixel*, выступающий в роли контроллера верхнего уровня, обеспечивающего требуемые режимы работы вентиляционной установки;
- импульсный датчик скорости вращения вала электродвигателя ЛИР-285А;
- электропривод воздушной заслонки *Belimo LM230A*;



- 1 – Вентилятор типа ВО-14-320-4;
- 2 – Измерительный трубопровод Ду=200 мм;
- 3 – Заслонка с электроприводом BELIMO LM230A;
- 4 – Гибкая вставка;
- 5 – Узел крепления расходомера;
- 6 – Штуцер для установки прибора контроля скорости потока;
- 7 – Струевыпрямительная решетка «УПП ЭМИС-ВЕКТА 1200 200/200-Н»;
- 8 – Основание.

Рис. 1. Общий вид и конструкция лабораторного стенда

- расходомер газа массовый СУРГ 1.000, используемый для определения скорости потока и объёмного расхода воздуха в вентиляционном канале

Основными экспериментами, позволяющими изучить взаимодействие перечисленных выше узлов системы вентиляции, являются:

- моделирование режимов плавного пуска вентилятора;
- исследование способов регулирования скорости вращения рабочего колеса вентилятора;
- обеспечение работы системы по заданному временному алгоритму;
- поддержание и контроль заданного расхода воздуха;

- контроль и диагностика состояния и работы составляющих системы вентиляции;
 - остановка работы системы вентиляции при аварийной ситуации.
- В результате прохождения лабораторного практикума на разрабатываемом стенде бакалавры-инженеры профиля «Электропривод и автоматика» приобретут следующие профессиональные компетенции:
- способность анализировать технологический процесс как объект управления;
 - готовность обеспечить соблюдение заданных технологических параметров технологического процесса и качества вырабатываемой продукции.

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

АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА МЕХАНИЗМА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РЕЖУЩЕЙ ГОЛОВКИ РАСКРОЙНОГО СТОЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ШАГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В настоящее время большое развитие получили полу и полностью автоматизированные системы, обладающие высокой точностью и производительностью, они способны заменить человека на самых трудоемких этапах производства изделия. Помимо экономии трудовых ресурсов использование автоматизированного раскройного комплекса (АРК) позволяет добиться экономии материальных ресурсов за счет оптимального расположения и точного вырезания деталей. Особенно часто АРК можно увидеть в крупных предприятиях и цехах, количество изделий и оборот продукции которых подчас настолько велик, что весь цех был бы заполнен людьми, но применение комплекса позволяет экономить материальные и человеческие ресурсы. Высокая точность позиционирования и резки обеспечивает производство продукции высочайшего качества кроя в огромных количествах. Один из вариантов блок-схемы автоматизированного раскройного комплекса представлен на рис. 1.

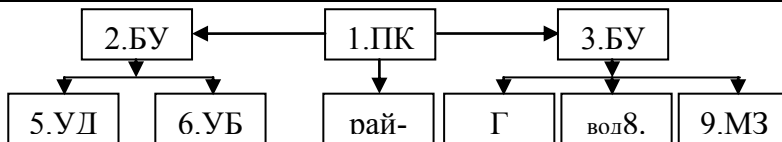


Рис. 1. Функциональная схема АРК: 1. Персональный компьютер;
 2. Блок управления перемещением; 3. Блок управления режущей головкой;
 4. Блок управления индикацией; 5. Управление двигателем конвейера;
 6. Управление боковым приводом; 7. Управление работой режущей головки
 8. Устройство позиционирования прижимной лапки; 9. Механизм заточки лезвия

В работе рассматриваются вопросы построения системы электропривода механизма перемещения режущей головки раскройного стола с использованием шаговых двигателей

Выполнен анализ систем управления шаговыми двигателями, схожих по функциональным возможностям. Наибольший интерес представляют следующие работы:

1. Программируемый блок управления шаговыми двигателями SMSD-1.5(Россия «НПФ Электропривод») [1].

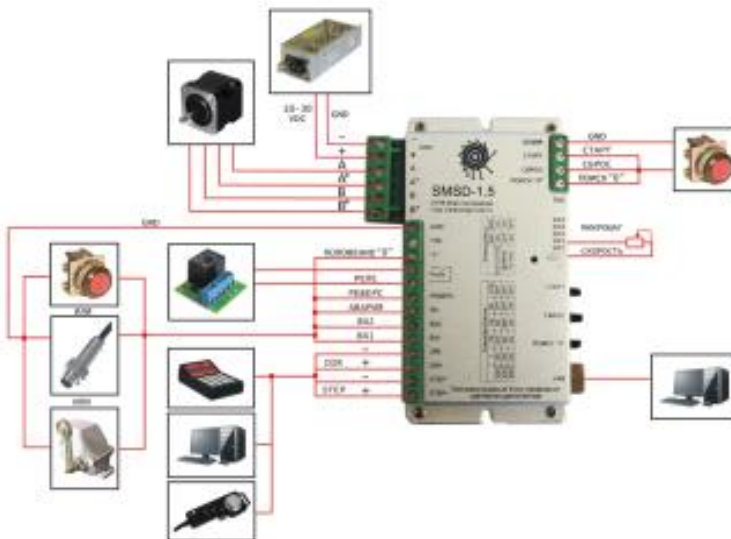


Рис. 2. Блок управления SMSD-1.5

Программируемый блок управления SMSD-1.5, изображенный на рисунке 2, предназначен для управления четырехфазными и двухфазными гибридными шаговыми двигателями с током фазы до 1,5А. Блок управления может работать в режиме целого шага или осуществлять дробление на 1/2, 1/4, 1/8, 1/16 шага.

2. Контроллер для управления шаговыми двигателями с возможностью работы в сети CAN-Bus (Китай)[2].

Через конвертер CAN-RS232 (UIM250B), пользователь может управлять UIM2420-х контроллерами по интерфейсу RS232, используя ASCII кодировку, не имея глубоких знаний о запуске шаговых двигателей и использования CAN шины. На основании проведенных патентных исследований принято целесообразным использовать для системы управления электроприводом контроллер PLC330b компании Purelogic (Россия) [3], представленный на рис. 3.

PLC330b (рис. 3) – современный, микрошаговый LPT многоканальный драйвер управления 3-мя ШД.

На силовом модуле расположен разъем для подключения контроллера к параллельному порту ЭВМ. На плате установлена микросхема 74HC541X в качестве буфера входных сигналов управления с ЭВМ. Реализована оптическая развязка сигналов управления step/dir на четырехканальных высокоскоростных оптопарах HCPL2630.



Рис. 3. Контроллер PLC330b.

Для защиты транзистора от обратной ЭДС реле, возникающей в моменты коммутации, используется диод PMLL4148, максимально допустимое обратное напряжение которого равно 75 В. В качестве драйвера шагового двигателя (ШД) используется специализированная микросхема фирмы Toshiba TB6560AHQ, которая в своем составе имеет логический контроллер, управляющий работой силовых ключей, генератор ШИМ - сигнала, 2 H-моста на полевых транзисторах, схему защиты от перегрева.

Для определения параметров и характеристик опытного образца системы управления ШД целесообразно применить средства компьютерного моделирования. Упрощенная модель шагового двигателя может быть построена на основе ниже приведенных уравнений:

$$\frac{di_a}{dt} = -\frac{R}{L_0}i_a + \frac{K_m}{L_0}\omega\sin(N_r\Theta) + \frac{\Theta_a}{L_0};$$

$$\frac{di_b}{dt} = -\frac{R}{L_0}i_b + \frac{K_m}{L_0}\omega\sin(N_r\Theta) + \frac{\Theta_b}{L_0};$$

$$t = K_m \left[-i_a \sin(N_r\Theta) + i_b \cos(N_r\Theta) \right] - K_{d4} \sin(4N_r\Theta),$$

где: K_m – силовая константа (Н·м/А), N_r – число пар полюсов, Θ – позиция ротора (рад), K_{d4} – амплитуда 4-й гармоники резонирующего момента (Н м).

Токи управления задаются цифровыми задатчиками тока. Основными параметрами, которых являются пропорциональная K_p и интегральная K_i составляющие[4].

$$v_d = K_p (i_{d_cmd} - i_{d_fb}) + K_i \int (i_{d_cmd} - i_{d_fb}) dt;$$

$$v_q = K_p (i_{q_cmd} - i_{q_fb}) + K_i \int (i_{q_cmd} - i_{q_fb}) dt.$$

Токи фаз двигателя i_a, i_b преобразованы посредством прямого преобразования Парка в неподвижную относительно ротора систему координат “d, q”, вращающейся в пространстве с некоторой скоростью[5].

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(N_r\Theta_{fb}) & \sin(N_r\Theta_{fb}) \\ -\sin(N_r\Theta_{fb}) & \cos(N_r\Theta_{fb}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix}$$

Модель замкнутой системы управления ШД включает в себя: блок задания сигналов управления (1), ПИ регуляторы тока (2), прямое (7) и обратное преобразования парка (3), блок формирования ШИМ (4), модель якорной цепи ШД (5), механическую часть ШД (6).

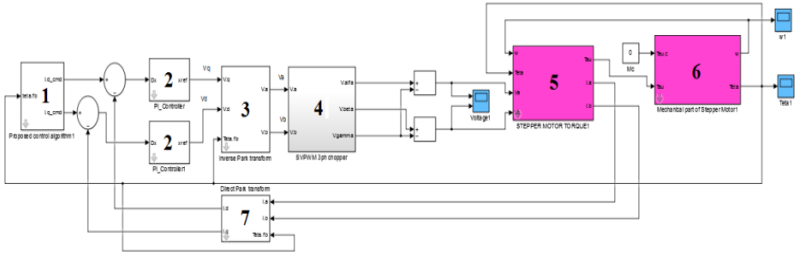


Рис. 4. Модель замкнутой системы управления ШД.

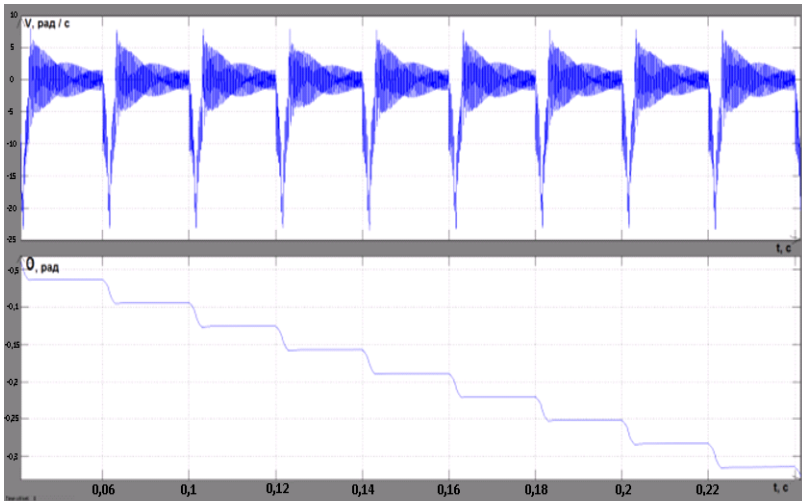


Рис. 5: Зависимости скорости и угла поворота от времени, при движении в обратную сторону

Библиографический список

1. www.electroprivod.ru
2. Журавлев В.В. Система управления исполнительными механизмами спектрометра на реакторе ИБР-2 как современная локальная сеть контроллеров. - г. Дубна, 2007. – с 38-50
3. www.purelogic.ru
4. Takashi Kanjo, and Akira Sugawara, “Stepping Motors and Their Microprocessor Controls” Clarendon Press, Oxford, 1994.
5. F. Khorrami, P. Krishnamurthy, and H. Melkote, “Modeling and Adaptive Nonlinear Control of Electric Motors”, Springer – Verlag Berlin Heidelberg New York, 2003.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕННЫХ И ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАНДАРТНЫХ ФОРМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОРНЕЙ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Применение стандартных форм распределения корней характеристического уравнения в синтезе систем управления электроприводом обеспечивает заданные требования к динамическим характеристикам, как при использовании модальных регуляторов (регуляторов состояния) и наблюдателей, так и в «классических» структурах с регуляторами переменных электропривода.

Следовательно, исследование временных и частотных характеристик стандартных форм, их сравнение, а также разработка методик их использования при синтезе систем управления электроприводами является актуальной задачей.

Предлагаются исследования следующих стандартных форм.

Распределение по биному Ньютона обеспечивает монотонные переходные процессы. Поэтому такое распределение корней часто используют в системах позиционирования и многомассовых системах электропривода с нежесткой механикой и люфтами. Монотонность процессов при любом порядке должна обеспечивать отсутствие перегулирования в переходных процессах, как при синтезе регуляторов переменных электропривода, так и при использовании в наблюдателях состояния.

Стандартную форму распределения по Баттерворту традиционно применяют в системах подчиненного регулирования электроприводов для настройки регуляторов тока, скорости и положения.

Стандартная форма распределения по Бесселю характеризуется минимальными искажениями системой управления входного воздействия за счет постоянства времени группового запаздывания. Таким образом достигается максимальное приближение переходных характеристик к идеальным, минимальные значения перегулирования даже для систем высокого порядка.

Стандартная форма распределения по Чебышеву используется для построения систем фильтрации сигналов, так как эта форма дает максимальное ослабление сигналов в полосе затухания.

Рассмотрены свойства временных и частотных характеристик основных стандартных форм для систем до 6 порядка, что обеспечивает синтез в большинстве расчета электромеханотронных системах современных электроприводов.

Основной проблемой при настройке систем является выбор среднегеометрического корня для обеспечения динамики, отвечающей техническому заданию по быстродействию.

Среднегеометрический корень может быть определен для системы по временным характеристикам, когда в техническом задании указывается время переходного процесса и погрешность регулирования.

Для удобства анализа переходных временных характеристик получены их аналитические выражения, используя обратное преобразование Лапласа в составе символических операций *MathCAD*. Получены результаты определения среднегеометрического корня для ряда величин точности регулирования по временным характеристикам. Определение производилось в программе *MathCAD* по графикам с использованием процедуры «трассировка». Проверка выбора среднегеометрического корня показала достижение заданной точки по времени и по уровню, соответствующему погрешности регулирования, для любого порядка. Это говорит о корректности алгоритма определения среднегеометрического корня по нормированным временным характеристикам.

Во многих промышленных системах управления, а особенно, в системах промышленного электропривода, таких как электроприводы станков и промышленных роботов, для оценки динамики всей системы и ее компонент используют частотные характеристики. В электроприводах станков и промышленных роботов рекомендуют для оценки динамики использовать понятие полосы пропускания, граница которой определяется меньшей из двух частот:

- частота, при которой ЛАЧХ пересекает уровень – 3 дБ;
- частота, при которой ЛФЧХ пересекает уровень – 90 градусов.

Для более точного вычисления среднегеометрического корня предлагается использовать аналитические выражения для частотных характеристик. Для стандартной формы по биному Ньютона получены аналитические выражения, позволяющие связать полосу пропускания и среднегеометрический корень.

При исследовании характеристик и синтезе нелинейных систем показана эффективность использования инструментов линейного анализа и оптимизации характеристик средствами *Simulink* программного комплекса *Matlab*.

*И.А. Балакирев, студент; рук. Б.С.Курнышев, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ С ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ЧАСТОТЫ

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

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

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

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

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

Основными решёнными задачами являются:

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

В результате была построена математическая модель электрического кабеля, были разработаны программы для моделирования и проанализированы различные варианты фильтров. Сформулированы методики для выбора структуры и расчета параметров фильтров.

Разработанный подход позволяет ограничить на заданном уровне скорость нарастания фронтов напряжения на двигателе и перенапря-

жений в кабеле и на двигателе, уменьшить до минимума радиоизлучение кабеля.

*Е.С. Шарапанов, студент; рук. Б.С. Курнышев, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ОГРАНИЧЕНИЕ УРОВНЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЭЛЕКТРОПРИВОДАХ С ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ЧАСТОТЫ

В процессе работы асинхронного электропривода на выходе и входе преобразователя частоты (ПЧ) возникают высокочастотные импульсы напряжения с амплитудой порядка 500 В. Эти импульсы распространяются вдоль электрических кабелей, вызывая мощное электромагнитное излучение в окружающую среду. Возникает проблема электромагнитной совместимости (ЭМС). Если не принять специальных мер по ограничению излучения, то такой электропривод не будет удовлетворять современным требованиям по ЭМС.

ЭМС – это способность технических средств удовлетворительно работать в реальной электромагнитной обстановке, не создавая недопустимых помех другим потребителям электрической энергии. Ввиду особой значимости проблемы ЭМС в России введен ряд новых стандартов [1 – 7], опирающихся на стандарты Международного Электротехнического комитета (МЭК) по ЭМС.

В данной работе предложено решение одной из задач в области ЭМС применительно к системе «Преобразователь частоты – электрический кабель – асинхронный двигатель». Предлагаемое решение позволяет ограничить скорость нарастания напряжения на выходе преобразователя частоты на заданном уровне (по действующим стандартам рекомендуемое значение скорости нарастания напряжения не должно превышать 500 В/мкс). В этом случае частота электромагнитного излучения не будет превышать 150 кГц, то есть спектр частот будет лежать ниже пределов радиодиапазона. Кроме того, ограничение скорости нарастания напряжения удовлетворительно сказывается на работе двигателя.

Известные решения указанной задачи используют электрические фильтры пассивного типа (содержащие катушки индуктивности, конденсаторы и резисторы). Отличие предложенного решения от известных заключается в том, что параметры пассивных фильтров определяются в зависимости от длины кабеля:

$$L_{\Phi} = L_0 l_{\text{каб}}, \quad (1)$$

$$C_{\Phi} = C_0 l_{\text{каб}}, \quad (2)$$

$$R_{\Phi} = \sqrt{\frac{L_{\Phi}}{C_{\Phi}}}, \quad (3)$$

где L_{Φ} – индуктивность фильтра, Гн; L_0 – приведенная индуктивность кабеля, Гн/м; C_{Φ} – емкость конденсатора фильтра, Ф; C_0 – приведенная емкость кабеля, Ф/м; $l_{\text{каб}}$ – длина кабеля, м; R_{Φ} – активное сопротивление фильтра, Ом.

Суть подхода состоит в том, что активное сопротивление в фильтре становится независимым от длины кабеля и равным волновому сопротивлению. Действительно, при подстановке (1) и (2) в (3) получаем

$$R_{\Phi} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}. \quad (4)$$

Левая часть в (4) – это волновое сопротивление кабеля. При таком условии процессы в кабеле становятся особенно благоприятными.

Библиографический список

1. **ГОСТ Р 51317.4.4-99** (МЭК 61000-4-4-95) «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к наносекундным импульсным помехам. Требования и методы испытаний». Взамен ГОСТ 29156-91.
2. **ГОСТ Р 51317.4.5-99** (МЭК 61000-4-5-95) «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии. Требования и методы испытаний». Взамен ГОСТ 30374-95 / ГОСТ Р 50007-92.
3. **ГОСТ Р 51317.3.2-99** (МЭК 61000-3-2-95) «Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе). Нормы и методы испытаний». Вводится впервые.
4. **ГОСТ Р 51317.3.3-99** (МЭК 61000-3-3-94) «Совместимость технических средств электромагнитная. Колебания напряжения и фликер, вызываемые техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе), подключаемыми к низковольтным системам электроснабжения. Нормы и методы испытаний».
5. **ГОСТ Р 51317.3.8-99** (МЭК 61000-3-8-97) «Совместимость технических средств электромагнитная. Передача сигналов по низковольтным электрическим сетям. Уровни сигналов, полосы частот и нормы электромагнитных помех». Вводится впервые.
6. **ГОСТ Р 51317.4.3-99** (МЭК 61000-4-3-95) «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к радиочастотному электромагнитному полю. Требования и методы испытаний». Взамен ГОСТ 30375-95 / ГОСТ Р 50008-92.

7. **ГОСТ Р 51317.4.6-99** (МЭК 61000-4-6-96) «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к кондуктивным помехам, наведенным радиочастотными электромагнитными полями. Требования и методы испытаний». Вводится впервые.

*Д.С. Туманов, студент; рук. В.Т.Филичев, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ (АСПЕКТЫ) ПРИМЕНЕНИЯ ТИРИСТОРНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ФАЗОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Использование асинхронного электропривода с фазовым управлением в большинстве случаев определяется технологическими требованиями производственных механизмов (транспортёров, насосов, вентиляторов, лифтов, конвейёров и др.), требующих плавного пуска и ограничения ударных моментов, ускорений и рывков, возникающих при прямом подключении асинхронных двигателей к номинальному напряжению сети, а также при небольших диапазонах регулирования скорости в кратковременном или периодически – кратковременном режимах.

Наиболее распространенной силовой схемой тиристорного регулятора напряжения является попарное встречно-параллельное включение тиристоров в каждую фазу трехфазного асинхронного двигателя. При изменении угла открытия тиристоров α в диапазоне от угла отставания тока статора от напряжения φ до 180° действующее фазное напряжение первой гармоники изменяется от номинального напряжения питающей сети до нуля [1].

Работа асинхронного двигателя на регулировочных характеристиках происходит в режиме прерывистого тока. При таком способе управления в спектре несинусоидального периодического тока при соединении обмоток статора звездой без нулевого провода кроме основной присутствуют нечетные 5-я, 7-я, 11-я и т.д. гармоники.

В связи с этим даже в установившемся режиме имеют место пульсации момента двигателя с частотой 300 Гц, которые практически не оказывают влияния на колебания скорости.

Высшие гармоники увеличивают потери в двигателе, возрастание которых оценивается введением в расчетные формулы потерь коэффи-

циентов $K_{n1} = \frac{I_1}{I_{11}}$ и $K_{n2} = \frac{I_2}{I_{21}}$, где $I_1(I_2)$ – действующий ток фазы статора (ротора), $I_{11}(I_{21})$ – действующее значение первой гармоники тока статора (ротора).

При регулировании напряжения в этой системе электропривода величины основных потерь при работе в установившемся режиме определяются [1,2]:

– потери в меди статора

$$\Delta P_{mc} = K_{n1}^2 \Delta P_{1mn} M_{ck} \left[A \frac{S_H}{S} + (1-A) \frac{S}{S_H} \right],$$

– потери в меди ротора

$$\Delta P_{2m} = K_{n2}^2 \Delta P_{2mn} M_{ck} \frac{S}{S_H},$$

– потери в стали статора

$$\Delta P_{1c} = \Delta P_{1cn} M_{ck} \left[B \frac{S_H}{S} + (1-B) \frac{S}{S_H} \right],$$

где $\Delta P_{1mn} = 3I_{1n}^2 R_1$ – номинальные потери в меди статора,

$\Delta P_{2mn} = 3I_2' R_2' = M_H \Omega_0 S_H$ – номинальные потери в меди ротора,

$M_{ck} = \frac{M}{M_H}$ – относительное значение момента двигателя,

$\Delta P_{1cn} \cong 0,2 \Delta P_H$ – номинальные потери в стали статора,

$\Delta P_H = P_H \left(\frac{1 - \eta_H}{\eta_H} \right)$ – суммарные номинальные потери в двигателе.

Значения коэффициентов А и В определяются для двигателей единой серии [1]:

$$A = \frac{\left[\frac{R_r'}{x_2' + x_0} \right]^2}{\left[\frac{R_r'}{x_2' + x_0} \right]^2 + S_H^2}; \quad B \cong 0,96 \div 0,98.$$

Электроприводы механизмов, в которых используется система с тиристорным регулятором напряжения, по технологическим особенно-

стям часть времени работают с недогрузкой. В этих случаях появляется возможность снизить энергопотребление недогруженного АД при работе в зоне номинальной скорости.

При работе на регулировочной характеристике ($u_1 < u_n$) возможно определить значение $S_{\text{опт}}$, соответствующее минимуму суммарных потерь, которое равно [1]:

$$S_{\text{опт}} = S_n \sqrt{\frac{AK_{\Pi}^2 P_{1\text{мн}} + B\Delta P_{1\text{сн}}}{(1-A)K_{\Pi}^2 P_{1\text{мн}} + K_{\Pi}^2 \Delta P_{2\text{мн}} + (1-B)\Delta P_{1\text{сн}}}}$$

Очевидно, что оптимизация энергопотребления просто реализуется в замкнутой системе автоматического регулирования скорости. Для разных типов АД значение $S_{\text{опт}}$ находится в пределах $(0,5...0,9)S_n$, [1], а значение КПД может возрасти в два раза.

Некоторое снижение энергопотребления появляется при осуществлении управляемого пуска с рациональной $(0,02...0,04)$ с продолжительностью нарастания напряжения, что уменьшает пусковые потери на 10 – 15 %.

Таким образом, применение тиристорных регуляторов напряжения для управления режимами АД в соответствии с технологическими требованиями позволяет одновременно решать и задачу энергосбережения.

Библиографический список

1. **Браславский И.Я.** Энергосберегающий асинхронный электропривод. – М.: Академия, 2004. – 250с.
2. **Маевский О.А.** Энергетические показатели вентиляльных преобразователей. – М.: Энергия, 1978.

*М.А. Сибирцев, студ.; рук. А.Б. Виноградов д.т.н., доц.
(ИГЭУ, Иваново)*

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ ТРАНСМИССИЯ ГУСЕНИЧНОГО ТРАКТОРА

Электромеханическая трансмиссия, именуемая в настоящее время также последовательной гибридной трансмиссией, применяется в тяжелых транспортных средствах (железнодорожные локомотивы, морские и речные суда, тяжелые промышленные тракторы и карьерные самосвалы) уже более ста лет. Однако широкое использование ее в

обычных автомобилях и тракторах долгое время сдерживалось большими размерами и массой. В настоящее время, в связи с усовершенствованием электрических машин переменного тока и появлением компактных полупроводниковых силовых преобразователей это препятствие уходит в прошлое.

Электромеханическая трансмиссия представляет собой бесступенчатую автоматическую трансмиссию, позволяющую получить произвольное соотношение скоростей вращения двигателя внутреннего сгорания, являющегося источником мощности транспортного средства, и ведущих колес этого транспортного средства. Двигатель внутреннего сгорания не имеет механической связи с ведущими колесами транспортного средства, вся мощность передается на ведущие колеса через электромеханическую трансмиссию. Тем самым достигается работа двигателя внутреннего сгорания с частотой вращения коленчатого вала, оптимальной для мощности, требуемой транспортному средству (работа на оптимальной топливной характеристике).

Рис. 1 содержит упрощенную структурную схему электромеханической трансмиссии гусеничного трактора. На рисунке присутствуют следующие элементы:

1. Двигатель внутреннего сгорания.
2. Асинхронный трехфазный генератор. Мощность генератора равна мощности двигателя внутреннего сгорания.
3. Трехфазный полупроводниковый инвертор, управляющий работой асинхронного генератора.
4. Трехфазный полупроводниковый инвертор, управляющий работой тягового асинхронного двигателя (в данном случае – привода ведущего катка правого борта).
5. Асинхронный тяговый двигатель привода ведущего катка правого борта.
6. Трехфазный полупроводниковый инвертор, управляющий работой тягового асинхронного двигателя (в данном случае – привода ведущего катка левого борта).
7. Асинхронный тяговый двигатель привода ведущего катка левого борта.
8. Бортовой редуктор и ведущий каток правого борта.
9. Бортовой редуктор и ведущий каток левого борта.

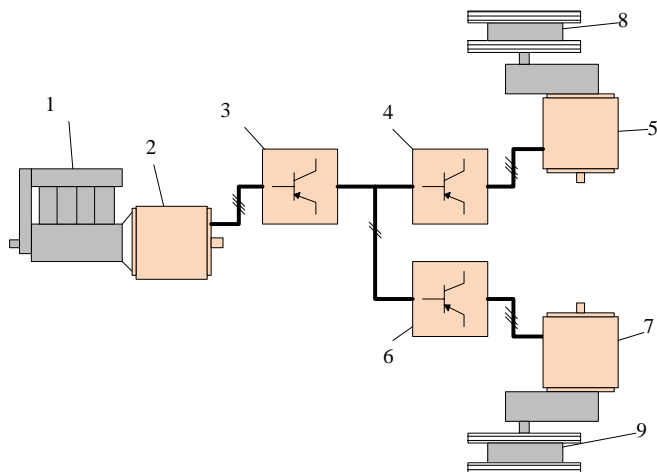


Рис. 1. Упрощенная структурная схема электромеханической трансмиссии

Звенья постоянного напряжения всех инверторов напряжения объединены, обеспечивая передачу мощности как от двигателя внутреннего сгорания к ведущим каткам в режиме движения, так и в обратном направлении в режиме торможения (реализуя режим торможения двигателем).

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

Рис. 2 содержит упрощенную блок-схему контура управления тяговыми асинхронными электроприводами.

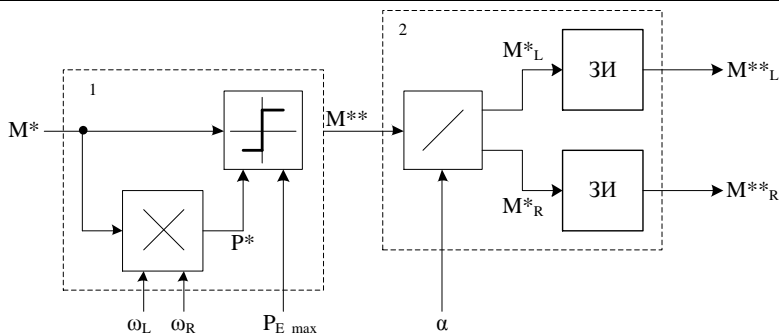


Рис. 2. Упрощенная блок-схема управления асинхронными тяговыми двигателями

Блок-схема содержит следующие основные компоненты:

Блок ограничения задания по тяговому моменту. Общее задание по тяговому моменту M^* вырабатывается органом управления (угол отклонения педали газа или продольный угол отклонения джойстика). Исходя из текущих скоростей вращения тяговых асинхронных двигателей ω_L и ω_R определяется мощность, требуемая этим двигателям для отработки данного задания по моменту P^* . Она сравнивается с максимальной мощностью, которую двигатель внутреннего сгорания способен выдать при текущей частоте вращения его коленчатого вала (данная характеристика определяется предельной тяговой характеристикой двигателя внутреннего сгорания и коррекцией, вырабатываемой его контуром управления) P_{E_max} . В случае, если требуемая мощность превышает максимальную доступную, выполняется ее ограничение. Результатом работы модуля является ограниченное задание по тяговому моменту M^{**} , которое поступает в блок 2.

Блок вычисления индивидуальных заданий по электромагнитному моменту тяговых асинхронных двигателей M^{**}_R и M^{**}_L . Распределение заданий по моменту выполняется, исходя из отклонения органа управления направлением движения α . Далее скорость изменения задающих сигналов ограничивается задатчиками интенсивности ЗИ. Данные задатчики интенсивности выполняют ограничение скорости изменения мощности, потребляемой или вырабатываемой тяговыми асинхронными двигателями.

Система управления асинхронного генератора получает постоянное задание по напряжению, благодаря чему во всех режимах работы под-

держивается постоянное значение напряжения в звеньях постоянного напряжения всех инверторов напряжения.

Двигатель внутреннего сгорания не управляется напрямую водителем. Задание для двигателя внутреннего сгорания вырабатывается системой управления электромеханической трансмиссией в зависимости от мощности, требуемой для отработки заданий по моменту тяговых асинхронных приводов.

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

Рис. 3 содержит упрощенную структуру управления двигателем внутреннего сгорания в случае, если двигатель управляется заданием по моменту на коленчатом валу.

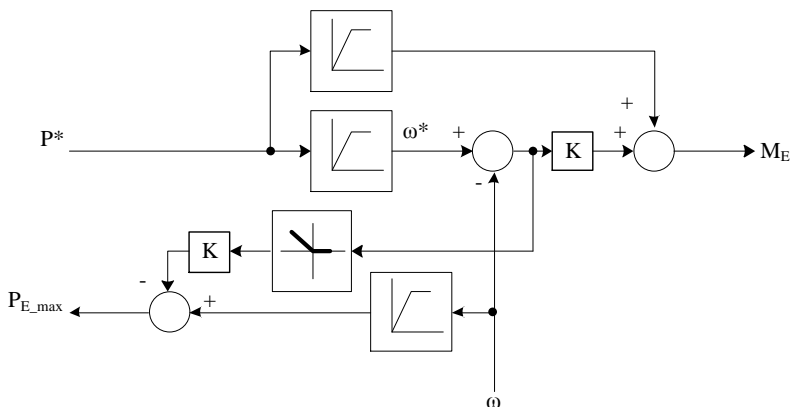


Рис. 3. Упрощенная структура управления двигателем внутреннего сгорания в контуре момента

В качестве входного сигнала используется задание по мощности двигателя P^* . С помощью оптимальной топливной характеристики двигателя определяется задание по скорости вращения коленчатого вала ω^* . Далее по разности задания и реальной скорости вращения коленвала ω определяется задание по моменту, которое фактически является заданием по подаче топлива (положение рейки системы подачи топлива в случае дизельного двигателя).

Помимо этого структура определяет ограничение по мощности P_{E_max} , используя для этого предельную механическую характери-

стику двигателя (нелинейная характеристика, реализуемая таблично) и ошибку задания по скорости.

*П.А. Колосов, асп.; рук. А.Б. Виноградов д.т.н., доц.
(ИГЭУ г. Иваново)*

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ КОМПЛЕКТА ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ТРАКТОРА «БЕЛАРУС-3023»

На протяжении последних лет большой интерес вызывают транспортные средства с электромеханической трансмиссией. Это связано с тенденцией совершенствования техники в направлении энергосбережения и экологичности. Не обошло стороной это и сельскохозяйственную технику. Концерн «Русэлпром» совместно с РУП «МТЗ» разработал электромеханическую трансмиссию для трактора «БЕЛАРУС-3032».

Применение электромеханической трансмиссии в тракторах имеет много преимуществ. Особенно это касается тракторов с большой мощностью. В таких тракторах традиционная механическая трансмиссия сложная и дорогостоящая в производстве и обслуживании. Коробка передач традиционной трансмиссии имеет большое количество элементов. Большую сложность вызывает управление трактором при наличии такого количества передач. Электромеханическая трансмиссия лишена этих недостатков - всего две передачи (два режима работы): транспортный и рабочий. Транспортный режим работы подразумевает работу в контуре скорости и предназначен для передвижения трактора. Рабочий режим – работа в контуре момента (от педали).

Преимущества применения электромеханической трансмиссии:

- Работа с высоким КПД, практически не зависящим от скорости движения и нагрузки.
- Простота в обслуживании.
- Оптимальность тяговой характеристики, за счет реализации регулирования и стабилизации момента и скорости.
- Экономичность, дизель при всех нагрузках и скоростях работает в оптимальном режиме.

В состав системы электропривода входит: тяговый генератор и тяговый двигатель производства ОАО «НИПТИЭМ», блок силовой электроники, контроллер верхнего уровня.

В докладе представлены экспериментальные данные и проведен анализ электромеханических характеристик полученных при испытаниях трактора «БЕЛАРУС-3032», на котором установлен комплект тягового электрооборудования (КТЭО). Целью испытания является подтверждение заявленных характеристик, полученных при испытаниях на стенде [1], с характеристиками, полученными в реальных режимах работы.

С помощью разработанного испытательного стенда были проведены комплексные испытания поставляемого комплекта КТЭО [2]. В рамках данного доклада наиболее интересны испытания характеризующие работу КТЭО в режиме пахоты. Экспериментальные данные представлены в табл. 1.

Таблица 1. Экспериментальные данные.

$n_{мг}$, об/мин	1909	1909	1909	1909	1909	1909	1909	1909
$M_{мг}, Нм$	130	460	827	1090	1123	1135	1139	1065
$P_{мг}, кВт$	25,98	91,94	165,29	217,86	224,46	226,86	227,65	212,86
$n_{тад}$, об/мин	95	496	1012	1489	2005	2502	2998	3717
$M_{тад}$, Нм	1365	1383	1306	1182	901	713	582	430
$P_{тад}$, кВт	13,58	71,82	138,38	184,27	189,14	186,78	182,68	167,34
КПД, %	52,25	78,12	83,72	84,58	84,27	82,33	80,25	78,62

Примечание: $M_{мг}$ – тормозной момент мотор-генератора, $n_{мг}$ – частота вращения мотор-генератора, $P_{мг}$ – мощность, подводимая к мотор-генератору, $M_{тад}$ – вращающий момент тягового двигателя, $n_{тад}$ – частота вращения тягового двигателя, $P_{тад}$ – мощность, отдаваемая тяговым двигателем. Для анализа и синтеза результатов интересен режим, при котором ТАД работает на скорости 2005 об/мин и моментом 901 Н*м, что соответствует мощности около 190кВт.

Ниже представлены графики характеризующие работу трактора в режиме пахоты, полученные при помощи сервисной вычислительной системы.

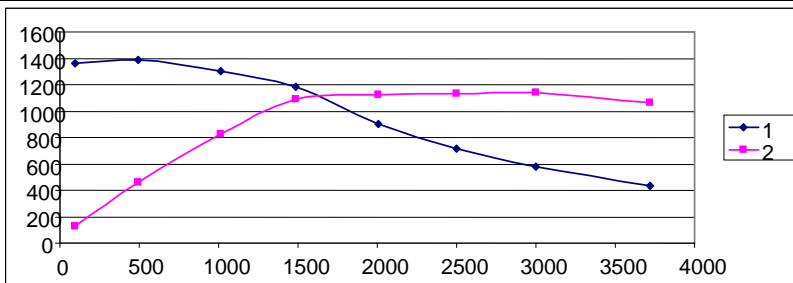


Рис.1. Зависимость вращающего момента ТАД (2) и тормозного момента МГ(1) (табл.1)

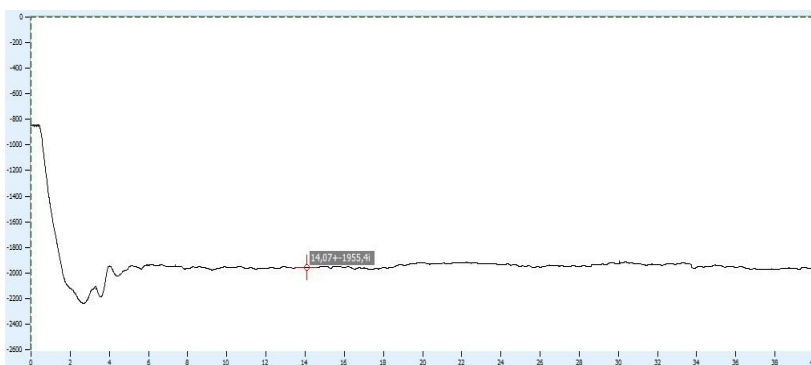


Рис.2. График скорости МГ

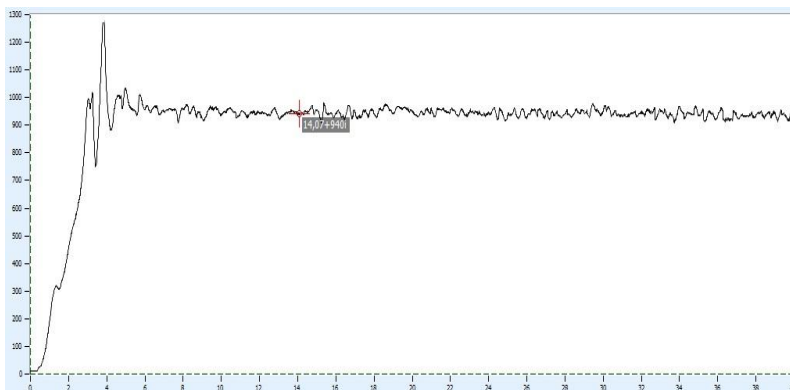


Рис.3. График момента МГ.



Рис.4. График скорости ТАД.

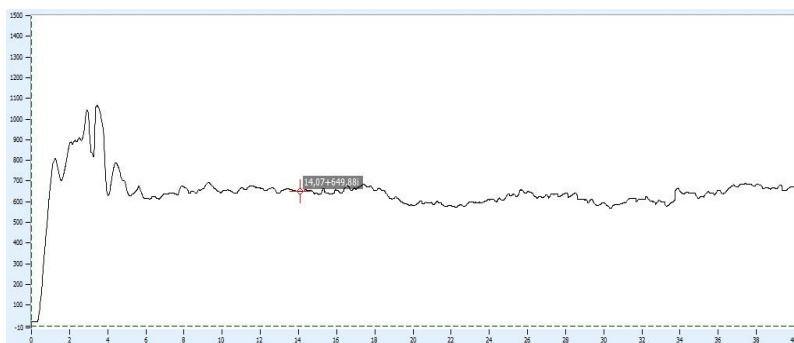


Рис.5. График момента ТАД.

Как видно из графиков (2-3), мощность, отдаваемая МГ в установившемся режиме пахоты составляет 192,5 кВт.

Как видно из графиков (4-5) в момент времени 3-4 секунды мощность, выдаваемая ТАДом, составляет примерно 180 кВт. В дальнейшем снижение мощности обусловлено мягкостью почвы, что в совокупности с требуемой скоростью на данном участке поля показывает результат в 142 кВт.

В результате эксплуатационных испытаний комплекта тягового электрооборудования трактора «БЕЛАРУС-3032» были получены результаты идентичные результатам, полученным на стенде. Мощность, выдаваемая МГ в установившемся режиме составляет 192,5 кВт.

Мощность выдаваемая ТАДом, в начальный момент времени (3-4 секунды), составляет примерно 180 кВт, что соответствует полученным результатам на стенде для текущей скорости ТАД.

Библиографический список

1. **Виноградов А.Б.** доктор .техн. наук, Колосов П.А., Родионов Р.В. канд. техн. наук. Разработка физической модели дизельного двигателя транспортных средств с электромеханической трансмиссией.
2. **Виноградов А.Б.** доктор .техн. наук, Колосов П.А., Родионов Р.В. канд. техн. наук. Экспериментальные исследования энергетических показателей гибридных транспортных средств.

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

МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С КОРРЕКТОРОМ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

Применение корректоров коэффицента мощности (ККМ) в структуре асинхронного электропривода (АЭП) является одним из наиболее простых и дешёвых способов улучшения гармонического состава потребляемого из сети тока, а также повышения энергосбережения. Задачей ККМ в идеале является формирование синусоидального сетевого тока, синфазного напряжению сети. Силовая часть АЭП с наиболее распространенной топологией ККМ представлена на рис. 1.

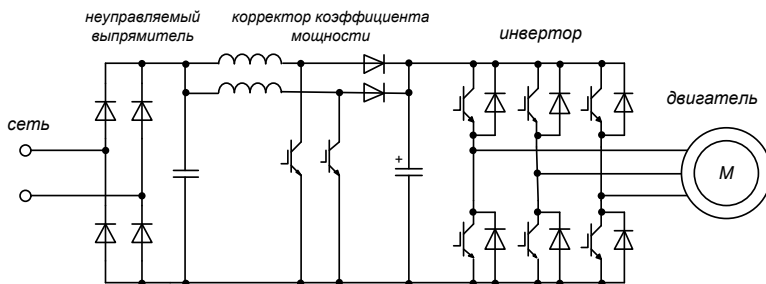


Рис. 1. Силовая часть асинхронного электропривода с двухфазным ККМ

Применение ККМ в структуре АЭП накладывает следующие особенности на реализацию микропроцессорной системы управления (СУ).

Частота работы СУ ККМ обычно в несколько раз выше частоты СУ АЭП (если для АЭП это значение обычно составляет от 1 до 10 кГц, для ККМ самое минимальное значение 50 кГц). СУ АЭП обычно обрывается в прерывании от одного из модулей ШИМ. Намного более высокая частота работы СУ ККМ обязывает при микропроцессорной реализации уделять ей больший приоритет по сравнению с СУ АЭП (как один из вариантов – использование для этого прерывание с более высоким приоритетом по сравнению с модулем ШИМ).

Следующей особенностью является то, что высокая частота работы СУ ККМ так же вносит свои особенности в разработку программного обеспечения. Дело в том, что алгоритм работы СУ ККМ оперирует с относительными единицами, что приводит к выполнению множества операций с дробными числами. Код, написанный на языке высокого уровня (в данном случае это С) вне зависимости от того, имеет ли микроконтроллер математический сопроцессор (при этом операции производятся с числами в формате float), или же применяется целочисленная математика (IQ-математика) приводит к тому, что время обсе-та СУ слишком велико. Самое логичное решение этой проблемы – написание оптимизированного кода на ассемблере.

Учитывая все эти особенности возможны следующие варианты микропроцессорной реализации СУ АЭП с ККМ.

Первый, самый простой вариант, заключается в следующем: работа СУ АЭП и СУ ККМ осуществляется в одном прерывании, чаще всего это прерывание от модуля ШИМ. Прерывание осуществляется от того модуля ШИМ, который управляет ключами ККМ. Частота работы СУ ККМ и СУ АЭП выбираются пропорциональными, а поскольку частота работы СУ АЭП гораздо ниже, то весь ее алгоритм разбивается на отдельные задачи, и в каждом прерывании осуществляется обработка алгоритма СУ ККМ и одной задачи СУ АЭП.

Второй вариант реализации СУ заключается в использовании двух прерываний с различными приоритетами. Обработка СУ ККМ осуществляется в прерывании с более высоким приоритетом, а СУ АЭП – с более низким. Примером для этого варианта может быть следующий (применительно к микроконтроллерам семейства C28x фирмы Texas Instruments): СУ АЭП выполняется в прерывании от модуля ШИМ №0 (ePWM0_INT), а СУ ККМ выполняется в прерывании от таймера №0 (TINT0), которое имеет более высокий приоритет.

Но наиболее простым вариантом является использование многоядерных микроконтроллеров (например семейство Concerto фирмы Texas Instruments), при этом обработка СУ АЭП и СУ ККМ происходит параллельно. Но многоядерные ЦСП стоят на порядок дороже, что несомненно приведет к удорожанию всего продукта. Однако у фирмы Texas Instruments очень интересное и экономически выгодное решение этой проблемы. Речь идет о ЦСП семейства TMS320F2803x и TMS320F2806x. Эти ЦСП содержат в своем составе модуль CLA (Control Law Accelerator). CLA это независимый модуль для выполнения вычислений с числами, представленными в формате с плавающей точкой. Модуль CLA разработан специально для выполнения скоростных задач вне ядра (CPU) микроконтроллера. Этот модуль имеет непосредственный доступ к регистрам АЦП, компаратора, ШИМ, а также высокоточного ШИМ (HRPWM). Эти особенности позволяют реализовать СУ ККМ в этом модуле, в то время как СУ АЭП будет выполняться в CPU. Таким образом, обе системы управления будут работать параллельно, остается только следить за тем, чтобы не возникло коллизий при обращении к АЦП.

Библиографический список

1. **Average** Current Mode Controlled Power Factor Correction Converter using TMS320LF2407A (SPRA902A) / Dallas: Texas Instruments, Jul. 2005
2. **Power** Factor Correction in Power Conversion Applications Using the dsPIC® DSC (DS01106A)/ Microchip Technology Inc., 2007
3. Implementing a Motor Control with PFC System on C2000 Microcontrollers (v1.2)/ Dallas: Texas Instruments, Jul. 2009
4. **Implementing** Sensorless Field Oriented Control of an AC Induction Motor with PFC front end on 2000 Microcontrollers/ Dallas: Texas Instruments, Inc. C2000 Systems and Applications, Jan. 2013
5. **Implementing** Sensorless Field Oriented Control of AC Induction Motor with PFC front end running on CLA using C2000 Microcontrollers (v1.0)/ Dallas: Texas Instruments, Inc. C2000 Systems and Applications, Oct. 2010

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

АЛГОРИТМ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С КОРРЕКТОРОМ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ НА ОСНОВЕ МОДУЛЯ CLA ПРОЦЕССОРА TMS320F28035

Существует несколько вариантов реализации алгоритма работы системы управления (СУ) асинхронного электропривода (АЭП) с корректором коэффициента мощности (ККМ). Наиболее перспективным вариантом является применение многоядерных микроконтроллеров. В этом случае обе задачи (задача управления АЭП и задача управления ККМ) выполняются параллельно. Однако многоядерные микроконтроллеры стоят достаточно дорого, что приводит к удорожанию всего устройства. Однако у фирмы Texas Instruments есть очень интересное и экономичное решение этой проблемы – речь идет о TMS320F28035 со встроенным модулем CLA.

Микроконтроллер TMS320F28035 – это цифровой сигнальный процессор (ЦСП), представитель семейства Piccolo фирмы Texas Instruments. Этот ЦСП содержит в своем составе модуль CLA (Control Law Accelerator). CLA это независимый модуль для выполнения вычислений с числами, представленными в формате с плавающей точкой. Модуль CLA разработан специально для выполнения скоростных задач вне ядра (CPU) микроконтроллера. Этот модуль имеет непосредственный доступ к регистрам АЦП, компаратора, ШИМ, а также высокоточного ШИМ (HRPWM). Эти особенности позволяют реализовать СУ ККМ в этом модуле, в то время как СУ АЭП будет выполняться в CPU. Таким образом, обе системы управления будут работать параллельно.

В данной реализации СУ АЭП с ККМ остается одно проблемное место, которое необходимо учитывать. Дело в том, что обе СУ работают параллельно, и обеим необходима информация с датчиков электрических величин – другими словами информация с АЦП. Но, поскольку в микроконтроллерах этого семейства только один АЦП – то могут возникнуть коллизии.

Одним из вариантов, который позволит избежать этих коллизий, является следующее решение. Частоты работы обеих СУ выбираются пропорциональными. Запуск АЦП происходит аппаратно от того мо-

дуля ШИМ, который управляет ключами ККМ. При этом триггером для запуска АЦП обычно выбирается событие, когда счетчик модуля ШИМ равен периоду, то есть в момент времени, максимально удаленный от коммутации транзисторных ключей инвертора и ККМ (для того, чтобы в измеренном сигнале было меньше шумов). И самое главное, между модулем ШИМ ККМ, и модулями ШИМ инвертора осуществляется сдвиг по фазе, который точно учитывает время преобразования АЦП. Временная диаграмма, показывающая алгоритм работы СУ АЭП с ККМ представлена на рис. 1.

Библиографический список

6. Implementing Sensorless Field Oriented Control of an AC Induction Motor with PFC front end on 2000 Microcontrollers/ Dallas: Texas Instruments, Inc. C2000 Systems and Applications, Jan. 2013
7. Implementing Sensorless Field Oriented Control of AC Induction Motor with PFC front end running on CLA using C2000 Microcontrollers (v1.0)/ Dallas: Texas Instruments, Inc. C2000 Systems and Applications, Oct. 2010
8. C2000 Microcontroller Workshop: Guide and Lab Manual/ Dallas: Texas Instruments, Inc. C2000 Systems and Applications, Sep. 2011
- 9.

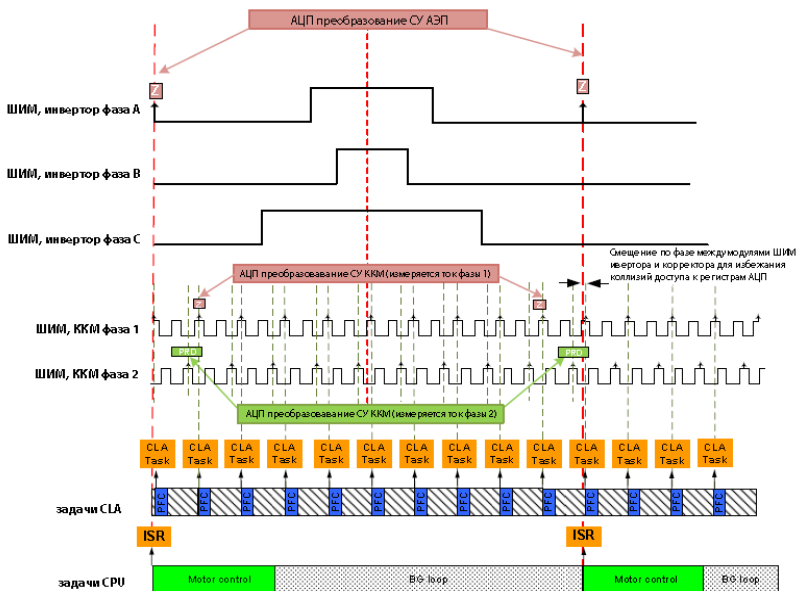


Рис. 1. Временная диаграмма, показывающая алгоритм работы СУ АЭП с ККМ

*В. Е. Русаков маг., К. С. Шишков инж., рук. В.Ф. Глазунов д.т.н.,
проф. (ИГЭУ, г. Иваново)*

О ВЛИЯНИИ УПЛОТНЯЮЩЕГО ВАЛА НА ЭЛЕКТРОПРИВОД МЕХАНИЗМА НАМОТКИ СНОВАЛЬНОЙ ПАКОВКИ

Повышение качества намотки сновальных паковок может быть достигнуто управлением, координирующим движение механизмов сновального и уплотняющего валов [1]. В качестве математической модели – эталона процесса наматывания используется спираль Архимеда с необходимой реализацией её параметра [2].

Непрерывный контроль радиуса паковки и сравнение его с эталонным значением, соответствующим равномерной плотности намотки, позволяет улучшить стабилизацию её выходных параметров.

Изменение регулирующего воздействия уплотняющего вала на намотку влияет как на натяжение нитей основы в зоне контакта намотки и уплотняющего вала, так и на статический момент электродвигателя механизма сновального вала.

При этом в процессе передачи вращательного движения от сновального вала к уплотняющему происходит укорачивание, а на сновальном валу удлинение поверхности контакта, и возникновение вследствие этого упругого скольжения.

С ростом диаметра намотки её модуль упругости уменьшается, увеличивается деформация в зоне контакта и нагрузка на двигатель механизма сновального вала.

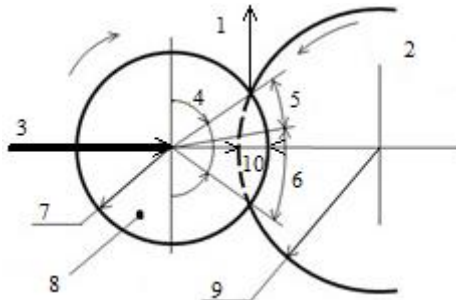


Рис. 1: 1 – момент силы трения (T); 2 – сновальный вал; 3 – сила (P); 4 – угол α_k ; 5 – угол покоя α_n ; 6 – угол скольжения $\alpha_{ск}$; 7 – радиус уплотняющего вала (R_1), 8 – уплотняющий вал; 9 – радиус сновального вала (R_2); 10 – смещение по линии действия уплотняющего вала (y_n).

В пределах углов покоя ($\alpha_{п}$) и скольжения ($\alpha_{ск}$) (рис. 1) скорость скольжения зависит от отношения силы трения T к передаваемому окружному усилию. Чем больше момент сопротивления вращению укачивающего вала, тем больше $\alpha_{ск}$ и меньше $\alpha_{п}$.

Нити основы поступают на намотку радиусом R_2 - $y_{п}$ (рис.1). При выходе из зоны контакта образовавшаяся вмятина исчезает за время, длительность которого зависит от вида деформации. При имеющей место вязкоупругой деформации паковки её радиус не успевает восстановиться за время одного оборота и происходит уплотнение намотки под действием силы P . Замкнутый виток нити радиусом (R_2 - $y_{п}$), имеющий натяжение основы T_0 переходит на новый уровень R_2 . При этом образуется суммарное натяжение [3]:

$$T = T_0 + 0,585 \frac{E_n F_0 P}{E_{np} l},$$

где $E_{np} = \frac{E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2}$, $E_{1,2}$ – модули упругости уплотняющего вала и нити; E_n, F_0 – модуль упругости и площадь поперечного сечения нити; l – ширина основы.

Распределение нормальных и касательных напряжений вдоль дуги контакта определяется упругими и фрикционными свойствами сновального и уплотняющего валов.

Совокупность нормальных напряжений вдоль дуги контакта, как правило, подчиняется гармоническому закону распределения [4].

При условии упругой деформации намотки нормальные напряжения в зоне контакта можно считать распределенными на половине его поверхности (Рис. 2) и связанными с касательными напряжениями законом Кулона.

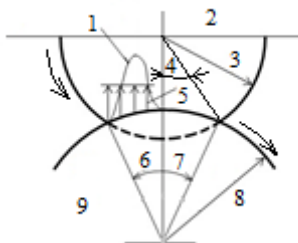


Рис.2: 1 – $n(\gamma)$; 2 – сновальный вал; 3 – R_2 ; 4 – γ ; 5 – $n_{ф}$; 6,7 – α ; 8 – R_1 ; 9 – уплотняющий вал.

При этом равнодействующая нормальных сил [4]:

$$N = -n_{cp} R_2 \sin \alpha.$$

Здесь $n_{cp} = \frac{P}{2R_2 \alpha l}$; $\alpha = \arcsin \frac{b}{R_1}$; b – ширина зоны контак-

та.

Параметры зоны контакта валов примем в соответствии [3]:

$$b = 1,128 \sqrt{\frac{P}{l} \cdot k \cdot R_{np}}; \quad k = \frac{1 - \mu_1}{E_1} + \frac{1 - \mu_2}{E_2}; \quad R_{np} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Здесь μ_1 и μ_2 – коэффициенты Пуассона уплотняющего вала и намотки.

Тормозной момент на сновальном валу от действия уплотняющего вала

$$M_T = 0,25 \frac{P \cdot R_2}{\alpha \cdot l} \sin 2\alpha.$$

Для валов $P = 2 \cdot 10^3$; $E_2 = 10^4 \text{ Н}$ ($5 \cdot 10^4 \text{ Н}$); $R_1 = 0,2 \text{ м}$; $f = 0,13 \text{ м}$; $l = 1,8 \text{ м}$; $\mu_1 = \mu_2 \cong 0,3$ на рис. 3 представлены зависимости M_T от радиуса намотки сновального вала.

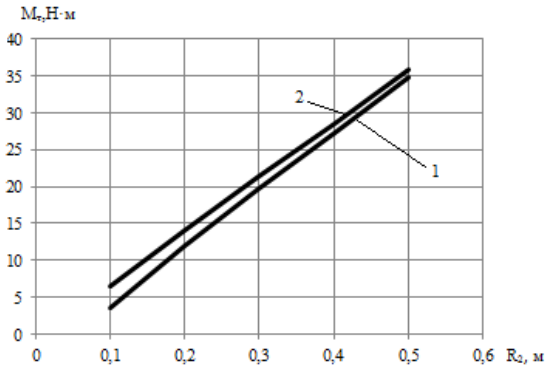


Рис. 3.: 1- зависимость M_T при $E_2 = 10^4 \text{ Н}$, 2 - зависимость M_T при $E_2 = 5 \cdot 10^4 \text{ Н}$.

Анализ зависимостей $M_T(R_2)$ показывает увеличение момента на сновальном валу от действия уплотняющего вала с ростом радиуса намоток. При этом увеличение модуля упругости намотки уменьшает значение тормозного момента.

Библиографический список

1. Глазунов В.Ф., Шишков К.С. О построении системы управления наматывания сновальных валов.
2. Куткин А.Ю. Проектирование текстильных паковок рулонного типа и методы их воспроизводства. Иваново: НПЦ «Стимул». 2006. 210с.
3. Сухарев В.А. Натяжение нити в случае фрикционной намотки. - Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 1982, №2. с. 29-33.
4. Фомин Ю.Г., Ларионов С.В., Ларионова М.Д. Основы теории, корректирования и расчет валковых машин, ч. 1. Иваново: «Иваново». 1999. 273с.

*В. А. Замков, А. С. Короткевич, Л. Е. Малинин, студенты;
рук. С. К. Лебедев, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

РАЗРАБОТКА СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО КОПИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ПО BLUETOOTH МАНИПУЛЯТОРАМИ LEGO MINDSTORMS NXT 2.0

В настоящее время, в первую десятку наиболее востребованных обществом специалистов входят выпускники университетов, специализирующиеся в области мехатроники и робототехники. Организация подготовки таких специалистов в условиях практически полного отсутствия государственного финансирования и частного партнерства представляется чрезмерно амбициозной, но и актуальной задачей.

Предлагаемая разработка направлена на развитие лабораторной базы для формирования у выпускников определенных компетенций в области робототехники.

Использование биотехнических систем в робототехнике подразумевает включение оператора в процесс управления промышленным манипулятором. Среди дистанционных систем управления манипуляторами самыми распространенными являются системы копирующего управления, когда задающее устройство является кинематически подобным самому манипулятору.

Для изучения принципов дистанционного копирующего управления используются два комплекта интеллектуального конструктора Lego Mindstorms NXT 2.0, действующих на расстояниях, доступных для связи по каналу Bluetooth контроллеров NXT.

Манипулятор и задающее устройство представляют собой двухзвенные механизмы с двумя поворотными шарнирами с взаимно перпендикулярными осями вращения.

Разработаны, отлажены и предлагаются к внедрению в лабораторный практикум по робототехнике варианты построения дистанционной системой копирующего управления.

Предлагается презентация, описывающая этапы сборки конструкции системы дистанционного управления. Описаны варианты алгоритмов управления, процедура разработки и отладки программного обеспечения.

Дальнейшая работа предполагает изучение возможности использования 3-го шарнира из комплекта Lego Mindstorms для совершенствования конструкции и расширения функциональных возможностей для лабораторного практикума.

Д.С. Головцов, А.В. Введенский, студенты;

рук. А.А. Репин, ст. преп.

(ИГЭУ, г. Иваново)

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАТРОННОГО МОДУЛЯ МИКРО-СЕРВОПРИВОДА

Микро-сервоприводы являются неотъемлемой частью элементов управления движением таких сложных мехатронных объектов, как мобильные роботы и беспилотные летательные аппараты различной конструкции. Причём точность поддержания заданного углового положения выходного вала микро-сервопривода напрямую определяет устойчивость режимов работы, а также возможность обеспечения выполнения указанным оборудованием требуемой технологической операции. В этой связи, задача анализа принципов работы мехатронных модулей, построенных на базе микро-сервоприводов, с целью разработки практических рекомендаций для их выбора и применения представляет существенный интерес.

Основными требованиями, предъявляемыми к микро-сервоприводам, являются:

- обеспечение точного, откалиброванного движения и усилия органам управления;
- быстрота отработки движения при изменении задающего сигнала с дистанционного пульта управления;
- помехозащищённость электрических элементов микро-сервопривода;
- способность жёстко сохранять положение рабочих органов управления в режиме удержания.

В общем случае рассматриваемый нами мехатронный модуль включает в себя:

- двигатель постоянного тока;
- MOSFET-модуль, состоящего из двух плеч по два транзистора в каждом;
- редуктор с высоким передаточным числом ($i = 45 \div 200$);
- потенциометр обратной связи по угловому положению рабочего вала;
- микропроцессорная плата, организующая алгоритм управления;
- качалка (плечо), исполнение и параметры которой могут варьироваться в зависимости от задач и способа монтажа;
- помехозащищённый корпус.

Приведём далее краткое описание перечисленных узлов микро-сервопривода.

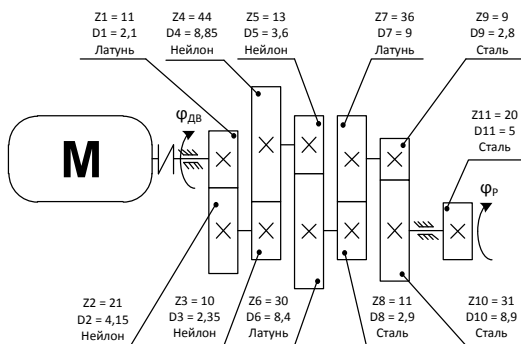


Рис. 2.1. Кинематическая схема микро – сервопривода

Кинематическая схема объекта представлена на рис. 1 и включает в себя: двигатель, редуктор и муфту. На данной схеме представлены направления вращения вала двигателя и рабочего вала, число зубцов (Z_i) каждой из шестерен, а также их основные диаметры (D_i) и материал изготовления. С целью создания требуемого момента на качалке (его значение указано в таблице 1.1) в сервоприводе реализован редуктор с высоким передаточным числом. Столь высокое количество ступеней редуктора обусловлено установкой компактных при монтаже шестерён, а также для обеспечения более эффективного передающего движения. Выбор материала в той или иной передаточной паре или в редукторе в целом оказывает влияние на ряд определённых свойств. Металлические (латунные, стальные иногда алюминиевые) шестерни

обладают на порядок большей ударной прочностью зубьев. То есть, их живучесть при авариях намного выше, чем у нейлоновых (пластиковых) шестерен. Но они существенно дороже и несколько тяжелее. Многие модели сервоприводов выпускаются в трёх вариантах: с нейлоновыми, металлическими и комбинированными шестернями. Помимо стоимости, сервопривода с металлическими шестернями имеют еще один недостаток. На моделях с высоким уровнем вибраций со временем на зубьях шестерен возникает наклеп и как следствие - люфт редуктора, как правило, после многолетней работы. В нейлоновых данный эффект отсутствует и долговечность соответственно увеличивается.

Для борьбы с люфтами редуктора, которые прямо влияют на точность позиционирования качалки, а также могут порождать на летающих моделях дрейф управляемых поверхностей, рабочий вал сервопривода устанавливают на шарикоподшипники. Особенно полезно применение такой опции на моделях с большим уровнем вибраций, поскольку обычные втулки скольжения выходного вала сервопривода довольно быстро разбалтываются, и возникает люфт.

В качестве исполнительного электродвигателя используется коллекторный двигатель постоянного тока с трехполюсным ротором. Потенциометр обратной связи представляет собой реостат, выполненный из плёнки резистивного материала. По поверхности данного реостата перемещается электрический контакт механически связанный с рабочим валом сервопривода. Функция потенциометра заключается в том, что на нём формируется сигнал определённого значения при определённом угловом положении рабочего вала.

Микропроцессорная плата сервопривода включает в себя микроконтроллер, обеспечивающий на аппаратном уровне алгоритм управления ключами MOSFET-модуля. Также в его задачи входит, сравнение управляющего сигнала с сигналом обратной связи по углу.

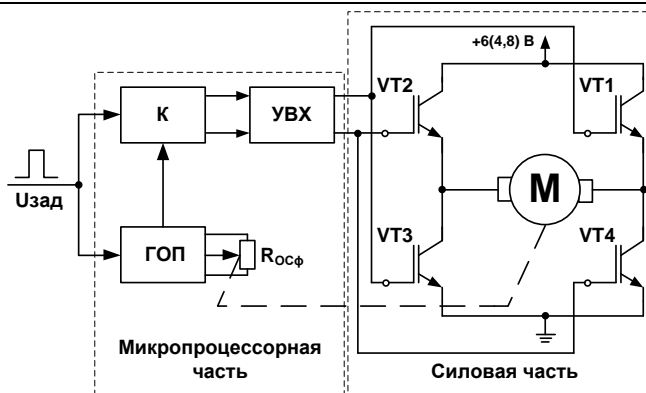


Рис. 2. Упрощенная функциональная схема микро-сервопривода

На рис. 2. представлена упрощенная функциональная схема микро-сервопривода [1].

Схема состоит из генератора опорного импульса (ГОП), к которому подключен потенциометр обратной связи, компаратора (К), устройства выборки - хранения (УВХ) и силового моста, в диагональ которого включен двигатель (М). Стоит также отметить, что ГОП, УВХ и К реализованы на микропроцессорной плате. Управляющий импульс приходит на компаратор и одновременно запускает генератор опорного импульса. Длительность опорного импульса зависит от положения потенциометра обратной связи, механически соединенного с выходным валом. Управляющий и опорный импульсы сравниваются компаратором по длительности. Разностный импульс появляется на верхнем либо на нижнем выходах компаратора в зависимости от того, какой из сравниваемых импульсов длиннее. Длина разностного импульса определяет величину рассогласования между «требуемым» и «имеющимся» положением управляющей поверхности объекта. Эта величина измеряется и запоминается в виде постоянною потенциала на время цикла управляющею импульса в устройстве выборки-хранения. Величина разностного сигнала мала и недостаточна для обеспечения отпирания и запираия транзисторов, с целью чего разностный сигнал пропорционально увеличивается таким образом, чтобы его действующее значение стало удовлетворительным для последующей обработки и обеспечения коммутации в транзисторных ключах. Получается, так называемый, удлинённый разностный импульс. Далее разностный сигнал

усиливается на базе регулятора и модулируется высокочастотным сигналом рабочей коммутации транзисторных ключей.

Для более глубокого понимания принципов работы микро-сервопривода нами было проведено математическое его математическое моделирование в среде Simulink MATLAB. При этом за основу нами была взята структурная схема, отражающая особенности рассмотренных выше режимов работы мехатронного модуля, и представленная на рис. 3.

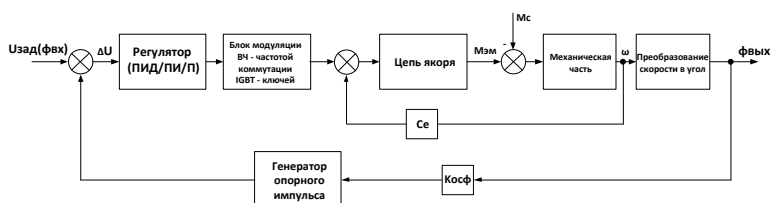


Рис. 3. Структурная схема микро-сервопривода

Анализ результатов моделирования подтвердил высокие динамические характеристики микро-сервоприводов, что обуславливает целесообразность их применения в мобильных робототехнических комплексах, а также позволил разработать методику выбора мехатронных модулей робототехнических систем.

Библиографический список

1. **Васильков В.С.** Принципы устройства и действия рулевых машинок. // http://www.rcdesign.ru/articles/radio/servo_intro – Сайт разработчиков и пилотов радиоуправляемых моделей

МОДЕЛЬ ПРИВОДА ВЫСОКОТОЧНОГО МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО СТАНКА НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА РАСЧЕТА ПОЛЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ

В настоящее время все более широкое распространение в высокоточных металлорежущих станках получают привода на основе синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ). Соответственно возникает необходимость в более свершенных системах их управления и более точных методах расчета. Современные модели СДПМ основаны на следующих допущениях:

- не учитывается насыщение стали;
- кривая размагничивания постоянного магнита линейна и не зависит от температуры;
- не учитывается зубчатость сердечников, т.е. зазор машины предполагается гладким;
- учитывается только радиальное синусоидальное распределение индукции в зазоре.

В данной работе представлена модель СДПМ непосредственно в фазных координатах учитывает реальное распределение магнитного поля в активной зоне машины с учетом насыщения магнитной цепи, дискретного распределения многофазной обмотки статора по пазам и перемещения зубчатого сердечника статора относительно ротора с постоянными магнитами (ПМ). Благодаря этому возможно создавать законы управления двигателем со значительно сниженными вибрациями, что улучшит качество и точность выпускаемой продукции.

Работа любой электрической машины описывается уравнениями движения вращающихся частей, уравнениями электрического состояния ветвей и электромагнитного момента.

Потокосцепления фаз обмотки статора $[\Psi]$ можно представить в виде суммы потокосцеплений от ПМ ротора и фазных токов статора:

$$[\Psi] = [\Psi_0] + [L][i], \quad (1)$$

где $[\Psi_0] = [\Psi_{10} \quad \Psi_{20} \quad \dots \quad \Psi_{m0}]^T$ – матрица-столбец потокосцеплений фаз, обусловленных ПМ ротора; $[L]$ – матрица само- и взаимности фаз обмотки статора.

Как показали проведенные исследования, насыщение магнитной цепи статора вентильных двигателей с ротором из высококоэрцитивных магнитов без ферромагнитных вставок обусловлено главным образом постоянными магнитами, а элементы матрицы $[L]$ можно считать линейными и независимыми от угла поворота ротора α .

При этом допущении можно предварительно методами теории поля рассчитать кривые изменения потокоцеплений $[\Psi_0(\alpha)]$ от постоянных магнитов ротора в функции угла α с учетом реальной структуры активной зоны машины и насыщения стали. В качестве примера на рис. 1 приведены кривые $\Psi_0(\alpha)$ на периоде изменения.

Элементы матрицы $[L]$ при известном угле α могут быть определены аналогичным образом. Для этого необходимо рассчитать поле в линеаризованной активной зоне ($\mu = \text{const}$) при возбуждении произвольным значением тока в одной из фаз при различных значениях α , при этом области, занятые постоянными магнитами, заменяются средами без источников поля, магнитные проницаемости которых равны магнитным проницаемостям ПМ.

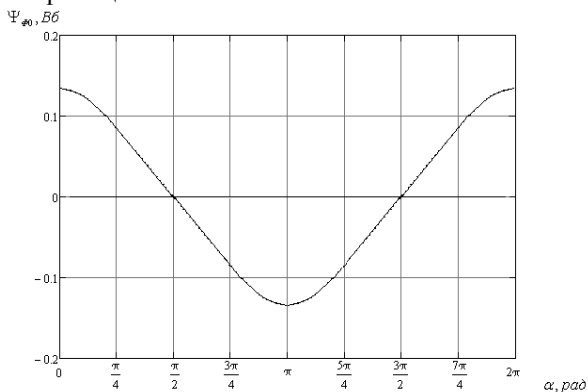


Рис. 1. Зависимость потокоцепления от угла поворота ротора

Электромагнитный момент СДПМ можно найти, применяя закон сохранения энергии к электромеханическому преобразованию в линейной модели нелинейной системы [1]. Его значение определяется по формуле.

$$M_{\ominus} = [i]^T \frac{d[\Psi_0(\alpha)]}{d\alpha}. \quad (2)$$

При наличии в системе управления СДПМ обратных связей по фазным токам и углу положения ротора α предлагаемая модель позволяет формировать кривые фазных токов, обеспечивающих постоянный заданный электромагнитный момент при любом положении ротора относительно статора, что значительно снижает вибрации двигателя и улучшает плавность хода, особенно на низких скоростях. Допустим, как один из вариантов, что при установившейся частоте вращения $\Omega = const$ фазные токи статора должны изменяться по синусоидальному закону с амплитудной модуляцией $I_m(t)$ таким образом, чтобы при заданном угле α относительно оси первой фазы статора величина электромагнитного момента $M_{\vartheta} = M_C$ оставалась неизменной в любой произвольный момент времени t . Тогда для любого момента времени t мгновенные фазные токи $[i]$ могут быть представлены выражением:

$$[i] = I_m(t)[S], \quad (3)$$

Где

$$[S] = \left[\sin(\omega t + \alpha) \dots \sin\left(\omega t + \alpha - \frac{2\pi(k-1)}{m}\right) \dots \sin\left(\omega t + \alpha - \frac{2\pi(m-1)}{m}\right) \right]^T.$$

Кривая $I_m(t)$ на периоде ее изменения определится по формуле

$$I_m(t) = \frac{M_{\vartheta}}{[S]^T \frac{d[\Psi_0]}{d\alpha}}. \quad (4)$$

На рис. 2 представлены кривые изменения мгновенных фазных токов при установившемся режиме СДПМ, соответствующие постоянному номинальному моменту исследуемого двигателя, а также изменение модулированной амплитуды этих токов $I_m(t)$ по (4).

Из полученных результатов следует, что при использовании амплитудной модуляции токов для исключения пульсаций электромагнитного момента СДПМ токи всех фаз будут иметь одинаковую форму и гармонический состав.

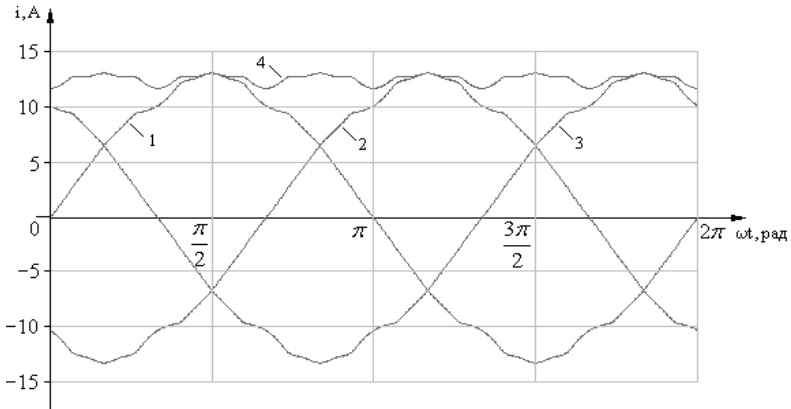


Рис.2. Кривые изменения фазных токов трехфазного СДПМ при постоянном моменте: 1-3 фазные токи, 4- зависимость $I_m(t)$

Предлагаемая модель позволяет построить, при наличии обратных связей по току, системы управления с улучшенными энергетическими и виброшумовыми характеристиками.

Библиографический список

1. **Иванов-Смоленский А.В.** Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах: Учеб. пособие для вузов по спец. «Электромеханика». – М.: Высш. шк., 1989.

*С.М. Васильев студент, М.А. Захаров соискатель;
рук. А.М. Захаров, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, Иваново)*

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В СИСТЕМЕ ВОДОСНАБЖЕНИЯ СРЕДСТВАМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Актуальная проблема энергосбережения, вызванная непрерывным повышением цен на углеродные носители, сейчас касается каждого потребителя.

Ряд конкретных механизмов, направленных на экономию энергии и ресурсосбережение, дает перестройку топливно-энергетического комплекса и снижение энергоемкости экономики, повышение эффективности использования энергии и применение энергосберегающих технологий и энергоэкономичного оборудования в электроэнергетике, транспорте, промышленном (промышленности) и жилищно-бытовом секторах (ЖКХ).

В России по статистике до 40% используемых энергоносителей расходуется нерационально, причем на единицу промышленной продукции расход энергии в 2,5-3 раза выше, чем в индустриально развитых странах мира.

Одна из важнейших стратегических задач страны — сократить энергоемкости отечественной экономики на 40% к 2020 году. Для ее реализации необходимо создание совершенной системы управления энергоэффективностью и энергосбережением

При этом наиболее важным направлением является энергосбережение в жилищно-коммунальном хозяйстве, так как именно в этом секторе нерационально расходуются огромные энергетические ресурсы. Потенциал энергосбережения ЖКХ составляет 30 %. Решение данной проблемы - решение комплексной задачи.

В ходе работы была выбрана насосная станция холодного водоснабжения, питающая часть города. Для выполнения мер энергоэффективности и ресурсосбережения, был произведен ряд работ:

1. Расчет и выбор частотно регулируемого привода для насосов насосной станции;
2. Выбор современной запорно-регулирующей и предохранительной арматуры и расчет места ее установки;
3. Выбор датчиков и регуляторов сетевого давления и расчет места их установки на ответвлениях сети;

4. Оптимизация работы системы водоснабжения. Работы по диспетчеризации и автоматизации управления сетями.

По результатам работ создано логико-математическое описание взаимосвязи перечисленных выше компонентов и характеристик системы водоснабжения участка города. Разработана автоматическая система управления водоснабжения.

*С.М. Пискунов, студент; М.А. Захаров, соискатель;
рук. А.М. Захаров, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, Иваново)*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТУРБОМЕХАНИЗМА СРЕДСТВАМИ КОМПЛЕКСНОГО УЧЕБНОГО СТЕНДА

В металлургии, химической, газовой промышленности, на транспорте и в сельском хозяйстве, в оборонных отраслях, в национальной экономике и в бытовом секторе используются большие и мощные воздуходувки, насосы, компрессоры, которые оснащаются ВЧРП, позволяющие регулировать скорость и расход газа и жидкости. Их применение позволяет исключить экономически невыгодный способ регулирования дросселированием и отказаться от заслонок и клапанов, что обеспечивает определённую экономию энергии. В некоторых случаях особенности технологического процесса требуют изменения скорости вращения насосов, компрессоров и вентиляторов. ВЧРП обеспечивают высокую точность управления, что позволяет полностью удовлетворить требования технологического процесса и обеспечить экономию электроэнергии. ВЧРП являются универсальными приводами для управления вентиляторами, насосами и центробежными нагнетателями.

Для осуществления научно исследовательских работ на базе физической модели высоковольтного частотно-регулируемого привода «ВЧРП», расположенного в лаборатории кафедры ЭП и АПУ Ивановского государственного энергетического университета, возникла необходимость в создании замкнутых систем регулирования, адекватно отражающих работу реальных производственных механизмов.

В качестве нагрузочного устройства используется математическая модель, разработанная в среде LabView. Программный комплекс получает информацию о состоянии электропривода с помощью датчиков напряжения, тока и скорости. Исходя из этих исходных данных моде-

лируется работа нагруженного механизма и рассчитанное значение давления в сети подается на вход обратной связи электропривода.

В студенческой научно – исследовательской работе проведен анализ нагруженных характеристик электропривода турбомеханизма. Разработана модель механической части турбомеханизма, адекватно отражающей поведение реального исследуемого объекта.

Проведена апробация замкнутой системы электропривода в ходе научно-исследуемой работы.

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

СТАБИЛИЗАЦИЯ НАТЯЖЕНИЯ ГИБКОГО МАТЕРИАЛА В СИСТЕМЕ ДВУХДВИГАТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Транспортирование валковыми механизмами гибких материалов в процессе их обработки является типовой операцией непрерывных технологических объектов различных производств. Одними из главных требований, предъявляемых к электроприводу указанных механизмов, является стабилизация натяжения полотна на минимальном по условиям отсутствия образования складок уровне, как в статичном, так и динамическом режимах работы.

Выполним анализ процесса стабилизации натяжения полотна, транспортируемого в зоне деформации двумя валковыми механизмами 2 и 3 (рис. 1), имеющими электроприводы 9,10. Автоматическая стабилизация натяжения обеспечивается регулированием скорости 4 ведомых валков с помощью электропривода 8 в системе, включающей датчик натяжения 7 и регулятор 12.

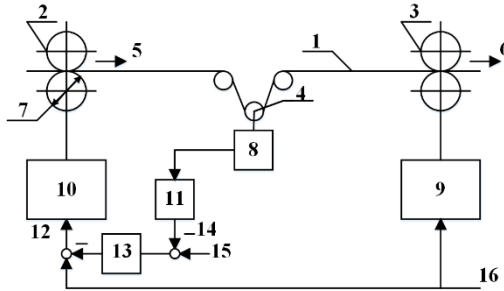


Рис. 1. Функциональная схема системы электропривода:

- 1 – полотно; 2,3 – валковые механизмы; 4 – ролик петлеобразователя; 5,6 – скорости $v_{1,2}$;
 7 – диаметр вала D_B ; 8 – преобразователь; 9,10 – электроприводы ЭП-1,2;
 11 – коэффициент передачи k_F ; 12 – напряжение U_1 ; 13 – регулятор натяжения R_F ;
 14,15,16 – напряжения, задающие натяжение, скорость и обратную связь по натяжению.

В качестве возмущающего воздействия примем изменение скорости 6 полотна на выходе зоны деформации, обусловленной, например, изменением нагрузки электропривода 9.

Установим зависимость заданного минимального натяжения полотна от параметров системы и действующего возмущения, при котором обеспечивается отсутствие его складкообразования в переходном процессе.

С целью ужесточения требований к быстродействию системы электропривода примем малоходовой датчик натяжения [1] имеющий минимальную возможность перемещения измерительного ролика 4.

Систему управления частотой вращения электропривода ЭП-1 (рис.2) примем настроенной на стандартный биномиальный оптимум, представив его передаточную функцию аperiодическим звеном:

$$H_{эн}(s) = \frac{v_1(s)}{U_1(s)} = \frac{k_{эн}}{T_{эн}s + 1} . \quad (1)$$

Здесь $k_{эн} = \frac{D_B}{2 \cdot i_p \cdot k_c}$; i_p – передаточное отношение редуктора между

валом электродвигателя и валковым механизмом; k_c – коэффициент обратной связи по частоте вращения вала двигателя, В·с/рад.

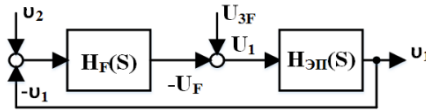


Рис. 2. Структурная схема системы электропривода.

Процесс деформации транспортируемого полотна с датчиком натяжения может быть представлен передаточной функцией в виде:

$$H_n(s) = \frac{U_F(s)}{\Delta v(s)} = \frac{k_v \cdot k_F \cdot E_0}{T_n \cdot s + 1}, \quad (2)$$

где $k_v = \frac{1}{v_2}$; E_0 – модуль упругости полотна, отнесенный к его ширине, Н;

$T_n = \frac{L}{v_2}$; L – длина полотна в зоне деформации, м;

$\Delta v = v_2 - v_1$, м/с.

Передаточную функцию замкнутой системы с учетом (1) и (2) представим в виде:

$$H_3(s) = \frac{v_1(s)}{v_2(s)} = \frac{k_3}{T_{эн} \cdot T_n \cdot s^2 + (T_n + T_{эн}) \cdot s + 1 + k_3}, \quad (3)$$

Здесь $k_3 = k_v \cdot k_F \cdot E_0 \cdot R_F \cdot k_{эн}$.

Соотношение параметров характеристического уравнения (3), соответствующее аperiodическому процессу:

$$(T_n + T_{эн})^2 > 4 \cdot T_n \cdot T_{эн} \cdot (1 + k_3), \quad (4)$$

С учетом имеющего место на практике соотношения $T_{эн} \ll T_n$, условие аperiodического процесса примем в виде:

$$T_n > 4 \cdot T_{эн} \cdot (1 + k_3).$$

Тогда

$$H_3(s) = \frac{k_3 / (1 + k_3)}{T_n' \cdot s + 1}, \quad (5)$$

где $T_n' = \frac{T_n}{1 + k_3}$.

В качестве возмущения примем ступенчатое изменение скорости v_2 в момент времени t_n (рис. 3) на $\Delta v_2 = v_{2н} - v_{2к}$.

При этом соотношение скоростей Δv_2 изменит знак, т.к. $v_{2н} < v_{1н}$ и натяжение $F(t)$ начнет уменьшаться в соответствии с уравнением

$$T_n' \frac{dF}{dt} + F = E_0 \cdot k_v \cdot (v_{2н} - v_1(t)). \quad (6)$$

В момент времени t_0 (рис. 3) $v_2 = v_{2к} = v_1(t_0)$ и натяжение F , достигнув минимального значения, начнет увеличиваться в соответствии с заданным значением U_{3F} , при этом

$$v_1(t) = v_{1н} - \Delta v_2 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T_n}}). \quad (7)$$

После подстановки (7) в (6) получим:

$$T_n' \frac{dF}{dt} + F = E_0 \cdot k_v \cdot [v_{2н} - v_{1н} + \Delta v_2 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T_n}})]. \quad (8)$$

Введем обозначения:

$$\frac{E_0 \cdot k_v}{T_n'} \cdot \Delta v_1 + \frac{E_0 \cdot k_v}{T_n'} \cdot \Delta v_2 = A; \quad \frac{E_0 \cdot k_v}{T_n'} \cdot \Delta v_2 = B.$$

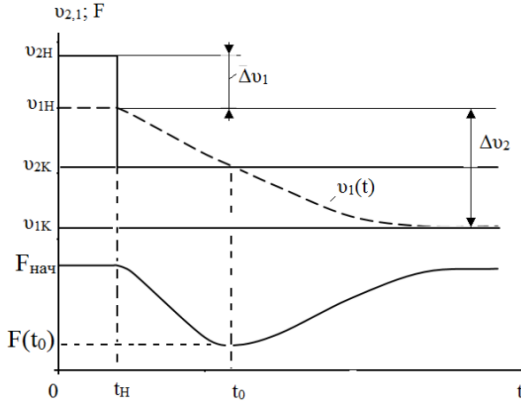


Рис. 3. К определению минимального натяжения в зоне деформации.

Тогда (8) примет вид:

$$\frac{dF}{dt} + \frac{1}{T_n'} \cdot F = A - B e^{-\frac{t}{T_n}}. \quad (9)$$

Общее решение (9):

$$F = e^{-\frac{t}{T_n}} \left\{ \int \left[A - B \cdot e^{-\frac{t}{T_n}} \right] \cdot e^{\frac{t}{T_n}} dt + c \right\} \quad (10)$$

$$F = e^{-\frac{t}{T_n}} \left(A T_n' \cdot e^{\frac{t}{T_n}} - B t \right) + c \cdot e^{-\frac{t}{T_n}} = A T_n' - (B t - c) e^{-\frac{t}{T_n}}.$$

При $t=0$: $A T_n' + c = F_{нач}$; $c = F_{нач} - A T_n'$.

Тогда

$$F(t) = A T_n' - (B t - F_{нач} + A T_n') \cdot e^{-\frac{t}{T_n}}. \quad (11)$$

Для поиска минимума $F(t)$ возьмем производную и приравняем ее к нулю.

$$\begin{aligned} \frac{dF}{dt} &= \frac{d}{dt} \left(-B t \cdot e^{-\frac{t}{T_n}} \right) + \frac{d}{dt} \cdot F_{нач} \cdot e^{-\frac{t}{T_n}} - A T_n' \cdot e^{-\frac{t}{T_n}} = \\ &= \left[-B + \frac{B t}{T_n} - (F_{нач} \cdot \frac{1}{T_n} - A) \right] \cdot e^{-\frac{t}{T_n}} = 0; \\ -B + \frac{B t}{T_n} - \frac{F_{нач}}{T_n} + A &= 0, \end{aligned}$$

откуда

$$t_0 = \frac{F_{нач} - (A + B) T_n'}{B}. \quad (12)$$

Значение $F(t_0) = A T_n' - (B t_0 - F_{нач} + A T_n') \cdot e^{-\frac{t_0}{T_n}}$.

Так для системы с параметрами: $k_F = 0,2$ В/Н; $k_C = 0,062$ В·с/рад; $k_s = 6,8$; $R_F = 0,1$; $D_B = 0,16$ м; $i_p = 7,5$; $L = 1,5$ м; $E = 2 \cdot 10^3$ Н; $T_n' = 0,19$ с; $v_{2н} = 1$ м/с; $\Delta v_1 = 0,05$ м/с; $\Delta v_2 = 0,1$ м/с; $F_{нач} = 1000$ Н, получим $t_0 = 0,99$ с; $F(t_0) = 298$ Н.

Библиографический список

1. Глазунов В.Ф., Прокушев С.В. Автоматизация оборудования для непрерывной обработки тканевых материалов. – изд. ИГЭУ, 2002, 348 с.

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

ЭЛЕКТРОПРИВОД НАСОСНОЙ СТАНЦИИ ДЛЯ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Современная насосная станция (НС) представляет собой установку повышения давления, в состав которой входят от двух до шести вертикальных насосов и один преобразователь частоты (ПЧ), который устанавливается внутри шкафа управления. Преобразователь частоты работает поочередно с каждым насосом (рис.1).

Насосы соединены между собой всасывающими и напорными трубопроводами и установлены на общей раме-основании. Подключение насосов к коллекторам выполняется при помощи отсечных и обратных клапанов. Электрический шкаф управления устанавливается на полу.

Совместно работающие насосы находят широкое применение на всех видах НС. При этом для обеспечения требуемых технологических показателей используется параллельное, последовательное и комбинированное соединение установок. Наиболее характерным является параллельное соединение насосов, применяемое на большинстве видов НС. Технологическая схема типовой НС приведена на рис.2.

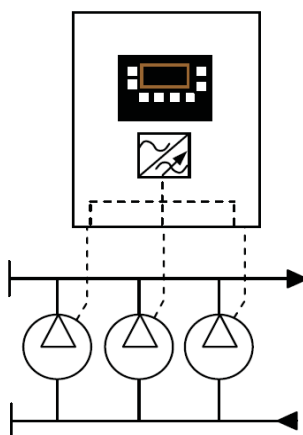


Рис. 1. Структурная схема насосной установки

Насосы соединены между собой всасывающими и напорными трубопроводами и установлены на общей раме-основании. Подключение насосов к коллекторам выполняется при помощи отсечных и обратных клапанов. Электрический шкаф управления устанавливается на полу.

Совместно работающие насосы находят широкое применение на всех видах НС. При этом для обеспечения требуемых технологических показателей используется параллельное, последовательное и комбинированное соединение установок. Наиболее характерным является параллельное соединение насосов, применяемое на большинстве видов НС. Технологическая схема типовой НС приведена на рис.2.

В правой части рис. 2 размещена таблица, в которой для каждого из объектов НС приведен перечень контролируемых параметров. Данный перечень может изменяться в зависимости от назначения НС и мощности насосных установок.

Для насосных установок центробежного типа применяют следующие основные способы регулирования подачи жидкости и давления:

- дросселирование трубопровода;
- байпас;
- отключение или подключение насосов (ступенчатое регулирование);
- изменение частоты вращения рабочего колеса насоса.

Одним из широко применяемых вариантов регулирования является сочетание ступенчатого регулирования с изменением частоты вращения рабочего колеса насосной установки, которое достигается с помощью частотно-регулируемого электропривода.

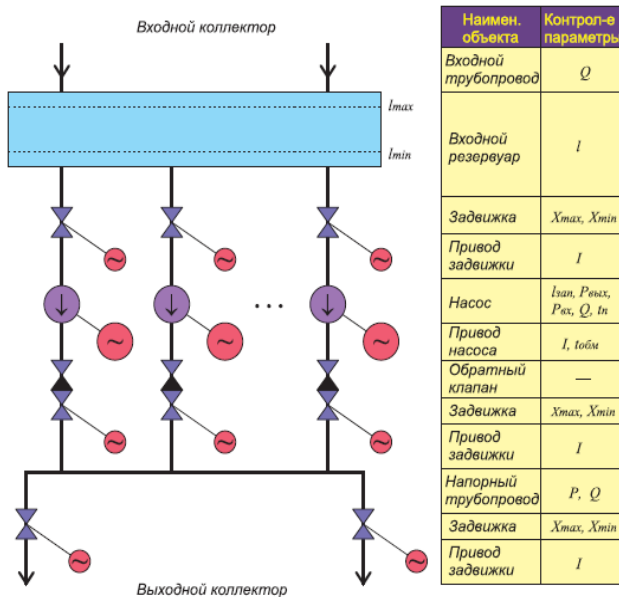


Рис. 2. Технологическая схема типовой НС

Насосные установки с регулированием частоты вращения двигателей находят применение в следующих ситуациях:

- в системах с большим количеством потребителей, в которых колебания водопотребления происходят часто и в разное время суток;
- при необходимости поддержания постоянного давления;
- в системах, в которых необходим постоянный контроль за работой насосной станции при помощи системы диспетчеризации.

При возникновении водопотребления регулируемый преобразователем насос включается и работает с частотой вращения, обеспечивающей заданное давление. С ростом потребления воды последовательно включаются остальные насосы, которые будут работать на максимальной частоте, в то время как частота вращения регулируемого насоса начинает подстраиваться для поддержания постоянного давления. При снижении водопотребления происходит каскадное отключение насосов в зависимости от значения давления; регулируемый насос уменьшает число оборотов до минимального заданного значения, после чего отключается.

Регулируемые насосные станции имеют низкий уровень шума, что ведёт к повышению уровня комфорта для потребителей, а плавный останов насосов значительно снижает гидравлические удары в сетях.

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

ЭЛЕКТРОПРИВОД НАСОСА ДЛЯ ПЕРЕКАЧКИ НЕФТЕПРОДУКТОВ

К электроприводам насосов для перекачки нефтепродуктов предъявляются повышенные требования, определяемые условиями окружающей среды и специфическими режимами работы насосов.

Потому управление и защита электронасосных установок осуществляется при помощи специальных станций управления, устанавливаемых в непосредственной близости от объекта перекачки.

Необходимость создания специальных станций управления обусловлена спецификой электродвигателей для насосов по перекачки нефтепродуктов и особенностями эксплуатации нефтяных скважин электронасосами, к которым относятся:

- удалённость объекта защиты и управления от станции управления;
- разные условия тепловых режимов станции управления и двигателей насосов для перекачки нефтепродуктов; первая подвержена влиянию атмосферных условий (сезонные колебания температуры, изменения влажности и т.д.), второй может находиться в среде с температурой, достигающей 120°C и более.

Среди особенностей, связанных с условиями эксплуатации, следует выделить две основные.

Первая особенность обусловлена обязательной универсальностью работы насоса. Насос должен работать без перебоев в любых климатических условиях (включая и экстремальные). В связи с этим возникает необходимость максимального оснащения станций управления средствами местной автоматики, в частности, средствами, обеспечивающими самозапуск электродвигателя при возобновлении питания электроэнергией.

Вторая особенность заключается в специальных режимах работы электронасоса. Так, при периодической эксплуатации электронасос работает круглые сутки, а автоматически включается и отключается на определённые отрезки времени, заданные в соответствии с заранее разработанной программой, определяемой необходимостью перекачки

сырья. Как показала практика, однозначно определить эти интервалы весьма проблематично.

Станция управления должна также обеспечивать общепринятые для электродвигателей защиты – от коротких замыканий и чрезмерных перегрузок, от исчезновения и резкого снижения напряжения, от длительной работы на режиме холостого хода, от работы на двух фазах и др.

При разработке токовых защит электродвигателей насосов для перекачки нефтепродуктов, необходимо учитывать наличие в установке длинного кабеля, а также то обстоятельство, что замыкание внутри электродвигателя или в кабельном вводе сопровождается возникновением дуги. В оценке состояния насоса важнейшее значение имеет контроль за сопротивлением изоляции системы «преобразователь энергии-силовой кабель-электродвигатель».

В работе рассматривается насос фирмы «MARFLEX» с двигателем типа M2KP 315 SMB-4 и частотным преобразователем ACS 800 производства фирмы АВВ.

Станция управления «MARFLEX» предназначена для ручного, автоматического и дистанционного управления и защиты насосных установок, оснащённых асинхронными двигателями номинальной мощностью до 150 кВт.

Двигатель M2KP 315 SMB-4 - трёхфазный асинхронный с короткозамкнутым ротором с номинальной мощностью 132 кВт - предназначен для продолжительного режима работы во взрывоопасных помещениях при температуре до 40 °С как от сети переменного тока, так и от регулируемого силового преобразователя в качестве привода центробежных насосов для перекачки нефтепродуктов, а также загрузки и разгрузки нефтеналивных судов, нефтеналивных хранилищ. Для предотвращения проникновения жидкости на поверхность двигателя в комплект входит гидрозащитный чехол.

Частотные преобразователи ACS 800 имеют ряд типоразмеров, предназначенных для управления двигателями от 1.5 до 150 кВт.

Для двигателя M2KP 315 SMB-4 целесообразно выбрать ACS 800 типоразмера R7i.

Инверторная секция шкафа снабжена проходными втулками внизу или вверху для кабелей двигателей. В стандартном исполнении выходные шины, находящиеся внизу инверторного модуля, выступают в переднюю часть секции для облегчения доступа к ним.

Блок управления (RDCU-02C), содержащий плату RMIO с основными входами/выходами и гнездами для дополнительных модулей ввода/вывода, установлен на DIN-рейке около инверторного

модуля.

Модули типоразмера R7i снабжены фильтрами синфазных помех в качестве стандартных принадлежностей. Дополнительно предлагаются выходные фильтры (du/dt) и функция защиты от несанкционированного пуска.

*С.А. Петровский, А.А. Фадеев, студенты;
рук. А.В. Пруднов, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, Иваново)*

ЭЛЕКТРОПРИВОД И АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕРМОФОРМОВОЧНОЙ МАШИНЫ

Термоформовочная машина предназначена для формования из полиэтилентерефталатной ленты различного вида изделий. Технологическая схема термоформовочной машины приведена на рис. 1. В технологической схеме можно выделить несколько зон: раскатка пленки, зона предварительного нагрева, зона нагрева, зона формования и зона сбора готовых изделий. Пленка с бобины поступает в каландр, валы которого подогреваются водой, тем самым нагревая пленку. Затем пленка поступает в зону нагрева на клуппную цепь, состоящую из двух основных частей – тянущей цепи и крепящихся к ней устройств для захвата и поддержания пленки-клуппов. В рассматриваемой машине используются игольчатые клуппы, они жестко захватывают пленку, накалывая в ней отверстия, и протягивают пленку в зону нагрева. Далее она, нагреваясь до требуемой температуры, подается в зону формовки, где одновременно с формованием происходит вырубка изделий.

После определенного числа циклов формования, штабелер забирает готовые изделия и транспортирует их на стол упаковки. Остаточные материалы наматываются на бобину и затем отправляются на переработку.

Исходя из технологического процесса для обеспечения высокой эффективности производства необходимо четко согласовать работу электроприводов механизмов стола формовки (двигатель М 4) и подачи клуппных цепей (двигатель М 3). При этом двигатель М 4 должен обеспечивать максимально возможную скорость, а двигатель М 3 должен подстраиваться под ритм работы двигателя М 1. Таким образом, электропривода должны обеспечивать высокое быстродействие и точность позиционирования Система управления электроприводами использует программируемый контроллер. В настоящее время на линии отсутствует согласования скоростей двигателей М1 и М2. Для согласования скоростей пленки между зонами предварительного нагрева и на-

грева используется оптический датчик положения петли пленки. На двигателе формовки установлен главный энкодер, который фиксирует положение стола формования, как только форма достигает определенного положения (когда заданная фаза совпадает с сигналом главного энкодера), контроллер посылает команду на пуск или останов цепей подачи. На валу двигателя цепей МЗ установлен энкодер, контролирующий положение вала двигателя, по средствам этого реализовано позиционирование цепей подачи.

До настоящего времени на линии использовался электропривод Indramat TDM and KDS servo drive состоящий из 3х или более модулей, один из которых является логическим преобразователем, основанном на жесткой логике, второй – силовой преобразователь, третий – логическое управление преобразователем (непосредственное задание параметров привода: скорость, положение).

Все сигналы и команды обрабатываются главным контроллером. В данном случае с логики Indramat TDM в контроллер приходит информация:

- исправность привода;
- готовность к эксплуатации;
- текущая позиция;
- позиционирование выполнено;
- сигнал отработки задания;
- ошибка выполнения операции и др.

В свою очередь, с контроллера идут сигналы в Indramat:

- старт;
- старт одного цикла протяжки;
- цепи медленно вперед;
- цепи медленно назад;
- свободный ввод;
- автоматический ввод и др.

Модернизация необходима ввиду:

- морального устаревания СУ Indramat в целом;
- сложностью в параметрировании;
- дороговизны, сложности ремонта;
- высокой стоимостью сервопривода;
- замены системы управления на более современную, построенную на основе микроконтроллера.

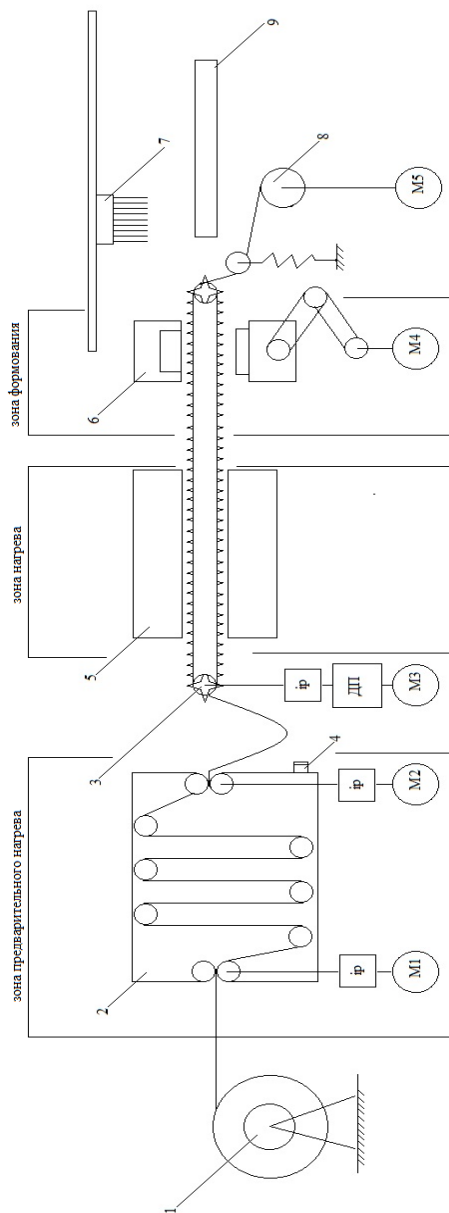


Рис. 1. Технологическая схема термоформовочной машины:

1. Бобина. 2. Каландр. 3. Цепи подачи. 4. Оптический датчик уровня. 5. Плиты нагрева.
6. Стол формовки. 7. Штгабелер. 8. Бобина с остатками материала. 9. Стол упаковки.

Для модернизации была выбрана система электропривода DELTA VFD C2000 с АД СЕГ МТ132SR-44, которая проста в установке, настройке и отвечает всем параметрам, необходимым для качественного производства продукции. В работе рассмотрены вопросы оптимизации передаточного числа редуктора и оптимизации тахограммы работы привода клуппных цепей.

*А.Ю. Крючкова, студ.; рук. М.А. Соломаничев
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ВОПРОСЫ МОДЕРНИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГЛАВНОГО ДВИЖЕНИЯ ТОКАРНО- КАРУСЕЛЬНОГО СТАНКА МОДЕЛИ 1512Ф3

В настоящее время важной является задача повышения технологического уровня как давно действующих, так и совершенно новых моделей металлорежущих станков (МРС), которая, в первую очередь, связана с совершенствованием характеристик и расширением функциональных возможностей их электрического привода (ЭП). Последние представляют наиболее наукоемкую, мобильную и быстроразвивающуюся отрасль станкостроения и позволяют эффективно решать сложные и ответственные задачи повышения производительности, точности и автоматизации соответствующего оборудования.

ЭП на базе полупроводниковых преобразователей нашел широкое применение в таких ведущих отраслях народного хозяйства, как машиностроение, металлургия, станкостроение, химическая и легкая промышленности, робототехника, самолетостроение и др. Перспективным направлением в развитии автоматизированного электропривода МРС является внедрение асинхронного ЭП на базе силовых транзисторных преобразователей частоты, к основным преимуществам которого следует отнести [1]:

- высокие энергетические показатели (КПД и коэффициент мощности);
- малые габариты и масса;
- стабильность характеристик и их малая зависимость от параметров силовых транзисторов преобразователя, работающих в ключевом режиме;
- высокое быстродействие;

- возможность оптимизации параметров с помощью микропроцессорной техники.

Вышесказанное позволяет говорить об актуальности вопросов, связанных с модернизацией находящихся в эксплуатации устаревших моделей станочных приводов и необходимостью приближения их технико-экономических показателей к уровню возможностей, реализуемых большинством современных серий комплектных электроприводов общепромышленного назначения. Это определяет актуальность темы дипломного проекта и позволяет сформулировать его цель – решение вопросов модернизации ЭП главного движения токарно-карусельного станка модели 1512Ф3, оборудованного системой числового программного управления (ЧПУ) типа H55-2, путем замены действующего устаревшего комплектного привода постоянного тока ЭПУ1М...Д с двигателем П-81 на современный частотно-регулируемый ЭП переменного тока.

В соответствии с указанной целью необходимо:

- сформулировать и обосновать основные требования к электроприводу главного движения рассматриваемого МРС;
- выбрать асинхронный двигатель (по мощности), основные элементы защиты электрооборудования и тип ЭП (с обоснованием в рамках модернизации) на базе преобразователя частоты для управления механизмом главного движения станка;
- выполнить анализ расчетных статических и динамических (по результатам математического моделирования) характеристик выбранной системы электропривода;
- обосновать экономический эффект от модернизации системы ЭП; рассмотреть вопросы безопасности и экологичности принятых в проекте решений при эксплуатации механизма главного движения МРС, управляемого от выбранного типа частотно-регулируемого привода;
- выполнить анализ результатов выполнения дипломного проекта на предмет соответствия перечню требований, указанных в техническом задании на проектирование.

Для решения указанных задач (в соответствии с заданием на проект) выполняются следующие этапы дипломного проектирования:

- разработка технического задания на проектирование ЭП главного движения (в рамках его модернизации) токарно-карусельного станка модели 1512Ф3;

- описание конструкции станка и реализуемого им технологического процесса; указание общей характеристики и основных технических параметров рассматриваемого МРС;
- формулировка и обоснование требований к электроприводу главного движения станка;
- выбор двигателя по расчетному значению его мощности и основных защитных элементов электрооборудования, а также обоснование выбора рационального варианта построения системы электропривода на базе преобразователя частоты (с описанием устройства и принципа работы) для управления механизмом главного движения указанной выше модели МРС;
- расчет и построение статических характеристик выбранного типа системы электропривода; построение структурной схемы и разработка математической модели указанной системы для получения динамических характеристик ЭП главного движения станка;
- расчет показателей экономической эффективности от модернизации и рассмотрение вопросов безопасности и экологичности принятых в проекте решений при эксплуатации электропривода механизма главного движения токарно-карусельного станка модели 1512Ф3;
- составление ведомости соответствия полученных в проекте результатов требованиям, приведенным в техническом задании на проектирование.

Основные требования к электроприводу главного движения рассматриваемого станка, оборудованного системой ЧПУ, формулируются в дипломном проекте на основании информации, изложенной в [2].

Расчет требуемой мощности двигателя и его выбор на начальном этапе расчета параметров системы ЭП главного движения указанного МРС выполняются по методике, изложенной в [3]. С учетом этого выбирается асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором производства фирмы *ABB* типа *M2AA 200L 3GAA 202011 – ADA* ($P_N = 30$ кВт, $U_N = 400$ В, $I_N = 59$ А, $n_N = 1470$ об/мин, $M_N = 195$ Н·м, $M_{max} = 663$ Н·м, $2p = 2$, $J_{дв} = 0,225$ кг·м², $\eta = 92$ %, $\cos \varphi = 0,8$) общепромышленного назначения, имеющий базовую конструкцию в алюминиевом корпусе.

В качестве основных элементов защиты силовых цепей электрооборудования от токовых перегрузок и коротких замыканий выбираются автоматические выключатели ВА и плавкие предохранители серии ПП.

Основным критерием выбора типа электропривода для управления механизмом главного движения станка является способ обработки и

спектр технологических задач, выполняемых на нем. Выбор рационального варианта построения системы ЭП сводится к обеспечению наибольшего соответствия между техническими характеристиками самого станка и возможностями данного привода при необходимых технико-экономических показателях.

С учетом указанных в дипломном проекте требований к ЭП главного движения МРС, а также исходя из типа и параметров электродвигателя, в результате сравнительного анализа подходящих вариантов частотно-регулируемых приводов выбирается ЭП на базе преобразователя частоты производства фирмы «ВЕСПЕР» типа EI-7011 ($P_{\Sigma} = 40$ кВт, $I_{\text{ном}} = 60$ А, $U_{\text{вх.н}} = (380 \div 460)$ В, $U_{\text{вых.мах}} = (380 \div 460)$ В, $f_{\text{пч}} = 50/60$ Гц, $f_{\text{вых.н}} = (0 \div 400)$ Гц) [4].

Вид расчетных механических характеристик (рис. 1) обусловлен необходимостью обеспечения постоянства перегрузочной способности ($M_K/M_N = \text{const}$) выбранного двигателя в составе ЭП главного движения путем изменения частоты питающего напряжения.

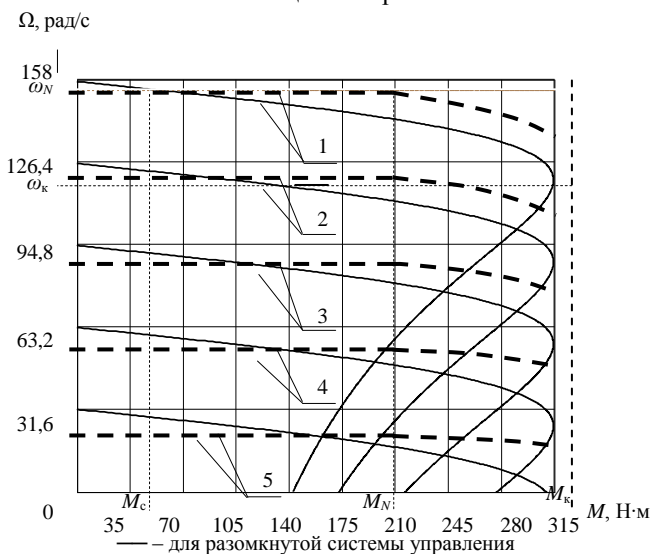


Рис. 1. Механические характеристики (1–5) ЭП главного движения станка (после модернизации) при частотном регулировании по закону $U/f = \text{const}$, соответствующие частоте f питающего напряжения, равной 50, 40, 30, 20 и 10 Гц

На основе анализа полученных в проекте расчетных динамических характеристик выбранного типа ЭП механизма главного движения

станка сделан вывод о возможности его применения с точки зрения качества переходных процессов в динамических режимах работы данного привода. Результаты расчета экономического эффекта от модернизации электропривода механизма главного движения токарно-карусельного станка модели 1512Ф3 и оценка уровня безопасности и экологичности принятых в проекте решений показывают целесообразность применения выбранного типа привода для управления данным механизмом.

Библиографический список

1. Сандлер А.С. Электропривод и автоматизация металлорежущих станков. – М.: Высшая школа, 1972.
2. Андреев Г.И., Босинзон М.А., Кондриков А.И. Электроприводы главного движения металлообрабатывающих станков с ЧПУ. – М.: Машиностроение, 1979.
3. Глазунов В.Ф., Соломаничев М.А. Выбор электродвигателей по мощности: метод. указ. – Иваново: ИГЭУ, 2007.
4. Преобразователи частоты общепромышленного применения ВЕСПЕР EI-7011. Руководство по эксплуатации, 2008.

*С.Ф.Панченко, студентка, рук. Ю.П. Спичков, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ВЕКТОРНО-УПРАВЛЯЕМЫЙ АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ЛИНИИ ПО ПРОИЗВОДСТВУ КОНДЕНСАТОРНОЙ ПЛЕНКИ

В настоящее время для развития электронной техники большое значение приобретает продукция химической промышленности, необходимая для изготовления конденсаторов, и в частности - конденсаторная пленка. Основные технологические процессы формирования пленки осуществляется на оборудовании непрерывного действия, объединенного в поточные линии.

В данной работе рассматривается поточная линии по производству двухосноориентированной пленки из полиэтилентерефталата ПЭФТ-2004 КТ.

Важнейшая роль в повышении производительности таких технологических линий, увеличении объема и улучшении качества продукции производства пленочных материалов принадлежит системам автоматизированного взаимосвязанного электропривода. Традиционно на таком оборудовании использовались регулируемые электропривода с двигателями постоянного тока, так как до настоящего времени они имели лучшие динамические характеристики по сравнению с приводами переменного тока.

С переходом на рыночную экономику остро встал вопрос энерго- и ресурсосбережения. Устранение нерационального расхода электроэнергии сегодня решается всё чаще при помощи высоких технологий. Одну из ведущих позиций в этой области занимает внедрение регулируемого асинхронного электропривода на основе частотного преобразователя. Применение таких электроприводов обеспечивает работу электродвигателя в режиме оптимального к.п.д. во всем диапазоне регулирования скорости линии, что существенно снизит и их энергопотребление. Наиболее подходящим для решения поставленной задачи является векторно-управляемый электропривод с асинхронными двигателями, и в частности отечественные электропривода ЭПВ.

Взаимосвязанный электропривод непосредственно осуществляет синхронизацию движения рабочих машин во всех технологических режимах, производит стабилизацию заданных скоростей и их соотношения, создает условия для управления важнейшими физико-механическими параметрами пленки (натяжением, толщиной пленки и т.п.) в процессах ее формирования и последующей обработки.

Существенное влияние на натяжение пленки и ее деформацию в процессе работы линии оказывает перепад температуры полотна и изменение его геометрических параметров (ширина, толщина). Последнее приводит к изменению модуля упругости пленки, которое и является доминирующим фактором, влияющим на точность регулирования скорости и натяжение пленки.

Автоматическая система регулирования (АСР) натяжения готовой пленки строится на базе малоходовых датчиков натяжения, зон обработки, включающих как элемент транспортируемую пленку и отдельных системы электропривода. Таким образом, она состоит в целом из отдельных локальных АСР натяжения, обеспечивающих заданный цикл обработки и транспортирование пленки.

В этих условиях существенное значение на работу АСР натяжения пленки оказывает конструкция и параметры датчика натяжения. Обеспечение основного фактора качественной обработки ткани стабильного малого натяжения зависит от рационального выбора их конструкции, а также структуры взаимосвязанного электропривода.

Показано, что возможен такой выбор параметров датчика натяжения пленки, сочетание которых позволяет получить минимальную чувствительность всего устройства стабилизации натяжения пленки к вариации ее модуля упругости. В частности это достигается за счет подпружинивания ролика датчика натяжения и выбора соответствующей жесткости пружины.

В ходе выполнения работы выбран электропривод переменного тока и рассчитана его элементная база, разработана система регулирования (АСР) натяжения готовой пленки и выбраны рациональные параметры датчиков натяжения полотна.

Исследования показали, что разработанная система регулирования натяжения пленки обладает лучшими динамическими характеристиками, меньшей чувствительностью к вариации параметров выпускаемой пленки в сравнении с АСР натяжения пленки на базе электроприводов постоянного тока.

*М.Ю. Васильев, студент; рук. Ю.П. Спичков, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, Иваново)*

ВЕКТОРНО-УПРАВЛЯЕМЫЙ АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО СТАНКА

На современном этапе развития промышленных электроприводов значительно расширилась область применения регулируемых электроприводов переменного тока. В первую очередь в тех отраслях промышленности, в которых ранее использовались электроприводы постоянного тока с двигателями независимого возбуждения, обладающие в то время наилучшими регулировочными свойствами (в частности, металлообрабатывающая промышленность).

В настоящее время применение регулируемых электроприводов переменного тока рассматривается как ключ к энергосбережению, повышению надежности и конкурентоспособности предприятия, улучшению экологической обстановки.

Основным направлением совершенствования станочного парка металлообрабатывающего оборудования является его техническая модернизация. Она достигается, прежде всего, за счет установки современных электроприводов и новых микропроцессорных средств автоматики на уже работающем оборудовании.

В рамках данной работы рассмотрен вопрос модернизации электропривода главного движения металлорежущего станка ИР200ПМФ4

Сравнительный анализ существующих электроприводов показал целесообразность применения частотно-регулируемого асинхронного электропривода, и в частности отечественного векторно-управляемого электропривода ЭПВ, исп.2 с двухзонным регулированием скорости.

Современные системы векторного управления прошли долгий путь развития и в настоящее время являются наиболее распространенными среди систем электропривода переменного тока. По своим регулировочным данным они не уступают приводам постоянного тока. Они имеют небольшие потери и довольно высокий КПД на всем диапазоне регулирования, простой и надежный электродвигатель.

В процессе работы были рассчитаны параметры электродвигателя и выбраны параметры регуляторов. Значения потокосцепления и ЭДС асинхронного двигателя при номинальном режиме работы определены на модели прямого пуска АД.

Для проверки расчётов параметров системы управления была использована математическая модель электропривода, выполненная в программном комплексе MATLAB. Проведён расчёт переходных процессов в режимах пуска, изменения скорости и отработки «сброс/наброс» нагрузки.

Сравнительный анализ статических и динамических характеристик электроприводов постоянного и переменного тока, их надёжности и стоимости, условий эксплуатации с двигателями постоянного тока и асинхронными двигателями показали преимущества асинхронных электроприводов с векторным управлением координат.

*А.Н. Мальцев, студ.; рук. П.В. Вилков, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ПРИМЕНЕНИЕ МОТОР-РЕДУКТОРОВ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА МОСТОВОГО КРАНА

К основной задаче механизма подъема мостового крана можно отнести выполнение работы с максимально высоким коэффициентом полезного действия. К такому механизму можно отнести и мотор-редуктор.

Мотор-редуктор представляет собой систему электродвигателя и редукторной коробки, которая преобразовывает его мощность в нужном направлении (рис. 1).

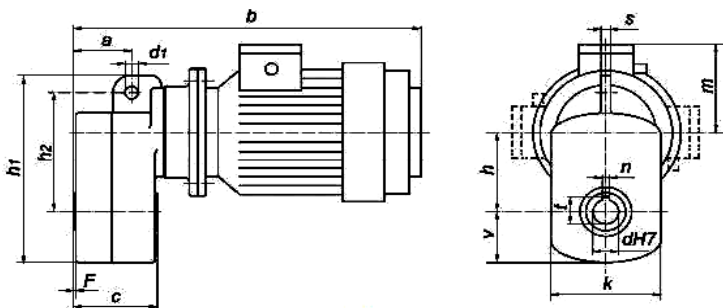


Рис. 1. Общий вид мотор-редуктора

Они относительно недорого стоят, достаточно надежны и имеют высокий коэффициент полезного действия.

Из популярных типов моторов-редукторов можно отметить следующие:

- червячные;
- цилиндрические;
- планетарные;
- волновые.

Каждый из этих типов имеет свои достоинства и недостатки.

Применительно к механизмам подъема (кран или лифт) нас может интересовать мотор-редуктор червячного типа.

Этот тип мотор-редукторов применяется на механизмах с непрерывным или повторно-кратковременным рабочим режимом. Они получили популярность благодаря тому, что привод очень неприхотлив и удобен, а также большим числом передаточных чисел – от 5 до 100. При работе они имеют низкий уровень вибрации, и как следствие, пониженную шумность.

Также необходимо отметить еще одну важную особенность мотор-редуктора этого типа. Они имеют функцию самоторможения, поэтому, если с его помощью поднимается груз, и двигатель, по какой-либо причине перестанет работать, редуктор остановится в одной точке и груз не упадет. Все это избавляет нас от необходимости устанавливать на механизм колодочный тормоз.

Однако с очевидными достоинствами этот тип имеет и недостатки. Главный из них – низкий коэффициент полезного действия. Он не превышает 80% из-за того, что скольжение металлических поверхностей механизмов происходит на высоких скоростях. Это не позволяет де-

лять мотор-редукторы такого типа малых размеров в этом случае потери мощности будут еще более ощутимы.

Однако отечественной промышленностью, в частности Промышленной Группой «Приводная Техника», в настоящее время уже выпускается седьмая серия мотор-редукторов с повышенным коэффициентом полезного действия и надежностью на мощности от 60 Вт до 15 кВт.

Таким образом, если при выборе двигателя механизма подъема мостового крана расчетная мощность окажется менее 15 кВт, то целесообразно выбирать мотор-редуктор червячного типа.

Библиографический список

1. **Редукторы** и мотор редукторы: 7-я серия – http://www.privod.ru/products/motor_reducers/index7ch.htm.

*Е.А. Маргацкая, асп.; С.Г. Воронин, д.т.н., проф.
ЮУрГУ, Челябинск*

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА И ДАТЧИКА МАГНИТНОГО ПОЛЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ПО ПОЛОЖЕНИЮ

В настоящее время датчики перемещения получили широкое распространение в самых разнообразных областях, что вызвало появление множества классов датчиков, которые различаются по принципу действия, точности, цене и другим параметрам. По принципу действия датчики перемещения могут быть емкостными, оптическими, индуктивными, вихретоковыми, ультразвуковыми, магниторезистивными, потенциометрическими, магнитострикционными, на основе эффекта Холла. Выбор датчика должен основываться, прежде всего, на требованиях, предъявляемых к разрабатываемому устройству, таких как точность, условия применения, габаритные размеры, стоимость и другие. В том случае, если приоритетным критерием являются массогабаритные показатели, то среди перечисленных типов датчиков в настоящем исследовании рассматривается датчик Холла и оптический датчик.

Датчик холла представляет собой датчик, работающий на эффекте Холла, суть которого заключается в том, что при помещении в магнитное поле некоторого проводника с постоянным током, в этом проводнике возникает поперечная разность потенциалов [1].

На уровне программной реализации измерения перемещения посредством датчика Холла требуется знание его выходной характеристики, которая может быть получена опытным путем. Эта характеристика представляет собой зависимость $U_{\text{дх}}(x_{\text{дх}})$ выходного напряжения датчика, которое может быть обработано АЦП микроконтроллера, от расстояния до сигнального элемента, в качестве которого может быть использован постоянный магнит. В большинстве случаев характеристика носит нелинейный характер, и вывод ее аналитической зависимости практически не представляется возможным. В таком случае, конечно, целесообразно прибегнуть к процедуре аппроксимации, что в свою очередь также приводит к определенным трудностям. В том случае, если проводить достаточно точную аппроксимацию путем разбиения характеристики на множество участков, это ведет к значительному усложнению алгоритма программы и увеличению времени вычисления. С другой стороны, в случае приближенной аппроксимации существенно снижается точность вычислений. Выходом из данной ситуации может послужить только наличие линейной выходной зависимости, на вид которой в большей степени оказывают влияние форма, размеры и материал магнита.

Исследование процесса повышения линейности характеристики датчика Холла рассматривается в данной работе в рамках реализации обратной связи для электропривода клапана выдоха аппарата искусственной вентиляции легких [2, 3].

Исследование влияния формы магнита на вид выходной характеристики датчика целесообразно проводить относительно двух плоскостей: перпендикулярной и параллельной линиям магнитной индукции сигнального элемента, при условии аксиальной намагниченности. Наиболее адекватное реальному электромеханическому устройству математическое описание можно получить при решении полевой задачи. Поэтому построение зависимостей магнитной индукции, считываемой датчиком, от конфигурации сигнального элемента проводится в *Ansoft Maxwell* – программном обеспечении, которое базируется на методе конечных элементов и точно рассчитывает статические, гармонические электромагнитные и электрические поля, а также переходные процессы в полевых задачах [4, 5].

В плоскости, перпендикулярной линиям магнитной индукции рассматривались следующие типовые математические формы магнита: правильный треугольник, квадрат, круг, эллипс. Для комплексной оценки также оценивался характер влияния величины площади каждой формы на вид выходной характеристики датчика.

В плоскости параллельной линиям магнитной индукции исследование проводилось для сигнального элемента цилиндрической формы, поскольку при данном типе сечения из рассмотренных характеристика наиболее полно приближается к линейной. В данном случае в верхнем основании магнита выполнялись вырезы различной глубины h сферической, конической и параболической форм.

В качестве совокупного результата проведенного исследования возможно выделить несколько закономерностей для повышения линейности выходной характеристики датчика Холла посредством изменения конфигурации сигнального элемента:

1. В плоскости перпендикулярной линиям магнитной индукции магнит цилиндрической формы при увеличении его диаметра наиболее полно приближает зависимость $B_{yx}(x_x)$ к линейной.

2. Однако увеличение площади сечения приводит к ухудшению точности позиционирования, что справедливо для любого типа сечения магнита.

3. Увеличение высоты магнита приводит к искажению линейности выходной характеристики датчика.

4. В плоскости перпендикулярной линиям магнитной индукции наиболее линейной выходной характеристики можно добиться при выполнении выреза параболической формы глубиной ориентировочно 1:3 относительно высоты магнита.

Оптический бесконтактный датчик, регистрирует изменение светового потока в контролируемой области, связанное с изменением положения в пространстве каких-либо движущихся частей механизмов и машин, отсутствия или присутствия объектов. Такой датчик состоит из двух функциональных узлов, приемника и излучателя, которые могут быть выполнены как в одном корпусе, так и в различных корпусах [6].

Относительно устройства, для которого проводится исследование, по типу действия рациональным является установка диффузионного светоотражающего оптического датчика. В таких датчиках источник оптического сигнала и его приёмник находятся в одном корпусе. Приёмник учитывает интенсивность луча, отражённого контролируемым объектом. Дальность действия зависит от отражательных свойств объекта и может быть определена с помощью поправочного коэффициента. Паспортные выходные характеристики диффузионных оптических датчиков [7], представляющих собой зависимости выходного напряжения фотодиода от расстояния до объекта, как правило носят нелинейный характер с ярко выраженным максимумом. В данном случае вид выходной зависимости непосредственно зависит от взаимного

расположения системы приемник - излучатель, которое включает в себя межцентровое расстояние S , угол наклона излучателя β и угол наклона приемника γ .

Для исследования перечисленных параметров на вид выходной характеристики была составлена математическая модель датчика, реализованная в программном пакете Delphi. Алгоритм построен на итерационном процессе, когда рассматривается некоторое количество лучей света, выходящих от излучателя под разными углами с разной интенсивностью, и под каким углом с какой интенсивностью, согласно геометрической модели, они попадают на линзу приемника. В результате построения соответствующих графиков можно выделить следующие характерные особенности:

1. Увеличение межцентрового расстояния приводит к смещению максимума характеристики в положительную сторону по оси расстояния до объекта и в то же время к уменьшению диапазона выходного напряжения датчика.

2. Изменение угла наклона приемника носит обратный характер влияния на выходную характеристику датчика: при его увеличении максимум смещается в отрицательную сторону по оси расстояния, а диапазон выходного напряжения существенно увеличивается. При этом также увеличивается чувствительность датчика при малых перемещениях.

3. Изменение угла наклона приемника не оказывает влияние на положение максимума, однако значительно ухудшает диапазон выходного напряжения.

Подводя обобщенный итог исследования, следует отметить, что невозможно однозначно рекомендовать определенный датчик для измерения малых линейных перемещений, однако можно вывести некоторые общие закономерности. Так, оптический датчик инвариантен к электромагнитным помехам, однако при его использовании можно добиться линейности выходной характеристики лишь в некотором диапазоне. С другой стороны, повышение линейности выходной характеристики датчика Холла за счет изменения конфигурации сигнального элемента сложнее в реализации, чем изменение геометрии системы светодиод - фотодиод. Также использование малогабаритного приемника оптического датчика свидетельствует о его малых выходных токах, что в свою очередь требует установки дополнительной схемы усилителя и экранирования от помех. Таким образом, необходимо для измерения малых перемещений, необходимо выбирать датчик, учитывая особенности его установки и режим использования.

Библиографический список

1. **Трофимова Т.И.** Курс физики: учеб. пособие для вузов. – М.: Издательский центр "Академия", 2006. – 506 с.
2. **Шабуров П.О., Маргацкая Е.А.** Электропривод клапана выдоха аппарата искусственной вентиляции легких. Электротехнические системы и комплексы: междунар. сб. науч. трудов. – 2012. – Вып. 20. – С. 83-90.
3. **Шабуров П.О., Маргацкая Е.А.** Smart lungmotor: активный клапан выдоха. Вестник ЮУрГУ. Серия "Энергетика". - 2013. - т.13. - № 1. - С.154 - 159
4. **Ansoft Corporation.** Ansoft Maxwell 3D Field Simulator v11 User's Guide. *J. of Computer-Mediated Communication*, 2005. URL: <http://www.slideshare.net/EraBrown/ansoft-maxwell-3d-v11-user-guide> (дата обращения: 20.10.2013).
5. **Помогаев Г.В., Согрин А.И., Лютов М.А.** Применение метода конечных элементов для расчета электромагнита тормоза инвалидной коляски. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Энергетика. – 2005. – № 9, Вып. 6. – С. 108-109.
6. **Густав Олссон, Джангуидо Пиани.** Цифровые системы автоматизации и управления. СПб.: Невский Диалект, 2001. – 557 с
7. **Avago technologies.** HSDL - 9100. Surface - Mount Proximity Sensor. Data Sheet, 2009. URL: <http://www.avagotech.com/docs/AV02-2259EN> (дата обращения: 01.02.2014).

*В.Г. Никоноров, Д.С. Макеева, студ.; рук. В.В. Рожков, к.т.н., доц.
(Филиал МЭИ в г. Смоленске)*

МОДЕРНИЗАЦИЯ СХЕМЫ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОУРОВНЕВОГО АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Совсем недавно одной из самых распространенных структур частотно-регулируемого электропривода являлась схема преобразователя частоты «трехфазный управляемый выпрямитель – трехфазный автономный инвертор напряжения» (УВ-АИН) с тормозной цепью, позволяющей рассеивать энергию торможения двигателя [1]. Значение амплитуды напряжения на выходе схемы регулировалось углом управления выпрямителя, а частота зависела от длительности открытого состояния ключей инвертора. В этой схеме управление ключами инвертора производилось на частоте выходной сети, что ограничивало диапазон регулирования скорости машины. Кроме того, существенная несинусоидальность выходного напряжения инвертора вызывала несинусоидальность токов двигателя что, как следствие, приводило к значительным низкочастотным пульсациям момента.

Другое не менее распространенное схемное решение – преобразователь частоты по схеме «управляемый выпрямитель – автономный инвертор тока» (УВ-АИТ) [2]. Данная структура до сих пор ограничено используется преимущественно в мощных приводах переменного тока с векторным частотно-токовым управлением. Помимо недостатков, свойственных схеме УВ-АИН, данное решение характеризуется еще и относительно большой установленной мощностью устройства.

В настоящее время около 90% всех преобразователей частоты выполняется по схеме «трехфазный неуправляемый выпрямитель – трехфазный автономный инвертор напряжения» с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) выходного напряжения. Данное решение имеет ряд достоинств относительно других вариантов. Несинусоидальность токов двигателя устраняется за счет высокочастотной широтно-импульсной модуляции, которая позволяет управлять амплитудой и частотой выходного напряжения. Недостатки схемы таковы, что при использовании ШИМ выходного напряжения происходит ускоренное старение изоляции обмоток и постепенное разрушение подшипникового узла двигателя. Существующие решения данных проблем заключаются в проектировании и последующем выборе двигателя с усиленной изоляцией, замене стального подшипникового узла на керамический. При этом асинхронный частотно-регулируемый привод существенно удорожается – из схемы исчезает простой по конструкции и дешевый объект управления.

Более эффективное решение – сохранить общепромышленный двигатель, но не допускать больших производных напряжения на обмотках двигателя формированием инвертором кривой напряжения по форме как можно более близкой к синусоиде. Такая форма напряжения обеспечивается многоуровневым инвертором в составе преобразователя частоты. Выбор числа используемых «уровней» для формирования выходного напряжения осуществляется компромиссно с учетом экономической целесообразности. В настоящее время использование многоуровневых автономных инверторов в составе частотного привода экономически оправдано лишь применительно к высоковольтным двигателям переменного тока.

В данной работе ставится задача создания такой многофункциональной схемы преобразователя частоты, которая позволит обеспечить синусоидальный ток в питающей сети, выполнить качественную рекуперацию энергии в питающую сеть, компенсировать потребляемую реактивную мощность. Решение данной задачи видится в усовер-

шенствовании существующих схем преобразователей частоты путем установки активного выпрямителя (АВ), причем при многоуровневой структуре инвертора применением АВ с тем же числом уровней.

Обзор публикаций по тематике многоуровневых преобразователей показывает, что наиболее оптимально использовать не более чем пятиуровневые структуры. Такие схемы обеспечивают существенное улучшение формы кривой выходного напряжения при еще допустимом усложнении схемы и увеличении числа ключей.

На первом этапе работы по аналогии со схемой пятиуровневого бестрансформаторного статического компенсатора [3] принята схема пятиуровневого АИН.

В системе компьютерной математики MatLab разработана имитационная модель пятиуровневого АИН, которая показана на рис.1.

Схема модели помимо схемы преобразователя (5-level_AIN) содержит систему управления ключами пятиуровневого АИН (5-level_PWM-SIFU), выравнивающие цепи напряжений на конденсаторах звена постоянного тока с собственной системой управления. В качестве тестовой нагрузки на выходе АИН подключен асинхронный двигатель 4А132М2У3 мощностью 11 кВт.

Проведена серия компьютерных экспериментов, заключающихся в проверке работоспособности схемы при пуске машины через преобразователь (его нагружении) в мгновение 0.07 с и отключении нагрузки во время 0.7 с. За этот интервал времени двигатель успевает раскрутиться до номинальной скорости и проработать в установившемся режиме в течение 0.15 с.

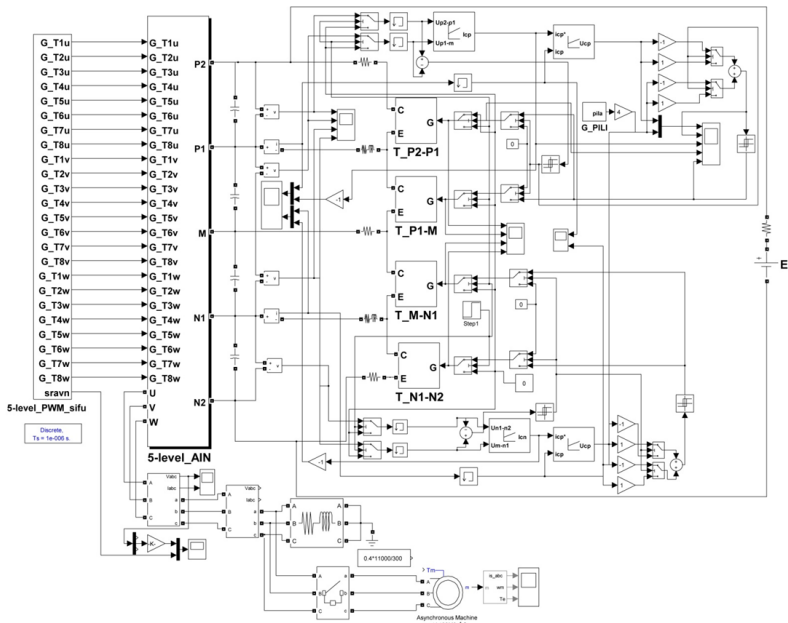


Рис. 1. Модель пятиуровневого АИН в MatLab.

Результаты экспериментов показаны на рис.2 и рис.3.

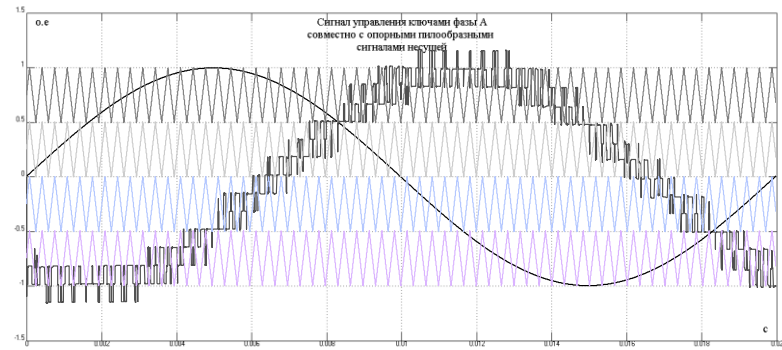


Рис. 2. Сигнал управления ключами фазы совместно с опорными пилообразными сигналами несущих и линейным напряжением

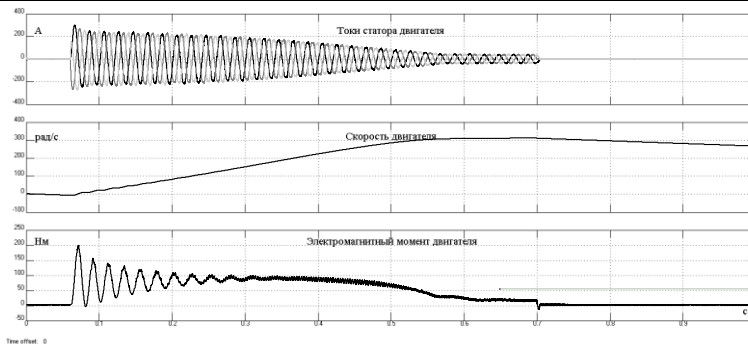


Рис. 3. Ток статора, скорость и электромагнитный момент двигателя

Проведенные эксперименты доказывают работоспособность разработанной модели. Двигатель питается линейным напряжением в соответствии с рис.2, высокочастотные пульсации электромагнитного момента при этом незначительны (см. рис.3).

В дальнейшем предполагается дополнить модель рис.1 пятиуровневого АИН схемой пятиуровневого АВ, работающего как в режиме рекуператора и компенсатора реактивной мощности, так и активного фильтра гармоник. Подобная многофункциональная схема для двухуровневого преобразователя частоты в филиале НИУ МЭИ в г. Смоленске разработана и опробована на модели [4].

Библиографический список

1. **Соколовский Г.Г.** Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Г.Г. Соколовский. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 272 с.
2. **Розанов Ю.К.** Силовая электроника: учебник для вузов/ Ю.К. Розанов, М.В. Рябчинский, А.А. Кваснюк. – М: Издательский дом МЭИ, 2007. – 632 с.
3. **Hirofumi Akagi, Hideaki Fujita, Shinsuke Yonetani, and Yosuke Kondo:** “6.6-kV Transformerless STATCOM Based on a Five-Level Diode-Clamped PWM Converter: System Design and Experimentation of a 200-V 10-kVA Laboratory Model”. IEEE Transactions on Industry applications, VOL. 44, NO. 2, March/April 2008.
4. **Крутиков К.К., Рожков В.В.** Применение многофункциональных силовых активных фильтров в составе мощного частотно-регулируемого электропривода. Электричество, №2, 2011. С.32-38.

*И.К. Лаптев, студ.; рук. Н.В. Роженцова к.т.н., доц.
(КГЭУ г. Казань)*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫХ ПРИВОДОВ В ГОСТИНИЧНОМ КОМПЛЕКСЕ “SULEIMAN”

В гостиничном комплексе “Suleiman” используется оборудование, приводимое в движение электродвигателями. Основным недостатком асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором является постоянная частота вращения ротора электродвигателя, практически не зависящая от нагрузки. Однако системы водоснабжения, тепло-снабжения и электроприводы главного движения лифта работают в режимах с переменной нагрузкой. Для регулирования их производительности применяют различные методы, но наиболее распространенным в настоящее время является метод понижения избыточной мощности при дросселировании расхода посредством клапанов и заслонок. Такие технические решения не обеспечивают экономию электроэнергии, увеличение ресурсов работы оборудования, а также не позволяют обеспечить полную автоматизацию систем. С развитием силовой полупроводниковой и микропроцессорной техники стало возможным создание устройства частотного регулирования электроприводом. Регулирование частоты обеспечивает адекватное изменение скорости вращения ротора, а амплитуда питающего напряжения при фиксированном значении частоты определяет величину максимального момента, развиваемого на валу двигателя.

Сравнение способов регулирования производительности электродвигателей с точки зрения электропотребления приведено на рис. 1, где Q/Q_n - отношение номинальной производительности двигателя к фактической; P/P_n - отношение номинального потребления активной мощности двигателем к фактическому.

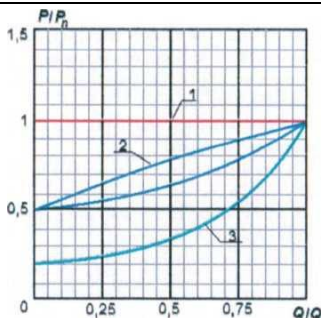


Рис.1. Сравнение методов регулирования производительности электродвигателей: 1 - без использования регулирования; 2 - регулирование дросселированием; 3-частотное регулирование.

Принцип действия основан на регулировании режима работы исполнительного оборудования путём подачи выходного напряжения различной частоты на контролируемые устройства. Применение преобразователя частоты (ПЧ) позволяют получить следующие преимущества:

- оптимизация рабочего режима контролируемого устройства и, как правило, увеличение его срока службы. Не подверженное излишним нагрузкам оборудование будет находиться в более хорошем техническом состоянии;

- более удобное управление двигателем оборудования, в том числе равномерный запуск и плавная остановка, а также возможность обратной подачи вращения вала (реверса) двигателя. Сюда же можно отнести удобство регулирования частотой вращения, подавая напряжение различной частоты;

- защита двигателя от перегрузок электрической сети или, от недостаточного напряжения.

Применение ПЧ в составе с электродвигателями гостиницы обеспечит экономию электроэнергии. Даже самые скромные подсчёты показывают, что при использовании этих устройств уровень энергосбережения увеличивается примерно на 15-20%, а в большинстве случаев на 30 % и более.

Таким образом, проведя расчет экономической эффективности от внедрения преобразователей частоты в электроприводы главного движения лифта и насосное оборудование, получили следующие результаты. Применение ПЧ в лифтах окупит себя за три года, а в системах отопления и водоснабжения более десяти лет. Для гостиничного ком-

плекса “Suleiman” экономически целесообразно внедрение ПЧ только в электроприводы главного движения лифта.

*С. Х. Ле, асп.; рук. В. Д. Тулунов д.т.н., проф.
(НИУ «МЭИ», г. Москва)*

К ВЫБОРУ РАЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ВАГОНОВ МЕТРОПОЛИТЕНА

Проблема массовых пассажирских перевозок в крупных городах с населением 1 млн. человек и более, как правило, успешно решается только посредством создания внеуличного транспорта — метрополитена, отличающегося большой пропускной способностью, высокой скоростью сообщения и регулярностью движения.

Вместе с тем метрополитен относится к числу технически сложных и капиталоемких сооружений. Опыт показывает, что строительство метрополитена целесообразно осуществлять при наличии пассажиропотока не менее 20-25 тыс. человек в час пик в одном направлении. При этих и более высоких нагрузках только метрополитен способен обеспечить высокую комфортность перевозки пассажиров.

Московский метрополитен - это основа транспортной системы столицы. Он надежно связывает центр города с промышленными районами и жилыми массивами. На сегодняшний день доля Московского метрополитена в перевозке пассажиров среди предприятий городского пассажирского транспорта столицы составляет почти 60%.

Технико-экономические показатели работы метрополитенов в решающей степени определяются эксплуатационными качествами используемых в них электропоездов (ЭПМ), которые, в свою очередь, определяются соответствующими показателями (стоимость изготовления, затраты на ремонты и обслуживание, срок службы, удельный расход энергии и надёжность работы...) использованной на них системы тягового электропривода (ТЭП), что и определяет актуальность и значимость обоснованного его выбора. В последнее время среди части специалистов утвердилось недостаточно обоснованное убеждение о безальтернативности использования на ЭПМ только асинхронных тяговых машин (АТМ), что якобы обеспечивает им решающие и бесспорные преимущества перед «архаичным» ТЭП с тяговыми машинами (ТМ) постоянного тока (ПТ) и дискретно-резисторным управлением (ДРУ). При этом основным и на первый взгляд бесспорным аргументом является сопоставление полученных в

эксплуатации энергетических показателей действительно, архаичной системы ТЭП с ДРУ и без рекуперативного торможения, используемой в Мосметрополитене с 1934г. практически без принципиальных изменений, с созданной с использованием последних достижений преобразовательной техники системой ТЭП с АТМ.

Некорректность такого подхода к оценке перспективности альтернативных систем ТЭП была показана в [1]. Между тем, имеющиеся экспериментальные данные и результаты теоретических исследований показывают, что ТЭП с ТМ ПТ имеет большие резервы улучшений всех его показателей. Начатые в конце 70-х годов прошлого века исследования этой проблемы в МЭИ показали возможность существенного улучшения энергетических показателей ЭПМ при оборудовании их легко реализуемым независимым возбуждением (НВ) ТМ, достигаемом с незначительными изменениями схемы силовых цепей и электрооборудования моторных вагонов (МВ), благодаря следующей реализации [2]:

— улучшение тяговых свойств в зоне ограничения силы тяги условиями сцепления и зоне ослабления поля ТМ соответственно за счет повышения динамической жесткости тяговых характеристик и регулирования силы тяги согласно с фактически действующим ограничением при уменьшении разброса нагрузок параллельно включенных групп ТМ;

— повышение эффективности тормозного процесса за счет более плавного регулирования тормозной силы в зоне высоких скоростей движения и сохранения максимальной тормозной силы до существенно меньшей скорости движения;

— рекуперативное торможение, являющееся основным резервным повышением энергетической эффективности вагонов метрополитена, с осуществлением в этом режиме перегруппировки ТМ;

— возможность использования более эффективных энергосберегающих алгоритмов управления в пусковых режимах.

Энергетические показатели ЭПМ с ТМ ПТ могут быть существенно улучшены при использовании на них отработанной на МВ наземных ЭП энергосберегающей системы тягового электропривода (ЭС ТЭП). Одной из особенностей рассматриваемой схемы по сравнению со схемами привода с НВ ТМ [3], является замена группового кулачкового реостатного контроллера тиристорным коммутатором (ТК). Она обеспечивает снижение пусковых реостатных потерь практически вдвое и увеличивающей эффективность рекуперации. Этим общие потери энергии при пуске в реальных условиях эксплуатации в Мосмет-

рополитене уменьшаются с 8-10 до 4-5% [4]. Показатели ЭПМ могут быть дополнительно повышены при использовании возможных [5] усовершенствований конструкции их ТМ ПТ.

В то же время, ЭПС с АТМ имеет и ряд недостатков, часть из которых была выявлена в испытаниях и эксплуатации во Франции электровозов с АТМ и ТМ ПТ, ещё в 70-80-е годы прошлого века в которых было получено, что электровозы с АТМ уступают локомотивам с ТМ ПТ практически по всем показателям, включая энергетику и надёжность. В частности, даже при работе в идеальных условиях с питанием АТМ симметричным и стабильным синусоидальным напряжением они по «энергетической эффективности» имели худший на 3% показатель.

Отсутствие у ЭПС с АТМ, эксплуатируемого в обычных сегодня условиях весомых преимуществ перед ЭПС с ТМ ПТ, показаны и отечественных исследованиях последних лет, в частности, в публикации ведущих специалистов ВНИИЖТ, посвящённой рассматриваемой проблеме [6], указано, что электровозы с АТМ имеют худшие «цепные качества» по отношению к электровозам с ТМ ПТ, то есть имеют худшие тяговые свойства, а также сделан вывод, что в условиях РЖД электровозы с АТМ «не будут энергетически эффективнее», чем электровозы с ТМ ПТ.

Таким образом, объективные данные показывают, что при реализации на ЭМП с ТМ ПТ простых и проверенных на опытных образцах технических решений по совершенствованию их ТЭП они не будут уступать поездам с АТМ ни по одному показателю. При цене ориентировочно вдвое меньшей они будут существенно эффективнее. Важнейшим их преимуществом является возможность использования полученных результатов при модернизации эксплуатируемых ЭПМ, значительная часть которых ещё не отработала расчётного срока. Поэтому использование ТЭП с ТМ ПТ перспективно.

Библиографический список

1. **В.Д.Тулупов.** Проблема совершенствования электроподвижного состава. Железнодорожный транспорт. 1992 г., №10, с. 28-36.
2. **В.Д. Тулупов, А.П. Марченков, С.И. Кабанец и другие.** Схема силовых цепей вагонов метрополитена с независимым возбуждением тяговых машин и тиристорным реостатным контроллером – Тр. МЭИ 1992, выпуск 641, с. 36-45.
3. **В. Д. Тулупов, Ляпунова Н. Д., Кабанец С.И.** Энергетические показатели новой системы тягового привода вагонов метрополитена/ Тр МЭИ 1983, Вып. 608, С.36-42.
4. **В.Д. Тулупов.** Тяговый электропривод постоянного тока с наилучшими технико-экономическими показателями. Сборник "Электросила", выпуск 41. Г. Санкт-Петербург 2002, с. 196-210.

5. **Электропривод** постоянного тока. Состояние и тенденции // Докл. Научно-практического семинара. – М. : Изд. МЭИ. 2002

6. **Л.А. Мугинштейн, В.А. Кучумов, О.Н. Назаров.** О выборе типа тягового электропривода электроподвижного состава. Железнодорожный транспорт 2005 г. , №5, с. 42-48.

Ю.Н.Митрофаненков, асп.; Д.С.Исаев, студ.;
рук. А.Е.Малиновский д.т.н, проф.
(филиал «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске)

ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД С БЕЗДАТЧИКОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОЙ МАШИНОЙ

В последнее время в нашей стране и зарубежном интенсивно разрабатывается вентильно-индукторный электропривод (ВИП), очень простой, надежный и дешевый, весьма перспективный для широкого круга применений. Одна из особенностей ВИП в традиционной комплектации – наличия датчика положения ротора, усложняющего конструкцию и снижающего надежность электропривода.

В публикациях [1], [2], [3] подробно рассмотрены метод бездатчикового определения углового положения ротора вентильно-индукторной машины (ВИМ), результаты исследования данного метода, силовой вентильный коммутатор и система управления. Целью данной работы является разработка лабораторного стенда с бездатчиковым управлением ВИМ. Цель разработки стенда – обеспечение лабораторной базы для исследования алгоритмов бездатчикового управления ВИМ и практического исследования для дальнейшего внедрения алгоритмов бездатчиковой идентификации углового положения рассмотренных в [1].

Для использования ВИМ в качестве датчика углового положения необходимо создавать в двух катушках, расположенных в разных фазах, квадратурные измерительные токи, частотой 10 кГц. Так как магнитные проводимости под полюсами фаз двигателя различны и соотношения магнитных проводимостей зависит от углового положения ротора двигателя, то потоки, вызванные измерительными токами, суммируются в магнитной системе с разными амплитудами. В результате получаем измерительный магнитный поток, фаза которого зависит от углового положения ротора двигателя, следовательно, имея информацию о фазе измерительного потока можно вычислить текущее угловое положение ротора. Анализировать фазу потока можно по фазе ЭДС наводимой измерительным потоком в отключенных обмотках машины[1]. Так как ВИМ должна работать в режиме двигателя и дат-

чика углового положения одновременно, то для определения углового положения необходимо использовать только не задействованные в данный момент времени (не участвующие в формировании электромагнитного момента) катушки ВИМ. Более подробно данный метод рассмотрен в [1].

Рассмотрим более подробно структуру лабораторного стенда, предназначенного для исследования ВИП с бездатчиковым управлением ВИМ.

На рисунке 1 приведена структурная схема лабораторного стенда



Рис. 1. Функциональная схема лабораторного стенда

Стенд состоит из следующих функциональных блоков: вентильно-индукторной машины, коммутатора, 3-х блоков драйверов, источника квадратурных токов, генератора квадратурно связанных сигналов, датчика напряжения и компаратора, микропроцессорной системы управления.

Для исследований в лабораторном стенде используется трех фазная ВИМ, имеющая 12 зубцов на статоре и 8 на роторе. Управление формированием силовых и измерительных токов в катушках ВИМ используется транзисторный коммутатор, построенных на полевых транзисторах. Коммутатор запитан от блока питания напряжением 110 В и

источника квадратурных токов. Для защиты от токов короткого замыкания в блоке питания реализована максимальнотоксовая защита.

Схема коммутатора рассмотрена в [4]. Сигналы управления коммутатор получает от 3-х блоков драйверов, которые выполняют функцию гальванической развязки коммутатора и микропроцессорной системы управления и функцию формирования сигналов управления затворами полевых транзисторов коммутатора. Один блок драйверов используется формирования сигналов управления ключами, коммутирующими силовые токи на катушках ВИМ, два других блока драйверов – для управления ключами, коммутирующими измерительные токи. С целью исключения возникновения сквозных токов, драйвера запитаны от гальванически развязанных блоков питания.

Для анализа фазы измерительной ЭДС используется 3 датчика напряжения, которые подключены к катушкам, находящимся в разных фазных обмотках. Для анализа фазы измерительной ЭДС в каждый момент времени используется только один датчик напряжения. Для выбора необходимого датчика напряжения на биполярных транзисторах реализован мультиплексор, которых подключает только один из датчиков напряжения к микропроцессорной системе управления.

Источник квадратурных токов формирует измерительные токи, связанные квадратурно, необходимые для бездатчиковой идентификации углового положения ротора ВИМ.

Микропроцессорная система управления, построенная на базе процессора PIC18F4321 выполняет бездатчиковую идентификацию углового положения и, управляя ключами коммутатора, производит управление ВИМ. Более подробно микропроцессорная система управления рассмотрена в [2].

Разработанный лабораторный стенд позволяет проводить исследование методов бездатчиковой идентификации углового положения роторов ВИМ и алгоритмов управления ВИМ. Исследования, проведенные на лабораторном стенде, подтверждают работоспособность бездатчикового ВИП рассмотренного в [1].

Библиографический список

1. Малиновский А.Е., Митрофаненков Ю.Н. Бездатчиковый вентильно индукторный электропривод// сб. трудов Междунар. науч.-техн. конф.: «Энергетика, информатика, инновации -2011» Т.1. Смоленск: РИО филиала ГОУВПО МЭИ(ТУ) в г. Смоленске-2012

2. Митрофаненков Ю.Н., Исаев Д.С. Микропроцессорная система управления бездатчиковым вентильно-индукторном электроприводом// ВЕСТНИК Российского национального комитета СИГРЭ // Специальный выпуск №1. Материалы молодежной сек-

ции РНК СИГРЭ: сборник конкурсных докладов по электроэнергетической и электротехническим тематикам по направлениям исследований СИГРЭ «Энергия – 2013». – Иваново: ФГБОУ ВПО ИГЭУ им. В.И.Ленина – 2013. .

3. Митрофаненков Ю.Н. Исследование информационной системы бездатчикового вентильно-индукторного электропривода//Сб. трудов 9-ой Межд. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов «Информационные технологии, энергетика и экономика» Т2. Смоленск – 2012

4. Митрофаненков Ю.Н., Малиновский А.Е. Коммутатор для бездатчикового вентильно-индукторного электропривода// сб. трудов Междунар. науч.-техн. конф.: «Энергетика, информатика, инновации -2012» Т.1. Смоленск: филиал МЭИ в г. Смоленске.-2012

5. Овчинников И.Е. Вентильные электрические машины и привод на их основе (малая и средняя мощность)/И.Е.Овчинников: Курс лекций – СПб.:КОРОНА-Век,2007

*Н.В. Савельев, асп.; рук. В.В. Рожков, к.т.н., доц.
(НИУ МЭИ (ТУ), г. Смоленск)*

ОСОБЕННОСТИ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНЗИСТОРНЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Транзисторные преобразователи широко применяются в схемах электроприводов. Их достоинство – высокая частота переключений, которая позволяет формировать сигналы в форме ШИМ высокого качества. Для автономных инверторов напряжения частота переключений может достигать величин в районе 10-20 кГц. Некоторые системы работают по принципу ШИМ 2-го порядка, т. е. несущая частота ШИМ не является фиксированной величиной.

Современные системы управления обладают сложной структурой. В их составе можно выделить несколько основных компонентов. Существует блок формирования управляющих сигналов, как правило, это управляющие напряжения. Другой блок – формирование импульсов управления силовыми ключами. Это условное деление применимо к большинству управляемых полупроводниковых преобразователей.

Выходная часть может быть построена различными способами. Наиболее популярным является формирование импульсов управления посредством опорных сигналов. Его суть заключается в сравнении сформированных сигналов управления и опорных. Опорные сигналы выбираются в зависимости от типа преобразователя. Для преобразователя частоты, построенного по типу управляемый выпрямитель – двухуровневый автономный инвертор напряжения допустимо использовать сигнал опорного напряжения в виде равнобокой пилы. Суть вы-

ходной части системы управления такого преобразователя – сравнение сформированных управляющих напряжений по фазам с сигналом пи-лы. Если управляющее больше опорного – работает верхний ключ стойки, если нет – нижний. Для инверторов более высокого порядка используются более сложные опорные сигналы и, соответственно, анализируется большее число условий. В таких системах управления упор делается лишь на отработку управляющих сигналов, что иногда приводит к слишком частым переключениям, перенапряжениям при отработке нулевых комбинаций и, тем самым, риску аварий и снижению срока службы транзисторных ключей.

Выходная часть системы управления может быть построена и по-другому. Можно сформировать управляющие сигналы посредством непосредственного анализа положения вектора управления в двухфазной системе, т.е. если мы имеем тройку управляющих напряжений, то после перехода из системы координат ABC в $\alpha\beta$, можно сопоставить положение вектора управления с векторами тройки фазных напряжений. Для примера приведён рис. 1

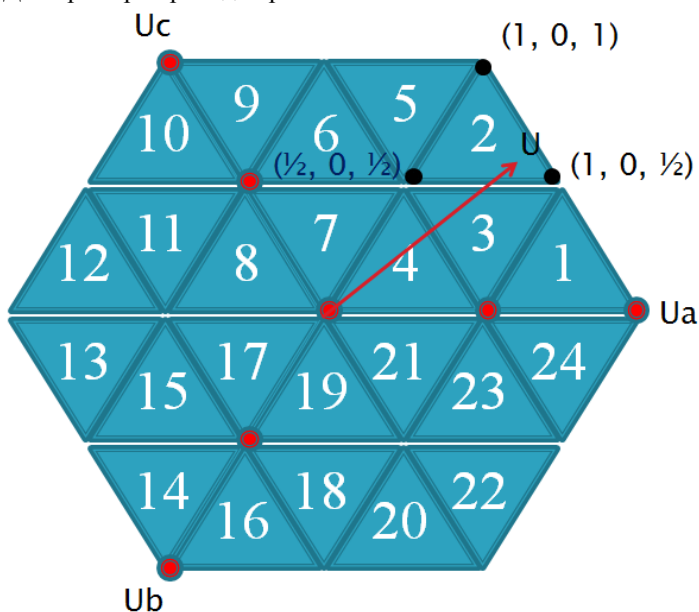


Рис.1 Координатная плоскость и вектор управления

Грани треугольников на координатной плоскости соответствуют векторам фазных напряжений трёхуровневого преобразователя частоты, построенного по схеме трёхуровневого АИН. Вектор управления попал в треугольник под номером два. Это означает, что текущее состояние вектора управления однозначно описывается тремя вершинами, олицетворяющими состояния транзисторных ключей. Для примера вершина (1,0,1) соответствует состоянию +U_a, +U_c, -U_b. Обозначения на рис. 1 условны. С другой стороны, возвращаясь к текущему состоянию вектора управления, выбор разбиения может быть иным. Главное – вектор должен принадлежать одному из треугольников, образованных точками пересечения показанных на рис. 1 отрезков (граней треугольников). Выбор зависит от следующих условий:

- качество формирования импульсов управления (согласно управляющему сигналу);
- минимальное количество переключений – влияет на срок эксплуатации силовых ключей и сложность алгоритма управления;
- минимальные броски тока при переключениях – переходы между различными вершинами должны осуществляться таким образом, чтобы при них отсутствовали, при возможности, переключения фаз с положительного максимального значения до отрицательного. Следует сказать, что этот принцип справедлив для преобразователей, порядком не ниже третьего. Положение каждого конкретного вектора управления после определения треугольника фиксируется посредством длительностей включения каждой из вершин треугольника. Длительности определяются из следующей системы линейных уравнений:

$$\begin{cases} \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 = 1; \\ \alpha_1 \Delta_1 + \alpha_2 \Delta_2 + \alpha_3 \Delta_3 = \alpha_U; \\ \beta_1 \Delta_1 + \beta_2 \Delta_2 + \beta_3 \Delta_3 = \beta_U; \end{cases}$$

где $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ - относительные длительности включения вершин;
 $\alpha_1 \beta_1 ; \alpha_2 \beta_2 ; \alpha_3 \beta_3$ - координаты вершин в выбранной системе;
 $\alpha_U \beta_U$ - координаты управляющего вектора;

Рассмотрим работу активного фильтра гармоник, построенного по трёхуровневой схеме, рис. 2

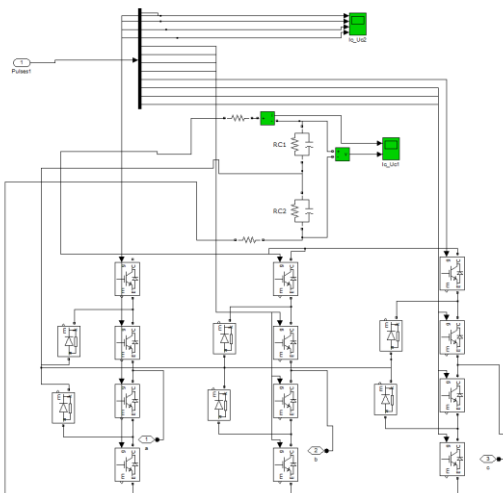


Рис. 2 Силовая часть активного фильтра

Из-за назначения для повышения качества сетевых напряжений и токов, форма формируемых этим устройством сигналов копирует противозащитный сигнал помехи и выдаёт его в сеть. Корректная работа фильтра возможна лишь при высокочастотном переключении транзисторных ключей, т.к. формируемый сигнал содержит множество высокочастотных составляющих. Необходим алгоритм формирования управляющих сигналов, который позволит реализовать такие высокочастотные переключения, не внося существенной погрешности. Таким как раз и является симплексный алгоритм, т.е. применение разомкнутой шим (2-го порядка). Вектор управляющего сигнала быстро перемещается по координатной плоскости, следовательно, опрос каждого нового состояния должен производиться как можно быстрее. Однако, как известно, микроконтроллеры, реализующие современные системы управления, работают с дискретными величинами. За время шага дискретизации (тактового цикла) все переменные сохраняют свои значения. Помимо этого, длительность включения той или иной вершины не может быть меньше шага дискретизации. Отсюда вытекает основная задача данной статьи - разработка оптимального алгоритма работы выходной части системы управления для системы активного фильтра гармоник, построенного по трёхуровневой схеме автономного инвертора напряжения. Помимо этого, выделим другие важные задачи, которые решены в ходе работы:

- проработка вариантов формирования систем управления активными фильтрами гармоник;
- синтез системы управления активным фильтром для любых нагрузок, построенным по трёхуровневой схеме АИН;
- применение симплексного алгоритма управления для формирования импульсов управления силовыми ключами как наиболее эффективного в сравнении с другими возможными вариантами.

Библиографический список

1. «MATLAB @ SIMULINK проектирование механотронных систем на ПК» С.Г. Герман-Галкин. СПб.: Корона-Век, 2008.
2. Сазонов В.В. Кондиционеры сети на основе активных фильтров. Электротехника, №5, 2007, с. 28-34

СЕКЦИЯ 21

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И МАГНИТОЖИДКОСТНЫЕ УСТРОЙСТВА

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

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

*Е.Е. Тулинова, Н.С. Иванов, рук. К.Л. Ковалев, д.т.н., проф.
(МАИ, г. Москва)*

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СГ С ПМ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ НА ОСНОВЕ ВТСП ПРОВОДОВ

Современный уровень потребления электроэнергии определяет повышенные требования к электромеханическим преобразователям. Синхронные машины широко используются в промышленности. Основная область их применения – преобразование механической энергии в электрическую. В общем случае можно выделить два типа синхронных генераторов (СГ): с возбуждением от постоянных магнитов (ПМ) и электромагнитным возбуждением. Преимущества СГ с ПМ: высокий КПД, надежность, простота конструкции. [1] Однако, наряду с преимуществами, машины с ПМ имеют одну важную особенность – сложность регулирования. В ряде случаев эта особенность делает невозможным применение таких машин. Электрические машины с электромагнитным возбуждением имеют возможность регулирования. Низкие по сравнению с машинами с ПМ значения магнитодвижущей силы (МДС) обмоток возбуждения могут быть увеличены с помощью СП токонесящих элементов.

В литературе подробно рассмотрены вопросы расчета и проектирования синхронных машин, как с электромагнитным возбуждением, так и с возбуждением от постоянных магнитов. Однако, вопрос характеристик электрических машин и сравнительного анализа МДС машин с постоянными магнитами и с ВТСП обмоткой возбуждения рассмотрен недостаточно полно. Установив связь МДС магнита и ВТСП обмотки возбуждения, представляется возможным оценить эффективность использования тех или иных типов машин (с ПМ или с электромагнитным возбуждением из ВТСП проводов), а также определить, при каких

условиях охлаждения различные типы машин обладают наиболее высоким уровнем мощности единичного агрегата.

Для определения взаимосвязи параметров СГ с ПМ и электромагнитным возбуждением, необходимо иметь аналитическое описание распределения магнитных полей в активной зоне СГ. Таким образом, задачей исследования является описание этого распределения для каждого типа СГ.

Расчет магнитных полей проводился на основе уравнений магнитостатики [2]

$$\operatorname{div} \bar{B} = 0, \operatorname{rot} \bar{H} = J$$

с соответствующими граничными условиями:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial A_i}{\partial \phi} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial A_j}{\partial \phi},$$

$$-\frac{1}{\mu_0 \mu} \frac{\partial A_i}{\partial \rho} = -\frac{1}{\mu_0 \mu} \frac{\partial A_j}{\partial \rho}$$

где A – векторный магнитный потенциал, $B = \operatorname{rot}(A)$. i, j – индексы векторного магнитного потенциала по разные стороны границы раздела сред.

Система уравнений магнитостатики для двухмерных магнитных полей сводится к решению уравнения Пуассона относительно векторного магнитного потенциала A . Уравнение Пуассона для СГ с ПМ [3]:

$$\Delta A = \mu_0 J_0 \sin(p\phi) \delta(\rho - R_s)$$

Уравнение Пуассона для СГ с электромагнитным возбуждением [3]:

$$\Delta A = \mathcal{L}P + \mu_0 J_0 \sin(p\phi) \delta(\rho - R_s).$$

Решая уравнение Пуассона для различных областей СГ каждого типа, был получен аналитический вид распределения векторного магнитного потенциала в активной зоне машины. Используя полученные результаты, были сопоставлены зависимости СГ с ПМ с аналогичными параметрами электрических машин с ОВ. Сравнительный анализ проводился для генератора в двигательном режиме. В качестве исходных параметров расчета были приняты параметры ВТСП двигателя для электротранспорта, разработка которого вводится в МАИ. Конструктивные параметры машины с постоянными магнитами и электромагнитным возбуждением были выбраны одинаковыми.

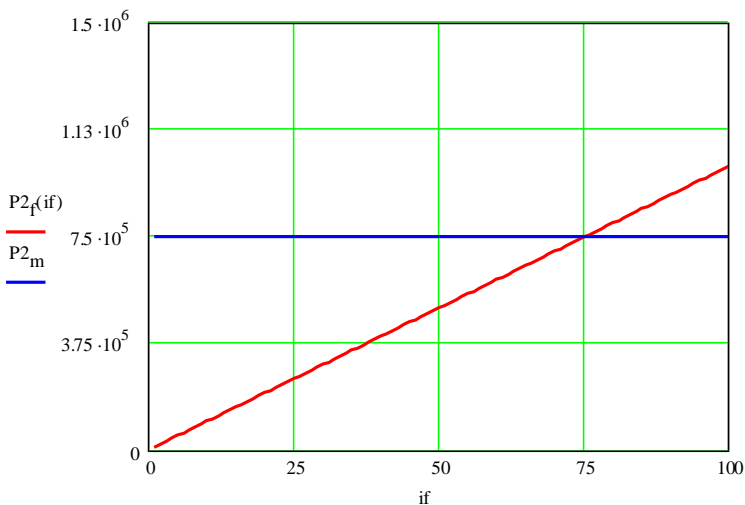


Рис. 1. Пример расчета выходной мощности двигателя с ПМ и электромагнитным возбуждением

На рис. 1 показан пример расчета выходной мощности двигателя с ПМ и электромагнитным возбуждением на роторе при различном уровне тока в ВТСП обмотках. Видно, что при уровнях тока в ВТСП токонесящих элементах близких к 100 А удается превзойти параметры машины с ПМ. Учитывая свойства современных ВТСП проводов, можно увеличить их токонесящую способность, понизив температуру ниже 77 К. Таким образом, можно сделать вывод, что синхронный генератор с электромагнитным возбуждением на основе ВТСП проводов второго поколения при температурах жидкого азота имеет более выгодные характеристики по сравнению с машинами на основе ПМ, а при температурах ниже 77 К – значительно их превосходит.

Библиографический список

1. **Иванов-Смоленский А.В.** Электрические машины. Том 2. Москва, издательство МЭИ, 2006, 532с.
2. **Бут Д. А.**, «Основы электромеханики», Москва, изд-во МАИ, 1996, 468с.
3. **Ковалев Л.К., Ковалев К.Л., Конев С.М.-А.** Электрические машины и устройства на основе массивных высокотемпературных сверхпроводников. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010, 396с.

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

РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРОШУМОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Преобразование энергии в электрических машинах сопровождается возникновением переменных электромагнитных сил, действующих на конструкцию машин, следствием чего является их виброактивность. Виброактивность - это способность объекта быть источником колебаний. Эти колебания проявляются в виде шума и вибраций. Основными источниками шума в АД являются магнитные, механические и аэродинамические источники [1]. Силы, вызывающие вибрацию АД, также подразделяются на силы магнитного, механического и аэродинамического происхождения.

Источником магнитных вибраций являются пульсирующие или вращающиеся магнитные силы и моменты, действующие в воздушном зазоре электрической машины, а также явление магнитострикции. Величины магнитных сил и их частоты зависят от типа электрической машины, частоты вращения и частоты питания, электромагнитных нагрузок, конструкции активной части и многих других факторов [1, 2, 3].

Основными источниками механических вибраций и шума в электрических машинах являются остаточный небаланс ротора и находящихся на нем деталей и подшипников. В быстроходных электрических машинах эти вибрации могут стать существенным источником структурного шума.

Аэродинамический шум является следствием вращения ротора и насаженного на его вал вентилятора. Шум, создаваемый вентилятором, является преобладающим над другими источниками при частотах вращения выше 1500 об/мин.

Информация о преобладающем источнике шума и вибрации является важнейшей в работах по снижению шума и вибрации. Разделение и исследование источников шума и вибрации производится экспериментально путем последовательного исключения источников. Источником магнитного шума и вибрации являются колебания ярма статора, поэтому виброакустические расчёты сводятся к исследованиям колебаний её ярма под действием периодически изменяющихся во времени и распределённых по

окружности радиальных и тангенциальных сил, которые зависят от распределения магнитной индукции в воздушном зазоре.

Проведены расчетные исследования виброшумовых характеристик асинхронного трехфазного двигателя с короткозамкнутым ротором номинальной мощностью 3 кВт серии RA [4], с высотой оси вращения $h=132$ мм, номинальным напряжением 220/380 В, синхронной частотой вращения 1000 об/мин (число полюсов $2p=6$).

Вычислены $2p$ гармонических полей статора $v=6 \kappa'p/d+p$, при $\kappa'/d=1$, $p=3$ и зубцовых ротора $\mu_z=\kappa Z_2+p$, для порядков гармонической проводимости $\kappa=\kappa'=0, \pm 1, \pm 2, \dots$, определены порядки вибрации $r = \mu \pm v \leq 6$, где d – знаменатель дробности обмотки (табл. 1 [3]). Незубцовые гармонические $v \geq 35$ имеют низкие обмоточные коэффициенты $K_{обв}$. Зубцовые гармонические полей статора v_z , ротора μ_z и порядки r для них выделены жирным шрифтом.

Таблица 1. Порядки вибрации $r = \mu \pm v$ при $\kappa'/d=1$, $p=3$, $\mu_z=\kappa Z_2 + p$, $\kappa = \kappa' = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$; число пазов ротора $Z_2=42$, $v=6\kappa'p/d+p$, число пазов статора $Z_1=36$

$v; v_z$													
	+3	-15	+21	-33	+39	-51	+57	-69	+75	-87	+93	-105	+111
$\mu; \mu_z$													
+3	+6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-39	-	-	-	-6	0	-	-	-	-	-	-	-	-
+45	-	-	-	-	+6	-	-	-	-	-	-	-	-
-81	-	-	-	-	-	-	-	-	-6	+6	-	-	-
+87	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-6	-	-

Исследуемый АД при среднем радиусе ярма $R_c=9,615$ (см) и высоте сердечника $h_c=1,37$ (см) имеет значения приведенной деформации (податливости) статора $\lambda_c=R_c^2/(Eh_c)$ при $r=0$ и $\lambda_c=(12R_c/E)(R_c/h_c)^3(r^2+1)/r^2(r^2-1)^2$ при $r \geq 2$, где $E=2,1 \cdot 10^7$ (Н/см²) – модуль упругости, приведенные в табл. 2.

Таблица 2. Значения λ_c в зависимости от r

r	0	2	3	4	5	6	8	10
$\lambda_c \cdot 10^{-5}, \text{см/Н}$	0,32	26,38	3,30	0,9	0,34	0,16	0,064	0,030

Результаты расчетов виброшумовых характеристик [3] сведены в таблицу 3.

Радиальные электромагнитные силы $K_{ск} \mu_r r$ в расчётах не учитываем вследствие отсутствия скоса, где $\mu_r=20 \cdot B_2 \delta (R_1/R_c)$ – амплитуда радиальной вибрационной силы порядка r ,

$K_{\text{ск}\mu} = [\sin(\mu\gamma_{\text{ск}}/2)]/(\mu\gamma_{\text{ск}}/2)$ – коэффициент скоса для μ -й гармонической, R_c – средний радиус спинки статора, R_1 – радиус сердечника внутренний, $B\delta$ – индукция в зазоре, $\gamma_{\text{ск}}$ – центральный угол скоса.

Таблица 3. Параметры вибраций АД

ν	μ	$r = \mu \pm \nu$	B_{ν} , Тл	B_{μ} , Тл	P_r , Н/см ²	ω_r , 1/с	Z_c , Н·с/с м	y_c , см/с	L , дБ	L_{Σ} , дБ
+3	+3	+6	0,778	-	9,32	628	995	0,662	43,0	67
-33	-39	-6	0,173	0,16	0,85	4187	148	0,406	55,0	
+39	-39	0	0,274	0,16	1,35	3559	87	1,097	62,5	
+39	+45	+6	0,274	0,13	1,10	4187	148	0,525	57,5	
+75	-81	-6	0,185	0,09	0,52	7746	79	0,461	61,5	

Здесь $B_{\nu} = (pK_{\text{об}\nu}/\nu K_{\text{об}1})(I_1/I_0)K_H B\delta$ и $B_{\mu} = (pK_{\text{об}\mu}/\mu K_{\text{об}1})(I_2/I_0)K_H B\delta$ – амплитуды магнитной индукции в статоре и роторе, где I_0 , I_1 , I_2 – фазные токи, K_H – коэффициент насыщения магнитной цепи для основной гармонической, $K_{\text{об}\nu}$ и $K_{\text{об}1}$ – обмоточные коэффициенты; $\omega_r = 2\pi f_r$ – угловая частота вращения радиальной вибрационной силы порядка r , где $f_r = f_1 k \cdot Z_2(1-s)/p$ для $r = \mu - \nu$ и $f_r = f_1 [k \cdot Z_2(1-s)/p + 2]$ для $r = \mu + \nu$; $Z_c = |\omega_r| m_c 10^{-2} - 1/|\omega_r| \lambda_c$ – полное механическое сопротивление статора, где m_c – приведенная масса спинки; $y_c = P_r / \sqrt{2} \cdot Z_c$ – скорость колебаний (вибраций) на поверхности сердечника статора, $L = 20 \cdot \lg(|\omega_r| y_c | 10^2 / 3)$ – уровень магнитной вибрации; L_{Σ} – результирующий уровень вибрации, в соответствии с [5] определяется при попарной группировке уровней L в порядке их убывания: 62,5 и 61,5 – $\Delta L = 2,5$ дБ; 61,5 и 57,5 – $\Delta L = 1,5$ дБ; 57,5 и 55 – $\Delta L \approx 1,5$ дБ; 55 и 43 – $\Delta L \leq 0,5$ дБ и не имеет практического значения; $\sum(\Delta L) = 5,5$ и $L_{\Sigma} = 62,5 + 5,5 = 67$ дБ.

Двигатели с высотой оси вращения $h = 132$ мм имеют степень защиты IP44. Среднее значение уровня звука зависит от высоты величины h и частоты вращения. Для $n = 1000$ об/мин при $h = 132$ мм, уровень вибрации не должен превышать 64 дБ. Средний уровень звука в режиме холостого хода не должен превышать 72 дБ. Уровень вибрации двигателей оценивается по наибольшему из эффективных значений вибрационной скорости и должен соответствовать значению 2,8. Из полученных данных следует, что данный двигатель по уровню виброшумовых характеристик находится на пределе требований.

Снижение магнитной вибрации при переходе от режима нагрузки к холостому ходу можно оценить по радиальным силам $P_r = 20 \cdot B_{\delta}^2 (R_1/R_c)$ и $P_{\nu} = 40 \cdot B_{\nu} \cdot B_{\mu} (R_1/R_c)$. Здесь P_r для основной гармонической поля практически не изменяется, а P_{ν} (удельная амплитуда переменной составляющей радиальной силы с порядком вибрации $r = \mu \pm \nu$), для гармони-

ческих B_v и B_μ , изменятся при снижении уровня вибрации на значение $\Delta L \approx 20 \cdot \lg[(I_1 I_2^2)/I_0^2]$, дБ.

Для зубцовых гармонических составляющие B_{vz} и $B_{\mu z}$ зависят от токов, а B_{z1} и B_{z2} практически неизменны, поэтому при холостом ходе обе составляющие имеют фазу намагничивающего тока $I_0 \approx I_{op}$ и суммируются алгебраически с соответствующим изменением электромагнитной радиальной силы $P_{v\mu z}$, шума и магнитной вибрации. Общее изменение магнитной вибрации ΔL при переходе от режима нагрузки с током $I_1 = I_n$ к режиму холостого хода можно оценить эмпирической формулой (по методике ВНИИЭМ) $\Delta L \approx 12 \cdot \lg(I_n/I_0) + 3,0$ дБ.

Исследуемый АД имеют снижение ΔL для режима холостого хода $\Delta L \approx 12 \cdot \lg(6,6/3,0) = 7,0$ дБ, что хорошо согласуется с экспериментальными исследованиями и соответствует нормам на допустимые уровни ($L_\Sigma \leq 70$ дБ) вибрации трёхфазных АД при $P_{2n} \leq 3,0$ кВт и $n_1 \leq 1000$ об/мин.

Из анализа методики и результатов расчетов следует, что уровень шумов и вибраций зависит от чисел зубцов статора и ротора, электромагнитных нагрузок. Выполним исследования виброшумовых характеристик АД-132-6 серии RA (3 кВт) при изменениях чисел зубцов статора и ротора, электромагнитных нагрузок [6]. Снизим электромагнитные нагрузки (А и B_6) на 10 %, увеличим число зубцов статора Z_1 с 36 до 54 и ротора Z_2 с 42 до 50. В таблице 4 приведены результаты расчетов виброшумовых показателей АД при уменьшении линейных нагрузок, в таблице 5 - результаты расчетов виброшумовых показателей АД при увеличении зубцов ротора Z_2 до 50, в таблице 6 - результаты расчетов виброшумовых показателей АД при увеличении зубцов статора Z_1 до 54.

Таблица 4. Параметры вибраций АД при уменьшении линейных нагрузок

v	μ	$r = \mu \pm v$	B_v , Тл	B_μ , Тл	Pr, Н/см ²	ωr , 1/с	Z_c , Н·с/см	ус, см/с	L, дБ	L_Σ , дБ
+3	+3	+6	0,7	-	8,38	628	995	0,60	42,0	64
-33	-39	-6	0,161	0,15	0,74	4187	148	0,35	53,7	
+39	-39	0	0,217	0,15	1,04	2511	51	1,50	61,0	
+39	+45	+6	0,161	0,12	0,76	4187	148	0,363	54,0	
+75	-81	-6	0,158	0,07	0,35	7746	79	0,313	58,2	

Таблица 5. Параметры вибраций АД при увеличении зубцов ротора Z_2 до 50

ν	μ	$r = \mu \pm \nu$	$B\nu$, Тл	$B\mu$, Тл	Pr , Н/см ²	ωr , 1/с	Zc , Н·с/см	yc , см/с	L , дБ	$L\Sigma$, дБ
+3	+3	+6	0,778	-	9,32	628	8,9	0,662	43,0	55
-51	-47	+4	0,150	0,14	0,63	4982	63	0,700	61,0	
-51	-53	+2	0,162	0,15	0,68	2989	54	0,900	59,0	
+57	+53	-4	0,163	0,15	0,75	4982	34	0,255	50,0	

Таблица 6. Параметры вибрации АД при увеличении зубцов статора Z_1 до 54

ν	μ	$r = \mu \pm \nu$	$B\nu$, Тл	$B\mu$, Тл	Pr , Н/см ²	ωr , 1/с	Zc , Н·с/см	yc , см/с	L , дБ	$L\Sigma$, дБ
+3	+3	+6	0,600	-	9,16	628	995	0,65	42,6	64,5
-33	-39	-6	0,173	0,15	0,82	4187	148	0,39	54,7	
+39	-39	0	0,250	0,16	1,19	3559	87,1	0,966	61,2	
+39	+45	+6	0,250	0,13	0,96	4187	148	0,460	56,2	
+75	-81	-6	0,160	0,08	0,39	7746	79,1	0,346	59,0	

Из анализа результатов расчетов следует, что снижение линейной нагрузки, индукции в зазоре, увеличение числа пазов статора способствуют снижению уровня вибрации до 10 дБ, при увеличении числа пазов ротора снижается порядок и уровень вибрации.

Библиографический список

1. **Шубов** И.Г. Шум и вибрации электрических машин.- Л.: Энергоатомиздат, 1986.
2. **Попов** В.И., Ахунов Т.А., Макаров Л.Н. Современные асинхронные электрические машины: Новая Российская серии РА.- М.: ЗНАК, 1999.
3. **Попов** В.И., Тихонов С.И. Электромагнитные расчеты характеристик и магнитных шумов трёхфазных 2р=6, 8, 10-полюсных асинхронных двигателей серии RA на высоте оси вращения Н=132 мм. – Нижний Новгород, ВГИПУ, 2006. - 28 с.
4. **Попов** В.И., Тихонов С.И. Магнитный шум трехфазных многополюсных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором серии RA // Электричество. 2008. №4, С.66-73.
5. **Лазарону** Д.Ф., Бикир Н. Магнитный шум электрических машин и трансформаторов / Пер. с рум. – М.: Энергия, 1973.
6. **Короткова** С.Н., Казаков Ю.Б. Исследование виброшумовых характеристик асинхронных двигателей // ЭНЕРГИЯ 2011: Материалы региональной науч.-техн. конф. студ. и асп. / ГОУВПО Ивановск. гос. энерг. ун-т имени В.И.Ленина. – Иваново, 2011. Т.2. С. 44-45.

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

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ОДНОФАЗНОМ АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ С ПУСКОВЫМ КОНДЕНСАТОРОМ

Визуализация магнитных полей в электромеханических преобразователях (ЭМП) – довольно актуальная тема современных исследований в области электромеханики. Исследования эти направлены на решение задач, связанных с оптимизацией конструкции преобразователя, его рабочих характеристик

Главной целью работы были визуализация и исследование магнитного поля ЭМП малой мощности на примере однофазного асинхронного двигателя с пусковым конденсатором.

Однофазный асинхронный двигатель с пусковым конденсатором имеет на статоре две обмотки: главную (рабочую), и вспомогательную (пусковую) с фазосдвигающим элементом – конденсатором. Двигатель пускают как двухфазный, а при достижении определенной частоты вращения ротора вспомогательная обмотка автоматически отключается, и двигатель продолжает работать уже как однофазный.

В общем случае в однофазном двигателе возникает эллиптическое магнитное поле, которое при специальном подборе параметров рабочей и вспомогательной обмотки статора, емкости конденсатора может стать круговым. К сожалению, круговое поле можно получить лишь при одном скольжении, в качестве которого обычно берут либо $s=1$ (при пуске), либо $s=0,05$ (при номинальной нагрузке).

В качестве объекта исследования был взят двигатель, расчетные данные которого приведены в выпускной квалификационной работе «Проектирование однофазного асинхронного двигателя с пусковым конденсатором (0,1 кВт, 220 В, 3000 об/мин)». Для исследования магнитного поля использовалась программная среда Ansoft Maxwell. При создании расчетной модели, удовлетворяющей требованиям данной программной среды, взяты: номинальное напряжение, число полюсов, марка стали сердечника, внутренний и внешний диаметр расточки статора, длина сердечника, число пазов на статоре и роторе, форма пазов и их размеры, тип обмотки, число элементарных проводников в пазу и их диаметры и т. д. В итоге получилась расчетная модель, изображенная на рис. 1.

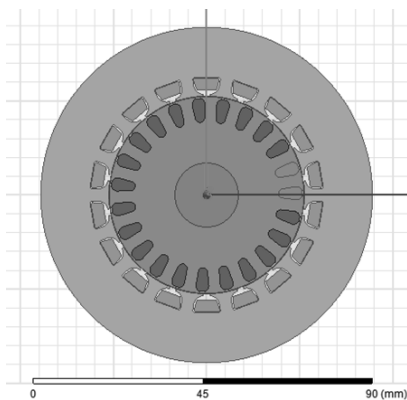


Рис. 1 Расчетная модель ОАД с пусковым конденсатором, выполненная в среде Ansoft Maxwell.

После создания модели были заданы различные условия расчета. Во-первых, механические параметры, т.е. скорость вращения ротора, так как магнитное поле рассчитывается только для одной скорости вращения. Во-вторых, тип источника питания обмоток статора, т. е. математическая функция изменения во времени мгновенной величины напряжения питания. В-третьих, время процесса изменения магнитного поля и дискретный шаг по времени процесса. После указания необходимых условий расчета, ЭВМ строит сетку в зоне, ограниченной внешним диаметром статора модели, и решает поставленную задачу методом конечных элементов. В результате расчета получаем магнитные поля в режиме пуска (пусковая обмотка включена) при синусоидальном питании с частотой 50 Гц в разные временные промежутки в периоде от 0 сек до 0,01 сек с шагом 0,005 сек.

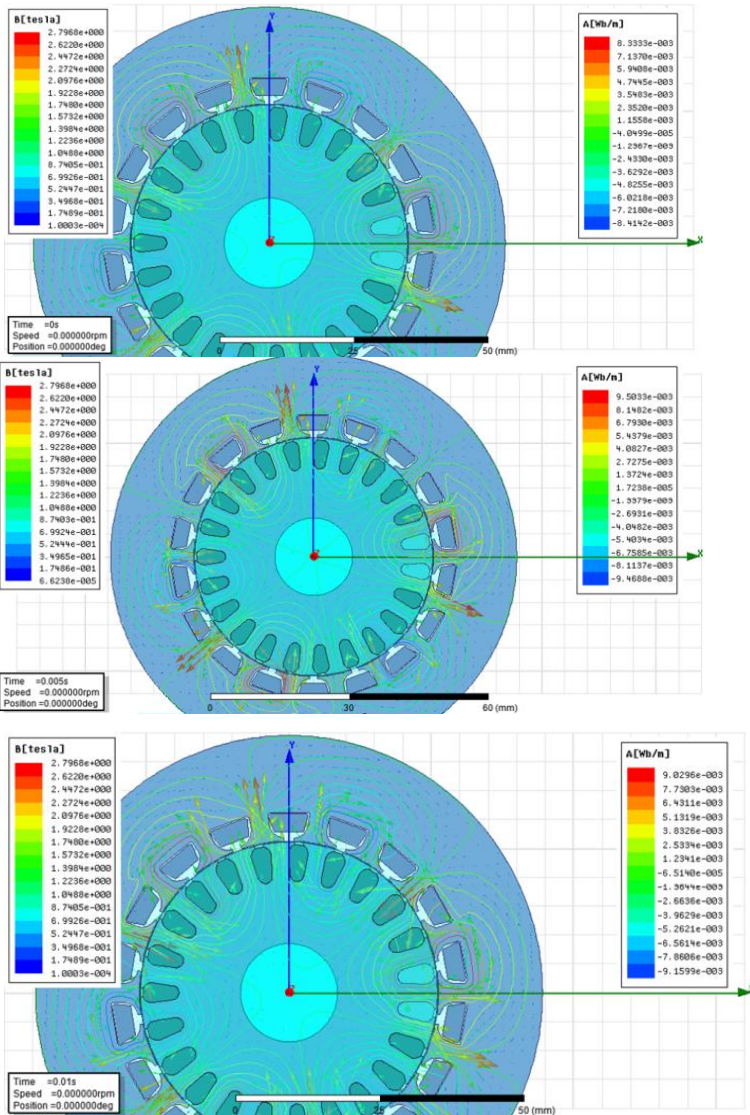


Рис. 2 Визуализация магнитных полей в ОАД с пусковым конденсатором в режиме пуска.

На рис. 2 видно, что силовые линии магнитного поля образуют три пары полюсов по окружности зазора. Как можно видеть из рисунка силовые линии образуют разные по величине внешние контуры. Эти внешние контуры с течением времени исчезают на одном полюсном делении и появляются на другом, располагающемся рядом с ним. При этом вектора магнитной индукции в каждой отдельной точке статора и ротора меняют свои направления на противоположные за время, когда ток в обмотках принимает значения от 0 до максимального, т.е. за 0,005 сек.

Библиографический список

1. Штёлтинг Г., Байссе А. Электрические микромашины: Пер. с нем.: - М.: Энергоатомиздат, 1991. - 229 с.: ил.
2. Лопухина Е. М. Расчет асинхронных микродвигателей однофазного и трехфазного тока / Е. М. Лопухина, Г. С. Сомихина. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 312 с.

*П.В. Кулешов, маг.; Д.М. Севрюгов, асп.;
рук. А.И. Тихонов, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ТРАНСФОРМАТОРЕ НА ОСНОВЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО

При проектировании силовых трансформаторов одной из наиболее ответственных задач, является уточненный тепловой расчет. Инженерные методики теплового расчета, представленные в руководящих документах, были созданы в конце 80-х годов XX века, главным образом, Всесоюзным институтом трансформаторостроения (ВИТ, г. Запорожье). Они позволяют получить приемлемую точность расчета типовых конструкций трансформатора. Эти методики используются до сих пор, особенно при оптимизации трансформаторов. Однако появление новых материалов и типов конструкций трансформаторов, требует большей точности и усовершенствования имеющихся методик расчета тепловых процессов. В настоящее время для этих целей используются метод конечно-элементного моделирования и метод Монте-Карло.

В общем случае данная задача решается в трехмерной постановке. Однако, например, при расчете обмоток силовых трансформаторов или

токоограничивающих реакторов, может быть учтена симметрия задачи, что позволяет ограничиться двухмерной постановкой.

Особенность расчета теплового поля с учетом свойств охлаждающей среды требует совместного решения уравнения теплопроводности и уравнений движения охлаждающей среды.

Уравнение теплопроводности в двухмерной постановке задачи в декартовых координатах (плоскопараллельная задача) имеет вид

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = -q, \quad (1)$$

в цилиндрических координатах (осесимметричная задача) –

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_r r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -q, \quad (2)$$

где T – температура; $\lambda_{x(y,z,r)}$ – компоненты тензора теплопроводности; q – удельная мощность тепловыделения.

Данные уравнения по виду совпадают с уравнениями магнитного поля в двухмерной постановке задачи. Это позволяет достаточно просто адаптировать библиотеку конечно-элементного моделирования магнитных полей EMLib [1], разработанную в ИГЭУ, к решению задач расчета теплового поля.

В качестве источников теплового поля используются объемные источники теплотер, импортированные из задачи электромагнитного расчета проектируемого устройства, который в свою очередь строится на базе комбинации модели электрической цепи и конечно-элементной модели магнитного поля, реализованного с использованием библиотеки EMLib. В качестве граничных условий задается температура на выбранной границе, заданный тепловой поток, условия конвективного теплообмена с охлаждающей средой, а также условия периодичности. Граница, на которой не заданы перечисленные условия, считается границей с заранее неизвестной температурой.

Граничные условия конвективного теплообмена имеют вид

$$q_k = \alpha(T_r - T_{\text{охл}}), \quad (3)$$

где $q_{\text{нк}}$ – нормальная компонента вектора плотности теплового потока на границе; T_r – температура границы твердого тела; $T_{\text{охл}}$ – температура охлаждающей среды; α – коэффициент теплоотдачи с поверхности.

Существует проблема определения коэффициента теплоотдачи с поверхности твердого тела α , величина которого зависит как от свойств охлаждающей среды, так и от свойств и формы охлаждаемой

поверхности. Для его определения решено использовать модель охлаждающей среды на основе метода Монте-Карло [2, 3].

При моделировании термодинамических систем (ТДС) методом Монте-Карло каждой структурной единице вещества (молекуле) ставится в соответствие некий *виртуальный объект* (частица), поведение которого определяется законами механики. Множество таких частиц,двигающихся в реальном времени в виртуальном пространстве, представляет собой *имитационную модель* термодинамической системы.

Так как количество молекул вещества N в реальных ТДС оказывается чрезмерно большим, то для моделирования ТДС рационально воспользоваться методами теории подобия. При этом количество частиц в модели N' можно задать по своему усмотрению, так что $N' \ll N$. Задаваясь произвольными значениями независимых масштабов подобия ($m_N = N' / N$, $m_t = t' / t$, $m_l = l' / l$, $m_{(l)} = \langle l' \rangle / \langle l \rangle$) и используя аппарат первой теоремы подобия можно рассчитать все зависимые масштабы, выразив их через независимые. Здесь m_N – масштаб по количеству молекул; m_l – масштаб по длине; m_t – масштаб по времени; $m_{(l)}$ – по средней длине свободного пробега молекул; штрихованные величины относятся к модели, нештрихованные – к оригиналу.

Поведение частиц модели подобно поведению молекул. Однако это подобие является неполным. В частности, отсутствует факт взаимного соударения частиц модели. Вместо этого каждая частица совершает броуновское движение с длиной свободного пробега

$$l'_i = -\ln(\omega_i) \cdot \langle l' \rangle = -\ln(\omega_i) \cdot \langle l \rangle \cdot m_{(l)}, \quad (4)$$

где $\langle l' \rangle$ – средняя длина свободного пробега частиц модели; $0 \leq \omega_i < 1$ – случайная величина.

Среднюю длину пробега молекул газа можно определить как

$$\langle l \rangle = \frac{3\eta}{nm_0u}, \quad (5)$$

где m_0 – масса молекулы; η – динамическая вязкость газовой среды при заданной температуре T и заданном давлении p ;

$$n = \frac{3p}{m_0u^2}, \quad (6)$$

– концентрация молекул газа при заданном давлении p ;

$$u = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}, \quad (7)$$

– среднеквадратичная скорость молекул газа при заданной температуре T ; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

Произвольный выбор масштаба по длине свободного пробега молекул позволяет управлять скоростью диффузии частиц модели.

Скорость движения частиц модели на прямолинейном участке траектории выбирается исходя из температуры газа T . Скорость v'_i i -й частицы рассчитывается в соответствии с распределением Максвелла

$$F(v) = 4\pi \left(\frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{3/2} v^2 e^{-\frac{m_0 v^2}{2kT}}. \quad (8)$$

При соударении частиц со стенками цилиндра происходит теплообмен термодинамической системы с окружающей средой. При этом скорость частиц изменяется так в соответствии с распределением Максвелла. В ходе имитационного эксперимента фиксируются параметры системы частиц, которые с помощью масштабных коэффициентов пересчитываются в термодинамические параметры газа:

- удельный тепловой поток через единичную поверхность изотермической стенки

$$q = m_q \frac{i}{6t'} \sum_{j=1}^{N'_i} [m'_0 (v'^2_{j+} - v'^2_{j-})], \quad (9)$$

- давление газа

$$p = \frac{p'}{m_p} = \frac{n' m'_0}{3N' m_p} \sum_{i=1}^{N'_i} (v'^2_{xi} + v'^2_{yi} + v'^2_{zi}); \quad (10)$$

- температура газа

$$T = \frac{T'}{m_r} = \frac{p'}{m_r n' k}; \quad (11)$$

- внутренняя энергия газа:

$$W = \frac{W'}{m_w} = \frac{i}{2m_w} \nu R' T' = \frac{i}{2m_r} \nu R T'; \quad (12)$$

- количество тепла, переданного через теплопроводную стенку

$$Q = \frac{Q'}{m_w} = \frac{i}{3m_w} \sum_{i=1}^{N'_i} \left[\frac{m'_0}{2} (v'^2_{i+} - v'^2_{i-}) \right], \quad (13)$$

где v'_{i+} и v'_{i-} – скорость i -й частицы до (индекс «-») и после (индекс «+») столкновения со стенкой; i – количество степеней свободы молекул газа; R – газовая постоянная; m_q , m_p , m_T , m_W – соответствующие масштабы;

$$m'_0 = \frac{N}{N'} m_0 = \frac{m_0}{m_N} \quad (14)$$

– масса частиц модели.

Из модели ТДС по (9) определяется удельный тепловой поток через теплопроводящую стенку. Данная величина служит для расчета коэффициента теплоотдачи данной стенки α по (3), который передается в систему конечно-элементного расчета теплового поля в твердых средах. Это позволяет избавиться от трудоемкого решения уравнения Навье-Стокса для движения охлаждающих сред.

Библиографический список

1. **Тихонов А.И., Булатов Л.Н.** Платформнезависимая библиотека конечно-элементного моделирования магнитного поля / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. – № 2011614852. Заявка № 2011613040, приоритет от 28.04.2011, Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 22.06.2011.
2. **Севрюгов Д.М., Тихонов А.И.** Разработка версии метода Монте-Карло для моделирования теплового поля (XVI Бенардосовские чтения): Материалы междунар. науч.-техн. конф. / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2011. – с.134-137.
3. **Севрюгов Д.М., Тихонов А.И.** Разработка модели термодинамической системы на основе теории подобия и метода Монте-Карло в технологии параллельных вычислений CUDA. – Иваново: "Вестник ИГЭУ", 2014, Вып. 1.

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

ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЁТ ГИБРИДНОГО ШАГОВОГО ДВИГАТЕЛЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ANSYS MAXWELL

Наибольшее распространение в настоящее время получили три вида шаговых двигателей: реактивные шаговые двигатели, шаговые двигатели с постоянными магнитами и гибридные шаговые двигатели. Последние представляют особый интерес с точки зрения моделирования процессов, протекающих в магнитном поле, так как имеют неко-

торые конструктивные особенности, делающие двухмерную постановку модели нежелательной. Только при трёхмерном моделировании можно получить реальную картину поля, создаваемого обмотками с током в гибридном шаговом двигателе (ГШД). Коснёмся конструкции и принципов работы ГШД подробнее.

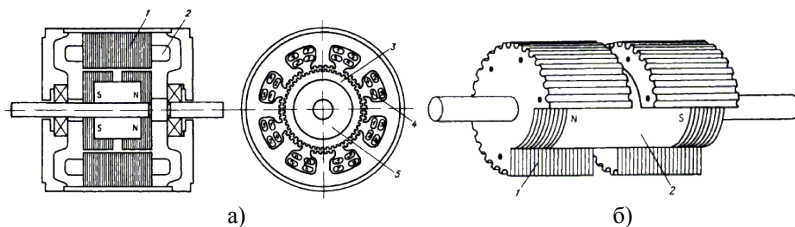


Рис. 1. Конструкция ГШД:

- а) продольный и поперечный разрезы ГШД: 1 – магнитопровод статора, 2 – обмотки, 3 – магнитопровод ротора, 4 – обмотка статора, 5 – постоянный магнит;
 б) структура ротора ГШД: 1 – шихтовая сталь, 2 – постоянный магнит.

Термин «гибридный» происходит от того факта, что двигатель работает, используя принципы как реактивного двигателя, так и двигателя с постоянными магнитами. Разрез и сечения (продольное и поперечное) ШД такого типа показаны на рисунке 1, а. Структура статора такая же, как у реактивного шагового двигателя, или очень близка к ней, но обмотки и их соединения могут отличаться от реактивного двигателя. В четырёхфазном ГШД катушки двух различных фаз намотаны на одном полюсе, как показано на рисунке 1, а. Таким образом, один полюс принадлежит не только одной фазе. Две катушки на полюсе намотаны по бифилярной схеме. При возбуждении катушки создают магнитные потоки различной полярности. В двухфазном ГШД на каждый полюс намотаны катушки только одной фазы, также как и в реактивном шаговом двигателе, однако магнитное поле машины имеет совсем другую конфигурацию ввиду того, что ГШД имеет особую структуру ротора.

Цилиндрический постоянный магнит располагается в теле ротора, как показано на рисунке 1,б. Постоянный магнит (ПМ) намагничен вдоль оси ШД для создания аксиального магнитного потока (рисунок 1,б). На каждый из полюсов постоянного магнита надет сердечник ротора из магнитомягкого материала. Зубцы пакетов ротора сдвинуты друг относительно друга на половину зубцового деления (рисунок 1,б). Момент в гибридном ШД создается за счет взаимодействия магнитных

полей катушек и постоянного магнита в зубчатой структуре воздушно-го зазора [1].

Рассмотрим принцип действия двухфазного ГШД. На одну из фаз подаётся напряжение. Магнитное поле, создаваемое обмоткой, накладывается на поле, создаваемое постоянным магнитом. Из-за того, что оба поля под зубцами одной половины полюса статора усиливают друг друга, в этом месте пространства появится движущая сила, в то время как под другой половиной полюса обе компоненты нейтрализуют одна другую, ослабляя движущую силу. Ротор делает шаг. Затем напряжение с первой фазы снимается, и подаётся на вторую фазу. Процессы в магнитном поле повторяются, создаётся движущая сила, ротор делает ещё один шаг, и т.д. Таким образом, результирующая сила будет направлена всегда в одну сторону.

Активный момент создаётся посредством магнитного поля обмоток, постоянный магнит способствует возникновению некоторого фиксирующего момента. Благодаря наличию намагничивающей силы постоянного магнита двигатель в прежних габаритах становится более высокомоментным и энергоэффективным по сравнению с аналогичным реактивным шаговым двигателем, а также становится более устойчивым при перегрузках, что позволяет уменьшить вероятность потери шагов при работе. Смещение пакетов ротора на половину зубцового деления позволяет уменьшить величину шага в 2 раза.

Для создания трёхмерной модели двухфазного ГШД была использована среда SolidWorks 2013. Были смоделированы трёхмерные элементы двигателя: статор, пакеты ротора, постоянный магнит, вал, обмотки и пр. Созданные элементы были импортированы в среду ANSYS Maxwell для моделирования полевого расчёта процессов, протекающих в двигателе [2]. Были заданы параметры материалов, из которых состоят детали ГШД. В настройки внесены данные, позволяющие учитывать шихтовку магнитопровода статора и ротора, соотношение потерь на гистерезис и на вихревые токи для электротехнической стали, кривые намагничивания для стали марки 2212. Также была задана кривая размагничивания и прочие характеристики для постоянного магнита.

Для прецизионного расчёта необходимо разбить модель на достаточно большое количество конечных элементов, причём, чем мельче будут составляющие её элементы, тем более близкую к реальности картину поля мы получим. Однако при этом также возрастают потребляемые вычислительные ресурсы ЭВМ, что значительно увеличивает время расчёта, особенно при трёхмерной постановке модели.

Ввиду большого времени расчёта приведённой ниже модели, ограничимся достаточно грубой сеткой (рисунок 2), но достаточной для получения предварительных результатов, картины поля и анализа происходящих в нём процессов.

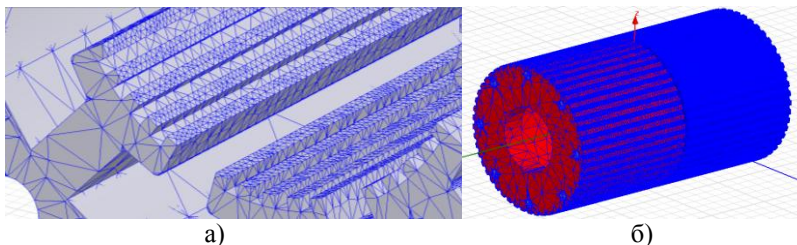


Рис. 2. Сетка конечных элементов трёхмерной модели ГШД:
а) сетка сердечника статора; б) сетка двух пакетов сердечника ротора

Исследуем момент пуска двигателя. Примем для начала магнитную проводимость постоянной, чтобы увеличить скорость расчёта. Частота вращения ротора равна нулю. В одну из фаз подаётся напряжение. Установившаяся величина тока составляет 1,5 А. Вторая фаза обесточена. Получим величину момента, действующего на ротор и картину поля, из которой видно, как увеличивается магнитная индукция под одной половиной полюса и уменьшается под другой. Результаты полевого расчёта приведены на рисунках 3 и 4.

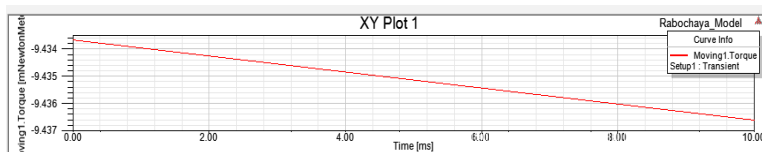


Рис. 3. Момент ГШД в момент пуска (9,43 мН*м)

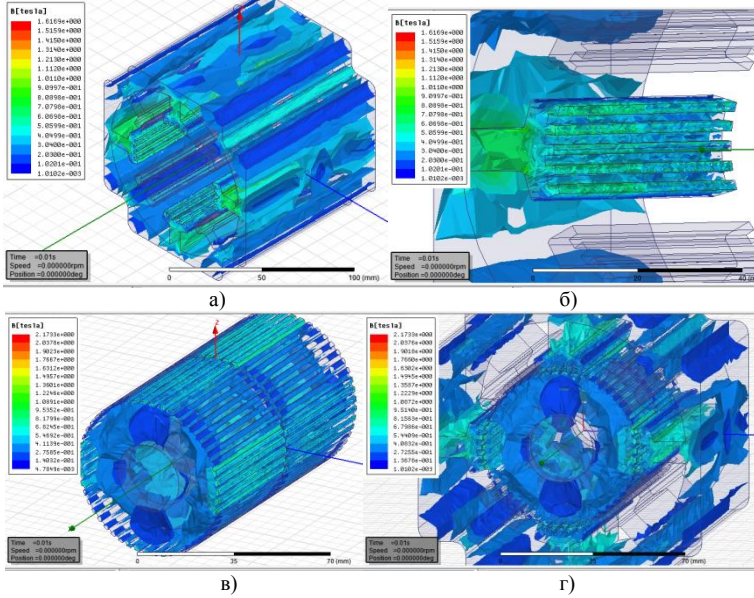


Рис. 4. Картины индукции магнитного поля ГШД в трёхмерной постановке в момент пуска:
а, б) поле статора; в) поле ротора с ПМ; г) результирующее поле

При полевом расчёте методом конечных элементов трёхмерной модели ГШД получена конфигурация магнитного поля в момент пуска и величина момента при заданных геометрии и параметрах материалов. Увеличивая количество конечных элементов сети, можно добиться более точного и реалистичного отображения картины поля, а также более точных значений момента, действующего на ротор и прочих величин полевого расчёта (ток, потери и т.п.).

Библиографический список

1. Карпенко Б.К., Ларченко В.И., Прокофьев Ю.А. Шаговые электродвигатели. – Киев: «Техника», 1972. – 216 с.
2. Вебинары ANSYS на русском языке. Электромеханика. Интернет-сайт. Режим доступа: <http://www.cae-club.ru/forum/elektromagnetizm/elektromekhanika>

РАЗРАБОТКА ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ ГУСЕНИЧНОГО ТРАКТОРА «БЕЛАРУС-1502Э»

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

В соответствии с отмеченными тенденциями в настоящее время проводится разработка, проектирование, опытно-конструкторские работы и испытания тяговых асинхронных электрических двигателей с короткозамкнутым ротором для схем гибридных силовых установок транспортных средств. В частности, для тракторов «Беларус-1502Э», «Беларус-3023» и др. используется последовательная схема передачи энергии на ведущие колёса для движения транспортного средства преимущественно с постоянной скоростью и высоким крутящим моментом на колёсах (рис. 1).

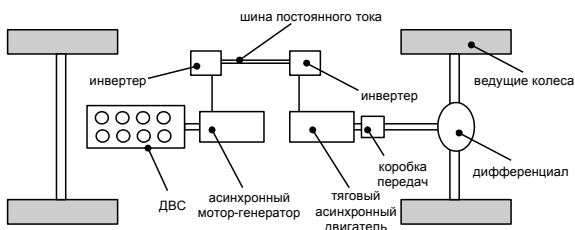


Рис. 1. Схема электромеханической трансмиссии трактора «Беларус-1502Э»

В этом случае механическая связь ведущих колёс с первичным источником энергии – двигателем внутреннего сгорания (ДВС), отсутст-

вует. Такой подход позволяет исключить конструктивные элементы механической передачи и стабилизировать режим работы ДВС в точке максимальной топливной эффективности и минимальных выбросов. В каждый момент времени полученная от ДВС механическая мощность последовательно преобразуется в электрическую мощность с требуемыми для электрической машины параметрами и далее обратно в механическую мощность, востребованную условиями движения.

При проектировании тяговых двигателей предпочтение было отдано асинхронным низковольтным трёхфазным двигателям, т.к. они просты в конструкции, характеризуются уникальными эксплуатационными качествами: большим сроком службы, простотой в обслуживании и ремонте, а отсутствие подвижных электрических контактов обуславливает их высокую надёжность. Кроме того необходимо учитывать, что массовое серийное производство электрических машин этого типа хорошо отлажено и стоимость их изготовления является сравнительно небольшой. Среди основных особенностей тяговых характеристик разрабатываемых электрических машин следует выделить большой диапазон частот вращения, особенно во второй зоне регулирования (выше номинальной скорости).

В процессе выполнения исследовательской задачи по разработке оптимальных активных частей тягового асинхронного двигателя в среде проектирования «СПРУТ-Технология» был произведён исследовательский расчёт 36 вариантов электродвигателей с проведением многоэтапной оптимизации параметров электрических машин в номинальном режиме работы при условии определения в каждом случае как экстремумов частных критериев, так и экстремумов свёртки критериев. Также требовалось обеспечить в конце второй зоны регулирования (при скорости $n=5800$ об/мин) при заданном уровне питающего напряжения (не более 300 В) кратности максимального момента не менее 1,3..1,45.

В качестве критерия оптимизации использовалась многоцелевая функция, представляющая собой свёртку частных критериев:

$$F(X) = \alpha_{\eta} \frac{\eta_i}{\eta_b} + \alpha_{Km} \frac{Km_i}{Km_b} + \alpha_{Qa} \frac{Qa_b}{Qa_i} + \alpha_{Mg} \frac{Mg_i}{Mg_b} + \alpha_{\theta Cu} \frac{\theta Cu_b}{\theta Cu_i} + \alpha_{Ca} \frac{Ca_b}{Ca_i} \quad (1)$$

В выражении (1) в качестве критериев качества разработки отобраны КПД (η), кратность максимального момента (Km), объём активных частей (Qa), отношение номинального вращающего момента к массе

активных материалов (Mg), перегрев обмотки статора (θ_{Cu}), относительная стоимость активных материалов по отношению к стоимости 1 кг меди в текущих ценах (Ca). Принятые условные индексные обозначения: b – базовый спроектированный до оптимизации двигатель; i – текущий проектируемый двигатель, подвергающийся оптимизации.

При этом «весовые» коэффициенты для частных критериев равны: $\alpha_{\eta} = 0,2$; $\alpha_{Kт} = 0,1$; $\alpha_{Qa} = 0,05$; $\alpha_{Mg} = 0,25$; $\alpha_{\theta_{Cu}} = 0,2$; $\alpha_{Ca} = 0,2$.

Основные технические данные исследуемых машин представлены в табл. 1.

Таблица 1. Основные технические данные базового двигателя ТАД 200-260 У2 и оптимального ТАД 250-146 У2

Наименование параметра	ТАД 200-260 У2 ($Da=327$ мм, $L=260$ мм, $2p=6$)	ТАД 250-146 У2 ($Da=437$ мм, $L=146$ мм, $2p=12$)
Номинальная мощность, кВт	48	48
Номинальная частота вращения, об/мин	1160	1160
Номинальная частота сети, Гц	59	118
Номинальный длительный момент на валу двигателя, Н*м	396,135	395,031
КПД в номинальном режиме, %	92,18	92,15
Кратность максимального момента, о.е.	3,684	3,207
Кратность максимального момента при $n=5800$ об/мин	1,523	1,652
Объем активного ядра, dm^3	27,802	27,881
Масса активных частей, кг	95,448	68,176
Отношение момента к массе активных материалов, о.е.	4,1503	5,7943
Перегрев обмотки статора, °С	116,561	123,2685
Относительная стоимость активных материалов (на 1 кг Cu), о.е.	43,701	42,941
Значение функции $F(X)$	1,0000	1,0785

Конструктивно тяговые асинхронные двигатели для электромеханической трансмиссии трактора «Беларус-1502Э» выполнены в раздельных сварных корпусах и крепятся на общей раме (рис. 2, а). Редуктор располагается внутри корпуса электродвигателя. Вал генератора соединен с валом дизеля, вал тягового электродвигателя соединен с входным валом двухдиапазонной коробки передач. Двигатели имеют выпные обмотки статоров из круглого эмалипровода с температурным индексом 200 °С и короткозамкнутые роторы из алюминия. Используемая система охлаждения является комбинированной – водяная

рубашка снаружи над пакетом статора, воздушный контур – внутри ЭМ. Стальные сварные станины и подшипниковые щиты конструктивно реализуют жидкостную циркуляционную систему охлаждения на внешней поверхности электрической машины (рис. 2, б). Охлаждающий воздух подается внутрь электрических машин через окно в корпусе трактора, расположенном между двигателем и генератором в центральном отсеке, а встроенный внутренний вентилятор на роторах машин обеспечивает осевое движение воздуха через вентиляционные каналы в пакете ротора. Также в центральном отсеке между электрическими машинами располагаются зубчатые колёса и датчики частоты вращения валов, а также силовые выводы обмотки.

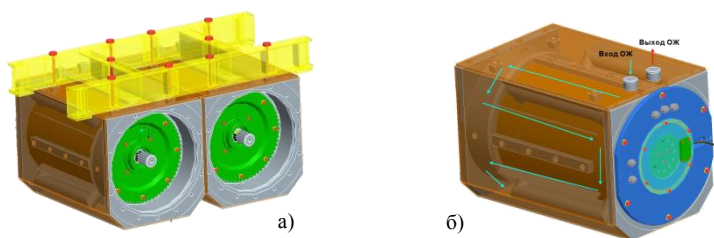


Рис. 2. Конструктивное исполнение двигателей (а) и жидкостная система охлаждения (б)

Параметры двигателей в различных зонах регулирования представлены в таблицах 2 и 3. Зависимости моментов и полезной мощности от скорости вращения представлены на рисунке 3.

Таблица 2. Параметры двигателя ТАД 200-260 У2 (h=200 мм, 2p=6, Da=327 мм, l=260 мм) в двух зонах регулирования

Зона	I зона					II зона				
	<i>U, В</i>	42	73	108	143	210	300	300	300	300
<i>f, Гц</i>	11	20	30	40	59	101,9	151,4	201,9	252,5	293
<i>P2, Вт</i>	8061	15584	23910	32220	48000	48000	48000	48000	48000	48000
<i>Mн, Н*м</i>	396,1	396,1	396,1	396,1	396,1	229,2	152,8	114,6	91,67	79,03
<i>η, %</i>	71,54	83,04	87,79	90,1	92,18	93,61	93,91	93,8	93,73	93,57
<i>Mтах, Н*м</i>	696,8	945,2	1113,9	1312	1459,4	1015,4	457,87	254,97	159,9	120,4
<i>η, %</i>	71,54	83,04	87,79	90,1	92,18	93,61	93,91	93,8	93,73	93,57
<i>Mтах, Н*м</i>	696,8	945,2	1113,9	1312	1459,4	1015,4	457,87	254,97	159,9	120,4
<i>I, А</i>	97,56	94,18	92,94	92,5	92,17	63,43	61,21	61,35	62,17	63,34
<i>Vzс, Тл</i>	1,802	1,802	1,818	1,828	1,841	1,582	1,127	0,832	0,655	0,559
<i>n, об/мин</i>	194,3	375,7	576,4	776,7	1157,1	1999,8	3000,2	3999,9	5000,4	5799,9

Таблица 3. Параметры двигателя ТАД 250-146 У2 (h=250 мм, 2p=12, Da=437 мм, l=146 мм) в двух зонах регулирования

Зона	I зона					II зона				
	<i>U, В</i>	33	65	96	127	186	300	300	300	300
<i>f, Гц</i>	20	40	60	80	117,5	200,9	301,4	401,9	502,5	583
<i>P2, Вт</i>	7640	15907	24135	32364	48000	48000	48000	48000	48000	48000
<i>Mн, Н*м</i>	392,9	392,94	392,95	392,96	395,03	229,21	152,79	114,6	91,672	79,031
<i>η, %</i>	77,73	87,04	89,88	91,19	92,15	90,5	90,98	91,2	91,12	90,86
<i>Mтах, Н*м</i>	840,1	1078,2	1153,3	1193	1266,9	1172,9	505,88	270,45	175,368	130,56
<i>I, А</i>	126,1	122,63	122,38	122,24	122,31	88,47	74,22	70,55	69,71	70,13
<i>Vzс, Тл</i>	1,708	1,743	1,738	1,736	1,742	1,672	1,153	0,898	0,708	0,604
<i>n, об/мин</i>	185,7	386,6	586,5	786,5	1160,3	1999,8	3000	3999,8	5000	5799,8

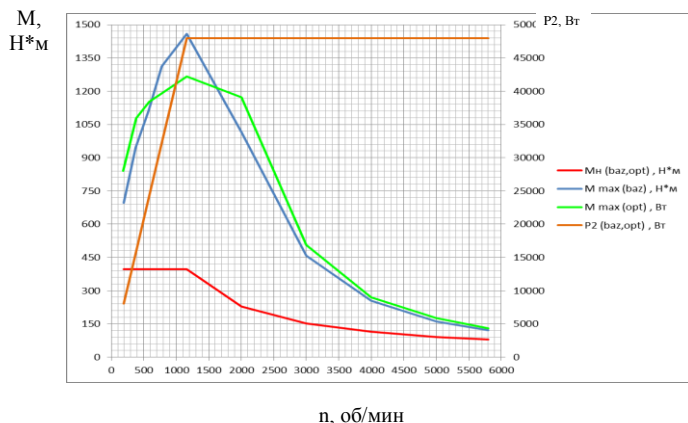


Рис. 3. Зависимости моментов и полезной мощности от скорости вращения для базового и оптимального двигателей

Библиографический список

1. **Гибридный привод транспортных средств.** Технический каталог ОАО «РУСЭЛПРОМ», 2011. – 16 с.
2. **С.Н. Флоренцев, Д.Б. Изосимов.** Тяговый электропривод в гибридных транспортных средствах. Идеология проектирования комплектного тягово-энергетического оборудования для гибридных транспортных средств. Часть 1. Электротехника. №7. 2009. Часть 2. Электротехника. №8. 2009.
3. **Трансмиссии тракторов (конструкция).** Под ред. В.М. Шарипова. – М.: МГТУ «МАМИ», 1999. – 245 с.
4. **Электромеханическая трансмиссия.** Технический каталог ОАО «РУСЭЛПРОМ», 2011. – 12 с.

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

РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИЛ В ТОРЦЕВОМ ВЕНТИЛЬНОМ ДВИГАТЕЛЕ

В настоящее время в диапазоне малых и средних мощностей все чаще применяются электроприводы на базе вентильных электрических машин с аксиальным магнитным потоком (ВМАП). Или, как их еще называют – торцевых машин. Теоретические исследования по анализу и синтезу электрических машин этого класса носят эпизодический, разрозненный характер, т.к. этот тип машин еще только входит в эксплуатацию. Анализ магнитного поля и электромагнитных усилий в большинстве случаев происходит с применением пакетов конечно-элементного моделирования. При использовании этих пакетов задача ставится в 3х мерной постановке, что существенно увеличивает время расчета. Так же возрастают требования к умению работать с соответствующим программным обеспечением.

Целью данной работы является упростить анализ и расчет электромагнитных усилий в торцевых машинах.

Для рассмотрения был выбран торцевой вентильный электродвигатель (ТВД) с полым ротором для смесителя сыпучих материалов^[1].

Расчет производился в среде конечно-элементного моделирования Elcut. Основное математическое соотношение, которое использует данная среда для расчета нестационарного магнитного поля, является:

$$\frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(\frac{1}{\mu_y} \cdot \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left(\frac{1}{\mu_x} \cdot \frac{\partial A}{\partial y} \right) = \gamma \cdot \frac{\partial A}{\partial t} - J_{\text{ст}}$$

Т.к. Elcut имеет возможность решать задачи только в двухмерной постановке, необходимо ввести следующие допущения.

1) Поля рассеивания с внутренней и внешней цилиндрической поверхности ТВД незначительны и ими можно пренебречь.

2) Развернем ТВД вдоль средней линии (см. рис. 1) и будем рассматривать его как линейный двигатель.

3) Будем производить расчеты только для одной пары полюсов.

4) Ротор остается неподвижным, рассчитывается пандеромоторная сила, которая действует на него при зафиксированном положении.

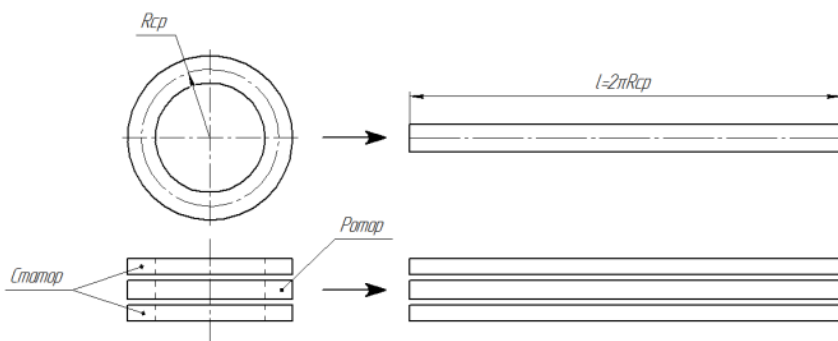


Рис. 1. Представление ТВД в виде линейного двигателя.

График изменения плотности тока в обмотках статора представлен на рис. 2.

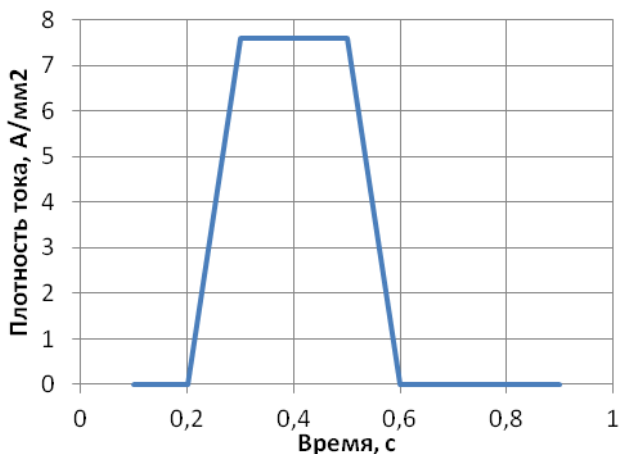


Рис. 2. График изменения плотности тока во времени

Граничные условия, заданные для расчета, показаны на рис. 3.

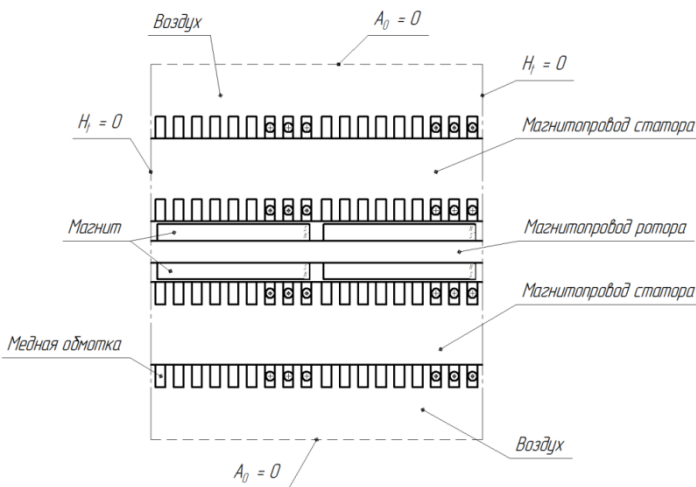


Рис. 3. Граничные условия на одну пару полюсов.

Результаты расчета были сравнены с данными, полученными в ходе проектирования. Стоит отметить, что выражения, использованные в методике проектирования, были выведены с использованием пакетов, решающие задачу анализа электромагнитных усилий в 3х мерной постановке^[2]. Сравнение обоих методов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Расчетные данные.

Расчет по методике	Расчет в Elcut	Отклонение
$B_{\delta} = 0.73$ Тл	$B_{\delta} = 0.8$ Тл	9 %
$M_{cp} = 1.3$ Н·м	$M_{cp} = 1.2$ Н·м	8 %

Как видно из таблицы 1, значения, полученные по методике расчета, основанной на 3х мерной постановке задачи и значения, полученные в результате расчета в Elcut, различаются меньше чем на 10 %. Что вполне удовлетворительно для инженерного расчета в первом приближении.

Библиографический список.

1. **Балагуров И.А., Казаков Ю.Б.**, Торцевой вентильный электромеханический преобразователь с полым ротором. Тезисы 8 международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Энергия – 2013»
2. **Ганджа, С.А.** Анализ электромагнитной мощности для различных конструктивных исполнений вентильных машин с аксиальным потоком. Вестник ЮУрГУ, № 32, 2010

А.С. Перминова, магистрант; рук. Ю.И. Страдомский, профессор
(ИГЭУ, г. Иваново)

НОВЫЙ СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В РАБОЧИХ ЗАЗОРАХ УПЛОТНЕНИЙ

Введение. Повышение эффективности магнитожидкостных герметизаторов и снижение их массогабаритных показателей является актуальной задачей. Одним из возможных способов достижения поставленной цели является разработка и совершенствование новых способов формирования высоко градиентных магнитных полей в рабочих зазорах данных устройств.

Принцип работы магнитожидкостного герметизатора (МЖГ) основан на создании в рабочем зазоре высоко градиентного магнитного поля. В магнитных системах с магнитопроводящим валом неоднородность поля в зазоре достигается изменением геометрии образующих

рабочий зазор магнитопроводящих поверхностей. На поверхностях полюсных приставок или вала, образующих зазор, выполняют концентраторы, которые перераспределяют магнитный поток в зазоре [1÷3].

В случае, когда одна поверхностей, образующих рабочий зазор, является немагнитной, данный принцип перераспределения поля не работает. Известен способ, когда магнитный поток концентрируется в зазоре между двумя разноименными полюсными приставками, и зона зазора с повышенной напряженностью поля располагается около немагнитной поверхности (рис. 1). Эффективность такого способа герметизации ниже, чем с магнитным валом и зависит от того, на-

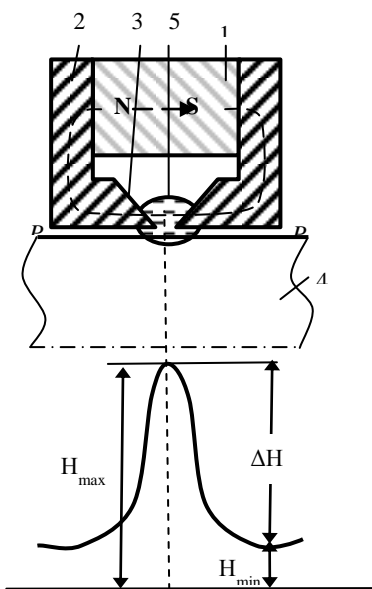


Рис. 1. МЖГ немагнитного вала:
1 – магнит, 2 – полюсные приставки, 3 – концентраторы, 4 – вал, 5 – МЖ

сколько малым может быть выполнен зазор между полюсными приставками и поверхностью немагнитного вала. Для удержания требуемого перепада, на валу последовательно устанавливают ряд таких магнитных систем.

В данной работе предлагается новый способ создания высоко градиентных магнитных полей в рабочих зазорах магнитоожидкостных герметизаторов. Способ работоспособен в герметизаторах как с магнитными, так и немагнитными валами, то есть является универсальным. Магнитная система герметизатора по данному способу состоит как минимум из двух одинаковых кольцевых постоянных магнитов, расположенных на одной оси и обращенных друг к другу одноименными полюсами. Картина прохождения магнитных потоков рядом расположенных магнитов показана на рис. 2. Магнитные потоки, выходящие из одноименных полюсов соседних магнитов, проходят через ограниченные по размерам концентрические поверхности АБ и ВГ, совпадающие с наружными и внутренними поверхностями магнитов. На этих поверхностях наблюдается максимальная концентрация линий потока и, соответственно, максимальная напряженность магнитного поля в магнитной системе. При сближении магнитов площадь концентрических поверхностей АБ и ВГ уменьшается, что позволяет регулировать градиент и максимальную напряженность поля. Выходя из межполюсного пространства, магнитные потоки рассеиваются в окружающем пространстве, а напряженность

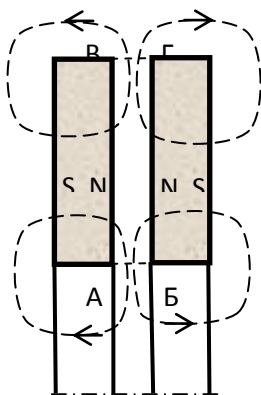


Рис. 2. Принцип действия МЖГ

поля быстро снижается. Если поверхность вала герметизатора расположена близко от внутренней поверхности магнитов, то на поверхности вала наблюдается поле высокой напряженности, так как линии потока на малом расстоянии от поверхности АБ еще не успевают рассредоточиться. Максимальная напряженность поля в рабочем зазоре будет определяться величиной рабочего зазора герметизатора, расстоянием между магнитами, размерами магнитов и свойствами магнитотвердого материала, используемого в магните.

Численная оценка эффективности способа. Для определения эффективности предлагаемого способа был проведен эксперимент на ос-

нове математического моделирования магнитного поля магнитной системы. Использовался метод конечных элементов. На начальном этапе исследований важно подтвердить работоспособность способа повышения градиента напряженности и максимальной напряженности поля, поэтому было рассмотрено, каким образом величина расстояния между постоянными магнитами t влияет на величину индукции на поверхностях немагнитного и магнитного валов. В эксперименте величина рабочего зазора δ между поверхностью вала и внутренней поверхностью магнитов была задана 0.05 мм, использовались постоянные магниты из закритического самарий-кобальтового магнитотвердого материала КС-37. Применение закритического магнитотвердого материала в магнитах данной системы обязательно, что исключает их взаимное размагничивание при сближении. Размеры магнитов выбраны следующими: наружный диаметр $\Phi_{\text{н}}=30$ мм, внутренний $\Phi_{\text{вн}}=20$ мм, длина магнитов $L=4$ мм.

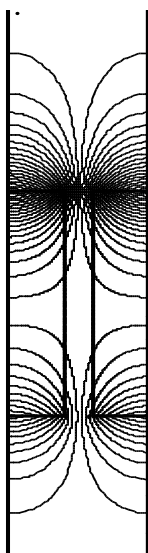


Рис. 3. Картина распределения линий векторного магнитного потенциала магнитной системы

Результаты расчета. На рис. 3 показана полученная в результате расчета картина распределения линий векторного магнитного потенциала магнитной системы, которая соответствует принципу распределения магнитного поля в пространстве и заданным граничным условиям.

На рис. 4 показана зависимость максимальной индукции поля в рабочем зазоре герметизатора около поверхности немагнитного вала напротив участка АБ от расстояния между магнитами t .

Напряженность поля в зазоре устойчиво растет при уменьшении расстояния между магнитами. Наиболее ощутимые изменения индукции происходят при расстоянии между магнитами меньше 1 мм. Максимально достигнутое значение индукции в зазоре на поверхности немагнитного вала составляет 1.08 Тл. Для сравнения, средняя индукция около торцевой поверхности уединенного постоянного магнита составляет 0.31 Тл. Очевидно, что максимум индукции в зазоре

данной системы будет меняться с изменением размеров используемых магнитов и выбранного магнитотвердого материала.

Данный способ может успешно использоваться для герметизации магнитопроводящих валов. На рис. 4 приведена зависимость максимальной индукции в зазоре МЖГ с магнитопроводящим валом. Значения индукции значительно выше, чем в системе с немагнитным валом и достигают 2,26 Тл.

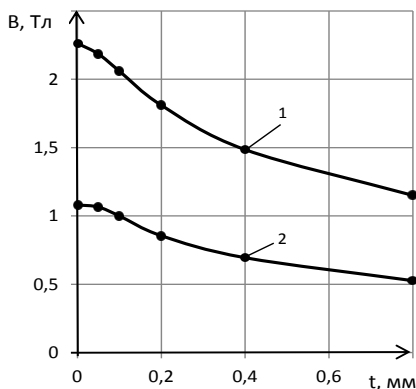


Рис. 4. Изменение индукции на поверхности вала от межполюсного расстояния при $\delta=0,05$ мм:

1 – вал магнитный, 2 – вал немагнитный

лов, по эффективности сопоставим известным способом герметизации немагнитного вала, в тоже время значительно упрощает конструкцию герметизаторов.

Заключение. Предложен новый способ формирования высоко градиентных магнитных полей в рабочих зазорах магнитожидкостных герметизаторов. Способ позволяет создавать универсальные герметизаторы, работающие как с магнитными, так и с немагнитными валами, обеспечивает конструктивную простоту и технологичность изготовления герметизаторов. Математическое моделирование магнитного поля герметизатора новой конструкции подтвердило эффективность предложенного способа и герметизатора на его основе.

Библиографический список

1. Казаков Ю.Б., Морозов Н.А., Страдомский Ю.И., Перминов С.М. Герметизаторы на основе нанодисперсных магнитных жидкостей и их моделирование / Иван. Гос. Энерг. Ун-т.- Иваново, 2010. - 184 с.

2. **Перминов С.М.** Исследование распределения напряженности магнитного поля и магнитных потоков в магнитоожидкостном герметизаторе классической конструкции // Вестник ИГЭУ. - 2012. - №6. - с. 32-36.

3. **Полетаев В.А., Перминов С.М., Пахолкова Т.А., Перминова А.С.** Исследование магнитного поля рабочего зазора магнитоожидкостного герметизатора классической конструкции // Вестник ИГЭУ. - 2011. - №5. с. 42-45.

*В.Н. Кадилов, магистрант.; рук. А.К. Громов, к.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРАХ С ПРОДОЛЬНО- ПОПЕРЕЧНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Рассматриваются синхронные генераторы (СГ) неявнополюсного типа.

При эксплуатации основного оборудования электростанций задаются уровни напряжения и величина отдаваемой активной мощности.

Режим СГ в общем случае может меняться произвольно. Для турбогенераторов наиболее часто встречающимися вариантами изменения режима являются два:

- изменение реактивной мощности; при этом активная мощность и активный ток постоянны;

- изменение активной и реактивной мощностей при $U_r = \text{const}$ и $U_c = \text{const}$ в процессе набора или снижения активной мощности генератора. При любых вариантах регулирования необходимо оценивать уровень устойчивости процесса в конкретном режиме.

Представление о состоянии генераторов в различных режимах работы дает диаграмма мощности, построенная в координатах p, q . Наличие такой диаграммы, либо ее отображения вместе с рабочей точкой режима на экране видеомонитора, позволяют персоналу судить о правильности ведения режима по наглядной картине границ устойчивой работы генератора при заданном напряжении на зажимах. Диаграммы p, q определяют области допустимых режимов и области рабочих режимов. Номинальным значениям напряжения, токов статора и возбуждения машины из уравнений установившегося режима (для p и q) турбогенератора соответствуют уравнения (в о.е.):

$$\left(q + \frac{u^2}{x_c} \right) + p^2 = \left(\frac{ue_0}{x_c} \right), \quad (iu^2) = p^2 + q^2$$

Эти уравнения являются окружностями, первая из которых, с центром в начале координат, определяет геометрическое место точек, соответствующих номинальному току статора, а вторая – геометрическое место точек, соответствующих номинальной ЭДС (току возбуждения) машины. Общее множество, образованное этими окружностями, представляет собой совокупность режимов, в которых может работать данная синхронная машина.

На базе уравнений электрического движения обобщенной машины:

$$\begin{pmatrix} u_a^s \\ u_b^s \\ u_a^r \\ u_b^r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R^s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R^s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R^r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R^r \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_a^s \\ i_b^s \\ i_a^r \\ i_b^r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L_1^s & 0 & L_1^{sr} \cos n\varphi & -L_1^{sr} \sin n\varphi \\ 0 & L_1^s & L_1^{sr} \sin n\varphi & L_1^{sr} \cos n\varphi \\ L_1^{sr} \cos n\varphi & L_1^{sr} \sin n\varphi & L_1^r & 0 \\ -L_1^{sr} \sin n\varphi & L_1^{sr} \cos n\varphi & 0 & L_1^r \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_a^s \\ i_b^s \\ i_a^r \\ i_b^r \end{pmatrix},$$

где $u_a^s, u_b^s, u_a^r, u_b^r$ - напряжения на зажимах обмоток по продольной и поперечной осям статора и ротора, n - число периодов магнитного поля в зазоре, ω_m - угловая частота вращения поля, t - время, δ - длина зазора p - число пар полюсов, R^s, R^r - активные сопротивления статора и ротора, L_1^{sr} - взаимная индуктивность статора и ротора, L_1^s, L_1^r - индуктивности статора и ротора, $i_a^s, i_b^s, i_a^r, i_b^r$ - токи по продольной и поперечной осям статора и ротора, был создан алгоритм расчета угловых и v-образных характеристик, а также построена P-Q диаграмма для синхронной машины с продольно-поперечным возбуждением.

Алгоритм расчета угловой характеристики, построения P-Q диаграммы:

1. Задаются параметры исследуемой машины: сопротивления, индуктивности, частоту вращения и т.д.
2. Задаются напряжения и токи возбуждения, углы нагрузки.
3. С помощью операторов Matlab, решается система, вышеприведенных, уравнений.
4. Находятся зависимости тока и напряжения от времени. По этим зависимостям определяется угол фазового сдвига тока и напряжения, это нам потребуется для проверки результатов расчёта.
5. Рассчитывается длина кривых тока и напряжения в точках и во времени, тут же рассчитывается длина одного периода, в установленном режиме, в точках и во времени.

6. Находится полная мгновенная мощность на периоде и на $\frac{1}{4}$ периода.
7. Рассчитывается интеграл от полной мгновенной мощности и делится его на период, получаем активную мощность.
8. Из формулы $u_i = P(1 - \cos 2\omega t) - Q\sin 2\omega t$ выражаем $Q\sin 2\omega t$ и делим на четверть периода, получаем реактивную мощность.

Для проверки результатов расчёта, находим \cos и \sin угла между током и напряжением и по формуле $u_i = P(1 - \cos 2\omega t) - Q\sin 2\omega t$ находим активную и реактивную мощности. Полученные результаты сходятся с погрешностью менее 3 %.

*С.Г. Романов, маг.; рук. А.И. Тихонов, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

БИБЛИОТЕКА ФУНКЦИЙ ДЛЯ ПОДСИСТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Цель работы состоит в разработке математического обеспечения подсистем поиска оптимального решения, входящих в состав систем автоматизированного проектирования силовых трансформаторов.

Актуальность темы подтверждается ростом потребляемых мощностей, характерным для России, что приводит к необходимости увеличения производства силовых трансформаторов. Это повышает требования к надежности и экономичности эксплуатации производимых трансформаторов. Поэтому оптимальность проекта является одним из главных условий технического задания на проектирование. Таким образом, наличие подсистемы поиска оптимального решения (ППОР) является необходимым для современных САПР силовых трансформаторов. Для разработки ППОР требуется математический аппарат, способный решать оптимизационные задачи в условиях многокритериальности, многоэкстремальности и дискретности целевой функции.

При разработке современных САПР в настоящее время используются автономные математические пакеты, каждый из которых имеет свои специфические особенности. В частности, для формирования технического задания на проектирование и формирование пояснительной записки в настоящее время используется, главным образом, широкодоступный пакет MSExcel, предоставляющий разработчику приложений удобный табличный интерфейс, средства визуальной обработки численной информации и средства управления функционалом систе-

мы, который может создаваться с использованием встроенной системы программирования Visul Basic for Excel.

В то же время математический функционал Excel недостаточен для создания наукоемких приложений, требующих мощной численной математики, характерной для САПР. Поэтому было решено совместить функционал Excel с функционалом математического пакета MatLab посредством интерфейса ExlLink.

Отдельные подсистемы, в частности подсистема оптимизации, могут быть реализованы с использованием пакета MatLab, специализированного на выполнение алгоритмов численной математики. Так, для решения задач оптимизации пакет MatLab содержит две библиотеки:

- Optimization toolbox – библиотека функций поиска решений с использованием математического аппарата нелинейного программирования;
- Global Optimization Toolbox – предоставляет методы поиска решения в случае множественных, дискретных и даже стохастический целевых функций.

Использование первой библиотеки позволяет достаточно быстро находить локальный экстремум непрерывно дифференцируемой целевой функции нескольких переменных из заданной стартовой точки. При этом используется ряд методов оптимизации, из которых наиболее мощным и известным является квазиградиентный метод переменной метрики Дэвидона-Флетчера-Пауэлла.

Вторая библиотека включает в себя ряд методов, позволяющих находить оптимальное решение в случаях, когда вид целевой функции не соответствует требованиям библиотеки Optimization toolbox.

Библиотека Global Optimization Toolbox предоставляет следующие возможности:

- интерактивные инструменты для формализации и решения задач оптимизации и мониторинга прогресса решения;
- глобальный поиск с помощью многозаходных решателей для нахождения одного или нескольких глобальных оптимумов;
- поиск оптимального решения с помощью генетических алгоритмов с учетом линейных, нелинейных и связанных функциональных ограничений;
- многоцелевой генетический алгоритм с идентификацией по Парето множества решений;
- имитационный инструмент, реализующий метод поиска оптимального решения, имитирующий процесс термического отжига материалов;

- поддержка параллельных вычислений при реализации поисковых решателей;
- поддержка пользовательских типов данных в генетическом алгоритме, многоцелевом генетическом алгоритме и имитационном решателе.

К числу методов поиска оптимального решения, реализуемых библиотекой Global Optimization Toolbox, относятся:

- Прямой поиск (Direct search) – является методом решения задач оптимизации, которые не требуют никакой информации о градиенте целевой функции. В отличие от традиционных методов оптимизации, которые используют информацию о градиента или высших производных для поиска оптимальной точки, прямой алгоритм поиска ищет набор точек вокруг текущей точки и выбирает из него то, в котором значение целевой функции ниже, чем значение в текущей точке.
- Генетические алгоритмы – это более сложный вариант прямого поиска, основанный на биологических принципах естественного отбора и эволюции. Генетический алгоритм повторяет определенное количество раз процедуру модификации популяции (набора решений), добиваясь получения новых наборов решений. При этом на каждом шаге из популяции выбираются «родительские особи», то есть решения, совместная модификация которых (скрещивание) и приводит к формированию новой особи в следующем поколении. Генетический алгоритм использует три вида правил, на основе которых формируется новое поколение: правила отбора, скрещивания и мутации. Мутация позволяет путем внесения изменений в новое поколение избежать попадания в локальные минимумы оптимизируемой функции.
- Имитационный алгоритм – это метод решения задач оптимизации, основанный на имитации физического процесса нагрева материала, а затем медленного снижения температуры, минимизируя таким образом энергию системы. В каждой итерации алгоритма новая точка генерируется случайным образом. Расстояние от новой точки из текущей точки ищется по распределению вероятности пропорционально температуре. Алгоритм позволяет избежать ловушек в локальных минимумах.

В настоящее время ведется работа по систематизации всех алгоритмов и формирования библиотеки функций для решения задач оптимизации силовых трансформаторов.

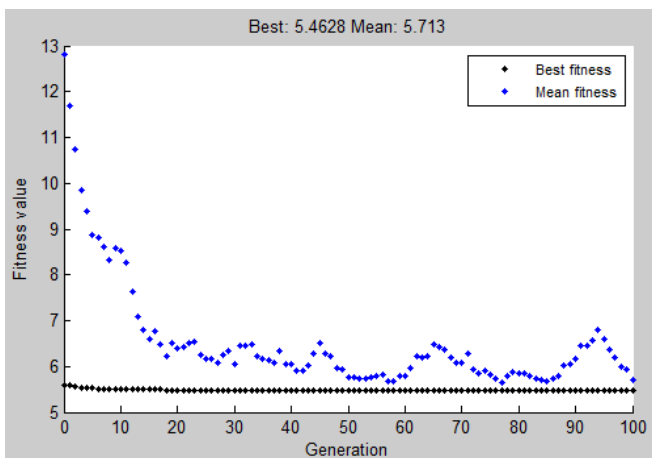


Рис. 1. Тренд оптимизации трансформатора с использованием библиотеки генетических алгоритмов пакета MatLab

В частности, исследованы и реализованы в САПР трансформаторов возможности поискового метода с использованием генетических алгоритмов. Так, на рис. 1 приведен тренд поиска оптимального решения трансформатора ТМГ-1000-10/0,4, осуществленный средствами библиотеки генетических алгоритмов MatLab. В результате получен оптимальный вариант, дающий экономию по себестоимости по сравнению с исходным вариантом порядка 20000 руб.

SAПP TPANС_ТМГ_1000_Оптм - Microsoft Excel

	Помощь	Имя	Заданное	<< Рекомендация
1. Техническое задание				
4	Способ охлаждения	Cooling	Масляный	
5	Полная мощность трансформатора	S	1000000	ВА
6	Номинальное линейное напряжение ОВН	UH	10000	В
7	Номинальное линейное напряжение ОНН	UL	400	В
8	Число ступеней регулирования напряжения	Nstreg	5	
9	Шаг ступени регулирования	Sstreg	2,5	%
10	Способ регулирования напряжения	Reg	ПВВ	
12	Тип обмотки НН	TypeWL	Цилиндрическая из ленты	
13	Схема соединения на стороне НН	ConfectionL	Звезда	
14	Тип обмотки ВН	TypeWH	Цилиндр. из прям. провода	
15	Схема соединения на стороне ВН	ConfectionH	Треугольник	
16	Группа соединения	Group	11	
18	Число фаз	m	3	
19	Частота	f	50	Гц
20	Ток холостого хода	i0	1	%
21	Напряжение короткого замыкания	uk	5,5	%
22	Потери холостого хода	P0	1600	Вт
23	Потери короткого замыкания	Pk	10800	Вт
Материалы и их характеристики				

Проект / Оптимизация / КЭМ / АОптим / Модель / Приложение / Опт

Укажите ячейку и нажмите ВВОД или выберите "Вставить"

Рис. 2. Внешний вид САПР силовых трансформаторов в среде Excel

На рис. 1 приведен лист Excel, на котором реализована подсистема проектного расчета САПР силовых трансформаторов. Она имеет форму пояснительной записки. Поверочный расчет осуществляется в среде MatLab в пакетном режиме. Результаты расчета возвращаются в ячейки пояснительной записки в Excel. Оптимизация также реализована средствами MatLab и инициируется программными средствами Excel. Результаты оптимизации помещаются на лист «Оптимизация».

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

РАСЧЕТ УСИЛИЙ В ПРОВОДНИКАХ ОБМОТКИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

В условиях эксплуатации электротехнических устройств может произойти короткое замыкание (КЗ), которое может быть, как внешним, так и внутренним. При этом в нем возникает переходный процесс, сопровождаемый большими токами, которые могут быть причиной его повреждения, поскольку на обмотки оказывают воздействие значительные электромагнитные силы и происходит их интенсивный нагрев. В современных электрических системах и сетях применяются быстродействующие релейные защиты и поэтому поврежденные участки сетей и оборудование выключаются в течение десятых долей секунды после начала КЗ. В связи с этим при внешних КЗ обмотки не успевают нагреться до опасной температуры. При внутренних КЗ быстрого отключения, как правило, не происходит и замкнутые витки обмотки настолько нагреваются, что их проводники могут расплавиться. При этом имеет место серьезное повреждение электротехнического устройства.

Более подробно рассмотрим внешнее короткое замыкание трансформатора, представляющее опасность для обмоток с точки зрения их исходной геометрической целостности. Предположим, что замыкание произошло на вторичных зажимах трансформатора в результате каких-то неисправностей в электрических сетях: механическое повреждение изоляции, ошибочные действия персонала и т.д.

В этом случае величину токов короткого замыкания можно определить согласно инженерной методики расчета установившегося тока короткого замыкания базируется на формуле, приведенной ГОСТ 11677-85 [1]:

$$I_{k,y} = \frac{100I_{ном}}{u_k \left(1 + \frac{100S}{u_k S_k}\right)}, \quad (1)$$

где $I_{ном}$ – номинальный ток соответствующей обмотки, А; $S_{ном}$ – номинальная мощность трансформатора, МВА; S_k – мощность короткого замыкания электрической сети; u_k – напряжение короткого замыкания трансформатора, %.

Ударный ток короткого замыкания с учетом максимально возможной апериодической составляющей, определяется по формуле

$$i_{\max} = \sqrt{2} \cdot I_{k,y} \left(1 + e^{-\pi u_a / u_p} \right), \quad (2)$$

где u_a и u_p – активная и реактивная составляющая напряжения короткого замыкания трансформатора.

Так же величину ударных токов можно определить, воспользовавшись моделью динамических режимов работы трансформатора разработанной в ИГЭУ, которая позволяет моделировать физические процессы в технических устройствах на основе точных численных методов расчета полей и цепей.

Динамическая модель трансформатора, представляет собой систему дифференциальных уравнений, которая для схемы соединения обмоток Y/Y имеет вид [2]

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{12} = i_1 r_1 + \frac{d\Psi_1}{dt} - i_2 r_2 - \frac{d\Psi_2}{dt}, \\ u_{23} = i_2 r_2 + \frac{d\Psi_2}{dt} - i_3 r_3 - \frac{d\Psi_3}{dt}, \\ 0 = i_4 (r_4 + R_{n4}) + \frac{d\Psi_4}{dt} + L_{n4} \frac{di_4}{dt} - i_5 (r_5 + R_{n5}) - \frac{d\Psi_5}{dt} - L_{n5} \frac{di_5}{dt}, \\ 0 = i_5 (r_5 + R_{n5}) + \frac{d\Psi_5}{dt} + L_{n5} \frac{di_5}{dt} - i_6 (r_6 + R_{n6}) - \frac{d\Psi_6}{dt} - L_{n6} \frac{di_6}{dt}, \\ i_1 + i_2 + i_3 = 0, \\ i_4 + i_5 + i_6 = 0; \end{array} \right. \quad (3)$$

здесь u_{jk} – линейное напряжение между фазами с индексами k и j ; i – ток обмотки; Ψ – потокосцепление обмотки; r – сопротивление обмотки; R_n и L_n – активное и индуктивное сопротивления нагрузки; обмотки с индексами 1, 2, 3 являются обмотками ВН, а обмотки с индексами 4, 5, 6 – обмотками НН. На рис. 1 приведены кривые расчета трехфазного короткого замыкания трансформатора ТМ-1600/10.

Для выбранного момента времени, в котором величина токов максимальна, определяем их значения. Далее воспользовавшись библиотекой конечно-элементного моделирования EMLib можно построить картину электромагнитного поля в режиме короткого замыкания. Результаты расчета силового трансформатора ТМ-1600/10 приведены на рис. 2.

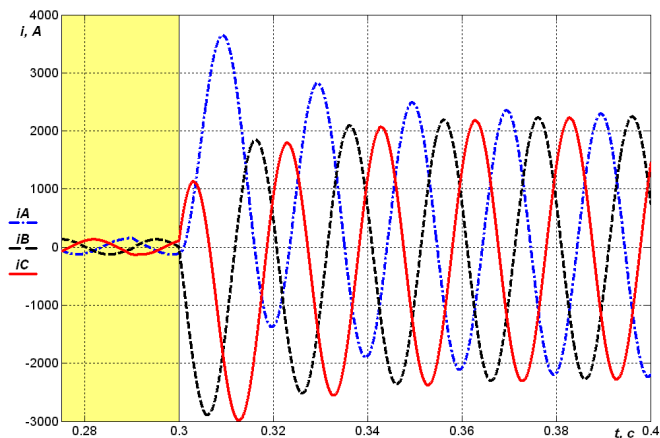


Рис. 1. Результаты расчета трехфазного короткого силового трансформатора ТМ-1600/10

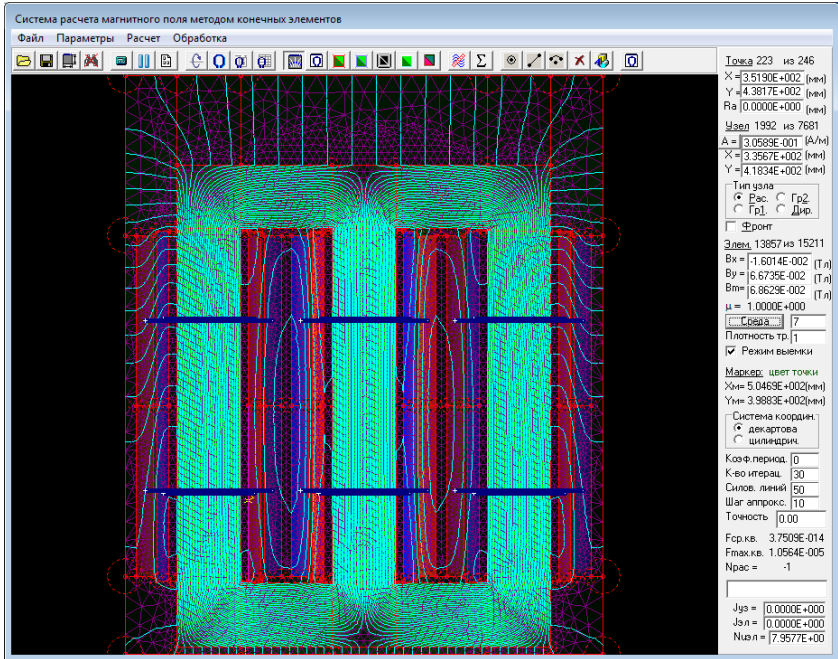


Рис. 2. Результаты расчета магнитного поля с использованием конечно – элементной модели EMLib

По результатам расчета магнитного поля можно определить среднее распределение магнитной индукции по высоте обмотки силового трансформатора. На рис.3 представлены результаты определения среднего значения индукции.

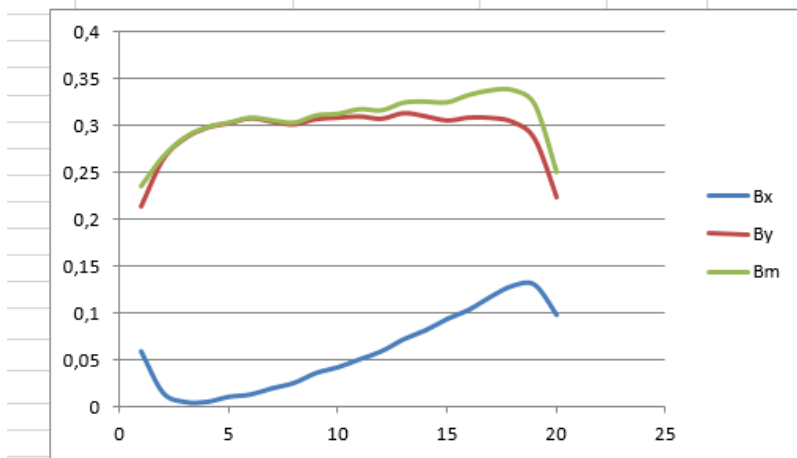


Рис. 3. Среднее значение индукции в обмотке ВН распределенное по высоте

В проводниках, в которых наводится наибольшая индукция, будет возникать наибольшие усилия, которые будут деформировать как сам проводник там и близлежащие проводники, тем самым нанося повреждения изоляции. Серьезные повреждения изоляции приводят, как правило, к ее пробое и выходу из работы электротехнического устройства и как следствие дорогостоящему ремонту.

Для полученных средних значений индукции можно определить величину сил, возникающих в проводниках. Для этого необходимо воспользоваться законом Ампера.

Из графика распределения среднего значения индукции видно, что она неравномерно распределяется по высоте обмотки, следовательно, и усилия будут распределяться тоже неравномерно. Для наглядного представления и определения последствий короткого замыкания, как поведут себя проводники под действием радиальных и осевых усилий в обмотках, а также определения величины деформации как проводников, так и обмотки в целом можно воспользоваться программным комплексом SolidWorks и смоделировать поведение проводников и обмотки под воздействием усилий. В качестве примера была рассмотрена обмотка ВН трансформатора и определена деформация проводников

от действующих на них усилий. Результаты моделирования представлены на рис. 4.

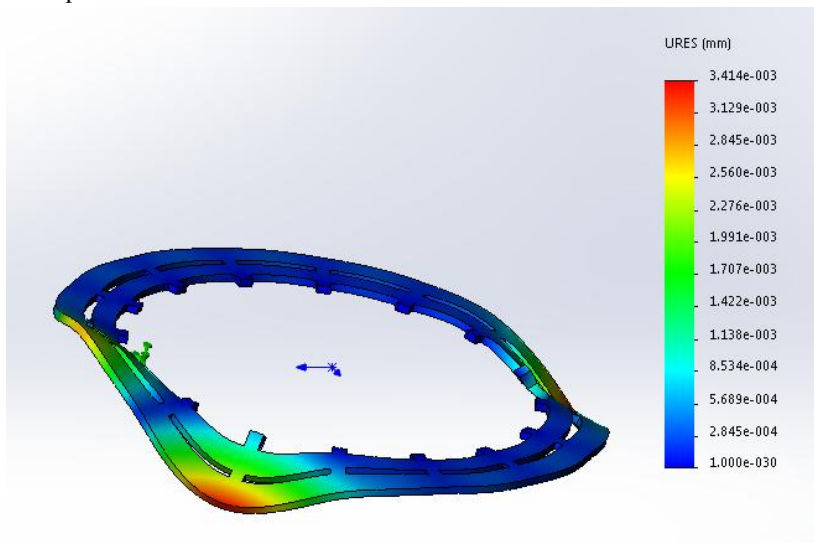


Рис. 4. Результаты моделирования усилий действующих на проводники силового трансформатора обмотки ВН

Библиографический список

1. **Тихонов А.И.,** Лапин А.Н. Проектирование силовых трансформаторов: Учеб. пособие / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2012. – 160 с.
2. **Климов Д.А.,** Попов Г.В., Тихонов А.И., Методы автоматизированного моделирования динамических режимов трансформаторов / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2006. – 100 с.

Кроме того, была разработана параметрическая графическая 3D-модель в Solid Works как сухих, так и масляных трансформаторов (рис. 2).

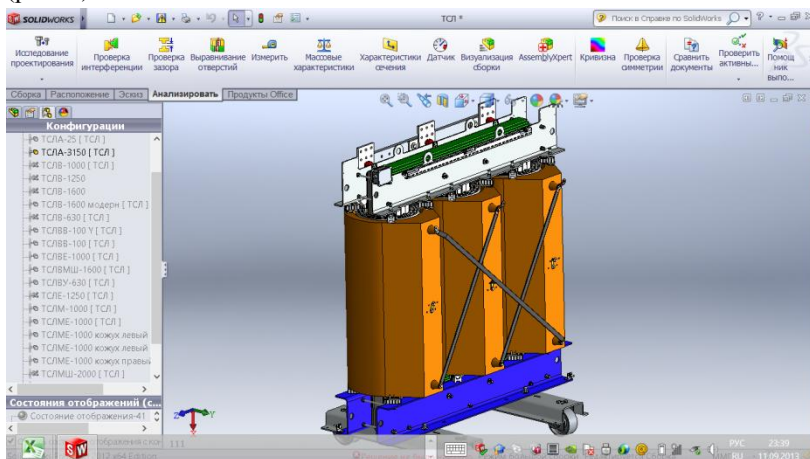


Рис. 2. Параметрическая 3D-модель трансформатора ТСЛ

3D-модель автоматически перестраивается по размерам готового проекта. Для этого была организована взаимосвязь между расчетной запиской в Excel и пакетом SolidWorks. Все необходимые размеры выбираются из соответствующих ячеек расчетной записки и передаются в таблицы SolidWorks, организованные в формате Excel (рис. 3). Эти размеры проверяются при сборке различных деталей.

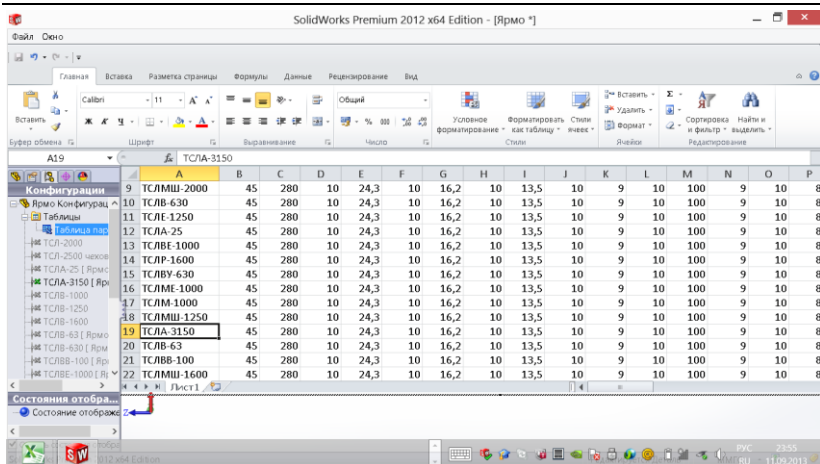


Рис. 3. Организация добавления данных из расчетной записки в параметрическую таблицу

Комплект чертежей спроектированного трансформатора генерируется автоматически. Для этого используется механизм стандартных шаблонов и конфигурирования модели в SolidWorks.

На рис. 4 представлен один из чертежей трансформатора ТСЛ-3150. Доступ к любой из модели можно получить по имени проекта из списка проектов и их модификаций.

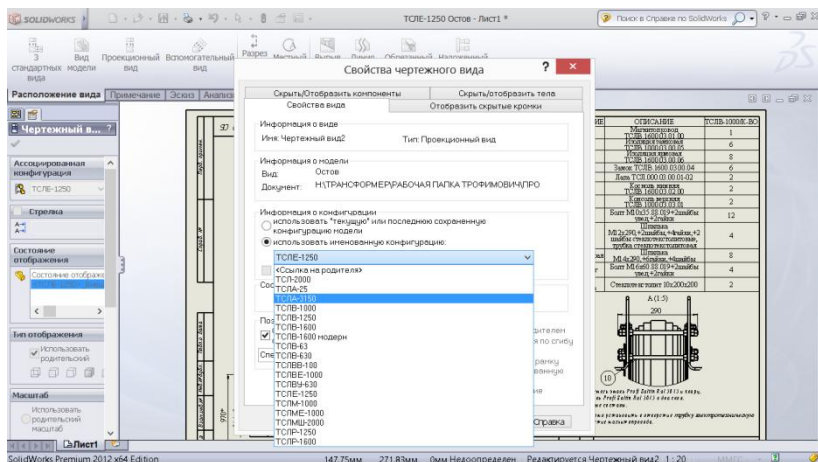


Рис. 4. Организация создания чертежей из параметрической модели

Создание подсистемы параметрической генерации чертежей трансформатора привело к значительному прогрессу при проектировании трансформаторов, а именно:

- каждый отдельный проект подвергся визуализации;
- значительно сокращается время при проектировании трансформатора (с 30-40 рабочих дней до 5-7);
- возможность применения отработанных конструктивных и технологических решений;
- быстрый доступ к базе проектов;
- минимизация ошибок при изготовлении деталей на станках ЧПУ;
- при модернизации и доработке отдельных узлов трудоёмкость сведена к минимуму;
- наглядная возможность унификации различных узлов и деталей.

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

УЧЕТ НЕЛИНЕЙНОСТИ В ПРОЦЕССАХ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ЦЕПНЫХ МОДЕЛЯХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ СУХОГО ТИПА С ОБМОТКАМИ ИЗ ЛЕНТЫ

Процессы теплопередачи в силовых трансформаторах являются наиболее важными для исследования, т.к. именно тепловой режим в основном определяет срок службы силового трансформатора. В качестве расчетных моделей тепловых процессов предлагаются разветвленные электрические схемы замещения (РЭСЗ) [3]. Для автоматизации процесса построения РЭСЗ предлагается использование параметрического генератора библиотеки ECLib [2]. Расчет тепловых сопротивлений теплоотдачи и теплопроводности воздуха с учетом конвекции осложняется тем, что основные характеристики теплового режима трансформатора являются функциями температуры. К таким характеристикам относятся:

- теплопроводность твердых материалов λ (проводников, твердой изоляции, металлоконструкций);
- теплопроводность охлаждающей среды λ_f ;
- динамическая вязкость охлаждающей среды μ ;
- плотность ρ охлаждающей среды.

Теплопроводность твердых материалов

Зависимость теплопроводности от температуры выражается следующей формулой:

$$\lambda = \lambda_0 (1 + \beta(\Delta T)) \quad (1)$$

где λ_0 – теплопроводность материала при температуре T_0 ; β – коэффициент объемного расширения, 1/К; ΔT – разница температур, К;

Теплопроводность охлаждающей среды (воздуха)

Коэффициент теплопроводности согласно молекулярно-кинетической теории определяется формулой:

$$\lambda_f = \frac{ik}{3\pi^{\frac{3}{2}}d^2} \sqrt{\frac{RT}{M}} \quad (2)$$

где i – сумма поступательных и вращательных степеней свободы молекул; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; $M = 29$ г/моль – молярная масса воздуха; T – абсолютная температура, К; d – эффе-

тивный диаметр молекул, м; $R = 8,314$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная.

Динамическая вязкость

В отличие от жидкостей, динамическая вязкость газов увеличивается с увеличением температуры (у жидкостей она уменьшается при увеличении температуры). Для определения динамической вязкости газов может быть использована формула Сазерленда [4]:

$$\mu = \mu_0 \frac{T_0 + C}{T + C} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (3)$$

где μ – динамическая вязкость при заданной температуре T , (Па·с); μ_0 – контрольная вязкость при некоторой контрольной температуре T_0 , (Па·с); T – заданная температура, К; T_0 – контрольная температура, К; C – постоянная Сазерленда для того газа, вязкость которого требуется определить.

Формулу допускается применять для температур в диапазоне $0 < T < 555$ К и при давлениях менее 3,45 МПа с ошибкой менее 10 %, обусловленной зависимостью вязкости от давления. Для воздуха постоянная Сазерленда и контрольная вязкость при контрольной температуре соответственно равны: $C = 120$ К; $T_0 = 291,15$ К; $\mu_0 = 18,27$ мкПа·с.

Удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении

В диапазоне температур 293,15 К – 373,15 К (20 – 100 °С) удельная теплоемкость сухого воздуха меняется от 1,005 до 1,009 кДж/(кг·К); т.е. в пределах 0,4 %. Поэтому можно принять теплоемкость величиной, не зависящей от температуры.

Плотность воздуха

Плотность сухого воздуха может быть вычислена с использованием уравнения Менделеева-Клапейрона для идеального газа при заданных температуре и давлении:

$$\rho = \frac{p \cdot M}{R \cdot T} \quad (4)$$

Для расчета параметров цепной модели используются коэффициенты теплоотдачи:

$$\alpha = Nu \frac{\lambda_f}{l_0} \quad (5)$$

где Nu – безразмерный коэффициент Нуссельта, l_0 – характеристический размер, м.

Число Нуссельта является функцией чисел Грасгофа и Прандтля:

$$Nu = C (Gr Pr)^m, \quad (6)$$

$$Gr = \frac{gl_0^3}{\nu^2} \beta \Delta T, \quad (7)$$

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda_f}. \quad (8)$$

Кинематическая вязкость ν связана с динамической вязкостью следующим соотношением:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}. \quad (9)$$

Критерий Рэлея Ra связывает числа Грасгофа и Прандтля:

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{gl_0^3}{\mu(T)} \rho(T)^2 \beta \Delta T \cdot \frac{c_p}{\lambda(T)}. \quad (10)$$

Таким образом, общее выражение для коэффициента теплоотдачи обмоток сухого трансформатора примет вид:

$$\alpha = Nu \frac{\lambda_f}{l_0} = C \left(\frac{gl_0^3}{\mu(T)} \rho(T)^2 \beta \Delta T \cdot \frac{c_p}{\lambda(T)} \right)^m \frac{\lambda_f}{l_0}, \quad (11)$$

$$\alpha = Nu \frac{\lambda_f}{l_0} = C_0 \left(\frac{gl_0^3}{\mu_0 \frac{T_0 + C}{T + C} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{RT}{M} \right)^{\frac{5}{2}}} \frac{p^2}{\beta(T - T_0)} \cdot \frac{c_p}{\frac{ik}{3\pi^{\frac{3}{2}} d^2}} \right)^m \cdot \frac{\lambda_f}{l_0} \quad (12)$$

Расчет α ведется итерационным методом с использованием коэффициента релаксации. Расчет тепловых сопротивлений приведен в [3].

Коэффициенты C_0 и m определяются из эмпирических данных, полученных в результате вычислительного эксперимента в полевой установке средствами Flow simulation (рис. 1).

В таблице 1 приведены результаты расчета коэффициента теплоотдачи с поверхности обмоток сухого трансформатора.

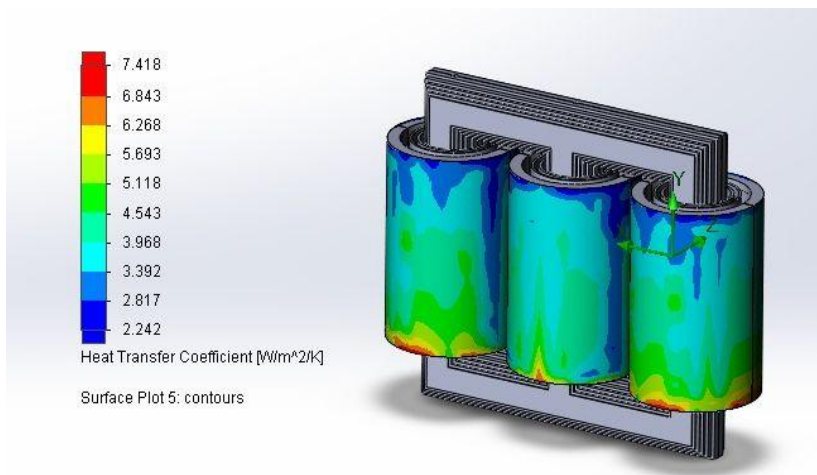


Рис.1. Пример расчета коэффициента теплоотдачи с обмоток ТСЛ-400/10 во Flow simulation

Таблица 1. Результаты расчета среднего коэффициента теплоотдачи (КТО) по высоте с наружной поверхности обмоток сухого трансформатора с литой изоляцией

	КТО, рассчитанный по формуле (12), Вт/м ² К		КТО, полученный в результате решения уравнения Навье-Стокса, Вт/м ² К	
	<i>ОВН</i>	<i>ОНН</i>	<i>ОВН</i>	<i>ОНН</i>
ТСЛ-400/10	4,355	6,216	4,033	5,908
ТСЛ-630/10	3,446	5,217	3,264	4,899
ТСЛ-1000/10	3,124	4,271	3,001	4,371
ТСЛ-1600/20	3,582	3,007	3,292	2,864

Библиографический список

1. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип. М., «Энергия», 1977. – 344 с.
2. Стулов А.В., Корнев И.А., Тихонов А.И. Параметрическая генерация и расчет электрической схемы замещения тепловых процессов в обмотках из ленты сухих трансформаторов и токоограничивающих реакторов в стационарных режимах/ - "Вестник ИГЭУ", 2013, Вып. 6. – с. 47-51.
3. Стулов А.В., Тихонов А.И. Тепловой расчет обмоток сухих трансформаторов и токоограничивающих реакторов с использованием электрических схем замещения/Вестник ИГЭУ, вып.6. – Иваново, 2012 – с.40-43.
4. Alexander J. Smits, Jean-Paul Dussauge Turbulent shear layers in supersonic flow, Birkhäuser, 2006, ISBN 0-387-26140-0, p. 46.

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

ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ С СЕРДЕЧНИКОМ ИЗ АМОРФНОЙ СТАЛИ

Современное состояние энергетики характеризуется неизбежным ростом потребляемых мощностей. При этом повышенные требования предъявляются к силовым трансформаторам, суммарная мощность которых в 5-6 раз превышает генераторную мощность. Одним из перспективных направлений в области энергосбережения является использование в распределительных сетях трансформаторов нового типа с сердечниками из аморфной стали. По мере удаления от электростанции единичные мощности трансформаторов уменьшаются, а удельный расход материалов на изготовление трансформатора, цена 1 кВт и потери, отнесенные к единице мощности, возрастают. Поэтому значительная часть материалов, расходуемых на все силовые трансформаторы, вкладывается в трансформаторы с более высоким напряжением 35 и 10 кВ. В этих же трансформаторах возникает основная масса потерь энергии, а эти потери энергии в свою очередь имеют большую стоимость.

В трансформаторах классического исполнения снижение потерь холостого хода достигается не только за счет использования новых марок холоднокатаной электротехнической стали, но и за счет разработки новых схем шихтовки магнитопровода. В частности, большую популярность приобретает схема шихтовки Step-Lap, позволяющая существенно уменьшить зазоры в стыках. Внедрение подобных технологий требует использования высокоточных роботизированных линий поперечного раскроя стали.

В последнее время все более пристальное внимание уделяется проблеме изготовления магнитопроводов силовых трансформаторов из аморфной стали. Это позволяет снизить потери холостого хода трансформатора в четыре и более раз. Однако технологический процесс изготовления трансформатора существенно изменяется по сравнению с

традиционным производством, но требования к технологии производства и сборке остаются прежними, как и для улучшенной электротехнической стали. Уменьшение потерь короткого замыкания достигается главным образом понижением плотности тока за счет увеличения массы металла в обмотках. Снижение потерь в трансформаторах из аморфных сталей по сравнению с трансформаторами из электротехнической стали (По данным Metglas Inc.) приведены в табл. 1.

Таблица 1. Сопоставление потерь холостого хода в трансформаторах разной конструкции

Мощность трансформатора (3 фазы 11кВ)	Основные потери – использование трансформаторной стали SiFe	Основные потери – с использованием аморфной стали	Сокращение потерь, %
25 кВА	100	28	72%
40 кВА	140	39	72%
63 кВА	180	50	72%
100 кВА	260	66	75%
250 кВА	520	150	71%
630 кВА	1,000	280	77%
1.000 кВА	1.700	350	80%
1,600 кВА	2,100	490	77%
2,500 кВА	2,700	550	80%

К техническим преимуществам трансформаторов с магнитопроводом из аморфной стали можно отнести следующие:

- низкие потери холостого хода,
- высокая магнитная проницаемость,
- прямоугольная форма кривой намагничивания,
- высокая коррозионная стойкость,
- отсутствие межлистовой изоляции.

Практически все электромагнитные, механические и потребительские свойства аморфной стали превосходят аналогичные свойства анизотропной электротехнической стали, за исключением индукции, составляющей 1,5 Тл и коэффициента заполнения. Производство трансформаторов с сердечником из аморфной стали в России пока еще не

налажено, однако многие заводы в скором времени планируют перейти на выпуск таких устройств

Сокращение расхода изоляционных материалов, трансформаторного масла и металла, употребляемого на изготовление баков и систем охлаждения трансформаторов, достигается путем снижения испытательных напряжений и уменьшения изоляционных расстояний при улучшении изоляционных конструкций на основе совершенствования технологии обработки изоляции и применения новых средств защиты трансформаторов от перенапряжений.

Большой эффект в деле экономии можно наблюдать исходя из годовых затрат Z_s . Для учебных целей расчетная формула несколько упрощена:

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

где $Z_{mp} = 0,185$ X оптовую цену – стоимость трансформатора в год; P_x – потери холостого хода, кВт; P_k – потери короткого замыкания, кВт; Q_p – реактивная мощность, квар.

Принимаются: $Z_x = 5$ руб./кВт – стоимость 1 кВт потерь холостого хода в год; $Z_k = 4$ руб./кВт – стоимость 1 кВт потерь короткого замыкания в год.

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

Реактивная мощность

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

где S – номинальная мощность, ква; I_o – ток холостого хода, %; U_p – реактивная составляющая напряжения короткого замыкания, %; 8760 – число часов в году; 8700 – число часов, в течение которых имеют место потери холостого хода в году; 4000 – то же, потери короткого замыкания.

Таким образом, расчетная формула годовых затрат имеет вид

$$Z_r = 0,185 \times \text{оптовая цена} + 5P_x + 4P_k + 1,5 \frac{S}{100} \left(I_o \frac{8760}{8760} + U_p \frac{4000}{8760} \right) \text{руб./год.}$$

При выборе наилучшего варианта проектируемого трансформатора наиболее экономичным будет тот, у которого значение Z_s будет наименьшим. Средняя цена трансформатора с сердечником из аморфной

стали с заданными параметрами составляет 320 000 рублей, а трансформатора классического исполнения 280 000 рублей.

Для трансформатора АТМГ:

$$Z_r = 0,185 \times 320000 + 5 \cdot 62 + 4 \cdot 1210 + 1,5 \cdot \frac{63}{100} \left(0,32 \cdot \frac{8760}{8760} + 3,5 \cdot \frac{4000}{8760} \right) \text{руб./год.}$$

$$Z_2 = 64350 \text{ руб./год.}$$

Для трансформатора ТМГ:

$$Z_r = 0,185 \times 280000 + 5 \cdot 200 + 4 \cdot 1280 + 1,5 \cdot \frac{63}{100} \left(1,0 \cdot \frac{8760}{8760} + 3,5 \cdot \frac{4000}{8760} \right) \text{руб./год.}$$

$$Z_2 = 57922 \text{ руб./год.}$$

Удорожание годовых затрат исходя из данного расчета определяется более высокой оптовой ценой начального нового изделия но годовая экономия очевидна за счет суммарных потерь энергии за год в трансформаторе расчет параметров которых приведен в табл. 2.

Таблица 2. Основные расчетные параметры трансформатора с аморфной сталью (АТМГ) и трансформатора классического исполнения (ТМГ)

ПАРАМЕТРЫ	АТМГ	ТМГ
Номинальная мощность, Sn(КВа)	63	63
Потери короткого замыкания,(Вт)	1210	1280
Потери холостого хода,(Вт)	62	200
Номинальный ток холостого хода ,%	0,32	1,0
Коэффициент заполнения, Кз(%)	0,85	0,95
Высота обм. высшего напряжения,(м)	0,021	0,020
Масса обмотки ВН,(кг)	11,55	11,37
Масса обмотки НН,(кг)	17,60	20,04
Масса отводов,(кг)	0,19/0,09	0,19/0,03
Масса магнитопровода,(кг)	225,6	207,6
Индукция в магнитопроводе,(Тл)	1,32	1,58
Ширина бака,(м)	0,332	0,349
Длина бака,(м)	1,092	0,910
Глубина бака,(м)	0,611	0,246
Объём масла в баке,(м³)	0,219	0,081

Период окупаемости трансформатора по предварительным расчетным данным 3,5 года, принимая общую расчетную массу $m = 260$ кг АТМГ, и ТМГ $m = 240$ кг.

Библиографический список

1. **Еремин И. В., Попов Г. В., Тихонов А. И.** К вопросу о проектировании распределительных трансформаторов из аморфной стали // 2-я Всероссийская науч.-практич. конф. «Новые технологии в промышленности, науке и образовании» / под общей ред. И.П. Белова. – Оренбург: Изд-во ООО «Золотой кардинал», 2011. - с. 111-112.
2. **Исламов С.В., Еремин И.В., Тихонов А.И.** Особенности проектирования трансформаторов с сердечником из аморфной стали: Материалы региональной науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых «Энергия - 2012». Том 4 / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2012. - с. 75 - 78.
3. **Тихонов А.И., Лапин А.Н.** Проектирование силовых трансформаторов до: Учеб. пособие / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2012. – 132 с.

СЕКЦИЯ 22

**МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ И
МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ ИНФОРМАЦИОННО-
УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ**

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

Секретарь – асс. **Аполонский В.В.**

*А.Р. Галиев, студ.; рук. В.Р. Иванова, к.т.н.
(КГЭУ, г.Казань)*

**ИНТЕГРИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ ОСВЕЩЕНИЕМ - ГЛАВНЫЙ
КРИТЕРИЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ**

Системы управления освещением приобретают всё большее значение и популярность в светотехнической практике. Связано это как с возрастающими требованиями к энергоэффективности осветительных установок, так и с возможностью удовлетворения требований конечных пользователей к комфортности освещения.

На сегодняшний день имеется огромное количество регулируемых осветительных приборов и целый ряд систем управления освещением, которые специально созданы для задач управления искусственным освещением и контролем поступления естественного света с целью создания комфортной для зрения световой среды и энергосбережения [1, 2].

Регулируемые осветительные приборы могут быть непосредственно управляющими либо вспомогательными датчиками или приборами, получая информацию от которых срабатывают первые (блок управления освещением, контроллеры, датчики освещения/присутствия/движения, дистанционно управляемые выключатели, радиоуправляемые выключатели, GSM-управляемые выключатели, фотоэлементы, таймеры и реле времени и др.) [3].

В свою очередь на основе регулируемых осветительных приборов созданы и применяются разработанные системы управления освещением. Таковыми могут быть следующие:

- система управления освещением на основе использования датчиков освещенности и присутствия;

- система управления, представляющая собой сенсорную панель с интуитивной структурой управления, которая дает возможность получать информацию от датчиков движения и освещенности в автоматическом режиме;
- локальные системы освещения, которые не имеют функции интегрирования в систему управления организацией.

Существуют и другие типы систем управления, однако, несмотря на многие преимущества их использования, имеются недостатки. Главным недостатком является то, что рассматриваемые регулируемые осветительные приборы и системы управления освещением работают в форме дополнений к традиционному освещению, а именно, они контролируют и устанавливают освещенность в фиксированных заданных точках расположения датчиков, что дает малый выигрыш в эффективности.

Поэтому является актуальным использование интеллектуальных систем освещения, которые должны функционировать согласно определенному пользователем набору правил поведения и интегрировать в себя целый ряд технологий. Они должны включать в себя сложные средства для ввода в эксплуатацию и конфигурирования, оценки параметров окружающей среды, функционирования в сетях передачи данных и самостоятельного принятия решения.

Целью данной работы была разработка блока управления, встроенного в блок питания светильника с беспроводным коммуникационным модулем, для возможности создания интеллектуальной системы управления освещением.

Блок управления включает в себя матричный датчик, беспроводной интерфейс передачи данных и микроконтроллер с заданным программным обеспечением.

В свою очередь матричный датчик выполнен в виде многомерного измерительного элемента, который интегрирует в себе функции датчиков освещенности, присутствия и движения.

Для интеграции всех используемых светильников в помещении в блок управления встраивается беспроводной интерфейс передачи данных, который позволит «общаться» всем элементам системы освещения и в результате приведет к минимизации затрат на техническое обслуживание системы за счет самодиагностики.

Главным преимуществом использования предлагаемого устройства является возможность сравнительно большой экономии электроэнергии расходуемой на освещение помещений. По нашим расчетам эко-

номия составит более 40 % в отличие от традиционных методов освещения.

Структурная схема блока питания со встроенным в него блоком управления представлена на рис.1.

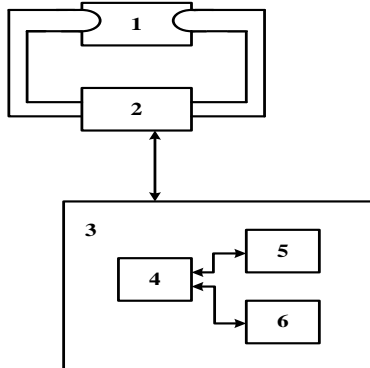


Рис. 1. Структурная схема интеллектуального блока питания светильника

- 1- светильник
- 2- блок питания
- 3- блок управления, встроенный в блок питания
- 4 - матричный датчик
- 5 - беспроводной интерфейс
- 6 - микроконтроллер

Библиографический список

1. Бубекри М. Проектирование естественного освещения с учётом поведения Человека / М. Бубекри, Н. Вэнь // Светотехника, № 1, 2009 г. С. 44–50.
2. Бонати А. Энергосбережение посредством интеллектуальных систем светорегулирования / А. Бонати // Светотехника, № 4, 2009 г. С. 41–44.
3. Эннс О. Интеллектуальные системы уличного освещения /О. Эннс // Энергосбережение, № 1, 2008 г. С. 58–60.

*Р.А. Хуснутдинов, аспир.; А.А. Туркия, аспир.;
рук. М.Ф. Садыков, к.ф.-м.н., доц.
(КГЭУ, г. Казань)*

СИСТЕМА ВОЗБУЖДЕНИЯ РАДИОЧАСТОТНЫХ ИМПУЛЬСОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЯКР УСТАНОВКЕ

В нашей работе используется персональный компьютер (PC) с установленной на него программой написанной в среде LabView, Spincore, усилитель мощности, Transcoupler, предварительным усилителем и катушкой. Структурная схема системы представлена на рис.1.

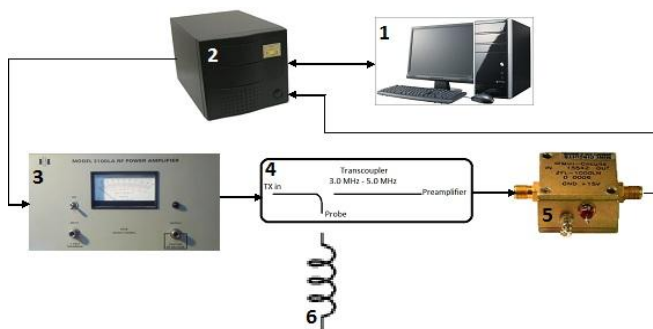


Рис.1: 1 - PC; 2 - Spincore; 3 - Усилитель мощности; 4 - Transcoupler;
5 - Предварительный усилитель; 6 - Катушка

С помощью методики ядерного квадрупольного резонанса можно определить содержание и тип взрывчатого вещества, находящегося на некотором расстоянии от детектирующей катушки. Детектирование ЯКР-спектров ^{14}N веществ, содержащих связи N-C, в последние годы стало весьма важным из-за прямой связи этого класса веществ с наркотиками и взрывчатыми веществами.

Взрывчатые и наркотические вещества в подавляющем большинстве содержат в себе атомы азота или хлора, что дает заманчивую возможность их обнаружения с помощью метода ЯКР. Устройство для регистрации скрытых закладок взрывчатых веществ на основе ЯКР на ядрах азота ^{14}N является единственным устройством, обеспечивающим однозначную идентификацию взрывчатого вещества. Хотя частоты ЯКР ^{14}N , ^{35}Cl и ^{37}Cl лежат в низкочастотном диапазоне, что приводит к

низкой чувствительности метода, ЯКР уже становится серьезным конкурентом другим методам.

Spincore формирует и преобразует радиочастотные сигналы с заданными характеристиками. При помощи программы на РС, которая управляет Spincore, задается нужный нам сигнал, передаваемый на усилитель мощности и проходящий далее по системе до катушки со взрывчатым веществом, в нашем случае NaNO_2 . После полученное эхо проходит через предварительный усилитель и поступает на Spincore, далее после преобразования сигнала поступает на РС и при разложении Фурье получаем АЧХ ЯКР-сигнала. На рис. 2 представлена амплитудно-частотная характеристика ЯКР-сигнала обнаруженного при использовании цилиндрической катушки диаметром 8 см., высотой 6 см.

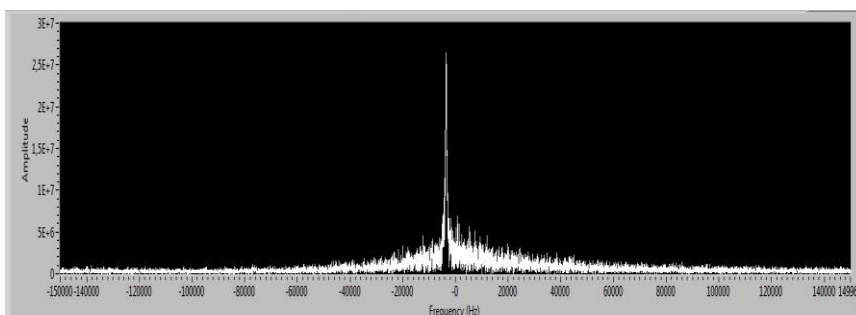


Рис.2. АЧХ ЯКР-сигнала.

Evgeny Shchukine, étudiant gr. 1-34m; Superviseur scientifique Anisimov Anatoly, professeur; Adviser française Natalia Antipova, professeur (ISPU, Ivanovo)

Les architectures à base de molécules

Les ordinateurs moléculaires sont des systèmes informatiques qui utilisent la puissance de calcul des molécules (souvent des molécules organiques). Les ordinateurs moléculaires utilise l'idée de capacités de capacité de calcul d'arrangement des atomes dans l'espace.

L'ordinateur à base de molécules peut être composé de circuits moléculaires logiques constitués de molécules élémentaires ou de transistors dirigés par une seule molécule.

Utiliser directement les molécules pour réaliser les dispositifs laisse envisager des techniques de fabrication chimique simples sans avoir à mettre en oeuvre des procédés lithographiques complexes. Une approche intéressante est proposée par James Tour et son équipe [1]. Le principe est de fonctionnaliser des dispositifs appelés nanocells représentés figure 1.

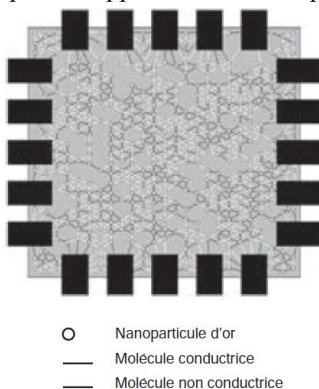


Figure 1. Nanocell fonctionnalisable.

J.M. Tour et al., Nanocell logic gates for molecular computer, © IEEE 2002.

La nanocell est composée d'un ensemble de molécules qui peuvent être en liaison chimique entre elles par l'intermédiaire de nanoparticules d'or. Ces molécules ont deux états possibles, l'un équivalent à un état de conduction et l'autre à un état de non conduction. Le système total est donc équivalent à un réseau de résistances interconnectées de manière aléatoire. Cet ensemble de molécules est relié à un certain nombre de plots électriques disposés en périphérie et servant d'interface avec une électronique intégrée plus classique

par exemple dans une technologie 90 nm. Les molécules ont la propriété de voir leur état changer en fonction de la tension appliquée à leurs bornes.

Le système est, après fabrication, dans un état non défini et le réseau de résistances est aléatoire. Il est alors possible de le programmer. En effet, en appliquant des combinaisons de tensions différentes sur les électrodes périphériques, on modifie la résistance de certaines molécules en fonction du principe énoncé précédemment. Si cette opération est répétée un grand nombre de fois en suivant un algorithme déterminé, il est possible d'établir une relation logique entre les tensions appliquées sur certains plots et les courants mesurés sur d'autres. La nanocell a été fonctionnalisée. Des fonctions logiques de base ont été ainsi créées comme le montre la figure 2.

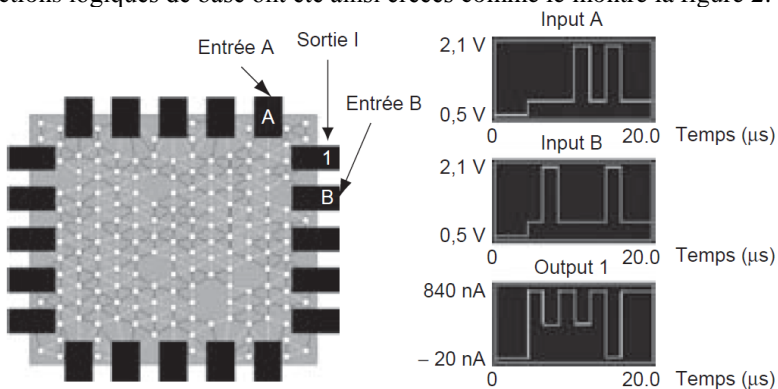


Figure 2. Porte NAND à base de molécules.

J.M. Tour et al., Nanocell logic gates for molecular computer, © IEEE 2002.

Ajoutons qu'il est nécessaire que la courbe courant-tension de la molécule présente au moins dans une région une résistance négative. En effet, un système logique complet ne peut se faire sans une fonction de type inverseur. Le principe de fonctionnement de la nanocell étant uniquement basé sur une division du potentiel appliqué en fonction des résistances, il est indispensable de disposer de résistances négatives pour réaliser une fonction de type inverseur.

References

1. **J.M. Tour et al.**, Nanocell logic gates for molecular computing, IEEE transactions on Nanotechnology, juin 2002
2. **Hervé Fanet**, Micro et Nano – Électronique: Bases - Composants – Circuits, DUNOD, 2006

Shchukin Evgeny, stud. gr. 1-34m; Scientific supervisor Terehov Anatoly, professor; English adviser Tyurina Svetlana, ass. professor (ISPU, Ivanovo)

Low-pass amplifier realized on a TDA1558q chip

Audio amplifier (AA), low-frequency amplifier (LFA), audio power amplifier (APA) is a device (an electronic amplifier) for amplification of the electrical oscillations corresponding to the human hearing in audio frequency range, thus these amplifiers are required to gain in the frequency range from 20 to 20 000 Hz at -3 dB, the best LFA have a range from 0 Hz to 200 kHz, the simplest LFA have a narrower frequency range.

My amplifier has an output power of 2 x 22 watts, and it is simple enough for beginning radio hams. This scheme is useful for custom columns or for homemade music center that can be made from an old MP3 player.

The circuit has a relatively high output power so the radiator is needed for cooling this device. You can apply the CPU cooler for it.

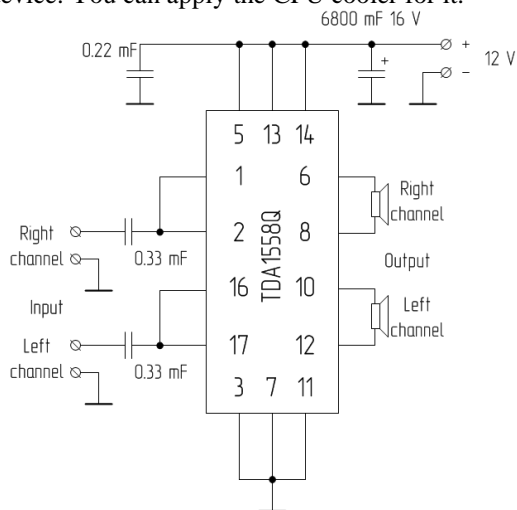


Figure 1. Circuit diagram of low-pass amplifier

The entire assembly can be performed by hinged installation without circuit board. At first it is necessary to remove the chip pins 4, 9 and 15. They are not used. Pin count goes from left to right, if you keep it to yourself and pin marking up. Then you should flatten output pins gently. Next, fold the pins 5, 13 and 14 up, all these pins are connected to the positive

supply. The next step is bending pins 3, 7 and 11 down - it's a minus supply, or "ground". After these manipulations you should screw the chip to the heat sink using thermally conductive paste. Pins 1 and 2 are soldered together - it's the right channel input, the capacitor 0.33 uF must be soldered to them. Similarly, it is necessary to proceed with the pins 16 and 17. Common wire for the input is a minus supply or "ground".

You should solder plus wire of supply to pins 5, 13 and 14. The same wire is soldered to the positive pin of the capacitor 6800 uF. Bent down pins 3, 7 and 11 are soldered together by wire, and the wire is soldered to the negative pin of the capacitor 6800 uF. Then wires from the capacitor go to the power supply.

Pins 6 and 8 are the output of the right channel, pin 6 is soldered to the positive pin of dynamics and pin 8 is soldered to the negative pin of dynamics.

Pins 10 and 12 are the output of the left channel, pin 10 is soldered to the positive pin of dynamics and pin 12 is soldered to the negative pin of dynamics.

The capacitor 0.22 uF should be soldered in parallel to the pins of the capacitor 6800 uF.

The variable resistor 100 kilohms should be soldered to the input of the amplifier for volume regulating.

To develop this device you will need only five components. They are:

- 1) Chip - TDA1558Q
- 2) 0.22 uF capacitor
- 3) 0.33 uF capacitor - 2 elements
- 4) Electrolytic capacitor 6800 uF 16 V

References

1. **Sedra, Adel; Smith, Kenneth C.** (1991). Microelectronic Circuits, 3 ed. Saunders College Publishing
2. **Owen Bishop.** Electronics Circuits and Systems - Third Edition, Routledge, 2007

Shchukin Evgeny, stud. gr. 1-34m; Scientific supervisor Terehov Anatoly, professor; English adviser Tyurina Svetlana, ass. professor (ISPU, Ivanovo)

LED multivibrator for security alarm

Multivibrator is a relaxation oscillator of the electrical square wave signals with the short edges. Multivibrator is one of the most common rectangular pulse generator and it is a two-stage resistive amplifier with deep positive feedback.

Despite its simplicity, its application is very wide. None of the electronic device is complete without it.

I realized LED multivibrator for security alarm in the office.

The first figure shows a circuit diagram of this device.

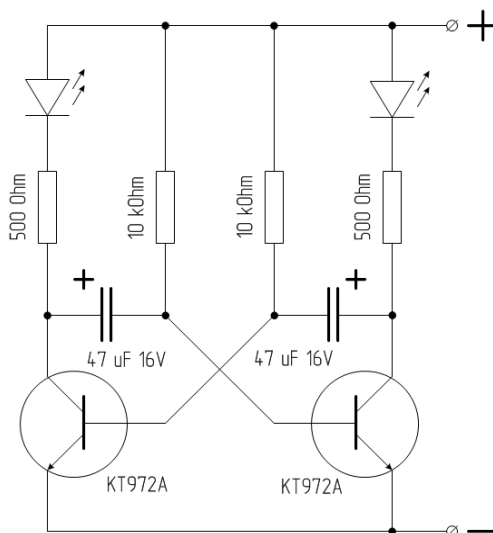


Figure 1. Circuit diagram of LED multivibrator for security alarm

LEDs are considered to be loads in this circuit. When the LEDs are switched, the multivibrator works.

To develop this device you need minimum of the components. They are:

- 1) 500 ohm resistor – 2 elements.
- 2) 10 kilohms – 2 elements.
- 3) Electrolytic capacitor 47 uF 16 V.

4) Transistor КТ972А – 2 elements.

5) LEDs – 2 elements.

КТ972А transistor is a composite transistor, so its case has two transistors. This composite transistor has high sensitivity and can withstand significant current without heat sink.

If you change the values of resistors and capacitors, the switching frequency will change also. You can achieve very interesting effects in the dynamics with frequency regulation, such as a squeak or pause for many seconds.

References

1. **Donald Fink** (ed), Electronics Engineers' Handbook, McGraw Hill, 1975
2. **Owen Bishop**, Electronics Circuits and Systems - Third Edition, Routledge, 2007

*Д.В. Буханова, студ.; рук. А.И. Терехов, проф., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)*

МИКРОКОНТРОЛЛЕРЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В СОВРЕМЕННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Микропроцессорные технологии уже давно вышли за рамки персональных компьютеров и суперЭВМ. Во всем мире широкое распространение получили микроконтроллеры, как в автоматизированных системах управления, так и в бытовых электроприборах, так как они отличаются надежностью, высокой степенью интеграции и небольшой стоимостью.

Развитие микропроцессорной техники привело к широкому применению в системах управления электроприводом цифровых регуляторов. С одной стороны это позволило существенно расширить набор реализуемых линейных и нелинейных законов и алгоритмов управления приводом. А с другой стороны, внесло такие особенности, присущие цифровым системам, как импульсный характер процессов получения информации, т.е. наличие квантования по времени и по уровню, а также наличие запаздывания в канале управления, необходимого для обработки информации и формирования управляющих сигналов. Это потребовало применения новых алгоритмов управления и новых методов синтеза систем управления приводом.

Микроконтроллеры являются наиболее массовыми представителями микропроцессорной электроники. Интегрируя в одном корпусе микросхемы высокопроизводительный процессор, оперативную и постоянную

память, а также набор периферийных устройств, микроконтроллеры позволяют с минимальными затратами реализовать широкую номенклатуру систем управления различными объектами и процессами.

Структурная организация, набор команд и аппаратно-программные средства ввода/вывода информации микроконтроллеров лучше всего приспособлены для решения задач управления и регулирования в приборах, устройствах и системах автоматики, а не для решения задач обработки данных.

Микроконтроллеры не являются классическими электронно-вычислительными машинами, так как физическая и логическая разделённость памяти программ и памяти данных исключает возможность модификации или замены (перезагрузки) прикладных программ микроконтроллеров во время работы, что сильно затрудняет их использование в качестве универсальных средств обработки данных.

Поэтому микроконтроллеры находят широкое применение в промышленной автоматике, контрольно измерительной технике, аппаратуре связи, бытовой технике и многих других областях человеческой деятельности.

*А.С. Исакова, студентка; рук. Л.Г. Копылова, к. т. н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)*

МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АНТЕННОЙ СТАНЦИИ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

В настоящее время вся промышленность претерпевает технологическую модернизацию, в том числе и военная промышленность.

Данный проект представляет собой модернизацию системы управления антенной станции спутниковой связи Р-439-П.

Функциональная схема антенного устройства представлена на рис. 1.

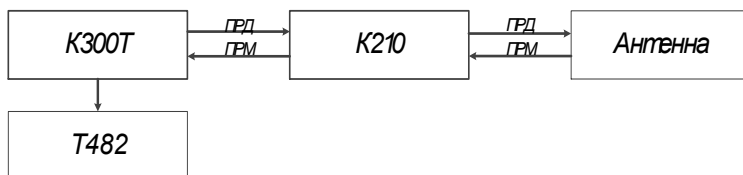


Рис. 1. Функциональная схема станции Р-439-П

Антенное устройство состоит из опорно-поворотного устройства с антенно-фидерной системой Л100-2П. Антенно-фидерная система выполнена на основе зеркального параболического отражателя диаметром 1,2 м. Опорно-поворотное устройство имеет механизм местного ручного наведения антенной системы на спутник по азимуту и углу места.

Кроме антенно-фидерной системы, на опорно-поворотном устройстве размещен прибор К210 – возбудитель и преобразователь частоты принимаемого сигнала.

В прибор К300Т входит приемное устройство, предназначенное для приема и демодуляции сигналов, поступающих на первой промежуточной частоте с антенного устройства.

Прибор Т482 предназначен для индикации уровня сигнала, принимаемого станцией, оператору, находящемуся на антенном посту, с целью обеспечения возможности местного ручного наведения антенны на ИСЗ.

Другая функция прибора Т482 – индикация уровня сигнала на входе передающего устройства станции, а также в раскрыве антенны.

Цель данного проекта заключается в автоматизации навигации антенным устройством.

Функциональная схема модернизированной станции Р-439-П представлена на рис. 2.

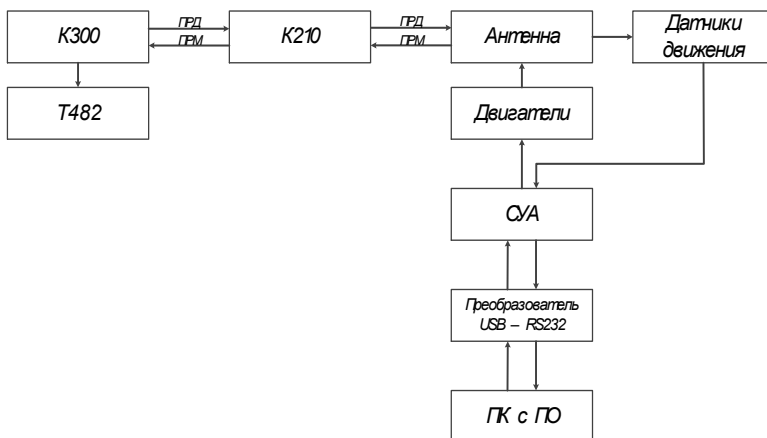


Рис. 2. Функциональная схема модернизированной станции Р-432-П

С персонального компьютера сигнал поступает на преобразователь USB – RS-232, так как антенна принимает сигнал интерфейса RS-232 и распределяет их на три потока RxD (отвечает за движение по азимуту), TxD (отвечает за движение по угол-место) и GND.

Система управления антенны (САУ) обрабатывает пришедшие сигналы и с помощью силовых ключей управляет двигателями, которые перемещают антенну.

Датчики движения фиксируют изменения положения антенны и подают сигнал об изменениях на микроконтроллер, который в свою очередь обрабатывает эти сигналы и обратно через преобразователь отправляет их на компьютер.

Антенна представляет собой сложное устройство значительной массы. Для того чтобы непрерывно определять угловые координаты движущейся цели, необходимо постоянно наводить антенну на цель с большой точностью. Поэтому в состав системы управления антенной входят электронные устройства, обеспечивающие высокую точность наведения и электромеханические устройства, обеспечивающие вращение антенны по азимуту и углу места с достаточно большими угловыми скоростями.

Аналогичные устройства для других видов станций давно используются военными и пользуются большой популярностью, так как упрощают и в то же время совершенствуют работу связистов.

*Р.А. Крайнов, студ.; рук. А.П. Бурков к.т.н., ст. науч. сотр.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

СИСТЕМЫ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ НА БАЗЕ FPGA

При разработке систем цифровой обработки сигналов (Digital System Processing, DSP) традиционным является подход, при котором используются DSP-процессоры общего назначения, а требуемые специфические алгоритмы обработки реализуются программно (в основном на языке С) [1].

Для проектирования таких систем необходимо выяснить и описать функции, подлежащие выполнению в системе, а затем согласовать их с возможностями микропроцессоров, которые могут быть использованы в данном проекте. Таким образом, перед разработчиком возникает вопрос выбора конкретного микропроцессора определенной фирмы производителя, от которого будет зависеть производительность управляющей системы.

В последние годы всё более широкую популярность приобретают высокопроизводительные 32-разрядные микроконтроллеры, использующие процессорное ядро ARM. Такие микроконтроллеры выпускаются многими известными производителями: Atmel, Samsung, Intel, Motorola, Cirrus Logic, Oki и другими. Они привлекают пользователей низким значением соотношения "цена/качество", что обусловило их широкое применение в разнообразных устройствах. Ряд этих изделий используется российскими производителями для создания современной электронной аппаратуры различного назначения [2].

Фирма ARM расширила семейство ARM9 Thumb приборами с новым качеством - ядром ARM9E. Процессорное ядро ARM9E - это процессор ARM9TDMI™, расширенный DSP возможностями и предназначенный для таких применений, в которых необходимо сочетание возможностей микроконтроллера и DSP. Использование совмещенного однопроцессорного решения позволяет существенно упростить кристалл, уменьшить его размеры и сократить "время выхода на рынок" конечной продукции [3].

Однако в последнее время все чаще можно наблюдать применение аппаратных методов цифровой обработки сигналов, основанных на использовании программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) с архитектурой FPGA (Field Programmable Gate Array) в качестве препроцессоров и сопроцессоров [1].

FPGA — это программируемые пользователем вентильные матрицы, которые управляются битовой последовательностью, записываемой во внутреннее статическое ОЗУ при конфигурировании ПЛИС, поэтому устройства этого класса получили название многократно реконфигурируемых [4]. Архитектура FPGA обладает большой гибкостью, на ее базе можно реализовывать распараллеливание операций, что позволяет существенно повысить производительность всей DSP-системы. При построении DSP-системы операции, требующие высокоскоростной обработки данных в параллельном режиме, реализуются на базе FPGA, а операции высокоскоростной последовательной обработки — с помощью DSP-процессоров. Такое распределение ресурсов системы позволяет добиться оптимального соотношения цена-качество и снизить энергопотребление.

Дополнительные возможности для распараллеливания операций обработки сигнала, оптимального распределения функций в системе с сопроцессором на базе FPGA обеспечивает наличие встроенных в FPGA процессоров [1]. Данные системы получили название "систем на

кристалле". В основе таких систем лежат не IP-модели реально существующих аппаратных процессорных ядер, а синтезируемые процессорные ядра, созданные специально для реализации в FPGA. Использование синтезируемых ядер существенно снижает время разработки DSP-систем и их конечную стоимость, позволяет добиться повышения тактовых частот системы за счет размещения всех компонентов на одном кристалле[5].

Производительность синтезированных процессорных ядер зависит от используемой для их реализации FPGA и ряда факторов, связанных с размещением структуры процессора на кристалле. Ведущим мировым производителем ПЛИС является фирма ALTERA [6]. Данная фирма выпускает 32-х разрядный микропроцессор с конфигурируемым программным ядром Nios II.

Свойство программной конфигурируемости, обеспечиваемое технологией FPGA, позволяет создавать различные варианты как процессорной системы, так и самого ядра Nios II и размещаться в любых чипах семейств Altera FPGA [7]. Таким образом, конфигурируемость дает возможность решать задачи производительности и стоимости микропроцессорной системы.

Таким образом, требуется провести сравнительный анализ технических характеристик современных DSP-процессоров и процессоров встраиваемым в FPGA на конкретных примерах (см. таблица 1).

Секция 22. Микроэлектронные и микропроцессорные информационно-управляющие системы

Таблица 1. Технические характеристики микропроцессоров AT91SAM9261 и Nios II

Параметры микропроцессора	AT91SAM9261	Nios II		
		Nios Economy core	Nios Standard core	Nios Fast core
Ядро микропроцессора	ARM926EJ-S			
Разрядность микропроцессора	32-х	32-х		
Архитектура микропроцессора	Гарвардская	Гарвардская		
Архитектура набора команд	32-разрядный ARM RISC механизм, операции перемножения/аккумуляции 16х32 выполняющиеся за один цикл, технология ARM Jazelle для ускорения выполнения Java-инструкций, поддержка 16-разрядной системы команд в режиме Thumb, обеспечивающая лучшую плотность кода, расширение инструкций для цифровой обработки сигналов (DSP)	32-разрядный RISC механизм, одиночная инструкция умножения/ деления 32х32, выдающая 32-битный результат, специальные инструкции для 64-битных и 128-битных вычислений над результатами умножения, операции с плавающей точкой, команды циклического сдвига, возможность создания до 256 собственных инструкций, интегрируемых в АЛУ процессора		
Максимальная тактовая частота, Гц	190	200	165	85 ¹
Производительность микропроцессора, MIPS	210	31	127	18 ²
Количество уровней конвейера	5	1	5	6
Кэш команд, Кб	16	нет	64	64 ⁶

Таблица 1. Продолжение

Кеш данных, Кб	16	нет	нет	64
Размер ПЗУ (ROM), Кб	32	настраиваемый		
Размер ОЗУ (RAM), Кб	160	настраиваемый		
Операции умножения и деления, бит	16x32	32x32		
Регистры общего назначения разрядностью 32 бит, шт	32	32		
Таймеры, шт	3	2		
Блок управления памятью (MMU)	есть	опционально		
Блок защиты памяти (MPU)	нет	опционально		
Контроллер SDRAM	есть	есть		
Контроллер SRAM	есть	есть		
Контроллер NAND-Flash	есть	есть		
Контроллер CompactFlash	есть	есть		
Контроллер ЖКИ	есть	есть		
Контроллер Ethernet	нет	есть		
Контроллер SPI	есть	есть		
Контроллер I ² C	есть	есть		
Интерфейс USB	есть	есть		
Интерфейс UART	есть	есть		
Цена	1830 руб.[8]	цена зависит от матрицы FPGA, в которую будет встроено процессор		

Например, FPGA фирмы Altera CYCLONE IV EP4CE22F17C8N имеет следующие характеристики:

- количество логических блоков 1395;
- количество макроячеек 22320;

- количество выводов 256;
- максимальная рабочая частота 472,5 МГц;
- цена 5790 руб. [8];

Быстрое ядро (Fast core) встраиваемого микропроцессора Nios II занимает в матрице FPGA менее 3000 макроячеек [7], что примерно составляет около 13,5% от всего внутреннего объема представленной выше матрицы FPGA фирмы Altera.

Таким образом, сравнительный анализ AT91SAM9261 и Nios II показал, что данные микропроцессоры обладают схожими техническими характеристиками, т.е. встраиваемый микропроцессор Nios II является полноценным эквивалентом современного микроконтроллера и может полностью заменить его функции в DSP-системе.

Выводы

В цифровой обработке сигналов на базе FPGA по сравнению с DSP-процессорами имеются такие преимущества, как возможность организации параллельной обработки данных, масштабирование полосы пропускания, расширяемость устройства.

Применение FPGA для DSP-систем позволяет достичь сокращения проектно-технологического цикла создания новых или модифицируемых изделий, повышения быстродействия, снижения потребляемой мощности, разработки оптимизированных решений путем использования встраиваемых процессоров.

Распределение функций DSP-системы по имеющимся аппаратным ресурсам FPGA, при котором для системы в целом обеспечивается оптимальное соотношение цена-качество, – это та проблема, с которой всегда сталкиваются разработчики.

Эффективные способы использования встраиваемых процессоров в FPGA не всегда очевидны, однако сам факт использования встраиваемых процессоров имеет огромное значение для снижения общей стоимости создаваемой DSP-системы. Они обеспечивают выполнение операций высокоскоростной последовательной обработки, тем самым минимизируя общее количество аппаратных ресурсов, необходимых для реализации системы.

Такой подход позволяет получить "системы на кристалле", которые абсолютно синхронны, что позволяет повысить тактовые частоты и упростить задачу синхронизации системы. Однако его повсеместному

распространению препятствует то, что разработчики DSP-систем не всегда имеют опыт проектирования на базе FPGA.

Библиографический список

1. **Перекрест А. А.** Преимущества использования сопроцессоров на базе ПЛИС FPGA в системах цифровой обработки сигналов// Электроника: Наука, технология, Бизнес. – 2006 . – №6 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.electronics.ru/journal/article/785>
2. **Емелин А., Шагурин И.** RISC-микроконтроллеры с процессорным ядром ARM// Новости микроэлектроники [Электронный ресурс]. URL: http://www.chipnews.ru/html.cgi/arhiv/02_06/6.htm
3. **Семейство ARM9E** [Электронный ресурс]. URL: http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/doc/micros/arm/arh/thumb9_2.htm
4. **Поперечный В.** Применение ПЛИС в цифровой схемотехнике// Компьютеры и программы. – 2001. – №2 [Электронный ресурс]. URL: http://www.comizdat.com/index.php?in=kpp_articles_id&id=24
5. **Шалтырев В.А.** Реализация микропроцессорных систем на основе ядра MICROBLAZE/ В.А. Шалтырев// МИФИ. – 2006.
6. **Хуторной С.** Система Excalibur - средство разработки SoC-решений от фирмы ALTERA// Рынок микроэлектроники [Электронный ресурс]. URL: <http://catalog.gaw.ru/index.php?page=document&id=1011>
7. **Nios II Processor Reference Handbook// Altera Corp.** — 2011. — [Электронный ресурс]. URL: http://www.altera.com/literature/hb/nios2/n2cpu_nii5v1.pdf
8. **Чип** и Дип – приборы и электронные компоненты. URL: <http://www.chipdip.ru>

*Д.В. Кукушкин, студ.; рук. А.А. Анисимов д.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДОСТУПОМ

На сегодняшний день система контроля и управления доступом являются неотъемлемым элементом инфраструктуры современного офиса словно система кондиционирования или система электронного документооборота. Кроме того, система контроля доступа является почти обязательным элементом многих комплексных систем безопасности. И совершенно оправданно, ведь система контроля и управления доступом позволяет автоматически контролировать проход людей или проезд автотранспорта на охраняемую территорию, являясь эффективным средством защиты от проникновения посторонних лиц на территорию объекта. Большинство систем позволяют фиксировать также и удаление человека или автотранспорта с охраняемой территории. В результате этого контроль доступа помогает обеспечивать не только сохранность материальных ценностей и безопасность персонала организации,

но и контроль над отработанными часами сотрудников. Помимо предотвращения доступа посторонних на охраняемую территорию, установка систем контроля доступа позволяет разграничить проход сотрудников и посетителей в ответственные помещения организации. Также установка системы контроля доступа на проходной или на контрольно-пропускном пункте предприятия позволяет автоматизировать работу пункта охраны в бюро пропусков, исключая влияние человеческого фактора. Тем самым контроль управления доступом позволяет упорядочить проход (проезд на автотранспорте) посетителей в приемную организации.

Процедура управления доступом сводится к взаимному опознаванию пользователя и системы и установления факта допустимости использования ресурсов конкретным пользователем в соответствии с его запросом. Средства управления доступом обеспечивают защиту охраняемого объекта, как от неавторизованного использования, так и от несанкционированного обслуживания системой. Защита реализуется процедурами идентификации, установления подлинности и регистрации обращений.

Процедура идентификации реализует задачу присвоения каждому пользователю конкретного кода с целью последующего опознавания и учета обращения. Принятая система идентификации служит исходной предпосылкой для последующего контроля подлинности доступа.

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

В случае организации системы контроля доступа при помощи электронного оборудования каждому из пользователей (сотрудники предприятия, охрана, гости и т. д.) выдается электронный идентификатор. С помощью идентификатора происходит аутентификация личности. После нее система принимает решение о допуске личности.

Электронная система защиты и контроля доступа на охраняемый объект позволяет при помощи центрального управляющего устройства (контроллера) производить сбор информации со всех опознающих

устройств (считывателей), обрабатывать ее, управлять исполнительными устройствами, а так же принимать команды от обслуживающего персонала. Таким образом, человек освобождается от рутинных операций по идентификации личности, пропуску и фиксации всех событий, что снижает к минимуму человеческий фактор.

*И.А. Малыгин, студ.; рук. А.И. Краснушкин
(ИГЭУ, г. Иваново)*

MES = АВТОМАТИЗАЦИЯ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ

Введение

Сегодня популярность MES-систем набирает стремительные обороты. Количество выставок и семинаров посвященных этому вопросу стабильно увеличивается, и перечень программного обеспечения разных фирм производителей удваивается чуть ли не каждый год. На фоне этого растёт и количество публикаций посвященных теории MES-систем: состав, функциональность, цели, задачи и т.д.

Тем не менее, надо признать как факт наличие большего числа неостребованных внедренных и, часто, «работающих» систем уровня MES. В данном случае я имею в виду проблему использования MES-систем в качестве реального инструмента управления производством. Не секрет, что большое количество внедренных систем существуют параллельно со старыми проверенными таблицами Excel и трубкой телефонного аппарата.

MES- не набор функций

На мой взгляд, такое состояние дел является не столько результатом ошибок при внедрении или неправильном выборе программных решений MES-системы (хотя и это очень важно), сколько неверной ориентацией MES.

По определению MES - специализированное прикладное программное обеспечение (см. Wikipedia), и традиционный подход определяет MES как набор функций:

RAS — Контроль состояния и распределение ресурсов.

DPU — Диспетчеризация производства (Координация изготовления продукции).

DCA — Сбор и хранение данных.

LUM — Управление людскими ресурсами.

QM — Управление качеством.

PM — Управление процессами производства.

PTG — Отслеживание и генеалогия продукции.

РА — Анализ эффективности.

Так удобно и понятно с точки зрения модульности программного обеспечения и этапности проектов внедрения. Но (!), именно традиционный подход мешает воспринимать этот действенный инструмент с точки зрения конечного результата и целей MES. Такое понимание MES, на мой взгляд, концентрирует на ИТ-составляющей MES – какие системы интегрировать, какие интерфейсы задействовать, какие программные решения использовать.

MES – это не набор функций, MES = автоматизация бизнес-процессов оперативного управления производством.

Именно понимание того, что MES автоматизирует конкретные бизнес-процессы конкретного производства, является залогом успешного проекта создания MES-системы. Такой подход непроизвольно заставляет описывать автоматизируемые бизнес-процессы, вовлекать в проект специалистов от производства и, в конечном счете, ориентирует на полезный с точки зрения эффективности производства результат.

Заключение

Таким образом, новое позиционирование MES позволяет использовать весь наработанный опыт создания ERP-систем, включающий такие важные для MES моменты как моделирование и реинжиниринг бизнес-процессов, консалтинговую направленность проектов внедрения.

Также не в последнюю очередь положительным моментом «репозиционирования» является тот факт, что MES должен и может стать неким концентратором лучших практик оперативного управления производством, позволяя компаниям оказывать, в том числе, и услуги по управленческому консалтингу.

*В.С. Радыгин, студ.; рук, Н.В. Салахутдинов, ведущий электронщик кафедры, старший преподаватель.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

РАЗРАБОТКА СИЛОВОГО МОДУЛЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА МОЩНОСТЬЮ ДО 2,2 КВТ

Данный проект посвящен разработке силового модуля асинхронного электропривода. На сегодняшний день, на рынке российского производства существует немалое количество вариантов приводов,

технические характеристики которых отвечают высоким требованиям для управления станками с числовым программным управлением. Но будь то тяжелый прецизионный многоосевой высокоскоростной обрабатывающий комплекс, серийный фрезерный станок и простой линейный модуль, собранный из готовых комплектующих, и всё это, без системы управления остаётся бесполезным набором механических компонентов любой машины.

Отечественная система, отвечающая за управление ими, давно устарела, и не отвечает современным техническим требованиям, а полное переоснащение станков на предприятиях тяжёлой промышленности не выгодно с любой точки зрения. Поэтому идеальным выходом из данной ситуации является усовершенствование электрооборудования и системы числового программного управления на основе уже имеющегося станка.

Таким образом, целью данного проекта является модификация микропроцессорного контроллера движения, изготавливаемого ранее. Основная суть новшества заключается в уменьшении мощности силового модуля управлением привода.

Наиболее важным фактором, влияющим на быстродействие и динамичность ЭП, является быстродействие интерфейса управления, по которому сигналы задания передаются на конечный исполнительный модуль. При этом требование к скорости интерфейса возрастает поэтапно:

Контур регулирования положения → контур регулирования скорости → контур регулирования тока → ШИМ управление (наибольшая скорость передачи).

Согласно анализу можно сделать следующие выводы:

1. Устройство формирования задания на ключи и силовой усилитель должны быть разделены;
2. Необходимым условием является ЭП с вынесенным регулятором положения;
3. Обязательное условие – использование ЭП с прямым ШИМ управлением.

Структура полностью автономного ЭП приведена на рисунке 1.

Явными преимуществами такого исполнения являются: максимально высокие характеристики быстродействия и точности, возможность применения сложных регуляторов с множеством фильтров и упреждающих компенсационных связей. Однако такая реализация не позволяет применять сложные структуры тандемного или многодвигательного управления осями, в данном случае может применяться лишь

метод одинакового задания траектории без возможности компенсации перекосов и неравномерностей хода каждого ЭП.

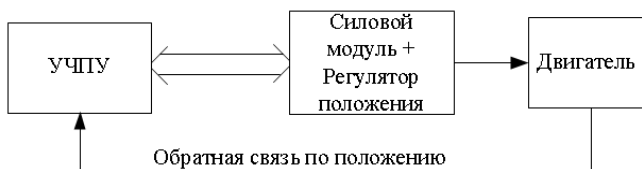


Рис. 1. Структура автономного ЭП

Для снижения нагрузки на интерфейс управления некоторые производители осуществляют алгоритмы интерполяции на стороне ЭП, там же производится компенсация люфтов.

Структура ЭП с вынесенным регулятором положения в УЧПУ приведена на рисунке 2.



Рис. 2. Структура ЭП с вынесенным регулятором положения

Достоинства: упрощение алгоритмов управления в ЭП, возможность создавать более сложные структуры многодвигательного управления.

Некоторые производители осуществляют управление контуром положения и скорости на стороне МК и в ЭП посылают только сигналы задания. Однако при этом быстродействие ограничено пропускной способностью интерфейса управления.

Те производители, которые используют скоростные оптические каналы, предпочитают сокращать длину соединительных кабелей, применяя топологию звезды или кольца. При этом канал управления перегружается и снижается быстродействие за счет большого количе-

ства строго синхронизированных посылок управления по положению и обратных связей с энкодеров, подключенных к приводам.

Структура ЭП с прямым ШИМ управлением показана на рисунке 3.

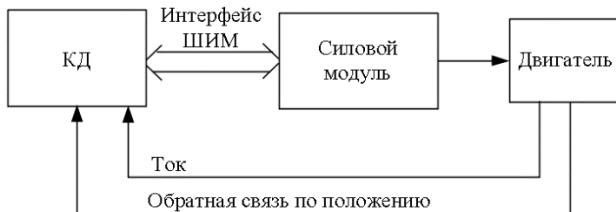


Рис. 3. Структура ЭП с прямым ШИМ управлением

Достоинства данного метода управления состоят в применении параллельного интерфейса управления СП, не требующего большого быстродействия, синхронизации посылок. При этом, система управления может находиться как в УЧПУ, так и в отдельном блоке регуляторов (Siemens, Fanuc, Delta Tau), напоминающем структуру автономно го регулятора, но рассчитанном на несколько СМ.

На основании проведенного анализа современных электроприводов, выбирается структура ЭП с прямым ШИМ управлением (рисунок 3). Выбор такой структуры ЭП с прямым ШИМ управлением и регуляторами, интегрированными в СУ, продиктован следующими достоинствами:

- минимальное время расчёта контуров тока и положения;
- высокая скорость в контурах регулирования;
- избавление от внешних интерфейсов, дающее преимущество в отсутствии задержек и интерфейсных помех;
- упрощение структуры и схемотехники СМ;
- повышение надёжности;
- снижение себестоимости СМ при отсутствии дополнительных материальных затрат в СУ;
- снижение стоимости канала (интерфейса) управления;
- повышение ремонтпригодности СМ;
- отсутствие настроек в СМ;
- легкий доступ к параметрам регуляторов;
- универсальность управления от СП любым типом двигателей;

- возможность менять структуру регуляторов, объединять их во взаимосвязанном управлении, несколькими ЭП.

*А.А. Топников, студент; рук. С.А. Капустин
(ИГЭУ им. В.И.Ленина, г. Иваново)*

МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОМПОНЕНТЫ

Магнитодиоды. Использование магнитодиодов в качестве датчиков.

Разработка биполярного планарного двухколлекторного магнитотранзистора Т.В. Персияновым. Особенности его изготовления. Метрологическая характеристика чувствительности магнитотранзистора к магнитному полю, метрологический паспорт.

Использование магнитотранзистора как датчика для измерения тока шинпровода гидроэлектростанции и измерения потока электронов в ускорителе элементарных частиц.

Разработки ИГЭУ гибридных датчиков измерения магнитного поля земли.

Попытка использования магнитотранзистора в чувствительном элементе аппарата для снятия электрокардиограммы человека.

Преимущества датчика с магнитотранзистором перед датчиком Холла.

Современные направления использования магниточувствительных элементов – сложные кодовые системы на магнитных картах, магнитодефектоскопы, магнитометры, безконтактные измерители постоянного и переменного тока.

Библиографический список

1. **И.М. Викулин.** Гальваномагнитные приборы. Радио и связь. 1983.
2. **Бараночников М.Л.** Микромагнитоэлектроника. ДМК Пресс. 2001.
3. **Стафеев В.И.** Магнитодиоды, магнитотранзисторы и их применение. Радио и Связь, 1987.

А. Р. Тюрин, студ.; рук. В.В. Тютиков д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)

ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ

На практике чаще всего приходится управлять нелинейными объектами. Системы модального управления, которые строятся на базе безынерционных или динамических регуляторов и позволяют независимо формировать динамические и статические показатели качества [1], неприменимы для нелинейных объектов, из-за чего модели последних приходится существенно упрощать (линеаризовать).

Метод автоматического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) способен решать задачи обеспечения заданной динамики нелинейных систем [2]. Однако обеспечение заданной статической точности при этом невозможно.

Для удовлетворения требований к работе нелинейной системы в статическом и динамическом режимах предлагается двухэтапная методика синтеза регулятора. На первом этапе применяется метод АКАР, позволяющий синтезировать САУ нелинейным объектом, свойства которой идентичны свойствам линейной. На втором этапе используется процедура аналогичная описанной в [1].

Рассмотрим использование методики на примере синтеза регулятора для упругого двухмассового объекта.

Исходный исследуемый объект управления (ОУ) и временная диаграмма при значениях параметров объекта $R_a = 0,19 \text{ Ом}$, $L_a = 0,25 \text{ Гн}$, $C_{12} = 50 \text{ Нм/рад}$, $J_1 = 0,15 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $J_2 = 0,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $K\Phi = 0,72 \text{ Вб}$ представлены на рис. 1 и 2 соответственно.

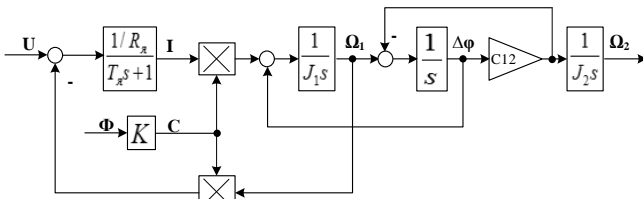


Рис. 1. Объект управления

Для определенности поставим задачу обеспечить статическую ошибку не более 10 рад/с при моменте сопротивления на валу рабочего органа 26 Нм и быстродействие замкнутой системы 200 мс.

Запишем дифференциальные уравнения, описывающие систему, представленную на рис. 1,

$$sI = \frac{1}{L_a} U - \frac{K}{L_a} \Omega_1 \Phi - \frac{R_a}{L_a} I;$$

$$s\Omega_1 = \frac{K}{J_1} I \Phi - \frac{C_{12}}{J_1} \Delta\varphi;$$

$$s\Delta\varphi = \Omega_1 - \Omega_2;$$

$$s\Omega_2 = \frac{C_{12}}{J_2} \Delta\varphi.$$

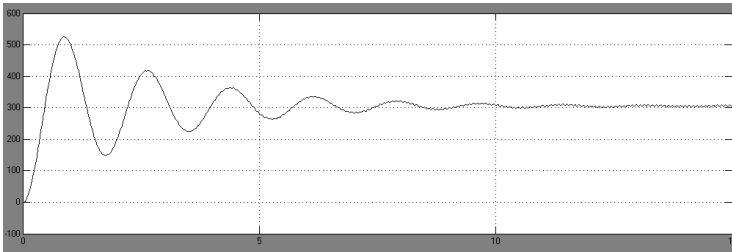


Рис. 2. Временная диаграмма частоты вращения рабочего органа

Матрицы **A** и **B**, в таком случае, имеют вид:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K}{L_a} \Phi & 0 & 0 \\ \frac{K}{J_1} \Phi & 0 & -\frac{C_{12}}{J_1} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & \frac{C_{12}}{J_2} & 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} \frac{1}{L_a} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Для синтеза системы управления методом АКАР для каждой переменной состояния используют функциональное уравнение вида:

$$T_i \dot{\Psi}_i + \Psi_i = 0,$$

где $\Psi_i = x_i - x_{0i}$.

Для нашего объекта запишем уравнения, характеризующие движение замкнутой системы:

$$\begin{aligned}T_1(\dot{I} - \dot{I}_0) + I - I_0 &= 0; \\T_2(\dot{\Omega}_1 - \dot{\Omega}_{10}) + \Omega_1 - \Omega_{10} &= 0; \\T_3(\Delta\dot{\phi} - \Delta\dot{\phi}_0) + \Delta\phi - \Delta\phi_0 &= 0; \\T_4(\dot{\Omega}_2 - \dot{\Omega}_{20}) + \Omega_2 - \Omega_{20} &= 0.\end{aligned}$$

где I – ток, Ω_1 и Ω_2 – частоты вращения 1-й и 2-й масс, $\Delta\phi$ – разность углов поворота двух масс, T_1, T_2, T_3 и T_4 – постоянные времени, определяющие время протекания процессов в синтезируемой системе.

В результате решения уравнений получим:

$$\begin{aligned}
 U = & \frac{R_a T_1 T_2 T_3 T_4 - L_a T_2 T_3 T_4 - L_a T_1 T_3 T_4 - L_a T_1 T_2 T_4 - L_a T_1 T_2 T_3}{T_1 T_2 T_3 T_4} I + \\
 & + \left(\frac{(\Phi K)^2 J_2 T_1 T_2 T_3 T_4 + L_a J_2 T_1 T_2 T_3 T_4 C_{12} + L_a J_1 T_1 T_2 T_3 T_4 C_{12}}{\Phi K J_2 T_1 T_2 T_3 T_4} + \right. \\
 & + \frac{-L_a J_1 J_2 T_3 T_4 - L_a J_1 J_2 T_2 T_4 - L_a J_1 J_2 T_2 T_3 - L_a J_1 J_2 T_1 T_4}{\Phi K J_2 T_1 T_2 T_3 T_4} + \\
 & + \frac{-L_a J_1 J_2 T_1 T_3 - L_a J_1 J_2 T_1 T_2}{\Phi K J_2 T_1 T_2 T_3 T_4} \left. \right) \Omega_1 + \left(\frac{L_a J_2 T_2 T_3 T_4 C_{12}}{\Phi K J_2 T_1 T_2 T_3 T_4} + \right. \\
 & + \frac{L_a J_2 T_1 T_3 T_4 C_{12} + L_a J_2 T_1 T_2 T_4 C_{12} + L_a J_2 T_1 T_2 T_3 C_{12}}{\Phi K J_2 T_1 T_2 T_3 T_4} + \\
 & + \frac{L_a J_1 T_2 T_3 T_4 C_{12} + L_a J_1 T_1 T_3 T_4 C_{12} + L_a J_1 T_1 T_2 T_4 C_{12} + L_a J_1 T_1 T_2 T_3 C_{12}}{\Phi K J_2 T_1 T_2 T_3 T_4} + \\
 & + \left. \frac{-L_a J_1 J_2 T_1 - L_a J_1 J_2 T_2 - L_a J_1 J_2 T_3 - L_a J_1 J_2 T_4}{\Phi K J_2 T_1 T_2 T_3 T_4} \right) \Delta \varphi + \\
 & \left(\frac{-L_a J_2 T_1 T_2 T_3 T_4 C_{12}^2 - L_a J_1 T_1 T_2 T_3 T_4 C_{12}^2 + L_a J_1 J_2 T_3 T_4 C_{12}}{\Phi K J_2 T_1 T_2 T_3 T_4 C_{12}} + \right. \\
 & + \frac{L_a J_1 J_2 T_2 T_4 C_{12} + L_a J_1 J_2 T_2 T_3 C_{12} + L_a J_1 J_2 T_1 T_4 C_{12} + L_a J_1 J_2 T_1 T_3 C_{12}}{\Phi K J_2 T_1 T_2 T_3 T_4 C_{12}} + \\
 & + \left. \frac{L_a J_1 J_2 T_1 T_2 C_{12} - L_a J_1 J_2^2}{\Phi K J_2 T_1 T_2 T_3 T_4 C_{12}} \right) \Omega_2 + \frac{L_a J_1 J_2}{\Phi K J_2 T_1 T_2 T_3 T_4 C_{12}} \Omega_{20}
 \end{aligned}$$

или

$$U = K_I I + K_{\Omega_1} \Omega_1 + K_{\Delta \varphi} \Delta \varphi + K_{\Omega_2} \Omega_2 + \frac{L_a J_1 J_2}{C J_2 T_1 T_2 T_3 T_4 C_{12}} \Omega_{20}$$

Система управления с регулятором представлена на рис. 3.

Моделирование синтезированной системы показало, что заданное быстроедействие обеспечивается при $T_1 = T_1 = T_1 = T_1 = 0,02c$, однако

при этом статическая ошибка значительно превышает допустимую (рис. 4).

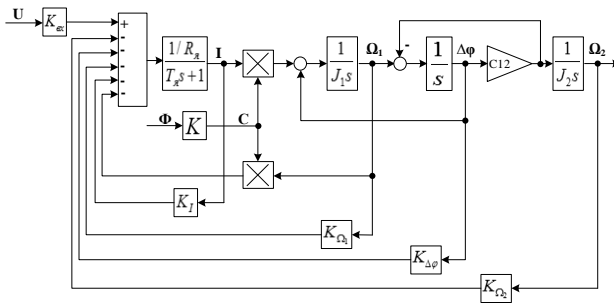


Рис. 3. САУ с АКАР

Для обеспечения необходимого значения статической ошибки необходимо значительно увеличить быстродействие, что технически не всегда возможно. Также можно использовать астатический регулятор, но в этом случае порядок расчетной модели увеличится на единицу и значительно возрастет сложность.

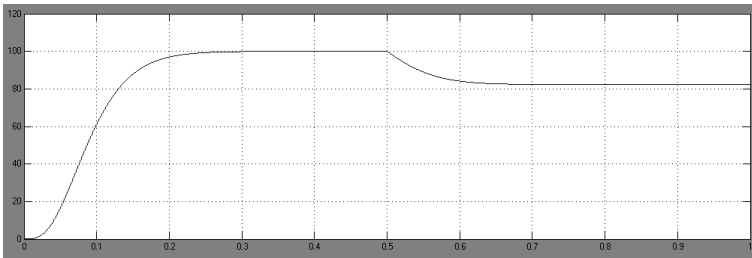


Рис. 4. Временная диаграмма частоты вращения рабочего органа

Далее используем подход, изложенный в [2].

Зададимся значениями $T_1 = T_2 = T_3 = T_4 = 0,01$ с при которых достигается заданная статическая точность (рис. 4). При этом желаемый полином имеет вид:

$$D_1(s) = (T_1s + 1)(T_2s + 1)(T_3s + 1)(T_4s + 1) = (0,01s + 1)^4 = 0,00000001s^4 + 0,000004s^3 + 0,0006s^2 + 0,04s + 1;$$

или

$$D_1(s) = s^4 + 400s^3 + 60000s^2 + 4000000s + 100000000.$$

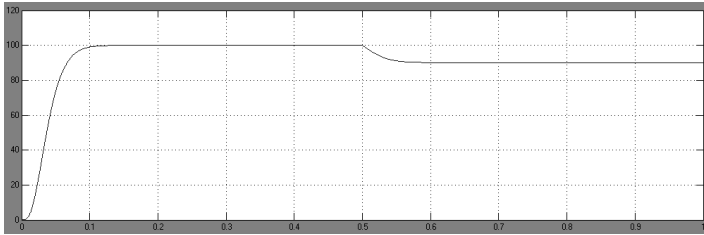


Рис. 5. Временная диаграмма частоты вращения рабочего органа

Синтезируем РС, чтобы обеспечить требуемое быстродействие. Среднегеометрический корень для полинома Ньютона 4-й степени согласно [3]

$$\Omega_0 = \frac{n + 2\sqrt{n+1}}{T_{ин}} = \frac{4 + 2\sqrt{4+1}}{0,2} = 42,36 \text{ c}^{-1}.$$

Формирование желаемого полинома $D_2(s)$ и синтез регулятора осуществим с помощью программы Satelite [4]. Желаемый полином имеет вид

$$D_2(s) = s^4 + 169,44s^3 + 10766s^2 + 304038s + 3219762.$$

Параметры переходного процесса замкнутой системы при этом соответствуют приведенным на рис. 5.

Формируем желаемый полином $D_3(s)$ в виде

$$D_3(s) = \frac{d_{10}}{d_{20}}d_{24}s^4 + \frac{d_{10}}{d_{20}}d_{23}s^3 + \frac{d_{10}}{d_{20}}d_{22}s^2 + \frac{d_{10}}{d_{20}}d_{21}s + d_{10};$$

$$D_3(s) = 31,058s^4 + 5263s^3 + 334400s^2 + 9443000s + 100000000.$$

Коэффициенты гибких обратных связей (ГОС) в канонической форме управляемости при этом примут следующие значения:

$$\bar{K}_1 = [d_{11} - d_{31} \quad d_{12} - d_{32} \quad d_{13} - d_{33} \quad d_{14} - d_{34}];$$

$$\begin{aligned} \bar{K}_1 &= [4000000 - 9443000 \quad 60000 - 334400 \quad 400 - 5263 \quad 1 - 31,058] = \\ &= [-5443000 \quad -274400 \quad -4863 \quad -30,058]. \end{aligned}$$

Коэффициенты (ГОС) в реальных координатах будут следующими

$$K_1 = [-7,5 \quad -253,3 \quad -12990 \quad -313,7].$$

Схема и временная диаграмма представлены на рис. 6 и 7 соответственно.

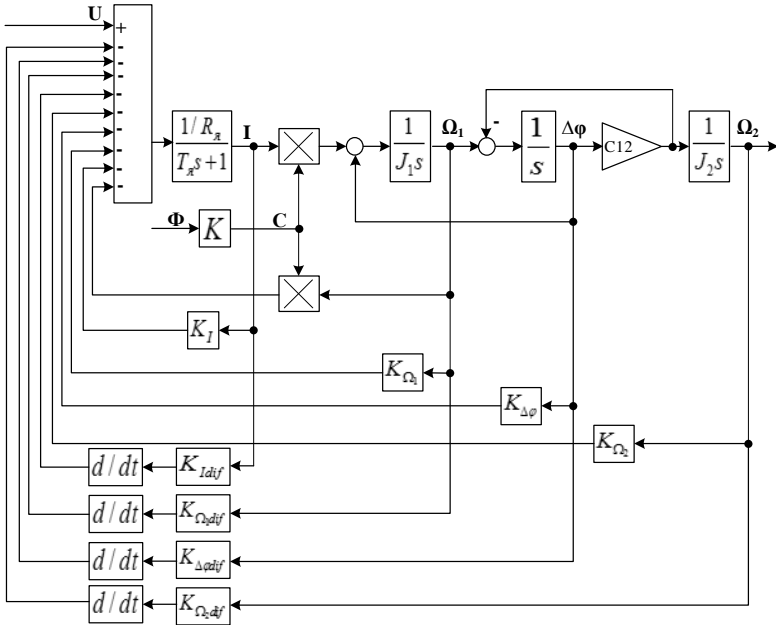


Рис. 6. САУ с АКАР и ГОС

Как видно из рис. 7, полученная система удовлетворяет как статическим, так и динамическим показателям качества.

Таким образом, этот предложенный метод позволяет синтезировать САУ нелинейными объектами, обеспечивающие выполнение требований к статическим и динамическим характеристикам.

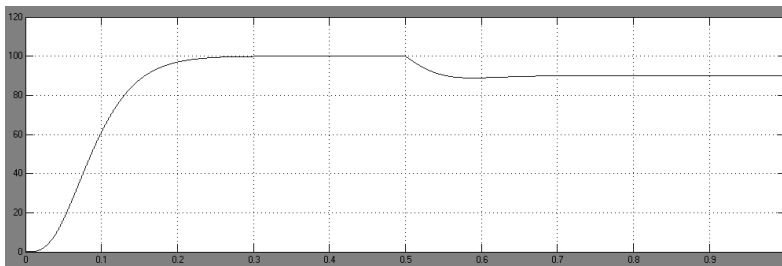


Рис. 7. Временная диаграмма частоты вращения рабочего органа

Библиографический список

1. **Тарарькин С.В., Тютиков В.В., Котов Д.Г.** Независимое формирование статических и динамических показателей систем модального управления // *Электричество*. – 2004. – № 11. – С. 56–62.
2. **Колесников А.А.** Основы теории синергетического управления. М.: Фирма «Испо-Сервис», 2000. – 264 с.: ил.
3. **Системное проектирование линейных регуляторов состояния:** Учеб. пособие / С. В. Тарарькин, В. В. Тютиков; Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2000. – 98 с.
4. **Котов Д. Г., Варков Е. А., Тарарькин С. В., Тютиков В. В.** Программный комплекс для автоматизированного проектирования систем модального управления («Сателлит»). Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2001610856. © М.: РОСПАТЕНТ, 2001.

*А. Р. Тюрин, студ.; рук. В.В. Тютиков д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ГРУБОСТИ НЕЛИНЕЙНЫХ САУ С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ РЕГУЛЯТОРОВ

При синтезе управляющих устройств нелинейными динамическими объектами возникает необходимость обеспечения заданных динамических показателей (быстродействие, колебательность) и статической точности. Достижение этих показателей может быть обеспечено различными способами. Данная работа посвящена сравнению параметрической грубости системы, синтезированной методом, аналогичным описанному в [1] с использованием метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) [2] вместо модального

управления, и классической астатической САУ, синтезированной методом АКАР.

Синтезируем регуляторы для электромеханического объекта, представленного на рис. 1, где I – ток, Ω_1 и Ω_2 – частоты вращения 1-й и 2-й масс, $\Delta\phi$ – разность углов поворота.

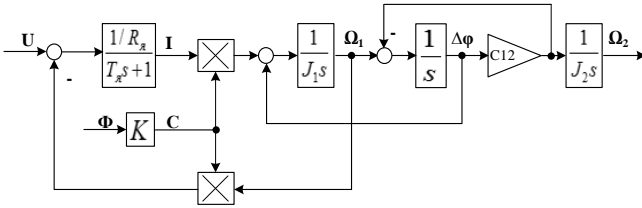


Рис. 1. Объект управления

Для определенности значения параметров объекта приняты следующими: $R_a = 0,19 \text{ Ом}$, $L_a = 0,25 \text{ Гн}$, $C_{12} = 50 \text{ Нм/рад}$, $J_1 = 0,15 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $J_2 = 0,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $K\Phi = 0,72 \text{ Вб}$. Необходимо обеспечить время переходного процесса не хуже 200 мс и статическую ошибку не более 10 рад/с при действии момента сопротивления на валу рабочего органа (РО) 26 Нм.

Запишем дифференциальные уравнения, описывающие систему, представленную на рис. 1,

$$sI = \frac{1}{L_a} U - \frac{K}{L_a} \Omega_1 \Phi - \frac{R_a}{L_a} I;$$

$$s\Omega_1 = \frac{K}{J_1} I\Phi - \frac{C_{12}}{J_1} \Delta\phi;$$

$$s\Delta\phi = \Omega_1 - \Omega_2;$$

$$s\Omega_2 = \frac{C_{12}}{J_2} \Delta\phi.$$

Уравнение регулятора, синтезированного согласно [1] примет вид:

$$U = K_I I + K_{\Omega_1} \Omega_1 + K_{\Delta\phi} \Delta\phi + K_{\Omega_2} \Omega_2 + \frac{L_a J_1 J_2}{C J_2 T_1 T_2 T_3 T_4 C_{12}} \Omega_{20},$$

где

$$\begin{aligned}
 K_I &= \frac{R_a T_1 T_2 T_3 T_4 - L_a T_2 T_3 T_4 - L_a T_1 T_3 T_4 - L_a T_1 T_2 T_4 - L_a T_1 T_2 T_3}{T_1 T_2 T_3 T_4}, \\
 K_{\Omega_1} &= \frac{(\Phi K)^2 J_2 T_1 T_2 T_3 T_4 + L_a J_2 T_1 T_2 T_3 T_4 C_{12} + L_a J_1 T_1 T_2 T_3 T_4 C_{12} +}{\Phi K J_2 T_1 T_2 T_3 T_4} + \\
 &+ \frac{-L_a J_1 J_2 T_3 T_4 - L_a J_1 J_2 T_2 T_4 - L_a J_1 J_2 T_2 T_3 - L_a J_1 J_2 T_1 T_4}{\Phi K J_2 T_1 T_2 T_3 T_4} + \\
 &+ \frac{-L_a J_1 J_2 T_1 T_3 - L_a J_1 J_2 T_1 T_2}{\Phi K J_2 T_1 T_2 T_3 T_4}, \\
 K_{\Delta\varphi} &= \frac{L_a J_2 T_2 T_3 T_4 C_{12}}{\Phi K J_2 T_1 T_2 T_3 T_4} + \frac{L_a J_2 T_1 T_3 T_4 C_{12} + L_a J_2 T_1 T_2 T_4 C_{12} + L_a J_2 T_1 T_2 T_3 C_{12}}{\Phi K J_2 T_1 T_2 T_3 T_4} + \\
 &+ \frac{L_a J_1 T_2 T_3 T_4 C_{12} + L_a J_1 T_1 T_3 T_4 C_{12} + L_a J_1 T_1 T_2 T_4 C_{12} + L_a J_1 T_1 T_2 T_3 C_{12}}{\Phi K J_2 T_1 T_2 T_3 T_4} + \\
 &+ \frac{-L_a J_1 J_2 T_1 - L_a J_1 J_2 T_2 - L_a J_1 J_2 T_3 - L_a J_1 J_2 T_4}{\Phi K J_2 T_1 T_2 T_3 T_4}, \\
 K_{\Omega_2} &= \frac{-L_a J_2 T_1 T_2 T_3 T_4 C_{12}^2 - L_a J_1 T_1 T_2 T_3 T_4 C_{12}^2 + L_a J_1 J_2 T_3 T_4 C_{12}}{\Phi K J_2 T_1 T_2 T_3 T_4 C_{12}} + \\
 &+ \frac{L_a J_1 J_2 T_2 T_4 C_{12} + L_a J_1 J_2 T_2 T_3 C_{12} + L_a J_1 J_2 T_1 T_4 C_{12} + L_a J_1 J_2 T_1 T_3 C_{12}}{\Phi K J_2 T_1 T_2 T_3 T_4 C_{12}} + \\
 &+ \frac{L_a J_1 J_2 T_1 T_2 C_{12} - L_a J_1 J_2^2}{\Phi K J_2 T_1 T_2 T_3 T_4 C_{12}},
 \end{aligned}$$

где T_1, T_2, T_3, T_4 – постоянные времени, определяющие время протекания процессов в синтезируемой системе

Коэффициенты гибких обратных связей (ГОС) будут следующими:

$$K_1 = \begin{bmatrix} K_{Idif} & K_{\Omega_1 dif} & K_{\Delta\varphi dif} & K_{\Omega_2 dif} \end{bmatrix} = [-7,5 \quad -253,3 \quad -12990 \quad -313,7].$$

Структурная схема САУ примет вид изображенный на рис 1.

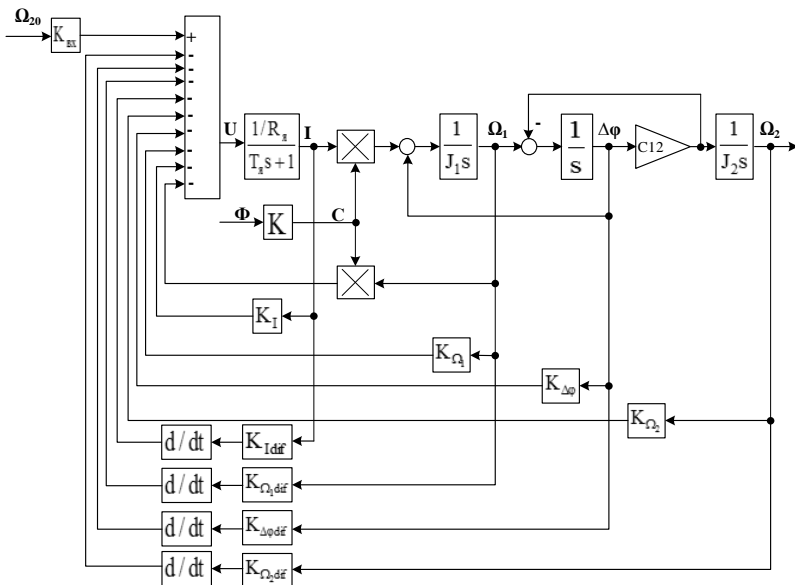


Рис. 1. АКАР с ГОС

Переходный процесс частоты вращения РО при подаче входного воздействия и изменении момента сопротивления приведен на рис. 2.

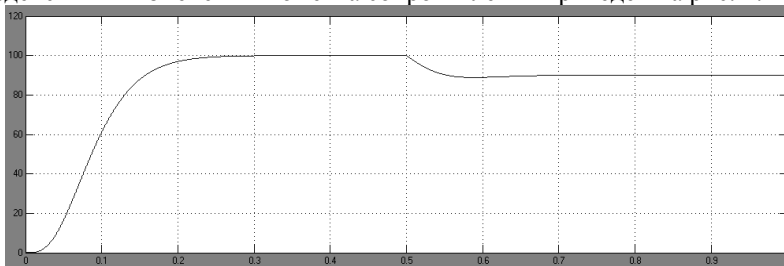


Рис. 2. Временная диаграмма частоты вращения РО

Синтезируем регулятор методом АКАР с астатизмом 1-го порядка методом, изложенным в [2]. Для этого расширим пространство состояний объекта управления, добавив интегратор на выход.

Запишем дифференциальные уравнения, описывающие объект управления с дополнительным интегратором:

$$sI = \frac{1}{L_a} U - \frac{K}{L_a} \Omega_1 \Phi - \frac{R_a}{L_a} I;$$

$$s\Omega_1 = \frac{K}{J_1} I \Phi - \frac{C_{12}}{J_1} \Delta\varphi;$$

$$s\Delta\varphi = \Omega_1 - \Omega_2;$$

$$s\Omega_2 = \frac{C_{12}}{J_2} \Delta\varphi.$$

$$s\varphi_2 = \Omega_2,$$

где φ_2 – угол поворота РО. Уравнение регулятора примет вид:

$$U = K_I I + K_{\Omega_1} \Omega_1 + K_{\Delta\varphi} \Delta\varphi + K_{\Omega_2} \Omega_2 + K_{\varphi_2} \varphi_2 + \frac{L_a J_1 J_2}{\Phi K T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 C_{12}} \Phi_{20}$$

где

$$K_I = \frac{R_a T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 - L_a T_2 T_3 T_4 T_5 - L_a T_1 T_3 T_4 T_5 - L_a T_1 T_2 T_4 T_5}{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5} +$$

$$+ \frac{-L_a T_1 T_2 T_3 T_5 - L_a T_1 T_2 T_3 T_4}{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5},$$

$$K_{\Omega_1} = \frac{(\Phi K)^2 J_2 T_1 T_2 T_3 T_4 T_5}{\Phi K J_2 T_1 T_2 T_3 T_4 T_5} +$$

$$+ \frac{L_a J_2 T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 C_{12} + L_a J_1 T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 C_{12} - L_a J_1 J_2 T_1 T_3 T_4 T_5}{\Phi K J_2 T_1 T_2 T_3 T_4 T_5} +$$

$$+ \frac{-L_a J_1 J_2 T_2 T_4 T_5 - L_a J_1 J_2 T_2 T_3 T_5 - L_a J_1 J_2 T_1 T_4 T_5 - L_a J_1 J_2 T_1 T_3 T_5}{\Phi K J_2 T_1 T_2 T_3 T_4 T_5} +$$

$$+ \frac{-L_a J_1 J_2 T_1 T_2 T_5 - L_a J_1 J_2 T_2 T_3 T_4 - L_a J_1 J_2 T_1 T_3 T_4 - L_a J_1 J_2 T_1 T_2 T_4}{\Phi K J_2 T_1 T_2 T_3 T_4 T_5} +$$

$$+ \frac{-L_a J_1 J_2 T_1 T_2 T_3}{\Phi K J_2 T_1 T_2 T_3 T_4 T_5},$$

$$\begin{aligned}
 K_{\Delta\varphi} &= \frac{L_a J_2 T_2 T_3 T_4 T_5 C_{12} + L_a J_2 T_1 T_3 T_4 T_5 C_{12}}{\Phi K J_2 T_1 T_2 T_3 T_4 T_5} + \\
 &+ \frac{L_a J_2 T_1 T_2 T_4 T_5 C_{12} + L_a J_2 T_1 T_2 T_3 T_5 C_{12} + L_a J_2 T_1 T_2 T_3 T_4 C_{12}}{\Phi K J_2 T_1 T_2 T_3 T_4 T_5} + \\
 &+ \frac{L_a J_1 T_2 T_3 T_4 T_5 C_{12} + L_a J_1 T_1 T_3 T_4 T_5 C_{12} + L_a J_1 T_1 T_2 T_4 T_5 C_{12}}{\Phi K J_2 T_1 T_2 T_3 T_4 T_5} + \\
 &+ \frac{L_a J_1 T_1 T_2 T_3 T_5 C_{12} + L_a J_1 T_1 T_2 T_3 T_4 C_{12} - L_a J_1 J_2 T_4 T_5 - L_a J_1 J_2 T_3 T_5}{\Phi K J_2 T_1 T_2 T_3 T_4 T_5} + \\
 &+ \frac{-L_a J_1 J_2 T_3 T_4 - L_a J_1 J_2 T_2 T_5 - L_a J_1 J_2 T_2 T_4 - L_a J_1 J_2 T_2 T_3 - L_a J_1 J_2 T_1 T_5}{\Phi K J_2 T_1 T_2 T_3 T_4 T_5} + \\
 &+ \frac{-L_a J_1 J_2 T_1 T_4 - L_a J_1 J_2 T_1 T_3 - L_a J_1 J_2 T_1 T_2}{\Phi K J_2 T_1 T_2 T_3 T_4 T_5}, \\
 K_{\Omega_2} &= \frac{-L_a J_2 T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 C_{12}^2}{\Phi K J_2 T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 C_{12}} + \\
 &+ \frac{-L_a J_1 T_2 T_3 T_4 T_5 C_{12}^2 + L_a J_1 J_2 T_3 T_4 T_5 C_{12} + L_a J_1 J_2 T_2 T_4 T_5 C_{12}}{\Phi K J_2 T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 C_{12}} + \\
 &+ \frac{L_a J_1 J_2 T_2 T_3 T_5 C_{12} + L_a J_1 J_2 T_1 T_4 T_5 C_{12} + L_a J_1 J_2 T_1 T_3 T_5 C_{12}}{\Phi K J_2 T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 C_{12}} + \\
 &+ \frac{L_a J_1 J_2 T_1 T_2 T_5 C_{12} + L_a J_1 J_2 T_2 T_3 T_4 C_{12} + L_a J_1 J_2 T_1 T_3 T_4 C_{12}}{\Phi K J_2 T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 C_{12}} + \\
 &+ \frac{L_a J_1 J_2 T_1 T_2 T_4 C_{12} + L_a J_1 J_2 T_1 T_2 T_3 C_{12} - L_a J_1 J_2^2 T_1 - L_a J_1 J_2^2 T_2 - L_a J_1 J_2^2 T_3}{\Phi K J_2 T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 C_{12}} + \\
 &+ \frac{-L_a J_1 J_2^2 T_4 - L_a J_1 J_2^2 T_5}{\Phi K J_2 T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 C_{12}}, \\
 K_{\varphi_2} &= -\frac{L_a J_1 J_2}{\Phi K T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 C_{12}},
 \end{aligned}$$

Астатическая система управления представлена на рис. 3, временная диаграмма частоты вращения электродвигателя при

$T_1 = T_1 = T_1 = T_1 = 0,01\text{с}$, $T_5 = 0,046\text{с}$ и приложении момента нагрузки $M_H = 26\text{Нм}$ в момент времени $t = 0,5\text{с}$ изображена на рис. 4.

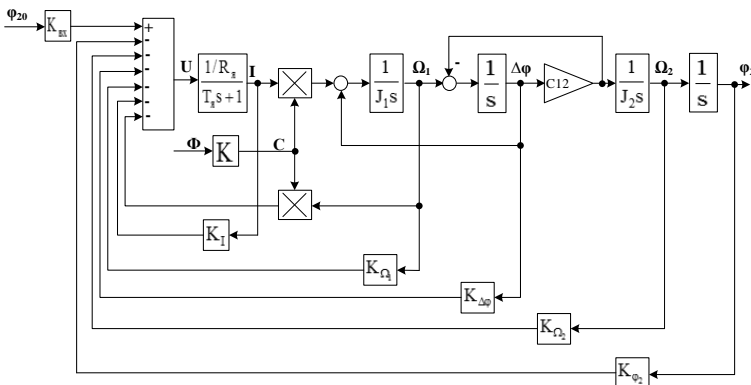


Рис. 3. АКАР с астатизмом

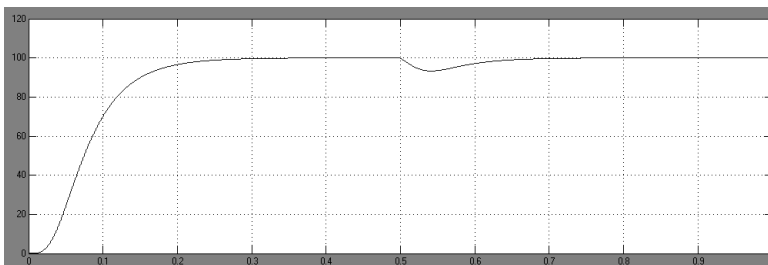


Рис. 4. Временная диаграмма частоты вращения РО

Сравним возможности систем, синтезированных рассмотренными методами, в отработке параметрических возмущений, вызванных изменением момента инерции второй массы.

Переходные процесс при увеличении момента инерции в 4 раза приведены на рис. 6.

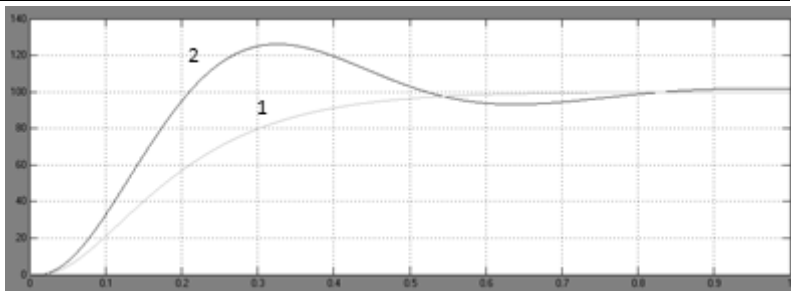


Рис. 6. 1 - АКАР с ГОС, 2 - АКАР с астазмом

Переходные процессы при уменьшении момента инерции в 4 раза приведены на рис. 6.

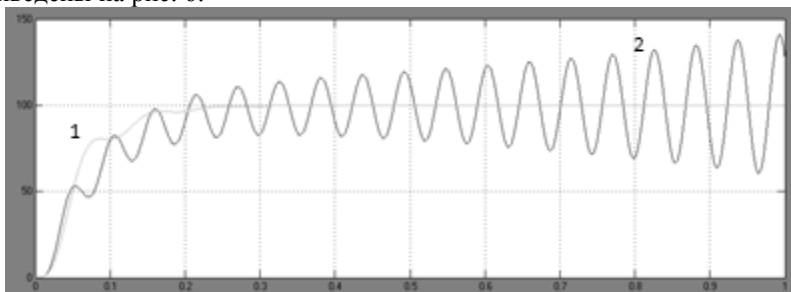


Рис. 9. 1 - АКАР с ГОС, 2 - АКАР с астазмом

Анализ результатов моделирования показывает, что система с ГОС обладает значительно большей параметрической грубостью.

Кроме того, повышение порядка САУ за счет астазма привело к существенному повышению трудоемкости синтеза регулятора.

Библиографический список

1. **Тарарькин С.В., Тютиков В.В., Котов Д.Г.** Независимое формирование статических и динамических показателей систем модального управления // *Электричество*. – 2004. – № 11. – С. 56–62.
2. **Колесников А.А.** Основы теории синергетического управления. М.: Фирма “Иско-Сервис”, 2000. – 264 с.: ил.

С.В. Швецов, студ.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СИЛИКАТНОЙ МАССЫ

Автоматизированные системы управления на производстве с высоким уровнем загрязнения и запыленности позволяют не только минимизировать человеческий фактор в работе и повысить производительность, но и исключить вред здоровью оператора производственной линии, т.е. повысить безопасность труда.

Объектом автоматизации, который мы описываем в данном случае, является линия распределения силикатной массы по бункерам силикатных прессов с плужковыми сбрасывателями, установленными над каждым бункером. Силикатная масса доставляется до бункеров по конвейерной ленте. Схема линии приведена на рисунке 1.



Рис. 1. Схема линии распределения силикатной массы

Внедренная система управляет 13-ю плужковыми сбрасывателями. Сбрасыватель опускается пневмоцилиндром после подачи сжатого воздуха (2-4 атм) пневмораспределителем. Пневмораспределитель включается с пульта управления системы подачей напряжения 220В и потребляет ток управления 0,06А (соленоиды). Уровень силикатной массы в бункерах прессов определяется сигнализаторами уровня в двух специально определенных точках бункера - верхней и нижней, - и отображается на пульте управления светодиодами (загораются при касании сигнализатора уровня). Сигнализаторы уровня выполнены из токопроводящих пластин, выполняющих роль первого электрода, и из второго электрода, подсоединенного к корпусу бункера. Силикатная масса является проводником.

Предусмотрена индикация срабатывания сбрасывателей на пульте управления. На пульте расположены светодиоды, показываю-

щие уровень массы в бункерах на основе сигнализаторов уровня. В нижней части пульта управления расположены кнопки, либо тумблеры ручного управления плужковыми сбрасывателями. Предусмотрена защита блока коммутации цепи питания соленоидов пневмораспределителей (далее - Выходные блоки) от короткого замыкания. Разработчиками предусмотрена возможность замены платы контроллера и выходных модулей управления в случае выхода из строя указанного оборудования.

Система имеет возможность работы в двух режимах: автоматическом и ручном. Выбор режима производится тумблером на пульте управления. Автоматический режим: наполнение бункеров работающих прессов последовательно по нижнему или верхнему уровню. Ручной режим: включение с пульта управления любых плужковых сбрасывателей, в любой последовательности и количестве. Системой предусмотрено выключение из работы любого плужкового сбрасывателя, независимо от режима управления.

Опрос сигнализаторов уровня производится каждые 10 секунд, причем, если какой-либо из каналов сбора информации неисправен, индикаторы сообщают об этом специальным образом. При запуске системы каждый бункер заполняется силикатной массой до нижнего уровня в прямой последовательности, чтобы обеспечить наиболее быстрый ввод в работу всех силикатных прессов. При заполнении всех бункеров до нижнего уровня система либо продолжает заполнять бункера до верхнего уровня в прямой последовательности, либо действует по правилу приоритетов, описанном ниже.

В заполнении бункеров силикатной массой используется понятие приоритета. Приоритетным для заполнения считается бункер, в котором недостаток силикатной массы был выявлен раньше остальных. Поскольку в случае обнаружения высшего приоритета у первого (по отношению к направлению движения массы) бункера на конвейерной ленте остается неиспользованная масса, то эта масса сбрасывается в бункер с номером с 7 по 13 с наибольшим приоритетом.

Результатом внедрения автоматизированной системы распределения силикатной массы является автономная работа плужковых сбрасывателей с равномерным заполнением всех 13-и бункеров в процессе работы силикатных прессов. Возможность ручного управления каждым сбрасывателем и его блокировка также имеют место. Предусмотрена возможность удаленного мониторинга работы системы.

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

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ МАТЕРИАЛЫ 1,5 РОДА

Сверхпроводящие вещества в зависимости от реакции на воздействие внешнего магнитного поля разделяются на сверхпроводники 1-го и 2-го рода. В 2004 году было высказано предположение, что диборид магния MgB_2 может вести себя в магнитном поле неким особым образом, из-за чего он получил название сверхпроводника 1,5-го рода. Однако экспериментальных подтверждений существования такого рода сверхпроводимости получено не было, и диборид магния до настоящего времени оставался единственным кандидатом в сверхпроводники 1,5-го рода. Коллектив учёных из США и Швеции теоретически показал, что полуторный род сверхпроводимости может иметь место в рутенате стронция Sr_2RuO_4 .

Sr_2RuO_4 — в определённом смысле уникальный сверхпроводник. Существуют разные способы классификации сверхпроводников. Один из них — по реакции на внешнее магнитное поле. Другим, более известным способом деления сверхпроводников является их дифференциация по величине критической температуры. Наконец, есть ещё один тип классификации, который заключается в делении сверхпроводников по структуре куперовской пары, которая, можно сказать, «вдохновляет» само явление сверхпроводимости.

Куперовские пары являются квантовыми объектами, свойства которых описываются специальной физической характеристикой — волновой функцией (квадрат модуля этой функции показывает вероятность обнаружить этот объект в заданном участке пространства; с некоторой натяжкой можно сказать, что эта функция аналогична зависимости координат от времени для классического объекта). Долгое время с момента открытия сверхпроводимости было известно, что куперовская пара — это объединение электронов с противоположно направленными спинами. Материалы с таким типом спаривания электронов физики называют спин-синглетными *s*-волновыми сверхпроводниками. Добавка «волновой» появляется из-за того, что, как уже было сказано, куперовские пары описываются *волновой* функцией, а приставка «*s*» означает, что их орбитальный момент (момент импульса) равен нулю, то есть они, упрощенно говоря, не вращаются вокруг своего центра масс.

После того как в 1986 году были открыты высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) на основе меди, экспериментальные исследова-

ния показали, что хотя в этих веществах электроны спариваются, имея противоположно направленные спины, куперовские пары всё-таки отличаются от таковых для известных ранее сверхпроводников. Отличие это заключается в том, что электронные пары в ВТСП вращаются, при этом их орбитальный момент в специальных единицах равен 2. ВТСП на основе меди были названы необычными (в научной литературе есть удачный английский термин «unconventional») спин-синглетными d -волновыми сверхпроводниками. Символ « d » указывает на то, что орбитальный момент куперовских пар равен 2. Иными словами, помимо собственного вращения электронов (спин), куперовская пара обладает ещё вращением вокруг своего центра масс (орбитальный момент).

В 1994 году была открыта сверхпроводимость в рутенате стронция. Несмотря на то что его критическая температура очень низкая, приблизительно 1,5 К, это открытие привлекло внимание специалистов по нескольким причинам. Прежде всего, потому, что данное вещество имело аналогичную ВТСП кристаллическую структуру и не содержало «обязательной» меди, как это имело место для всех известных на тот момент ВТСП. Сравнивая физические характеристики нормального и сверхпроводящего состояния Sr_2RuO_4 и медных ВТСП, пытались прояснить саму природу высокотемпературной сверхпроводимости.

Спустя год после открытия сверхпроводящего состояния рутената стронция коллектив теоретиков высказал гипотезу, что сверхпроводимость в Sr_2RuO_4 не является спин-синглетной. Согласно предположению этих учёных, в рутенате стронция спины в куперовской паре направлены в одну сторону, плюс сами куперовские пары обладают угловым моментом, равным единице.

Последовавшие эксперименты свидетельствовали в пользу этого предположения. Как итог, такая разновидность необычной сверхпроводимости получила название **спин-триплетной p -волновой** сверхпроводимости (символ « p » говорит о том, что орбитальный момент куперовской пары равен единице). В настоящее время нет данных о том, что какой-либо ещё из большого количества сверхпроводников обладает аналогичным типом сверхпроводимости. Собственно, из-за этой уникальности рутенат стронция бурно исследуется и поныне.

Результаты последних экспериментов указывают на то, что оба сорта куперовских пар можно рассматривать как отдельно взятые спин-синглетные сверхпроводники без вращения куперовских пар. Структура куперовских пар в «железных» сверхпроводниках оказалась более хитрой. Согласно экспериментальным данным, фазы волновых функций (комплексных величин) в «железных» сверхпроводниках

сдвинуты на π . Из-за этого фазового сдвига волновые функции каждого сорта имеют противоположные знаки. По этой причине такие сверхпроводники получили название $s\pm$ -волновых.

Ещё одной любопытной особенностью Sr_2RuO_4 как сверхпроводника является его двухзонность, о чём свидетельствуют результаты последних экспериментов. После получения таких данных, появились все основания предположить, что рутенат стронция является потенциальным кандидатом на звание сверхпроводника 1,5-го рода, в котором возможно существование различного рода неоднородностей вихревой решётки.

Первые подробные исследования распределения вихрей в данном сверхпроводнике были проведены в 2005 году [1]. Тогда экспериментаторы установили факт так называемой коалесценции вихревой решётки. Иными словами, вихри не формировали треугольную решётку в сверхпроводящем образце, отталкиваясь друг от друга, как это происходит в сверхпроводнике 2-го рода. Вместо этого они начинали сливаться в крупные домены, причём размеры этих доменов росли с усилением магнитного поля (рис. 1).



Рис. 1. Вихревая решётка в монокристалле рутената стронция, полученная во внешнем магнитном поле 0,0002 Тл (а), 0,0006 Тл (б) и 0,0007 Тл (с). Светлые участки соответствуют вихревым образованиям (областям, куда проникло магнитное поле) [1]

Результаты экспериментов означали, что в сверхпроводящем рутенате стронция существует некое притяжение между вихрями. Откуда берётся это притяжение и почему оно имеет место в Sr_2RuO_4 , для экспериментаторов оставалось загадкой.

Наблюдаемая коалесценция вихрей легко может быть объяснена, если попробовать описать сверхпроводящие свойства рутената стронция в рамках специальной теоретической модели, разработанной исключительно для этого сверхпроводника, в которой учитывается его двухзонность. Стоит отметить, что с некоторыми модификациями эта теория была использована для предсказания и обоснования сверхпроводимости 1,5-го рода.

Итак, основываясь на этой теоретической модели для Sr_2RuO_4 , было проведено численное моделирование возникновения вихревой решётки с

параметрами, соответствующими характеристикам сверхпроводящего состояния рутената стронция. Оказалось, что при заданных параметрах теория выдаёт на качественном уровне такое же поведение вихрей, которое было получено в проведённых ранее экспериментах (рис. 2).

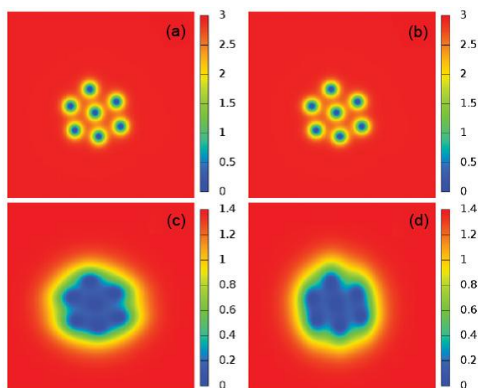


Рис. 2. Распределение концентрации (в относительных единицах) каждого «сорта» (слева — первого, справа — второго) куперовских пар в двухзонном сверхпроводящем рутенате стронция. Красные участки соответствуют наибольшему числу пар электронов, тёмно-синие — области, где их количество стремится к нулю. Данные графики показывают эволюцию вихревой решётки: от начала формирования вихревого кластера (а и б) из 7 вихрей до его непосредственного появления (с и д)[2]

Картинки на рисунке 2 ясно и чётко указывают на притяжение между вихрями и, как следствие, на их коалесценцию. В свою очередь, возможность формирования таких вихревых кластеров можно интерпретировать как факт наличия сверхпроводимости 1,5-го рода в этом соединении. Именно этот вывод и является основным результатом данной статьи.

Библиографический список

1. **V. O. Dolocan** et al. Observation of Vortex Coalescence in the Anisotropic Spin-Triplet Superconductor Sr_2RuO_4 (2005)
2. **Physical Review B**
3. **Egor Babaev, Mihail Silaev**, 2012. Comment on "Ginzburg-Landau theory of two-band superconductors: Absence of type-1.5 superconductivity"
4. **V. G. Kogan, Jörg Schmalian**, 2012. Reply to «Comment on "Ginzburg-Landau theory of two-band superconductors: Absence of type-1.5 superconductivity"»
5. **Egor Babaev, Martin Speight**, 2004. Semi-Meissner state and neither type-I nor type-II superconductivity in multicomponent superconductors

*С. А. Самаринский, студ.; рук. Л. Г. Копылова, к т. н.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

РАЗРАБОТКА СТЕНДА НА ОСНОВЕ ПЛАТЫ ВВОДА-ВЫВОДА NI PCIe-6343 И БИБЛИОТЕКИ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ПК MATLAB ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНОТРОННЫХ СИСТЕМ

При изучении электромеханотронных систем зачастую возникает необходимость выполнять тестовое включение того или иного объекта управления с целью предварительного анализа переходных процессов и выбора дальнейших путей синтеза регулятора. Подходы к решению этой задачи, наработанные в промышленности, являются несколько неудобными ввиду малой наглядности. Кроме того, в лабораторных условиях желательнее иметь возможность оснастить исследуемый объект тем или иным регулятором за минимальное время без разработки дополнительного и доработки имеющегося аппаратного обеспечения. Поэтому поставлена задача разработать удобный и наглядный стенд для исследования электромеханотронных систем.

С целью решения обозначенной выше задачи предлагается использовать плату ввода-вывода NI PCIe-6343, обладающую достаточно широкими возможностями взаимодействия с внешними устройствами. Так, плата оснащена аналоговыми входами и выходами, счетчиками, дискретными линиями ввода-вывода, которых достаточно для осуществления коммуникации с многими электромеханотронными объектами. Для управления платой ввода-вывода и, в свою очередь, объектом, целесообразно применять персональный компьютер под управлением ОС семейства Windows и программный комплекс MATLAB с библиотекой реального времени.

Предложенный подход позволяет быстро и наглядно оснастить объект управления регулятором, изучить прямые показатели качества переходных процессов, протекающих в объекте и в системе, при необходимости внести любые коррективы в регулятор, в том числе полностью изменить его структуру. Кроме того, при такой конфигурации стенда проектируемый регулятор может быть исследован на модели и перенесен на реальный объект управления без необходимости внесения каких-либо изменений, связанных с адаптацией регулятора к иной аппаратной платформе.

В рамках предварительных испытаний стенда установлено, что плата ввода-вывода NI PCIE-6343 пригодна для подобного рода применений и позволяет осуществлять управление с периодом дискретизации 1 мс без запаздывания.

Важно отметить, что стенд обладает высокой гибкостью и может быть адаптирован ко многим объектам управления.

СЕКЦИЯ 23

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Председатель – д.т.н., проф. Полетаев В.А.
Секретарь – к.т.н., доц. Ведерникова И.И.

*А.А. Подолян асс.; рук. Г.С. Тымчик д.т.н., проф.
(НТУУ «КПИ», г. Киев)*

АНАЛИЗ ФОРМИРОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ СИСТЕМОЙ ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЭМА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

Среди существующих бесконтактных методов неразрушающего контроля промышленного оборудования особое место занимает электромагнитно-акустический (ЭМА) метод [1].

Для реализации ЭМА метода параллельно поверхности контролируемого объекта помещается система токопроводящих нитей или витков. Локальный участок данной поверхности подвергается воздействию постоянного или медленно меняющегося магнитного поля. Электродинамическое взаимодействие приводит к появлению давлений. Соотношение описывающее закон распределения давлений на поверхность устанавливают связь между акустическим давлением на поверхность пространства с током нити и её расположением [2].

Для исследования процесса формирования решеткой синфазных нитей-излучателей акустических колебаний смоделировано влияние различных факторов (величины тока нити I_0 , частоты тока в нити f_i , расстояния h от нитей до поверхности на создаваемое суммарное акустическое давление p_Σ в объект контроля (рис. 1 - рис. 2).

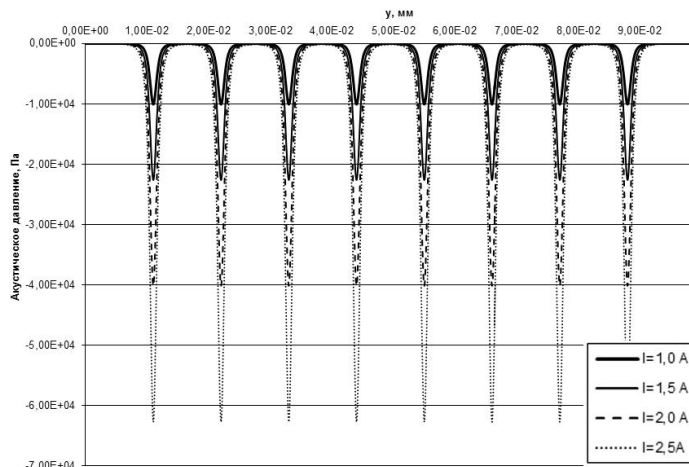


Рис. 1. Зависимость $p_{\Sigma}(y)$ при различных значениях амплитуды тока

$$I_0, B_{\Sigma} = 0,3 \text{ Тл}, h = 1 \text{ мм}, f_i = 0,5 \text{ МГц}$$

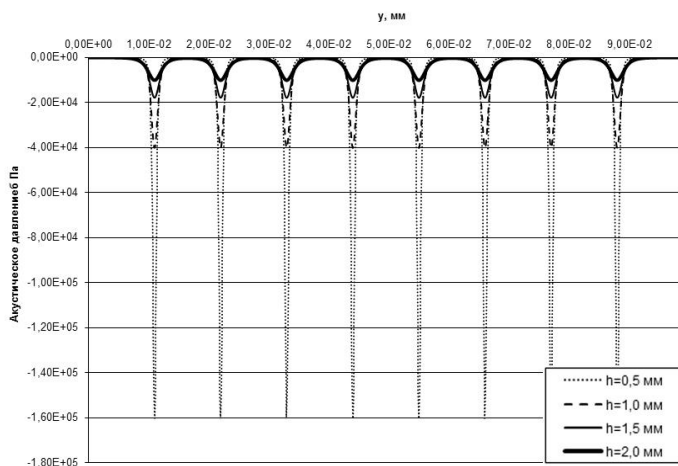


Рис. 2. Зависимость $p_{\Sigma}(y)$ при различных значениях расстояния h ,

$$B_{\Sigma} = 0,3 \text{ Тл}, I_0 = 2 \text{ А}, f_i = 0,5 \text{ МГц}$$

От количества нитей-излучателей и их длины зависит размер результирующего пучка излучения. Давление в каждой точке поверхности контролируемого пространства под решеткой будет создаваться каж-

дой нитью-излучателем, с учетом расстояния от рассматриваемой точки до центра каждого излучателя [2,3].

Показано, что максимальное акустическое давление создается непосредственно под нитью решётки. При увеличении расстояния до объекта контроля давление резко падает. С ростом величины тока в нитях давление растет в квадрате. Меняясь во времени, оно не меняет своего знака и изменяется от нуля до максимума дважды за период питающего тока.

Библиографический список

1. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / Под ред. В.В. Клюева М.: Машиностроение. – 2005. – 656 с.
2. **Сазонов Ю.И., Шкарлет Ю.М.** Исследование бесконтактных методов возбуждения и регистрации ультразвуковых колебаний: Ультразвуковые методы контроля. Дефектоскопия. Вып.5. 1969.
3. **Малинка А.В., Драпкин И.А., Коломец Н.Т.** Электромагнитно-акустический метод контроля ферромагнитных листов и труб. Дефектоскопия. 1972. Вып. 4.

*А.П. Баранов, студ., рук. Т.Ю. Степанова, к.т.н., доц.
(ИГХТУ, г. Иваново)*

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ НА СВОЙСТВА МИНЕРАЛЬНЫХ МАСЕЛ

К энергосберегающим технологиям относится создание микроэмульсий на основе поверхностно-активных веществ (ПАВ). ПАВ, модифицируя масла, изменяют их физико-механические свойства и увеличивают срок службы.

Главной причиной выхода из строя деталей узлов трения является коррозионно-механический износ, а также образование технических загрязнений в редукторах из-за реакций масла с металлом деталей.

Объектом исследования являлось индустриальное масло И-50, модифицированное микроэмульсиями на основе ПАВ. В качестве компонентов эмульсии использовали оксиэтилированные вещества и одноатомные спирты, которые хорошо эмульгируются в масле.

В процессе работы редуктора индустриальное масло И-50 окисляется, что вызывает изменение вязкости и соответственно повышение коэффициента трения и как следствие увеличение температуры смазочного материала, ведущее к дальнейшей деструкции масла.

Спирты, входящие в состав микроэмульсии, взаимодействуют с образовавшимися кислотами, соединяясь в сложные эфиры, вследствие чего происходит незначительное увеличение кислотного числа и изменение кинематической вязкости масла.

В лабораторных условиях проведены исследования смазочных композиций по следующим показателям: модуль сдвига, динамическая и кинематическая вязкость и кислотное число.

Поверхностно-активные вещества обладают низким сдвигом при деформации. Вещества, образующие микроэмульсию, имеют линейную форму молекул, которые в виде вытянутых палочек ориентируются в потоке масла и образуют защитный слой на трибоповерхностях. Снижение динамической вязкости системы наблюдали при увеличении напряжения сдвига.

Исследовалось влияние напряжения сдвига на динамическую вязкость смазочной композиции на ротационном вискозиметре «Реотест-RV2» и скоростью вращения цилиндра от 1 до 245 об/мин. Вязкое трение жидкости о цилиндр определялось по закручиванию приводной пружины, которое измеряется датчиком угла вращения.

Существенное влияние на незначительное изменение кинематической вязкости смазочного материала оказывала микроэмульсия на основе ПАВ (таблица 1).

Таблица 1 - Показатели смазочного материала

Процентное содержание ПАВ в масле И-50	Динамическая вязкость, МПас	Модуль сдвига, Н/м ²	Кинематическая вязкость, Сст	Кислотное число, мг КОН/г масла
0	65-38	3,5-7,8	105-107	0,043
1	57-35	3,0-6,3	107-109	0,025
2	56-34	3,2-7,1	108-109	0,017
3	55-33	2,9-6,9	111-112	0,014
4	54-35	3,1-7,3	110-112	0,010
5	54-36	2,8-8,0	112-113	0,009

Исследования показали, что ПАВ позволяют стабилизировать процесс окисления масла и продлить его срок службы и, соответственно, деталей узлов трения.

Микроэмульсия на основе ПАВ нейтрализуют действие образующихся в масле кислот, вследствие этого происходит уменьшение приращения кислотного числа в 2-3 раза и незначительное изменение кинематической вязкости смазочной композиции.

Результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод, что разработанная микроэмульсия на основе поверхностно-активных веществ замедляет деструкции индустриального масла И-50 и увеличивает срок службы смазочного материала.

Библиографический список

1. **Справочник** по триботехнике/ Под общ.ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. В3 т. Т. 1. Теоретические основы. – М.: Машиностроение, 1989. – 360 с.
2. **Горюнов, Ю. В., Перцов, Н. В., Сумм, Б. Д.** Эффект Ребиндора. – М.: Наука. – 1966. – 126 с.
3. **Аксенов, А. Ф.** Трение и изнашивание металлов в углеводородных жидкостях. – М.: Машиностроение, 1977. – 150 с.

*М.В. Смирнов, курсант, А.И. Бобков, курсант;
рук. А.В. Топоров, к. т. н., Е.А. Топорова, к. т. н.
(ИВИ ГПС МЧС России, г. Иваново)*

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЭКИПИРОВКЕ ПОЖАРНЫХ

Боевая одежда пожарного (БОП) предназначена для защиты его тела от опасных и вредных факторов окружающей среды, возникающих при тушении пожаров и проведении связанных с ними первоочередных аварийно-спасательных работ, а также от неблагоприятных климатических воздействий. Боевая одежда является основным и самым массовым по применяемости средством индивидуальной защиты пожарных. Она используется при тушении любых пожаров всеми категориями работающих (газодымозащитник, колонщик, водитель пожарного автомобиля и др.) [1].

Боевая одежда пожарного призвана защищать человека от воздействия различных факторов, основными из которых является высокая температура и физико – механические воздействия.

Компенсация механических воздействий достигается за счет использования подкладки, изготавливаемой из различных волокон. Являясь достаточно хорошей теплоизоляцией такие материалы не всегда эффективно защищают пожарного от механических воздействий. По-

этому, применение новых материалов, более эффективно поглощающих ударные нагрузки является актуальной задачей.

В последнее время появился целый ряд материалов с уникальными свойствами, среди которых можно выделить энергосорбент d3o [2].

Новый материал реализует эффект изменения вязкости в зависимости от скорости движения тела (Неньютоновская жидкость).

При обычных медленных движениях на расширение, растяжение или изгиб материал является гибким и эластичным. При ударах, он резко становится более плотным по всей своей поверхности, перераспределяя и, таким образом, поглощая энергию ударов. В этот момент сила удара равномерно распределяется на всю площадь материала, что существенно снижает ударную нагрузку непосредственно в месте удара. Как только воздействие удара заканчивается, материал, снова приобретает свою первоначальную форму и свойства.

На официальном сайте материала D3O можно встретить множество известных мировых брендов спортивной и мотоэкипировки, которые являются не только их партнерами, но и предлагают свои варианты изделий с различными защитными вставками, что доказывает его эффективность для защиты от ударов, неизбежных в экстремальных видах спорта.

Применение такого материала в качестве ударопоглощающих вкладок в боевую одежду может позволить снизить травматизм личного состава при выполнении боевых задач.

Однако, не стоит переоценивать данный материал. Так, например применение d3o в специальной обуви может быть ограничено вследствие его физических свойств. Отвердевание, а точнее значительное увеличение вязкости происходит при динамических нагрузках, возникающих при ударах и падениях. В случае наступания на острый предмет скорость воздействия незначительна, нагрузка носит статический характер, что не влечет за собой отвердевания материала и не препятствует проколу.

Таким образом, применение d3o в боевой одежде позволит заметно повысить защищенность пожарного от физико-механических воздействий, при условии, что они будут носить динамический характер.

Библиографический список

1. <http://www.0-1.ru/handbook/showdoc.asp?dp=11>
2. <http://www.d3o.com/>

*Д.А. Дуда, курсант, А.Н. Малышкин, курс.;
рук. В.В. Киселев, к. т. н., доц., А.В. Топоров, к. т. н.
П.В. Пучков, к. т. н.
(ИВИ ГПС МЧС России, Иваново)*

ВЛИЯНИЕ ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ПОЖАРЕ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

По данным справки, подготовленной департаментом надзорной деятельности по анализу обстановки с пожарами и последствий от них на территории РФ, мы можем отметить, что доля пожаров, возникающих на объектах, выполненных с применением металлоконструкций составляет порядка 15 %.

При пожарах в закрытых помещениях могут возникать температуры порядка 800 °С. Из литературных источников известно, что температуры порядка 600 °С приводят к снижению прочности металлических конструкций приблизительно в 3 раза. Что же происходит с металлоконструкциями при более высоких температурах, информации в литературе нет. Задачей данного исследования явилось выявить влияние на прочность конструкционных материалов повышенных температур до 800 °С, а также выявить каким образом влияет тушение пожара водой на остаточную прочность металлоконструкций.

Металлы обладают сильной чувствительностью к высоким температурам и к действию огня. Хотя металл и не горит, однако он быстро нагревается, плавится, понижаются его прочностные свойства. Если металлоконструкции дома не обработаны огнезащитными средствами, то пожар на первом этаже может повлечь обрушение здания целиком. Одним из способов огнезащиты металлических конструкций, получивших широкое применение за последнее десятилетие, является нанесение огнезащитных тонкослойных вспучивающихся красок. Огнезащитное действие данных материалов основано на образовании теплоизолирующего слоя (пенококса) при тепловом воздействии (170 – 200 °С), позволяющего замедлить прогревание металла и сохранить конструкциям несущую способность при пожаре в течение заданного периода времени, от 30 минут до 2 часов и более. Огнезащитная эффективность измеряется в минутах и зависит от полученного слоя покрытия.

Для проведения экспериментальной части работы использовалось стандартное лабораторное оборудование – высокотемпературные электрические печи, машина для испытания материалов на растяжение

и гидравлический пресс (рис. 1.)



Рис. 1. Лабораторное оборудование.

Испытанию подверглись конструкционный материал, который имеет наибольшее распространение в строительстве – конструкционная сталь. Было отобрано несколько образцов конструкционных материалов. Первый образец – эталонный, был испытан на разрывной машине Р – 5. Предел прочности стали составил 714,3 МПа. Другие образцы были подвергнуты нагреву в муфельной печи до различных температур в интервале времени от 15 до 40 минут.

Так, об условиях, исходя из которых, следует определять дислокацию подразделений пожарной охраны на территориях поселений и городских округов, - время прибытия первого подразделения к месту вызова не должно превышать 10 минут в городских поселениях, городских округах. Время оперативного развертывания, которое принимается от 6 до 8 мин. При самых оптимистичных прогнозах, пожарная команда приступит к тушению пожара, охлаждению металлоконструкций через 16 минут.

После нагрева одну заготовку погружали в воду для мгновенного охлаждения. Другую заготовку прошедшую нагрев оставили остывать на воздухе. После остывания, обе детали подверглись проверке на разрывной машине.

Проведенные исследования показали, что механические свойства стали при нагревании ее до температуры 200...250 °С практически не меняются. При температуре 250...300 °С прочность стали несколько повышается, пластичность снижается. Сталь в изломе имеет крупнозернистое строение и становится более хрупкой (синеломкость). Не следует при этой температуре деформировать сталь или подвергать ее ударным воздействиям.

Нагрев выше 400 °С приводит к резкому падению предела текучести и временного сопротивления, а при $t = 600 \dots 650$ °С наступает температурная пластичность и сталь теряет свою несущую способность.

Огнезащита несущих металлических конструкций является одной из важнейших задач в области обеспечения пожарной безопасности объектов. Применяемые для огнезащиты обычные (не вспучивающиеся) материалы, как правило, занимают дополнительный объем и увеличивают за счет собственной массы нагрузку на защищаемую конструкцию. Кроме того, средства огнезащиты должны не только обеспечивать защиту конструкции от внешнего огневого воздействия, но и обладать адгезией к подложке материала конструкции, долговечностью в нормальных условиях эксплуатации, технологичностью при изготовлении и нанесении на защищаемую конструкцию. Этим требованиям соответствуют вспучивающиеся огнезащитные составы, огнезащитный эффект которых основан на образовании при тепловом воздействии пористой массы с низкой теплопроводностью, которая препятствует притоку тепла к защищаемой поверхности.

Эксперименты показали, что для металлических конструкций критическое значение температуры $t_{кр}$, при котором ослабляются прочностные характеристики стали, равно 650 °С, причем продолжительность нагрева имеет определенное значения. Было выявлено, что прочностные параметры металлоконструкций при большем времени нагрева снижаются на 10 – 15 %.

В ходе испытаний также было установлено, что образцы, остывавшие на воздухе имели остаточную прочность порядка 428,6 МПа, что в 1,7 раза отличалось от эталонного. Образцы, охлажденные водой, разупрочнились в 5,6 раза, получив остаточную прочность 127,5 МПа (рис. 2.)

В качестве вывода следует отметить тот факт, что свойства материалов сильно зависят от температуры.

До температуры 300 °С временное сопротивление σ_v повышается (на 20 – 30 %), а при дальнейшем повышении температуры резко снижается.

Величина предела текучести σ_T и предела пропорциональности σ_n с повышением температуры уменьшается. При температуре 400 °С предел текучести составляет 60 – 70 % его величины при комнатной температуре. С повышением температуры длина площадки текучести сокращается и при температуре около 400° площадка вовсе исчезает.

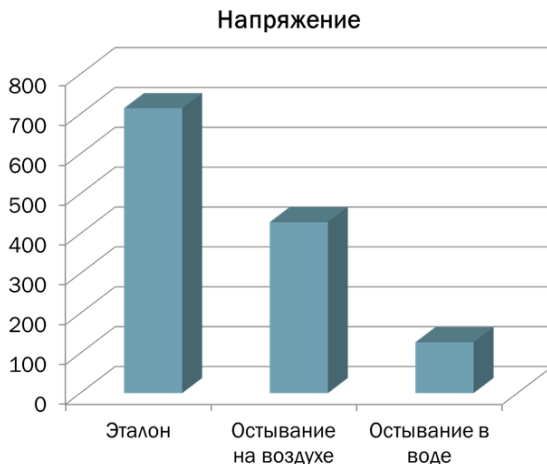


Рис. 2. Снижение прочности стали под воздействием высоких температур

Пластические свойства (относительное остаточное удлинение при разрыве δ и сужение площади поперечного сечения ψ) с повышением температуры до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ снижаются, а при дальнейшем ее повышении увеличиваются.

Механические свойства материалов зависят от продолжительности испытания. При некоторых температурах (например, для малоуглеродистой стали при температуре выше $800\text{ }^{\circ}\text{C}$) испытуемый образец может быть разрушен при напряжении меньшем, чем предел пропорциональности, соответствующий комнатной температуре, если это напряжение будет действовать достаточно продолжительное время.

Детали, предназначенные для работы при высоких температурах, следует изготавливать из специальных теплоустойчивых (жаропрочных) и жаростойких сталей, содержащих примеси специальных легирующих элементов или на потенциально опасных объектах несущие элементы металлоконструкций необходимо покрывать специальными огнезащитными составами.

Библиографический список

1. ГОСТ 30247.0-94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования.
2. Яковлев А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1988. – 143 с.

*А.Н. Малышкин, курс., Д.А. Дуда., курс.;
рук. В.В. Киселев, к. т. н., доц., А.В. Топоров, к. т. н.
П.В. Пучков, к. т. н.
(ИВИ ГПС МЧС России, Иваново)*

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ ЦЕПНЫХ БЕНЗОПИЛ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ СПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ

Часто при проведении спасательных работ в зонах ЧС, а также при ликвидации последствий стихийных бедствий требуется использование специального современного аварийно-спасательного оборудования. Одним из востребованных видов аварийно-спасательного оборудования являются бензопилы. Этот вид оборудования требуется при ликвидации последствий природных катаклизмов, таких как наводнения, ураганы, землетрясения.

До недавнего времени оснащенность сил пожарной охраны оставалась слабой, не хватало современного высокотехнологичного оборудования, а имеющееся оборудование часто было изношено, что создавало дополнительный риск отказов его при проведении спасательных операций.

В данной работе проводится анализ ассортимента продукции известных и известных брендов. В их число входит также отечественный производитель – «Урал». Как видим, производством спасательных бензопил занимаются многие производители, но какие же лучше остальных – это важный вопрос, требующий дополнительного анализа.

Единой версии изобретения бензопилы не существует, поэтому на роль первопроходцев претендуют многие из современных производителей данной техники. Попробуем проследить основные вехи развития, столь полезного и популярного ныне инструмента.

По сути своей, ручная бензопила является цепной пилой (chain saw) у которой режущий инструмент представляет собой замкнутую гибкую ленту собранную из небольших элементов с зубьями. Замкнутость ленты избавляет от необходимости реверсировать ход инструмента, что в конечном итоге приводит к увеличению производительности.

На рисунке 1, можно увидеть изображение цепной пилы, установленной на рельсы для распиливания больших стволов деревьев. Общий размер пилы можно оценить благодаря фигуре рабочего. Формально, данная пила выходит за рамки нашего исследования этапов развития ручных цепных пил, но весьма показательно что уже тогда (Обложка

еженедельника "Scientific American" за 22 января 1910 года) цепные пилы имели вполне привычную нам шину (схема внизу обложки).



Рис. 1. Обложка журнал "Scientific American" за 22 января 1910 года с изображенной на ней цепной пилой.

Самая ранняя обнаруженная конструкция цепной пилы была без шины. Патент на неё был выдан в США, 1 сентября 1885 года на имя Walter S. Shipe. (за основу работы взяты патенты выданные в США, это обусловлено тем, что именно американские патенты представлены в сети Интернет наиболее полно). В нём автор подробно описывал устройство и преимущества цепи и предлагал использовать лошадь или паровую машину для приведения пилы в действие.

В дальнейшем, изобретатели уделяли значительное внимание конструкции звеньев цепи, способам соединения их друг с другом и передачи движения с ведущего колеса на цепь. Зачастую, заявленное изобретение представляло из себя лишь цепь с колесом или шиной.

7 октября 1902 года, John Arthur Brines получает патент на перевозимую цепную пилу. Назывался патент "Sawing apparatus" и содержал описание весьма прогрессивного агрегата.

Прогресс не стоял на месте. Принцип современной бензопилы "одна пила - один человек" уже тогда манил изобретателей. В результате,

28 октября 1919 года, Ole J. Kendon получает патент на ручную цепную пилу "которая может быть использована одним человеком".

Спасательная бензопила CuttersEdge (рис. 2) специально разработана для применения пожарными, на основе опыта пожарных бригад в США и Европе. Она разработана для работ в условиях ЧС, в соответствии с требованиями стандартов США, самыми жёсткими в этой области.



Рис. 2. Аварийно-спасательная бензопила CuttersEdge.

Бензопила ориентирована для распила:

- полов (на деревянных лагах паркет, ковровые покрытия, линолеум, и т.п.);
- деревянных межэтажных перекрытий (в том числе с гвоздями, скобами, хомутами, сеткой, и т.п.);
- кровли (железной, битумной, полимерной и т.п.);
- легких стеновых конструкций (гипрок, газобетон, штукатурка и т.п.);
- автомобильные стёкла, пуленепробиваемые стёкла, армированные стёкла, стекловолокно, пластик и многие другие композитные материалы;
- обшивка самолёта, иллюминаторы, остекление кабины экипажа и другие конструкционные материалы, использующиеся в самолётостроении.

Эта пила имеет ряд существенных отличий от обычных бензопил, в том числе бензопил с победитовыми зубьями.

Главная особенность аварийно-спасательной бензопилы Cutters Edge - это специальная запатентованная пильная цепь BULLET Chain (рис. 3), которая не имеет аналогов в мире. Конструкция этой цепи была разработана "с нуля" специально для проведения спасательных работ.



Рис. 3. Пильная гарнитура BULLET Chain

Она обеспечивает большую производительность и значительно более долгий срок службы (в 20 раз дольше, чем стандартные). Зубья пилы имеют пулевидную форму и победитовые накладки. Они изготовлены из цельного куска металла и не имеют сгибов, что значительно уменьшает вероятность поломки. Пулевидный ограничитель глубины реза защищает твердосплавную накладку от нежелательных ударных воздействий, небольшой зазор между наконечником и режущей частью исключает возможность застревания цепи в материале. Цепь BULLET Chain не режет и не пилит, а фактически шлифует разрезаемый материал. Кроме высоких режущих свойств, цепь такой конструкции является самой безопасной с точки зрения "обратной отдачи" ("kickback"). Испытания показывают уменьшение энергии отдачи примерно на 67% по сравнению с обычной цепью для бензопил.

Таким образом, в своем развитии цепные пилы прошли длинный путь от громоздких устройств для разделки древесины на конной или паровой тяге до современных аварийно – спасательных бензопил, способных разрезать практически любые материалы, от древесины до стали и бетона.

Библиографический список

1. <http://www.motopila.ru/>
2. <http://www.cuttersedge.com/>

*А.П. Марусин, студ.; рук. В.А. Полетаев, д.т.н., проф.
(ИГЭУ г. Иваново)*

КОНСТРУКЦИИ УПЛОТНЕНИЙ МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ УСТРОЙСТВ

Все конструкции уплотнений магнитожидкостных устройств (МЖУ) могут быть подразделены с точки зрения поведения МЖ на четыре большие группы.

1. Устройства со статическим положением МЖ.

К ним относятся устройства, в которых МЖ неподвижна относительно окружающих её конструктивных элементов. В этом случае обычно используются магнитные свойства МЖ, удерживающие её в каком-либо положении. При расчёте таких устройств применяют уравнения феррогидростатики. достаточно простые в большинстве реальных случаев. К устройствам такого типа относятся герметизаторы неподвижных соединений, датчики положения, сепараторы немагнитных элементов, выключатели электрического тока.

2. Устройства с квазистатическим положением МЖ.

К ним относятся устройства, в которых МЖ во всем своем объёме неподвижна или малоподвижна относительно окружающих её конструктивных элементов, но микрообъёмы МЖ находятся в постоянном установившемся движении друг относительно друга. В этом случае используются обычно магнитные свойства МЖ, удерживающие весь её объём в определённом положении. При расчете устройств данного типа следует уже применять уравнения феррогидродинамики, учитывать вязкостную диссипацию энергии и другие физические эффекты, что существенно усложняет их использование в конкретных случаях. К устройствам такого типа относятся герметизаторы вращающихся валов, устройства смазки, датчики ультразвуковой диагностики, опоры вращения и ряд других.

3. Устройства с текущей МЖ.

Это такие устройства, в которых происходит течение МЖ из одного объёма в другой. При анализе работы устройств данного типа приходится применять уравнения феррогидродинамики с переменными коэффициентами. Это обусловлено перемещением МЖ по областям с разными значениями величин различных полей: напряженности магнитного поля, температуры, давления и т.д. В результате меняются свойства МЖ. в частности вязкость, эффективная плотность, теплопроводность, теплоёмкость и т.п. К устройствам такого типа следует отнести насосы, демпферы, холодильные установки, тепловые трубы и т.п.

4. Особые применения МЖ.

На основе МЖ выполняют многие виды устройств, в которых используется все многообразие свойств МЖ и их сочетаний. Устройства с МЖ нашли применение в медицине, при очистке жидкостей, в принтерах, излучателях и т.д. Уникальное сочетание свойств МЖ позволило разработать ряд технологических процессов, в которых МЖ используется в качестве рабочей среды. Для их реализации созданы разнообразные устройства.

Среди всех устройств с МЖ наибольшее распространение в различных областях техники и производственных процессах нашли магнито-жидкостные герметизаторы (МЖГ). Они включают в себя все возможные типы движения и положения МЖ, имеют чрезвычайно разнообразные конструктивные исполнения, применяются в космической и наземной технике, уплотняют газовые и жидкостные среды. Это разнообразие позволяет выделить их в отдельную группу магнито-жидкостных устройств и рассматривать отдельно.

Ферромагнитные жидкости используются для создания жидких уплотнительных устройств вокруг вращающихся осей в жёстких дисках. Вращающаяся ось окружена магнитом, в зазор между магнитом и осью помещено небольшое количество ферромагнитной жидкости, которая удерживается притяжением магнита. Жидкость образует барьер, препятствующий попаданию частиц извне внутрь жёсткого диска. Ферромагнитная жидкость также используются в некоторых высокочастотных динамиках для отвода тепла от звуковой катушки. Одновременно она работает механическим демпфером, подавляя нежелательный резонанс. Ферромагнитная жидкость удерживается в зазоре вокруг звуковой катушки сильным магнитным полем, находясь одновременно в контакте с обеими магнитными поверхностями и с катушкой. Ферромагнитные жидкости имеют множество применений в оптике благодаря их преломляющим свойствам. Среди этих применений измерение удельной вязкости жидкости, помещенной между поляризатором и анализатором, освещаемой гелий-неоновым лазером.

Если воздействовать магнитным полем на ферромагнитную жидкость с разной восприимчивостью (например, из-за температурного градиента) возникает неоднородная магнитная объемная сила, что приводит к форме теплопередачи называемой термомагнитная конвекция. Такая форма теплопередачи может использоваться там, где не годится обычная конвекция, например, в микроустройствах или в условиях пониженной гравитации. Возможно использование ферромагнитной жидкости для отвода тепла в динамиках. Жидкость занимает зазор вокруг звуковой катушки, удерживаясь магнитным полем. Поскольку ферромагнитные жидкости обладают парамагнитными свойствами,

они подчиняются закону Кюри — Вейса, становясь менее магнитными при повышении температуры. Сильный магнит, расположенный рядом со звуковой катушкой, которая выделяет тепло, притягивает холодную жидкость сильнее, чем горячую, увлекая горячую жидкость от катушки к кулеру. Это эффективный метод охлаждения, который не требует дополнительных затрат энергии. Замороженная или полимеризованная ферромагнитная жидкость, находящаяся в совокупности постоянного (подмагничивающего) и переменного магнитных полей, может служить источником упругих колебаний с частотой переменного поля, что может быть использовано для генерации ультразвука.

Ферромагнитная жидкость способна снижать трение. Нанесенная на поверхность достаточно сильного магнита, например, неодимового, она позволяет магниту скользить по гладкой поверхности с минимальным сопротивлением.

Одной из областей применения магнитных жидкостей является их использование в качестве магнитных смазок. В чем преимущества магнитных жидкостей по сравнению с традиционными смазками? МЖ на основе масла по сравнению с тем же маслом снижает трение на 20% эффективнее. Трение минимально, поскольку основой МЖ является масло, а размер содержащихся в ней твердых частиц на несколько порядков меньше шероховатостей идеально отполированных трущихся деталей. Дополнительным преимуществом использования МЖ в качестве смазок заключается в том, что магнитные жидкости, удерживаемые магнитным полем, не будут вытекать из агрегата. Кроме того, магнитные жидкости будут препятствовать попаданию, например, в подшипники посторонних немагнитных частиц (МЖ под воздействием магнитного поля выталкивают немагнитные материалы).

Применение магнитной жидкости для уплотнения вращающихся валов позволяют существенно увеличить ресурс механизмов и снизить уровень шума. В некоторых механизмах применение магнитожидкостных уплотнителей не имеют альтернативы, так как имеют абсолютную герметичность. Утечки через магнитожидкостные уплотнения полностью исключены.

*А.А. Киселева, студ.; рук. В.В. Марков, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ СТИЛЕВОГО УКРАШЕНИЯ ИНТЕРЬЕРОВ

Современный интерьер очень сильно отличается от привычной для нас в прошлом десятилетии домашней обстановки. Изменения коснулись всего - от мебели до отделки стен, от освещения до планирования пространства. Еще несколько лет назад слово “модно” было синонимом слова “стиль”. В современном же, быстро развевающемся мире, люди стали ценить индивидуальность и функциональность в интерьере. С этим связана лояльность дизайнеров к определенным, давно сложившимся стилям. Ориентируясь на потребности заказчиков, добавляют неожиданные элементы, тем самым создают новые современные стили.

Во все времена классика считалась признаком хорошего вкуса. Она не зависима от быстротечных модных явлений. Классический стиль всегда востребован. Он идеально подходит как к оформлению кабинетов и квартир, так и загородных усадеб. Для украшения часто используют картины и семейные фотографии. Их размещают на стенах, полках, на столике. Картины и фотографии обязательно должны быть в рамках из дерева.

При оформлении гостиной в классическом стиле часто используют всевозможные элементы декора с позолотой. В центре комнаты часто располагают камин, и уже под него подбирают остальные детали интерьера чаще всего это статуэтки, подсвечники, люстры с подвесками, лепнина, картины и зеркала. На окнах – сложные драпировки, возможно, даже с кистями. В центре потолка люстра из хрусталя или дорогого стекла. Это может быть и позолоченная или бронзовая люстра с плафонами в виде розочек или свечей. Также необходимо дополнить освещение классическими плафонными бра и торшерами с абажуром из ткани. Светильники в классическом интерьере могут быть и витражными – такие плафоны создают потрясающие визуальные эффекты. Поддаваясь потребностям современного человека, всегда изысканный классический стиль приобретает новую ветвь развития “Неоклассика”. Она выгодно отличается своим сдержанным и изысканным декором, но при этом дорогими отделочными материалами такими как: камень, дерево, шерстяной и хлопковый текстиль. Именно неоклассика ловко

скрадывает в себе обилие бытовой техники, за фасадами из красного дерева с фурнитурой с золотым или бронзовым покрытием.

XXI век характеризуется прагматизмом. Главным отличием интерьера нашего времени от интерьера минувшего века является высокая функциональность. Каждый квадратный метр пространства используется с максимальной пользой. При этом появляется возможность создавать ощущение простора и оставлять большой процент пространства незанятым. Всё это отразилось в стиле “Хай-тек”. Для него характерно применение, при декорировании, самых новых материалов. Мебель при очень высокой комфортабельности и функциональности, в основном, обретает экстравагантную, нестандартную форму. Стиль “хай-тек” является выражением постоянно изменяющегося мира и распространен в кругах энергичных, стремящихся не отставать от своего временем людей.

Сторонники этого направления показывают публике то, что обычно скрывается, а именно архитектурные и сантехнические детали. Как правило, особого функционального смысла эти детали не имеют, но хорошо выражают образный ряд. Здесь они не только участвуют в создании интерьера, а являются его основой. Функция элемента выставляется напоказ и приобретает дизайнерский смысл. Этому течению свойственны прямые стремительные линии, резкие формы, часто выполненные из металла. Мягкое смешение пространства и света, конфигураций предметов и их цветов вместе с идеальными пропорциями. Благодаря применению новых технологий, материалов, оборудования, интерьеры хай-тека постоянно сопоставляются с космическим кораблем.

Также его можно ассоциировать и с темой взгляда в будущее, и с «техно», и с «индустриальными» мотивами. Предметам декора в этом стиле отведена особая роль – их минимальное количество не должно уступать их функциональности. Также они должны быть в духе общего интерьера хай-тек. Декоративные украшения должны быть четких геометрических форм. Например, ваза для цветов в виде металлической полусферы или цилиндра, кубические скульптуры или так называемые инсталляции. Стену могут украшать черно-белые фотографии, спрятанные под стекло или современная графика. Лучшим украшением интерьера в стиле хай-тек является именно техника – самая современная и модная. Она и должна быть в центре такого интерьера. В интерьере не допускается использование, цветочков, глиняных горшочков, деревянных аксессуаров. Хай-тек – это тот вариант, когда предметами декора становится новомодная техника, на которой делается особый акцент. Этот стиль близок современному человеку, счи-

тающему себя родственником компьютера. Разнообразная техника со всевозможными висящими проводами смотрится в нем крайне гармонично.

Человек в любом возрасте и не зависимо от благосостояния хочет создавать вокруг себя уют, такую атмосферу, в которой ему было бы приятно находиться. Интерьеры эконома класса не означают, что они выглядят дешево и скучно. Одной из главных тенденций стилевого украшения интерьеров является использование разных видов отделки стен в одном помещении. Если раньше чаще всего использовались либо обои, либо покраска, то сегодня эти методы тесно соседствуют. Чем сложнее и многокомпонентнее отделка стен, тем интереснее и актуальнее получается интерьер. Примером служит такой стиль как “Минимализм”. В нем дизайнеры прибегают к недорогим отделочным материалам, простым формам потолка и отсутствию лишних элементов из гипсокартона, делают выбор в пользу цветных акцентов, текстиля среднего класса и оригинального интерьерного декора. Этому направлению характерна продуманность фактур и смысл общего интерьера в целом.

Цветовая гамма не допускают вычурности, яркой орнаментальности, украшательства. Композиция интерьера предельно простая и ясная, построена на использовании больших однотонных плоскостях с разными фактурами. Характерными для стиля являются часы соответствующего дизайна - без цифр на циферблате. На стенах могут быть монохромные картины или фотографии в простых рамах четкой геометрии. Впишется в интерьер в стиле минимализм и мебель – трансформер, в которой можно скрыть как компьютерный столик, так и откидную кушетку.

Вообще, метод встраиваемой мебели как нельзя лучше подчеркивает функционализм и конструктивизм стиля. Не последнюю роль в интерьере играет освещение. Обычно это встроенные в потолочные конструкции светильники, как одиночные люстры, так и точечные лампочки. Подвешивают бра и светильники на стены, грамотно располагая их с функциональной точки зрения.

Отдельной тенденцией современных интерьеров, которая приобретает все большее распространение, является стремление к использованию максимально натуральных материалов, что дало начало новому стилю “Эко-Дизайн”. В нем все выполняется только из натурального материала. Этот дизайн прокладывает путь к единению с живой природой и дарит ощущения свежести и покоя. Эко-стиль был создан для того, чтобы воссоздать природу у себя в доме. Самый главный смысл этого стиля заключается в самом слове экологический, потому что че-

людей по-настоящему может отдохнуть, набраться сил и энергии только в доме, в котором интерьер выполнен из натуральных материалов. В таком доме есть все преимущества, в отличие от городских душных квартир. Особую популярность эко стиль приобрел при строительстве деревянных загородных домов. Использование различных веточек, листьев, корней или коряг не только в качестве украшения, но и материала для создания каркасов, мебели, карнизов, предметов интерьера делает помещение не только красивым, но и эксклюзивным.

Дерево можно сочетать с другими природными материалами, например, с камнем, глиной, различными тканями, что дает еще больше возможностей для творчества. Преимуществом эко стиля является и то, что в процессе изготовления форма исходного материала (веток, корней, коряг) сохраняется, что требует минимальной дополнительной его обработки. Именно это и делает все элементы эко стиля неповторимыми, ведь в природе нельзя найти двух абсолютно одинаковых веток.

Дизайн интерьера квартиры, безусловно, предполагает общую перепланировку, отделочные работы и специально подобранную мебель, которая составляет единую композицию. Но очень важным элементом интерьера квартиры, которые придает ему законченный вид и индивидуальность, по праву считаются детали и аксессуары. Главный враг современного интерьера – захламленное пространство, поэтому очень важно чтобы предметы интерьера обладали, как и декоративностью, так и функциональностью.

*А.В. Мухин, студ.; рук. В.А. Полетаев, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

МЕТОДЫ УПРОЧНЕНИЯ РЕЗЦОВ

Повышение рабочих параметров различного оборудования требует применения материалов с повышенной прочностью, жаропрочностью и другими физико-механическими свойствами. При обработке таких материалов из-за недостаточной износостойкости режущий инструмент выходит из строя. Применяемые для изготовления режущего инструмента материалы дефицитны и дороги, поэтому необходимо повышать стойкость металлообрабатывающего инструмента. Увеличение режимов резания и, следовательно, производительности, ограничивается стойкостью инструмента. Повышение стойкости деталей достигается различными методами поверхностного упрочнения, химико-термической обработкой, а также применением износостойких и антифрикционных покрытий.

Изготовленный режущий инструмент должен иметь определенные режущие свойства, эти свойства улучшают проведением термической обработки и др. методов которые позволяют значительно их повысить.

К таким методам относятся:

1) методы повышения стойкости за счет улучшения структуры: это обработка в атмосфере водяного пара и обработка холодом.

2) Термохимические методы: цианирование, азотирование, борирование, фосфатирование.

3) Износостойкие покрытия рабочей части инструмента: хромирование (0.02 мм), покрытие карбидами тугоплавких металлов (3 – 10 мкм)

4) Дробеструйный метод – создается поверхностное упрочнение.

Обработке в атмосфере перегретого водяного пара подвергают цельный инструмент из быстрорежущей стали и сварной, если хвостовая часть изготовлена из стали 40Х, при температуре отпуска (550 – 570 °С).

Обработка перегретым паром:

– уменьшает слипание и схватывание поверхности инструмента с обрабатываемым металлом;

– предотвращает приваривание стружки обрабатываемого материала к инструменту в процессе резания;

– поверхность окисной пленки лучше удерживает смазочные жидкости; смазка при наличии окисной пленки уменьшает коэффициент трения между стружкой и режущей кромкой инструмента; при этом выделяется меньшее количество тепла, дольше сохраняется нормальная твердость режущей кромки, т. е. повышается стойкость инструмента (на 25 – 30 %);

– снимаются остаточные напряжения, возникающие после шлифования и заточки;

– повышается твердость режущей кромки инструмента за счет превращения в мартенсит аустенита, образовавшегося на поверхности режущей кромки при шлифовании и заточке инструмента;

– по коррозионной стойкости инструмент, обработанный в атмосфере пара, не уступает инструменту, подвергнутому химическому оксидированию. Обработка паром не устраняет обезуглероженный слой, следы коррозии и прижоги.

Последующая просушка не требуется, так как инструмент высыхает вследствие аккумуляции тепла. Обработку паром режущего инструмента из быстрорежущей стали проводят в процессе многократного отпуска после закалки или после шлифования и заточки. При отпуске в атмосфере пара инструмент (чистый и сухой) загружают в корзинах в печь, нагретую до 350 – 360 °С, и выдерживают при этой температуре

(в воздушной среде) до полного нагрева садки (30 мин – 1 ч). Затем в печь подается сухой пар, перегретый примерно до 300 – 400 °С, в течение 20 – 30 мин для вытеснения воздуха, а затем температуру повышают до 530 – 570 °С. Во время выдержки в течение 1 ч избыточное давление пара должно находиться в пределах 0,1 – 0,3 кгс/см². Отпуск проводят трехкратный. После последнего отпуска инструмент охлаждают сначала на воздухе до 50 – 70 °С, а затем (для повышения коррозионной стойкости) в масле, подогретом до 40 – 50 °С. После отпуска в атмосфере пара очистка инструмента не требуется.

Сущность процесса обработки холодом, предложенного в 1937 г. А. П. Гуляевым, заключается в дополнительном, более полном превращении остаточного аустенита в закаленной стали в мартенсит. Обычно для обработки холодом требуются температуры не ниже -80 °С. Отпуск перед обработкой холодом стабилизирует остаточный аустенит. Поэтому обработку холодом необходимо проводить непосредственно после закалки, а низкий отпуск (для снятия части внутренних напряжений) – после обработки холодом. Выдержка при низких температурах не увеличивает количества мартенсита, поэтому необходимо лишь сквозное промораживание деталей. Во избежание образования трещин при обработке холодом нельзя охлаждать сталь, еще не остывшую до температуры 20°, а детали и инструмент сложной формы для замедления охлаждения целесообразно обертывать асбестом или бумагой. Основное назначение обработки холодом – стабилизация размеров изделий. Структура закаленной стали с большим количеством остаточного аустенита не стабильна. Уже при комнатной температуре, а тем более при небольшом климатическом понижении температуры остаточный аустенит постепенно превращается в мартенсит. Это превращение сопровождается увеличением объема и размеры изделия меняются. Обработка холодом производится путем погружения инструмента в жидкий азот, а после обработки холодом облучением гамма-квантами, вследствие чего повышается ресурс его работы. Недостатками известного способа являются высокая хрупкость инструмента после обработки холодом, появление трещин в состыкованном инструменте. Способ не позволяет получать стабильные результаты по повышению стойкости инструмента, а зависит от ряда случайных факторов.

Одним из наиболее известных способов упрочнения режущих инструментов является цианирование инструментов. Оно заключается в нагреве готового (термо обработанного и заточенного) инструмента в специальных веществах, например в расплавленных цианистых солях, в результате чего его поверхностные слои насыщаются азотом и угле-

родом. Температура цианирования должна соответствовать температуре отпуска быстрорежущей стали (550 – 560 °С).

Азотирование придает поверхности детали особо высокую твердость и износостойкость, которые сохраняются при нагреве до 500 – 600 °С. Это важное преимущество азотированных деталей перед цементованными, которые могут сохранять высокую твердость лишь до 200 – 250 °С. Кроме того, азотирование повышает устойчивость стали против коррозии в атмосфере влажного воздуха и пара. При азотировании, как и при поверхностной закалке, благодаря увеличению удельного объема стали в поверхностном слое возникают большие внутренние сжимающие напряжения. Они способствуют снижению растягивающих напряжений от внешней нагрузки при работе детали. В результате выносливость детали, т. е. способность выдерживать большое число повторных нагрузок, повышается.

К борированию прибегают, главным образом, с целью повышения поверхностной твердости изделий, их износостойкости, реже – коррозионной стойкости и теплостойкости. Борированию подвергают поверхности изделий из железа, сплавов на его основе, а также тугоплавких металлов, используя явление диффузии. Различают борирование твердое, жидкое, газовое. Борирование вызывает появление в поверхностных слоях изделий остаточных снимающих напряжений до 50 – 100 кгс/мм², повышает их износостойкость в 5 – 10 раз, увеличивает коррозионную стойкость углеродистых и низколегированных сталей. Борирование повышает усталостную прочность изделий. Коррозионная, усталостная прочность изделий из углеродистых сталей после борирования увеличивается вдвое и более раз при добавке окислителей..

Хромирование, при котором слои хрома толщиной 3...5 мкм, имеющие твердость около 70 HRC, не только увеличивает износостойкость инструмента, но и уменьшает налипание обрабатываемого металла. Вследствие этого хромирование инструментов дает особенно хорошие результаты при обработке легких сплавов (алюминия), а также мягких вязких сталей и пластмасс.

При нагреве режущих инструментов до 550 – 560 °С в расплавленных солях, содержащих серу и циан, например смесь сернистого железа, сернокислого натрия, красной кровяной соли и др., происходит насыщение тонких поверхностных слоев инструмента серой, а также углеродом и азотом. Наличие серы уменьшает силы трения стружки и детали об инструмент, и это, вместе с протекающим одновременно слабым цианированием, должно привести к повышению его стойкости.

Хорошие результаты в повышении эксплуатационных характеристик твердосплавного инструмента, который разрушается в значитель-

ной мере в результате усталостных явлений, обеспечиваются методами поверхностного пластического деформирования (ППД): дробеструйное и обработкой. Дробеструйное упрочнение резцов значительно уменьшает число их поломок и в 2,0 – 2,5 раза повышает суммарную стойкость инструмента.

*Д.А. Окладин, студ.; рук. Н.В. Третьякова, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, Иваново)*

НАНОТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Материалы, содержащие структурные элементы с нанометровыми размерами по одной, двум или трем координатам, наличие которых приводит к значительным качественным изменениям, следует отнести к наноматериалам, а технологии их получения и дальнейшую работу с ними – к нанотехнологиям.

Наноматериалы и нанотехнологии могут найти применение во всех технологических переделах машиностроительного производства: литейное (ультразвуковые нанотехнологии подготовки формовочных материалов и изготовления гипсовых форм с повышенными физико-механическими свойствами для цветного литья, и др.), кузнечнопресовое, сварочное, инструментальное производства, термообработка, гальваника, сборка, нанесение различных покрытий, а также при ремонте технологического оборудования.

Использование современных конструкционных материалов ограничивается тем, что увеличение прочности приводит к снижению пластичности. Уменьшение структурных элементов и более глубокое изучение физики деформационных процессов, определяющих пластичность наноструктурных материалов, могут привести к созданию новых материалов, сочетающих высокие прочность и пластичность.

Машиностроение является потребителем объемных наноструктурированных материалов: стали, титан и его сплавы, алюминиевые сплавы, керамика, пластмассы и композиционные материалы. Их получают спеканием нанопорошков, контролируемой кристаллизацией аморфных сплавов, интенсивной пластической деформацией (всесторонняя ковка, экструзия, обкатка с наложением ультразвука), позволяющей измельчить зерно до наноразмерных величин.

Перспективными направлениями в области разработки конструкционных материалов являются: изготовление наноструктурных керамических и композиционных изделий точной формы, создание наноструктурных твердых сплавов для производства режущих инструментов с повышенной износостойкостью и ударной вязкостью, наност-

руктурных защитных термо- и коррозионностойких покрытий, полимерных композитов с наполнителями из наночастиц и нанотрубок. обладающих повышенной прочностью и низкой воспламеняемостью.

Получены образцы изделий из нанофазной керамики на основе оксидов алюминия и ряда переходных металлов. Плотная наноструктурная керамика имеет повышенную пластичность, что определяет возможность сверхпластичного формования керамических и композиционных изделий, исключающего необходимость финишной обработки материалов высокой твердости.

Разработаны металлокерамические наноматериалы на основе систем «карбиды вольфрама – кобальт» и «карбиды титана – железо», значительно превосходящие по износостойкости, прочности и ударной вязкости аналоги с обычной микроструктурой. Повышенные эксплуатационные характеристики этих материалов обусловлены образованием при спекании специфических непрерывных нитевидных структур, формирующихся в результате трехмерных контактов между наночастицами разных фаз. Разработка и внедрение в промышленное производство технологии создания нанокомпозитных изделий будет способствовать решению проблемы изготовления высококачественных режущих инструментов.

Повышение коррозионной стойкости наноструктурных покрытий обусловлено снижением концентрации примесей на поверхности зерен по мере уменьшения их размеров. Более чистая поверхность обеспечивает однородность структуры и более высокую коррозионную стойкость межзеренных границ.

Существенный эффект ожидается от внедрения технологических процессов нанесения износостойких покрытий на режущие инструменты, штампы и прессформы, а также водооталкивающих износостойких, коррозионно- и жаростойких покрытий деталей машин. Покрытия наносятся методами физического или химического осаждения.

В результате образования в поверхностных слоях изделия нанофазных комплексов, например, путем имплантации ионов хрома, титана и др. в поверхности контактирующих деталей, значительно повышается их долговечность: для деталей подшипников в 2...3 раза, для инструмента – в 5...6 раз.

Без изменения химического состава быстрорежущих сталей и твердых сплавов за счет термоциклического наноструктурирования и ионного синтеза SiC и SiO₂ из плазмы кремния создан уникальный металл- и деревообрабатывающий инструмент с высокой стойкостью.

На предприятиях машиностроения также реализуются технологии : электроэрозионная наноразмерная обработка профилированным и не-

профилированным инструментом на электроискровых станках с программным управлением; электрохимическая отделочная и размерная обработка рабочих поверхностей нагруженных деталей для регулирования микротопографии поверхности на наноуровне; ионноплазменное упрочнение инструмента, штампов, деталей машин с нанесением алмазоподобного покрытия толщиной до 2 мкм (без изменения шероховатости поверхности, при нагреве изделия менее 100°C); модификация поверхности за счет скоростных химико-термических взаимодействий плазменных струй с поверхностью металла с целью повышения износо- и коррозионной стойкости и твердости низкоуглеродистых легированных сталей; ионно-плазменное осаждение (благодаря тому, что в его основу заложен принцип ионного испарения, возможно получать тонкопленочные покрытия из различных материалов: любого состава с заданной структурой – нанокристаллической, аморфной, кристаллической, композитной).

Улучшение качественных показателей достигается посредством введения того или иного технологического процесса (литье, прессование, нанесение покрытий и т.д.), а также за счет технологических режимов изготовления заготовок и изделий (равноугольное прессование, термомеханическая обработка и др.).

Перспективными являются направления: производство монолитного твердосплавного металлорежущего инструмента с наноструктурированным покрытием и режущего инструмента из сверхтвердого материалов; использование резцовых вставок из поликристаллических алмазов и нитрида бора; серийное производство электрохимических станков для прецизионного изготовления деталей из наноструктурированных материалов и нанометрического структурирования поверхности; применение микроплазменного оксидирования для нанесения оксиднокерамического нанокристаллического покрытия и др.

Повышение свойств нанометалла, при его использовании взамен аналога позволяет: снизить расход металла за счет уменьшения массы изделий и затраты в процессе эксплуатации более легких изделий, повысить надежность и срок службы изделий, повысить стойкость инструмента.

Библиографический список

1. Головин Ю.И. Введение в нанотехнику. – М.: Машиностроение, 2007. – 493 с.
2. Уильямс, Л. Нанотехнологии без тайн / Л. Уильямс, У. Адамс: пер. с англ. Ю.Г. Гордиенко. – М.: Эксмо, 2009. – 368 с.

*А.П. Сошников, студ.; рук. В.А. Полетаев, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г Иваново)*

МЕТОДЫ УПРОЧНЕНИЯ СВЕРЛ, МЕТЧИКОВ, РАЗВЕРТОК

Повышение рабочих параметров различного оборудования требует применения материалов с повышенной прочностью, жаропрочностью и другими физико-механическими свойствами. При обработке таких материалов из-за недостаточной износостойкости инструмент выходит из строя. Применяемые для изготовления режущего инструмента материалы дефицитны и дороги, поэтому необходимо повышать стойкость металлообрабатывающего инструмента. Увеличение режимов резания и, следовательно, производительности, ограничивается стойкостью инструмента. Повышение стойкости режущего инструмента достигается различными методами поверхностного упрочнения, химико-термической обработкой, а также применением износостойких и антифрикционных покрытий.

Надежность режущего инструмента можно повысить с помощью химико-термической обработки (ХТО), которая позволяет упрочнить поверхностный слой инструмента. ХТО сочетает термическое и химическое воздействия с целью изменения химического состава, структуры и свойств поверхностного слоя инструментального материала. Она осуществляется в результате диффузионного насыщения поверхностного слоя неметаллами (азотом, углеродом, бором и т.п.). Наиболее перспективным видом ХТО для упрочнения режущей части металлообрабатывающего инструмента представляется процесс жидкостной карбонитрации. Насыщение поверхностного слоя азотом и углеродом способствует повышению твердости режущего инструмента из быстрорежущей стали до 70...74 HRC с одновременным снижением силы трения. В результате такой обработки стойкость режущего инструмента увеличивается в 1,5 – 2,5 раза. Вместе с увеличением стойкости происходит снижение силовых характеристик процесса обработки материалов резанием (крутящего момента и силы резания).

Главная цель нанесения износостойких покрытий – получение повышенной твердости и износостойкости контактных поверхностей режущего инструмента при сохранении относительно высокой прочности на изгиб и высокой ударной вязкости основы. Кроме того, износостойкие покрытия обеспечивают следующие дополнительные преимущества: снижение коэффициента трения в процессе резания; уменьшение силы резания; снижение интенсивности наростообразова-

ния; защита инструментального материала от адгезии и диффузии; повышение стойкости инструмента; расширение области применения инструментального материала. Впервые износостойкие покрытия применили на неперетачиваемых твердосплавных пластинах в 1970 г. За последние годы совершенствование методов нанесения износостойких покрытий сделало возможным применение их не только на неперетачиваемых пластинах, но и на инструментах, подвергающихся переточке, в том числе быстрорежущих. В настоящее время широкое использование получили покрытия из карбида титана TiC, нитрида титана TiN, карбонитрида титана TiCN, нитрида молибдена Mo₂N, диоксида алюминия Al₂O₃. Наиболее распространенными способами их нанесения являются: осаждение из газовой фазы, или химическое осаждение паров (ГТ), конденсация наносимого вещества в вакууме с последующей ионной бомбардировкой (КИБ), реактивное электронно-плазменное напыление (РЭП). Метод осаждения из газовой фазы основан на конденсации газообразных соединений с образованием твердых осадков. Ведущие зарубежные фирмы используют данный метод для нанесения износостойких покрытий (TiC, TiN, Ti(C, N)) на многогранные твердосплавные пластины. Стойкость пластин с покрытием возрастает в 3-4 раза.

Недостатком покрытий является то, что вследствие большой диффузионной инертности нитрида титана по отношению к материалу основы, прочность сцепления покрытия с основой во многих случаях оказывается недостаточной. Недостаток технологии осаждения покрытий из карбида и нитрида титана - взрывоопасность применяемой газовой смеси.

Антифрикционные покрытия наносят на контактные поверхности режущего инструмента; они имеют твердость меньше, чем материал основы, и выполняют функции твердых смазок, что ведет к снижению коэффициента трения и уменьшению изнашивания инструмента. Преимуществом антифрикционных покрытий является то, что их наносят обычно при комнатной температуре на специальным образом подготовленные поверхности и для улучшения сцепления с материалом основы подвергают нагреву до температуры, как правило, не выше 200 °С. Это позволяет применять такие покрытия для любых инструментальных материалов. В качестве материалов покрытий используют главным образом сульфиды и фосфаты различных металлов: MoS₂, NiP и др. Антифрикционные покрытия повышают стойкость инструментов. Так, по данным завода «Красный котельщик» (г. Таганрог), при сверлении стали 16ХГНМА стойкость сверл из быстрорежущей стали Р18 с дисульфидомолибденовым покрытием увеличилась в 2 – 4 раза, а при

сверлении стали 12Х18Н9Т – в 1,75-3,7 раза. При точении стойкость твердосплавных резцов возрастает в 1,4 – 1,8 раза. Повышенной теплостойкостью (до 600 °С) обладает кобальто-фосфорное Co_2P покрытие, имеющее твердость 850 HV и наносимое методом электролиза при 90... 100 °С. Его применение позволяет увеличить стойкость резцов из стали Р6М5 при точении конструкционных сталей в 3 раза, а сверл из стали Р18 при сверлении тех же сталей – в 2,5 раза. Особый интерес представляет способ нанесения антифрикционных покрытий с предварительным глубоким травлением контактных поверхностей инструмента. Появление достаточно глубоких пор обеспечивает постоянный выход частиц смазки к поверхности трения. Достаточно большая глубина пор (0,5...0,8 мм) обеспечивает возможность переточки по покрытой поверхности с сохранением смазочного эффекта.

Главной целью гальванического упрочнения контактных поверхностей режущего инструмента является создание надежного диффузионного барьера между инструментальным и обрабатываемым материалами. Сопутствующим эффектом такого упрочнения является снижение работы трения и улучшение теплоотвода. Из способов этой группы наиболее известным является хромирование. Карбиды хрома обладают повышенной прочностью. Износостойкость хромированных поверхностей увеличивается в 2 – 4 раза. Так, по некоторым данным, при обработке стали и чугуна стойкость хромированных сверл возрастает в 3 раза, разверток – в 2,5-3,5 раза, метчиков – в 3 раза. Ограничением в применении этого метода является возможность его использования только для температур резания, не превышающих 300...400 °С. Хромирование можно применять не только для быстрорежущих инструментов, но и для инструментов из углеродистых инструментальных сталей. Для улучшения теплоотвода от инструментального материала была исследована возможность нанесения медных покрытий, однако широкого применения этот способ не нашел.

Основой физических способов упрочнения является воздействие на поверхностный слой инструментального материала с целью изменения его структуры и физико-механических свойств. К физическим способам относятся: лазерное упрочнение, обработка инструмента в магнитном поле и глубоким холодом. Все эти способы исследовали в лабораторных условиях применительно только к быстрорежущим инструментам. Наиболее разработанным из этой группы является лазерное упрочнение. Сущность лазерного упрочнения состоит в мощном импульсном воздействии на упрочняемые поверхности светового пучка с чрезвычайно высокой плотностью энергии. Это вызывает нагрев поверхностного слоя выше температуры фазового превращения с после-

дующим режимом охлаждением, скорость которого в 10 – 100 раз больше, чем при обычной закалке. В результате поверхностный слой толщиной около 0,1 мм получает исключительно мелкозернистую структуру, а твердость его возрастает на 200...300 HV. Обработка инструмента в магнитном поле направлена на перемагничивание режущего инструмента, которое вызывает увеличение микротвердости поверхности, снижение уровня растягивающих остаточных напряжений от заточки и коэффициента трения на контактных поверхностях, способствует дроблению зерен, увеличивает концентрацию в поверхностном слое вольфрама, молибдена, углерода и кислорода. После магнитного упрочнения инструмент перед работой размагничивается. Главным преимуществом этого способа является его простота и доступность, использование обычного универсального оборудования и практически полное отсутствие дополнительных расходов. Режущий инструмент типа концевых фрез, сверл, разверток закрепляют в патроне обычного токарного станка, в резцедержателе которого установлен электромагнит или постоянный магнит, создающий сравнительно слабое магнитное поле. При вращении шпинделя инструмент подвергается перемагничиванию с частотой, равной частоте вращения. В результате магнитного упрочнения стойкость метчиков, концевых фрез, зенкеров, разверток возрастает в 1,7 – 2,3 раза.

*А.М. Власов, асп.; рук. В.А. Полетаев, д.т.н., проф.
(ИГЭУ г. Иваново)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ИЗМЕНЕНИЕ МОМЕНТОВ ТРЕНИЯ МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ УСТРОЙСТВ

В процессе работы уплотнения в нём выделяется тепловая энергия за счёт вязкостного трения слоев МЖ. Вопросы нагревания МЖ и его влияния на поведение МЖ в различных условиях достаточно подробно рассмотрены в научной литературе. Нагрев МЖ существенно влияет на работоспособность магнитожидкостных устройств. Тепловые процессы характеризуются числом Прандтля P_r . Оно показывает, во сколько раз количество тепла, выделившееся в данном объеме от вязкостного трения слоев жидкости, больше принесённого в этот объем за счёт теплопроводности жидкости.

Если вязкость МЖ составляет 0,1 Па·с, теплоёмкость равна 1600 Дж/кгград и теплопроводность 0,15 Вт/м град, то для такой жидкости число Прандтля равно 1066,6. У воды, например, этот параметр имеет

величину 6,5. Отсюда следует, что теплопроводность играет в МЖ существенно меньшую роль, чем вязкостные потери. Вся энергия вязкостной диссипации идёт на нагрев МЖ. Особенно сильным должен быть нагрев под зубцом полюса, так как там возникают значительные сдвиговые течения в малом объёме при больших значениях эффективной вязкости МЖ из-за наличия сильных магнитных полей.

За счет нагрева ухудшаются магнитные свойства жидкости и могут возникать течения под зубцами полюса. Представляется, что жидкость течет из зазора по валу в межзубцовое пространство, а под действием магнитных сил более холодная МЖ по поверхности полюса затягивается в зазор к вершине зубца. Удерживаемый перепад давлений определяется не средней температурой жидкости, а более высоким ее значением под зубцом полюса. Этот процесс термомагнитной конвекции будет усиливать возможность образования винтовых вихрей в межзубцовом пространстве. Эти явления оказывают влияние и на поверхностные процессы. Известно, что МЖ в магнитном поле приобретают определенную структуру. Упорядоченность ферромагнитных частиц должна снизить эффект влияния температурных перепадов на возникновение конвективных течений, что и проявляется в практике магнитожидкостных уплотнений. В рабочем зазоре уплотнения магнитные силы велики по сравнению со всеми другими силами, структурированное состояние нарушается только в очень узкой области зазора и при значительных градиентах сдвига. Поэтому следует ожидать отсутствия ярко выраженных термомагнитных конвективных явлений. Однако при создании тяжело нагруженных уплотнений: большие линейные скорости и магнитные поля, высокие температуры, плохая теплоотдача - в рабочем зазоре могут создаваться температуры, существенно влияющие на свойства МЖ и её поведение в зазоре герметизатора.

Момент трения является одним из важнейших параметров магнитожидкостных герметизаторов, который влияет на величины передаваемых моментов и мощности. На момент трения магнитожидкостного устройства влияет вязкость используемой магнитной жидкости, напряженность магнитного поля, градиент скорости сдвига в рабочем зазоре устройства, величина рабочего зазора, включающая величины шероховатости поверхностей полюсов и втулки, контактирующих с магнитной жидкостью.

Известно, что после механической обработки на поверхностях деталей образуются микронеровности. При расположении таких поверхностей в магнитном поле микронеровности становятся концентраторами линий векторного магнитного потенциала. Однородное магнитной поле около шероховатой магнитопроводящей поверхности перераспределяется и становится неоднородным. Рельеф поверхности со-

стоит из чередующихся выступов и впадин. Математическое моделирование магнитного поля около поверхности показало, что перераспределение поля начинается на высоте $3\div 4h$ от поверхности, где h - высота среднего выступа [2]. В направлении поверхности напряженность поля растет над выступом, над впадиной снижается. Индукция около выступов в разы превышает среднюю индукцию над поверхностью, во впадинах наоборот, индукция в разы ниже. То есть около рассматриваемой магнитопроводящей поверхности значение индукции меняется в десять с лишним раз. Степень перераспределения индукции магнитного поля определяется формой и соотношением ширины и высоты выступов шероховатой поверхности.

Если поместить около шероховатой поверхности мелкодисперсную магнитную среду, допустим, магнитную жидкость, то магнитные частицы будут стремиться попасть в зону, где напряженности поля максимальна, то есть к вершине выступа, создавая здесь повышенную концентрацию частиц. Вершины выступов покрываются слоем частиц, которые прочно удерживаются на поверхности. Магнитные частицы выстраиваются также в цепочки по линиям магнитного поля. Силы взаимодействия между частицами, тем выше, чем сильнее напряженность магнитного поля. То есть прочность цепочек из частиц существенно выше около вершин выступов шероховатой поверхности, чем на некотором удалении, где поле равномерное. Цепочки прочно связаны с вершинами выступов. Около шероховатой магнитопроводящей поверхности образуется слой магнитной жидкости с более сильным внутренним взаимодействием частиц, вследствие чего слой более прочный, чем слой жидкости в равномерном поле и, следовательно, менее подвижный. При движении шероховатой поверхности цепочки будут разрушаться в первую очередь в области однородного магнитного поля, где силы взаимодействия между частицами меньше. Около шероховатой поверхности будет существовать трудно разрушимый слой мелкодисперсной рабочей среды. Если рассматривается шероховатая поверхность вращающегося вала, то появление неподвижного слоя мелкодисперсной рабочей среды, увеличивает эффективный диаметр вала, следовательно, возрастает момент трения вала устройства. Если толщина слоя соизмерима с рабочим зазором устройства, то его появление сокращает величину рабочего зазора, способствует заметному увеличению градиента сдвига и напряжению сдвига дисперсной среды в зазоре, соответственно, повышению потерь в устройстве.

В процессе работы в магнитно-жидкостном герметизаторе выделяется тепловая энергия, прежде всего за счет вязкостного трения слоев магнитной жидкости. Количество тепла, выделяемое в жидком эле-

менте, практически все идет на его нагрев, что, возможно, создает конвективные течения. Увеличение температуры ведет к уменьшению вязкости жидкости и некоторому снижению ее магнитных свойств.

Для исследования влияния температуры на изменение моментов трения в рабочем зазоре магнитно-жидкостных уплотнений была спроектирована и изготовлена установка, показанная на рис.1.

Известно, что любой объект излучает электромагнитные волны в очень широком диапазоне частот, в том числе и волны в инфракрасном спектре, так называемое «тепловое излучение». При этом интенсивность теплового излучения напрямую зависит от температуры объекта, и лишь в очень малой степени зависит от условий освещенности в видимом диапазоне.

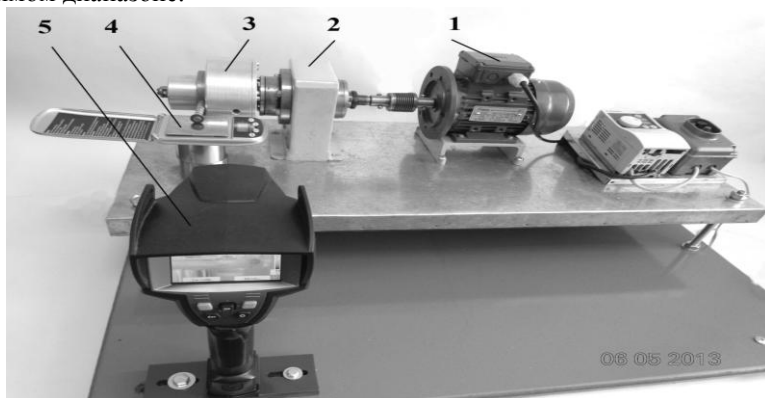


Рис.1 Фотография экспериментальной установки: 1 – двигатель; 2 – стойка; 3 – корпус; 4 – весы; 5 – тепловизор

Тепловизор – устройство, позволяющее визуализировать картину теплового излучения наблюдаемого объекта. Это открывает ряд уникальных возможностей для разных сфер деятельности: точных измерений, контроля технологических процессов, и конечно – обеспечения безопасности. Принцип действия современных тепловизоров основан на способности некоторых материалов фиксировать излучение в инфракрасном диапазоне. Посредством оптического прибора, в состав которого входят линзы, изготовленные с применением редких материалов, прозрачных для инфракрасного излучения (таких как германий), тепловое излучение объектов проецируется на матрицу датчиков, чувствительных к инфракрасному излучению. Далее сложные микросхемы считывают информацию с этих датчиков, и генерируют видеосигнал, где разной температуре наблюдаемого объекта соответствует

разный цвет изображения. Шкала соответствия цвета точки на изображении к абсолютной температуре наблюдаемого объекта может быть выведена поверх кадра. Также возможно указание температур наиболее горячей и наиболее холодной точки на изображении. В зависимости от модели тепловизоры различаются по величине шага измеряемой температуры. Современные технологии позволяют различать температуру объектов с точностью до 0,05-0,1 К.

*Л.К. Чернов, асп.; рук. В.А. Полетаев, д.т.н., проф.
(ИГЭУ г. Иваново)*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ НА ВЕЛИЧИНУ ПЕРЕХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Цепи электротехнических устройств не могут быть непрерывными, поэтому существуют соединения отдельных участков цепей. В местах соединения образуются электрические контакты. К местам соединения токоведущей цепи (контактам) предъявляются следующие требования: сопротивление участка, содержащего контакт, включая его переходное сопротивление, не должно превосходить сопротивления участка равной длины целого проводника соответствующей токоведущей цепи; нагрев контакта, при прохождении номинального тока не должен превосходить нагрева целого проводника и не должен выходить за нормы, установленные стандартами [1].

В основном контакты изготавливаются из цветных или драгоценных металлов. Контакты могут выполняться как из однородных материалов, например: медь – медь, алюминий – алюминий; так и из разнородных: медь – алюминий. По условиям работы контакты подразделяются на: работающие в воздухе, в закрытых или в открытых распределительных устройствах и работающие в масле [1].

В зоне соединения контактов образуется переходное сопротивление равное:

$$R = \frac{k\rho}{S} \sqrt{\frac{P}{\sigma}} \quad (1)$$

Где: p – давление на контакт, σ – сопротивление материала на сжатие, k – коэффициент неровности поверхности контакта (для плоскости равен единице), ρ – удельное электрическое сопротивление, s – суммарная площадь контактных точек.

Величина переходного сопротивления контакта не должна превышать более чем на 20 % величину сопротивления сплошного участка этой цепи примерно такой же длины. Величина переходного сопротивления контакта

зависит от степени окисления соединяемых контактных поверхностей проводников. Металл контактов взаимодействует с окружающей средой, кислородом воздуха, агрессивными газами и влагой и вступает с ними в химические реакции, вызывая химическую коррозию металла. Пленка окиси, образующаяся на поверхности металла (например, алюминия) от воздействия воздуха и окружающей среды, создается чрезвычайно быстро и обладает очень большим электрическим сопротивлением.

Контактные поверхности всегда имеют микроскопические возвышения и впадины; поэтому соприкосновение происходит только в отдельных точках - небольших площадках (рис. 1).

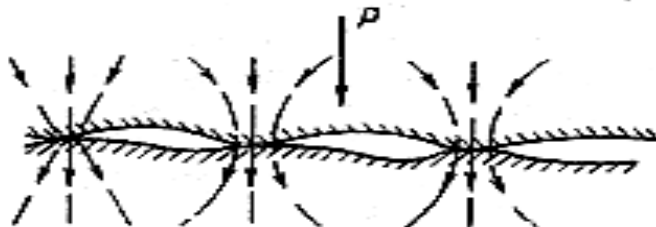


Рис. 1 Контактная поверхность.

Действительную площадь касания можно увеличить ростом силы прижатия контактов. Под влиянием силы прижатия металл в точках касания сминается, и размеры площадок увеличиваются, возникает соприкосновение в новых точках. Так же снижение переходного сопротивления можно добиться улучшением качества поверхности контактной пары [1].

Для проведения исследования было изготовлено 12 образцов контактных пар из латуни Л63, переходное сопротивление измерялось согласно гост 21342.1-87[2]. На основе априорных данных выбирались основные уровни факторов k : x_1 , x_2 и интервалы их варьирования. Фактором x_1 является энергия магнитного поля w , Дж, фактором x_2 – скорость вращения подвижного диска установки v , об/мин. С целью построения стандартной матрицы эксперимента натуральные значения факторов переводятся в кодовые безразмерные величины. Была составлена моделью 1-го порядка, проведены эксперименты по плану 2^2 . Для уменьшения систематических ошибок, эксперименты проводились в случайном порядке, каждый опыт проводится трижды. Результаты проведенных экспериментов представлены на рис. 1.

По результатам проведенных экспериментов можно сделать вывод, что улучшение качества поверхности контактной пары методом магнитного галтования уменьшает переходное сопротивление в среднем на 14 – 15 %.

На рис.2 представлено среднее значение переходного сопротивления до и после обработки, а рис.3 – визуализация участка поверхности контакта из контактной пары.

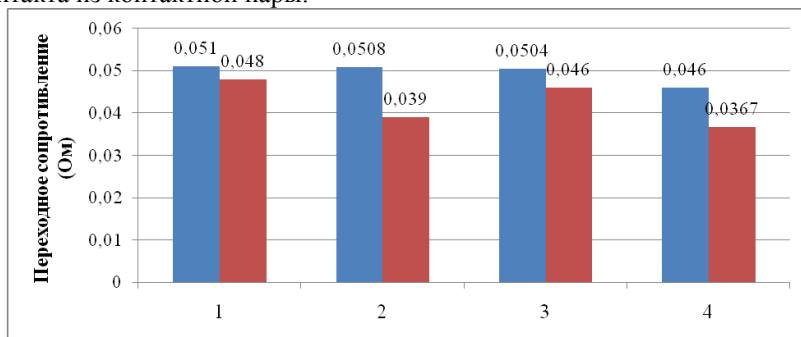


Рис. 2 Среднее значение переходного сопротивления до и после обработки: 1 - при $V=675$ об/мин, $W=209$ Дж; 2 - при $V=675$ об/мин, $W=877$ Дж; 3 - при $V=900$ об/мин, $W=209$ Дж; 4 - при $V=900$ об/мин, $W=877$ Дж.

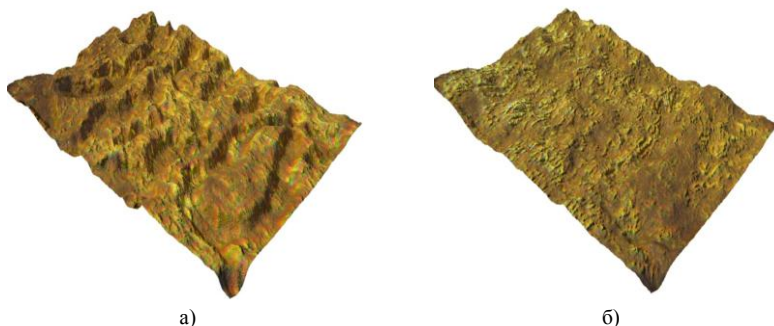


Рис. 3 Визуализация участка поверхности контакта (увеличение 40х): а) до обработки; б) после обработки.

Результат визуализации позволяет сделать вывод, что при улучшении качества поверхности контакта методом магнитного галтования, поверхность была очищена от оксидной пленки и выглажена галтовочными иглами. После обработки геометрическая форма поверхности упростилась и увеличилась общая площадь контакта, тем самым уменьшив переходное сопротивление.

Библиографический список

1. Берент В. Я. Материалы и свойства электрических контактов в устройствах железнодорожного транспорта. - М.: Интекст, 2005. - 408 с.
2. ГОСТ 21342.1-87 Резисторы переменные. Метод измерения переходного сопротивления контактов выключателя резисторов.

*Ю.В. Ланевский, аспирант; рук. В.А. Полетаев, д.т.н., проф.
(ИГЭУ г. Иваново)*

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ ГЕРМЕТИЗАТОРОВ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ АВТОКРАНОВ

Герметизаторы, в которых в качестве рабочего тела используется магнитные жидкости, нашли наиболее широкое применение из всех магнитожидкостных устройствах. Основные их преимущества - практически полная герметизация зазора между подвижным и неподвижным элементами узла и чрезвычайно малый момент трения, определили области применения магнитожидкостных герметизаторов (МЖГ). Наиболее важными ограничениями являются недостаточный удерживаемый перепад давления и малая работоспособность в контакте с жидкими средами. МЖГ очень надёжно компенсируют перепад давлений до 2 атм. вакуумной или газовой среды. Большие сложности возникают при разности давлений более 3 атм. МЖГ удовлетворительно работают при невысоких давлениях жидких сред, если можно создать газовый буфер между МЖ и уплотняемой жидкой средой. Возможность использования широкого спектра жидкостей-носителей при производстве МЖ, в частности полиэтилсилоксановых и перфторированных, позволяет применять МЖГ и другие устройства с МЖ в биохимической промышленности, при производстве различного вида белков и медицинских препаратов.

В первую очередь, МЖГ нашли свое применение в маломощных вакуумных системах при испытаниях подшипников и материалов. Хорошие результаты были получены в промышленных вакуумных системах различного назначения: плазменные технологии, лучевая сварка, напыление тонких пленок металла на бумагу и полимерные поверхности. Компания «Ferrofluidies Corporation» в 1977 году разработала МЖГ жестких дисков накопителей памяти для компьютерной техники. Герметизаторы на основе МЖ препятствуют проникновению даже табачного дыма на защищаемый объект.

Наиболее важное применение МЖГ нашли в космической технике. Практически все подвижные механические выводы из корпуса космических аппаратов уплотнены герметизаторами с МЖ. Наряду с возможностью уплотнения зазоров очень важным свойством МЖГ оказалось малое изменение собственного момента трения герметизатора после режима длительной стоянки и небольшая абсолютная величина этого момента. Этот эффект особенно важен для точного наведения

антенн и локаторов космических объектов, что очень трудно выполнить при наличии гистерезиса системы наведения.

В космических аппаратах МЖГ используются также для защиты подшипников, опор и различных систем от губительного действия вакуума на смазочные и покровные материалы, конструктивные элементы и т.п. Известен эффект диффузионной сварки двух непосредственно контактирующих в вакууме материалов. Поэтому без специальной защиты от действия вакуума подвижность незащищенных конструктивных элементов нарушается. Известны разработки космических скафандров, шлемы которых подвижны относительно корпуса скафандра и уплотнены МЖ, удерживаемой в зазоре магнитным полем.

В летательных аппаратах МЖГ хорошо зарекомендовали себя при герметизации радиолокаторов. В них отсутствуют продукты износа, которые могут нарушить работу подшипников. Момент трения МЖГ практически не зависит от изменения перепада давления при изменении высоты полёта. В зазоре герметизатора МЖ надёжно удерживается в момент взлёта, посадки и возможных ударных нагрузках.

Хорошо зарекомендовали себя МЖГ в криогенной технике. Для герметизации паров хладагента в рефрижераторных системах применяют МЖ на основе жидкостей-носителей с низкой точкой замерзания. Известно использование МЖГ для герметизации паров гелия и азота в устройствах со сверхпроводниками. В криогенном турбогенераторе МЖГ применены для вывода из ротора газообразного гелия после того, как он охладит сверхпроводящую обмотку возбуждения. Такой турбогенератор мощностью 20 МВт разработан во ВНИИЭлектромаше. Аналогичный герметизатор применён в исследовательском центре NASA для уплотнения вращающегося вала вентилятора, прокачивающего газовую смесь в мощном газовом лазере. Загрязнение рабочей смеси другими газами недопустимо.

Вакуумное оборудование, применяемое в плазменных технологиях напыления и нанесения тонких плёнок, электронно-лучевой плавки и сварки металлов, разработке маховичных накопителей энергии и т.п., не может обходиться без МЖГ. Разработаны специальные МЖ с низким давлением насыщенного пара на основе вакуумного масла.

Широкую область применения нашли МЖГ в конструкциях биореакторов и ферментаторов в производстве искусственных белков, лекарств и других органических материалов. В сложных условиях работы при двойной стерилизации температурой выше 130 °С МЖГ выдержали более 300 рабочих циклов, что составило свыше 1600 ч работы реактора. Герметизаторы устанавливались на биореакторы и фер-

ментаторы объёмом от 10 до 1000 л, диаметрами валов от 10 до 50 мм и частоте вращения валов от 180 до 1500 об/мин.

Отмечаются и другие области применения магнитных жидкостей: в аксиальной магнитожидкостной опоре, в магнитожидкостном микролифте для электропроигрывающего устройства, в электромагнитных лифтах скольжения, в магнитожидкостных датчиках угла наклона, давления, ускорения, для магнитогравитационной сепарации минерального сырья, в подшипниках качения, в смазочно-охлаждающих жидкостях, в технологических процессах, для очистки сточных вод тепловых электростанций, для получения магнитной жидкости из железосодержащих отходов производства, в ультразвуковой дефектоскопии, для ультразвукового контроля деталей подвижного состава железнодорожного транспорта, в магнитной оснастке для технологического применения магнитных суспензий, для блокировки оптических деталей, для магнитореологического управления прецизионным полированием, для стальных образцов при охлаждении в магнитной жидкости, магнитного упрочнения инструмента и деталей машин, об использовании магнитной жидкости в электромашиностроении, для охлаждения взрывозащищенных тяговых двигателей.

Автомобильные краны, выпускаемые на ОАО «Автокран» предназначены для работы как с обычными, так и взрывоопасными грузами. Привод механизмов крана – гидравлический от насоса, приводимого в действие двигателем шасси. Гидропривод обеспечивает легкость и простоту управления краном, плавность работы механизмов, широкий диапазон рабочих скоростей, совмещение крановых операций. Стрела – телескопическая, трехсекционная. Выдвижение секций стрелы производится при помощи гидроцилиндра и полиспадами. Основное изнашивание деталей происходит в узлах трения 1 и 2 (рис.1). В этих узлах трения возможно применение магнитожидкостных герметизаторов.

На рис. 1 представлена конструкция стрелы, а на рис. 2 – узел трения.

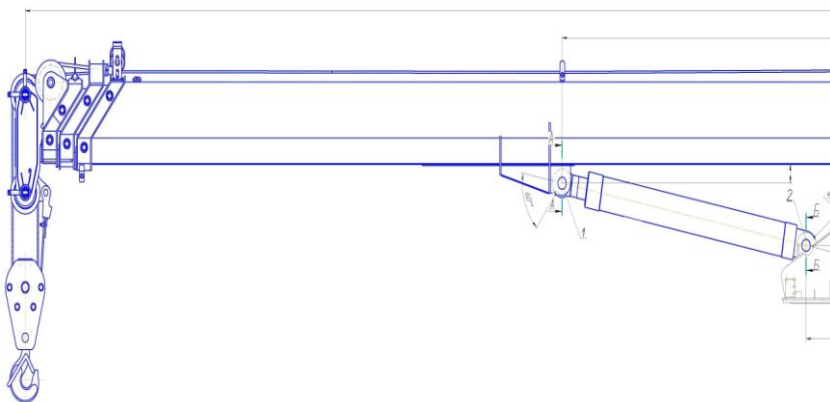


Рис.1. Стрела автомобильного крана

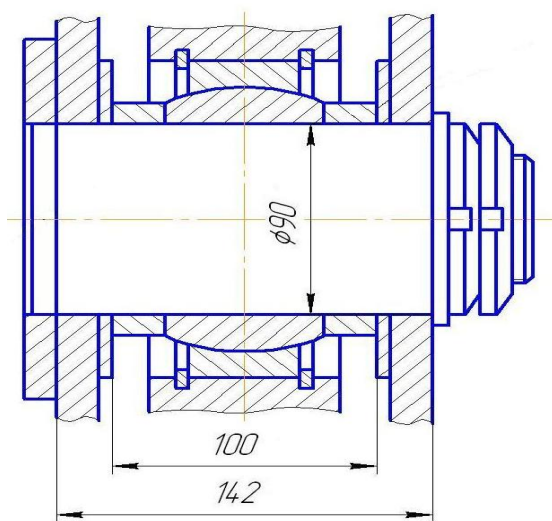


Рис.2. Узел трения

*А.В. Тихомирова, студ.; рук. В.А. Полетаев, д.т.н., проф.
(ИГЭУ г Иваново)*

КОНСТРУКЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТОКОСЪЕМНИКОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВРАЩАЮЩИХСЯ ДЕТАЛЕЙ

В практике измерений температуры вращающихся деталей машин наибольшее распространение получили способы осуществления электрических контактных связей в виде различных токосъемных устройств. При этом главным вопросом является снижение коммутационных помех, вносимых скользящими контактами в результате измерений.

Различные меры по улучшению контактных характеристик, принимаемые на основе лишь результатов экспериментов, без достаточного научного обоснования привели к множеству конструктивных разновидностей токосъемных устройств. Появились различные типы скользящих щеточных контактов, ртутных, игольчатых и шариковых токосъемников.

Общим вопросом для измерительных скользящих токосъемников является подбор контактных материалов. Из большого числа сочетаний материалов колец и щеток, применяющихся на практике, наиболее эффективными следует признать серебряные кольца с серебрографитовыми щетками, а также бронзовые, латунные и медные кольца с серебрографитовыми, медно-графитовыми, углеграфитовыми и в ряде случаев, угольными щетками.

Наиболее простой тип измерительного токосъемника составляют *клещевидные измерительные скользящие контакты повторно-кратковременного действия*. За это время щетки и диски не успевают нагреться от трения, что позволяет снижать возможные контактные термо-э. д. с. Важным преимуществом токосъемников такого типа является одинаковая сила нажатия, действующая на обе щетки, что обеспечивает идентичность тепловых условий на обеих щетках и способствует более полной взаимной компенсации даже тех малых термо-э. д. с, которые могут все же возникнуть в элементах токосъемника.

Описанный тип токосъемников при правильно подобранной измерительной схеме и аппаратуре позволяет делать периодические кратковременные замеры в условиях скоростей скольжения на кольцах до 20 м/сек (18 000 об/мин) при медных кольцах и медно-графитовых щетках.

С точки зрения простоты устройства представляют интерес *токосъемники с пружинящими щетками радиальной, торцовой и радиально-многоточечной установки*. Щетки данного типа токосъемников

представляют собой пружинящие пластины или прутки с наваренным или впрессованным на концах контактным материалом (серебро, серебрографит, меднографит)

Преимуществом пружинных щеток является возможность снижения механических вибраций щеток. Это осуществляется подбором таких геометрических размеров пружинящих пластин, при которых частота их собственных механических колебаний в несколько раз (достаточно в 3 – 5 раз) будет превышать частоту вибраций, которая возникает от вращения колец.

Для обеспечения низких переходных сопротивлений с гарантией от разрывов электрической цепи при вибрациях представляют интерес *токосъемники с накидными, опоясывающими щетками*.

Токосъемники этого типа представляют собой вращающееся контактное кольцо с канавкой по окружности, охваченное проволочной петлей. Важными факторами, обеспечивающими постоянство электрических характеристик скользящих токосъемников, являются постоянство силы нажатия, установленной опытным путем, и неизменность механических параметров (упругость, частота собственных колебаний) щеточной системы. Эти требования выполняются в токосъемниках со щетками рычажного типа.

Большое распространение в практике получили *токосъемники с приставными щетками радиальной установки, а также со щетками торцового расположения*. В этих схемах для установки щеток необходимы специальные гнезда щеткодержателей. При этом от степени точности изготовления щеткодержателей в значительной степени зависит вибрация щеток, возникающая от трения или заклинивания щеток в щеткодержателях. При радиальной установке щеток всегда имеется источник вибрации, вызванный отклонением формы кольца от идеально круглой поверхности. Малейшая эксцентricность, допущенная при обточке, при каждом обороте вызывает подбрасывание щеток. Кроме этого, щеткам передаются неизбежные радиальные вибрации вала испытываемой машины или вала токосъемной приставки. При торцовом расположении щеток этот недостаток в значительной мере устраняется, так как обработку торцовой поверхности дисков можно произвести с более высокой точностью, чем поверхности окружности кольца, а вибрацию машин и валов в аксиальном направлении практически исключить.

Если измерение термосопротивлениями проводится в течение короткого времени, например при запуске или при остановке машины, то переходное сопротивление может быть снижено применением так называемой *стилюющейся щетки*. Для осуществления такого токо-

сьемника кольцо выполняют с насеченной поверхностью в виде напильника из соответствующей стали. К кольцу прижимается латунный стержень, закрепленный в держателе и выполняющий роль щетки. Во время вращения кольца латунный стержень спиливается, обеспечивая хороший низкоомный контакт. Токосъемник со спиливающейся щеткой не применяют в цепи термопар, так как он сам является источником значительных термо-Э. д. с, возникающих в местах соприкосновения латунного стержня со стальным кольцом.

В поисках способов стабилизации переходного сопротивления и особенно улучшения динамических характеристик токосъемников были созданы *скользящие токосъемники с различной замкнутой средой* (подогретый воздух, электротехническое трансформаторное масло, инертный газ).

Один из таких токосъемников выполнен в виде *многощеточного скользящего контакта с радиальной установкой* серебрографитных или меднографитных щеток по латунному кольцу. Токосъемник помещен в замкнутую камеру, через которую продувается нагретый в калорифере воздух. Испытания токосъемника в условиях скоростей скольжения до 15–20 см/сек показали, что разброс величины переходного сопротивления в условиях нормальной температуры продуваемого воздуха находился в пределах 0,005 – 0,008 Ом. При доведении температуры воздуха до 70 °С, он резко снижался и не регистрировался имевшимися измерительными приборами. Сила нажатия на щетку регулировалась в пределах 0,5 – 3 кг/см², причем разброс в величине переходного сопротивления резко снижался уже при 0,6 кг/см².

Определенный интерес представляет *скользящий токосъемник с приставными щетками радиального или торцового расположения, замкнутый в герметическом сосуде, заполненном трансформаторным маслом*. Результаты испытания токосъемника в условиях скоростей скольжения до 15 – 20 м/сек показали, что масляная среда снижает разброс в величине переходного сопротивления, хотя величина его повышается в несколько раз по сравнению с данными, полученными в воздушной среде. Такой токосъемник пригоден для осциллографирования динамических тепловых процессов с помощью термосопротивлений, так как в их измерительной цепи при осциллографировании важен не столько общий уровень переходного сопротивления, сколько его стабильность и устойчивость.

Масляная среда в этом случае предохраняет поверхности скольжения от окислообразования и стабилизирует температуру контактов. Для выдавливания пленки масла из-под контактирующих поверхностей требуются большие силы нажатия, достигающие до 10 кг/см². При

большом числе оборотов, когда окружные скорости на поверхности дисков достигают 3 – 5 м/сек, контактные характеристики ухудшаются, что связано с гидродинамическим вклиниванием тончайшей пленки масла под щетки даже при больших величинах силы нажатия.

Значительное снижение переходного сопротивления и контактных термо-э. д. с, а также улучшение контактных характеристик достигается в скользящем токосъемнике со специальной, наклонной установкой щеток в замкнутой камере, продуваемой инертным газом – азотом .

Щетки со щеткодержателями устанавливаются под некоторым углом относительно радиуса с наклоном против направления вращения кольца. В герметический кожух после удаления воздуха медленным потоком через патрубки продувается азот.

Инертный газ, окружающий токосъемник, не допускает образования окисных пленок на контактных поверхностях колец и щеток. Необходимость наклонных щеток будет подробно освещена ниже при описании токосъемников с искусственным подогревом щеток. Здесь отметим только, что такая установка щетки дает возможность разложить силу нажатия на нормальную и касательную составляющие. Взаимодействие касательной составляющей с противоположно направленной силой трения позволяет скомпенсировать силу трения и тем самым избежать вредного влияния последней на динамические характеристики токосъемника. В частности, исчезают вибрации щетки, вызванные силой трения, ерзанием щеток по кольцу и их заклиниванием в щеткодержателях.

В измерительных цепях термопар из рассмотренных токосъемников с приставными щетками до окружных скоростей 10 – 15 м/сек пригодны только варианты с сочетанием медных, бронзовых или латунных колец с серебрографитными щетками, в токосъемнике же с азотной средой могут применяться и медные кольца с меднографитными щетками.

*И.А. Зиновьева, студ.; рук. А.М. Шурьгин, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ В ПРОСТРАНСТВЕ СОСТОЯНИЙ

В работе [1] показана целесообразность применения численно-аналитического метода пространства состояний при моделировании электромеханических систем. Отмечено, что данный метод позволяет определить значения переменных в дискретные моменты времени, соответствующие моментам переключения отдельных блоков системы, и исключает промежуточные вычисления без потери точности расчета.

Модель синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ) в пространстве состояний составляется на основе известных уравнений идеализированного двигателя в неподвижной относительно статора системе координат α, β . При использовании допущения, что в течение малого времени шага расчета Δt изменениями напряжений обмоток статора u_α, u_β и угловой скорости ротора $\omega_{эл}$ (эл. рад/с) можно пренебречь, дифференциальные уравнения СДПМ [2, 3] записываются в форме матричного уравнения состояния

$$\frac{d}{dt}[x_{ext}] = [A_{ext}][x_{ext}], \quad (1)$$

где $[x_{ext}]$ – расширенный вектор состояния, $[A_{ext}]$ – расширенная матрица состояния, и принимают вид

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ e_\alpha \\ e_\beta \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(-R_s)}{L_s} & 0 & \frac{(-1)}{L_s} & 0 & \frac{u_\alpha}{L_s} \\ 0 & \frac{(-R_s)}{L_s} & 0 & \frac{(-1)}{L_s} & \frac{u_\beta}{L_s} \\ 0 & 0 & 0 & (-\omega_{эл}) & 0 \\ 0 & 0 & \omega_{эл} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ e_\alpha \\ e_\beta \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где R_s, L_s – активное сопротивление и полная индуктивность обмотки фазы статора, $u_\alpha, u_\beta, i_\alpha, i_\beta, e_\alpha, e_\beta$ – напряжения, токи и противо- э.д.с. обмоток статора по осям α, β , причем

$$\begin{cases} e_{\alpha} = (-\Psi_{\text{пм}})\omega_{\text{эл}} \sin \varphi_{\text{эл}}, \\ e_{\beta} = \Psi_{\text{пм}}\omega_{\text{эл}} \cos \varphi_{\text{эл}}, \end{cases} \quad (3)$$

где $\Psi_{\text{пм}}$ – потокосцепление, обусловленное наличием постоянных магнитов, $\varphi_{\text{эл}}$ – угол положения ротора ($d\varphi_{\text{эл}}/dt = \omega_{\text{эл}}$).

Решение матричного уравнения (1) в произвольный момент времени $t = t_{\text{нач}} + \Delta t$ записывается как [4]

$$[x_{\text{ext}}] = e^{[A_{\text{ext}}]\Delta t} [x_{\text{ext нач}}], \quad (4)$$

где $[x_{\text{ext нач}}]$ – значение расширенного вектора состояния $[x_{\text{ext}}]$ в начальный момент времени $t_{\text{нач}}$.

На каждом расчетном интервале Δt сначала формируется расширенная матрица состояния $[A_{\text{ext}}]$, определяются значения коэффициентов ее характеристического уравнения, и рассчитываются ее собственные числа. Затем вычисляются переходная матрица состояния и расширенный вектор состояния $[x_{\text{ext}}]$.

Для расчета электромагнитного момента СДПМ используется формула

$$M_{\text{эм}} = \frac{m}{2} p_{\text{п}} \Psi_{\text{пм}} (i_{\beta} \cos \varphi_{\text{эл}} - i_{\alpha} \sin \varphi_{\text{эл}}), \quad (5)$$

где m – число фаз, $p_{\text{п}}$ – число пар полюсов двигателя, которая с учетом соотношений (3) позволяет вычислить значения электромагнитного момента двигателя $M_{\text{эм нач}}$ в момент времени $t_{\text{нач}}$ и $M_{\text{эм}}$ в момент времени $t = t_{\text{нач}} + \Delta t$.

Производная электромагнитного момента по времени на расчетном интервале Δt определяется по выражению

$$k_t = \frac{M_{\text{эм}} - M_{\text{эм нач}}}{\Delta t}. \quad (6)$$

При использовании допущения, что в течение малого времени шага расчета Δt изменением момента сопротивления $M_{\text{с}}$ можно пренебречь, получена формула, позволяющая рассчитать угловую скорость двигателя ω (рад/с) в момент времени $t = t_{\text{нач}} + \Delta t$:

$$\omega = \frac{1}{J_{\text{пр}}} \left(\frac{k_t}{2} \Delta t^2 + (M_{\text{эм нач}} - M_{\text{с}}) \Delta t \right) + \omega_{\text{нач}}, \quad (7)$$

где $J_{пр}$ – приведенный момент инерции, $\omega_{нач}$ – значение скорости ω в начальный момент времени $t_{нач}$.

Значения переменных, полученные в момент времени $t=t_{нач}+\Delta t$, и значение времени t принимаются начальными для расчета на следующем интервале. Затем процесс вычислений повторяется.

Библиографический список

1. **Шурыгин, А. М.** Разработка методов управления импульсно-фазовыми электроприводами с бесколлекторными двигателями для испытательной техники : дис... канд. техн. наук : 05.09.03 / Шурыгин Андрей Михайлович. – Иваново, 2007. – 177 с.
2. **Осин, И. Л.** Электрические машины. Синхронные машины : учеб. пособие для вузов по спец. «Электромеханика» / И. Л. Осин, Ю. Г. Шакарян ; под ред. И. П. Копылова. – М. : Высшая школа, 1990. – 304 с.
3. **Шурыгин, А. М.** Математическое описание бесколлекторного двигателя в неподвижной системе координат / А. М. Шурыгин, М. Н. Шурыгин, А. А. Масляева // Сборник научных трудов Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVI Бенардосовские чтения). – Иваново : ИГЭУ, 2011. – Т. 3 : Электротехника. – С. 154-156.
4. **Деруссо, П.** Пространство состояний в теории управления (для инженеров) : пер. с англ. / П. Деруссо, Р. Рой, Ч. Клоуз. – М. : Наука : Главная редакция физико-математической литературы, 1970. – 620 с.

*Е.А. Булгачев, студ.; рук. Е.В. Башмакова, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СОТС НА ПРОЦЕСС СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ

Исследование усадки стружки имеет большое научно-практическое значение для объяснения явлений, происходящих при пластических деформациях на контактных поверхностях в процессе резания.

Вопросам стружкообразования посвящены многочисленные работы, выполненные П.Д. Беспяхотным; П.Г. Петрухой, Н.В. Талантовым и их сотрудниками. В работах Н.В. Талантова пластически деформируемая зона определяется как «зона с пульсирующим контактом», которой присущи две фазы: упрочнения и разупрочнения. Первая фаза характеризуется превышением интенсивности деформационного упрочнения над интенсивностями температурного разупрочнения. На второй фазе интенсивность второго (температурного) процесса выше – и материал разупрочняется. Это отражает характер стружкообразования при резании материала [2,3].

Режимы резания оказывают существенное влияние на процессы, происходящие в зоне резания, в частности, на усадку стружки, силу,

температуру, вибрацию и т.д. В конечном счете, они определяют стойкость и работоспособность инструмента. Влияние режимов резания на процессы в зоне резания является переменным при изменении свойств и состава обрабатываемого и инструментального материалов. Усадка является внешним выражением той пластической деформации, проходящая по плоскости сдвига, которая сопровождается образованием стружки. Она зависит от угла резания и коэффициента трения на передней поверхности инструмента, т.е. от направления равнодействующей силы. Поэтому, при постоянной геометрии инструмента по величине усадки стружки можно судить о смазочной способности СОТС.

Модельные эксперименты по определению усадки стружки проводились на токарном станке модели 16К20. Проведены исследования по изучению продольной укорочения стружки. В качестве обрабатываемого материала использовалась сталь 12Х18Н10Т, в качестве режущего инструмента применялись резцы, оснащенные пластинками твердого сплава ВК8. Геометрия резцов, согласно справочной литературе [84], имела следующие параметры: $\gamma = 9^\circ$; $\alpha = 9^\circ$; $\varphi = 90^\circ$; $\varphi_1 = 9^\circ$; $\lambda = 0^\circ$. Расход СОТС составлял 300 ... 500 мл/мин. Подача СОТС осуществлялась капельным методом. Скорость резания составляла 100 м/мин, подача 0,1 мм/об. Глубина резания 1 мм.

Для получения дисперсии воспроизводимости опыта было проведено до 30 измерений усадки стружки. Дисперсия воспроизводимости распространялась на все испытания по измерению укорочения стружки и составила 3...5 %.

На заготовке диаметром 32,3 мм прорезался продольный паз шириной 2 мм и глубиной 5 мм. Таким образом, величина дуги окружности между пазами составила 99,42 мм. Коэффициент продольного укорочения стружки вычисляется по формуле:

$$K_l = l_0 / l_{cmp}, \quad (1)$$

где l_0 – длина среза (99,42 мм), l_{cmp} – длина стружки.

Оценка влияния СОТС на процесс стружкообразования производился по следующим параметрам: 1 – изменению формы стружки; 2 – радиуса ее завивания; 3 – коэффициента укорочения стружки K_l .

Радиус завивания стружки является наиболее простым и распространенным качественным показателем деформационных процессов, происходящих в срезаемом слое и на контактных поверхностях режущего инструмента и стружки. Результаты исследований на радиус завивания стружки представлены на рис.1. Как видно из рисунка, активированная СОТС приводит к уменьшению радиуса завивания струж-

ки при различных режимах. Это можно объяснить прежде всего через улучшение смазочных свойств охлаждающей средств, уменьшение адгезионного и диффузионного взаимодействия обрабатываемого и инструментального материалов, уменьшение процесса наростообразования. Улучшение смазочных свойств СОТС проявляется в уменьшении сил трения на передней поверхности, что приводит к уменьшению вторичных сдвиговых деформаций и к уменьшению радиуса завивания стружки [1].

На рис. 2 представлена зависимость коэффициента усадки стружки в зависимости от применяемой СОТС.

Анализ результатов на усадку стружки показывает, что применение активированной СОТС изменяет коэффициент продольного укорочения стружки. Так, при скоростях резания выше 70 м/мин специальная технология приготовления позволяет снизить коэффициент продольного укорочения стружки до ~7 %.

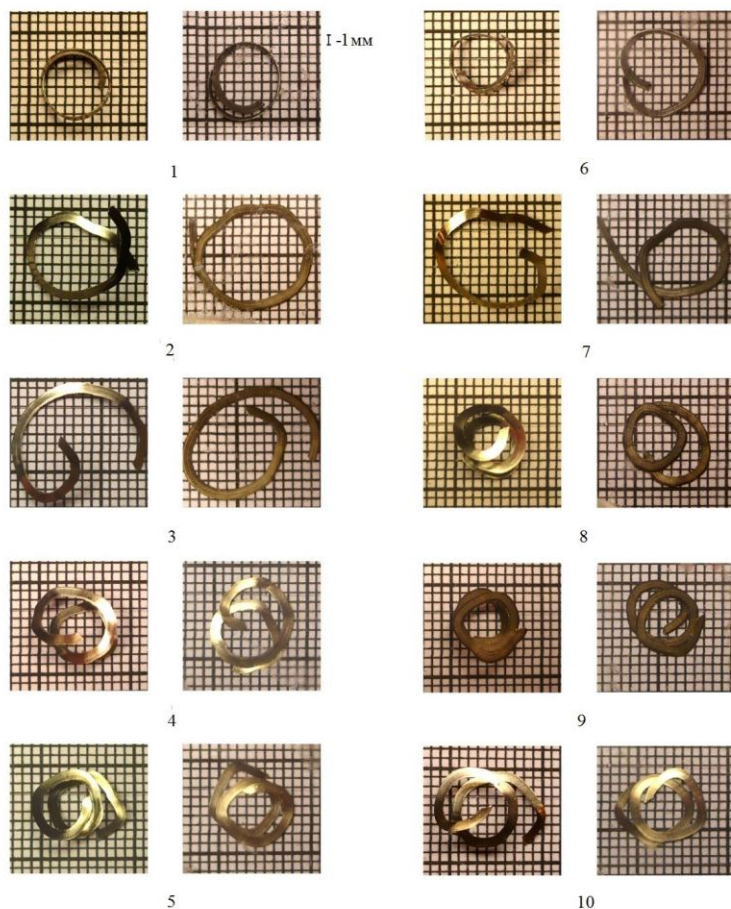


Рис. 1. Характер стружкообразования в зависимости от скорости резания

1- СОТС обычного приготовления 20 м/мин;	6- СОТС специального приготовления 20 м/мин;
2- СОТС обычного приготовления 40 м/мин;	7- СОТС специального приготовления 40 м/мин;
3- СОТС обычного приготовления 63 м/мин;	8- СОТС специального приготовления 63 м/мин;
4- СОТС обычного приготовления 80 м/мин;	9- СОТС специального приготовления 80 м/мин;
5- СОТС обычного приготовления 100м/мин.	10- СОТС специального приготовления 100 м/мин.

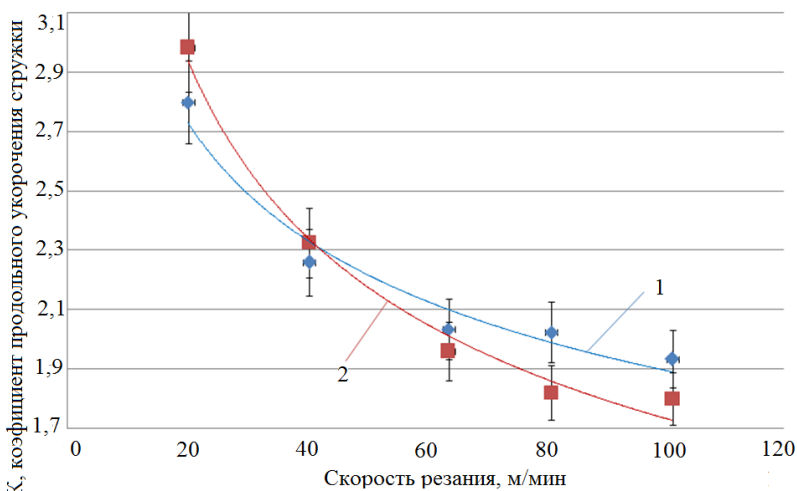


Рис. 2. Зависимость коэффициента усадки стружки в зависимости от скорости резания: 1 – СОТС обычного приготовления; 2 – мелкодисперсная активированная СОТС

Выявленные изменения в процессах стружкообразования позволяют более полно и правильно оценить характер их действия.

Таким образом, активированная СОТС лучше экранируют адгезию обрабатываемого материала с инструментом, за счет формирования вторичных смазочных структур, инициируемых процессами активации в специальном смесителе. Следовательно, обладают лучшей смазочной способностью.

Библиографический список

1. **Клушин, М.И.** Резание металлов. Элементы теории пластического деформирования срезаемого слоя / М.И. Клушин. - М.: Машгиз, 1958. - 454с.
2. **Латышев, В.Н.** Трибология резания. Кн.1. Фрикционные процессы при резании металлов / В.Н. Латышев. - Иваново: Изд-во ИвГУ, 2009. – с. 20-25.
3. **Латышев, В.Н.,** Годлевский, В.А. Вопросы физико-химической механики процессов трения и резания / В.Н. Латышев, В.А. Годлевский. - Иваново: ИвГУ, 1980. – с. 70.

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

НЕЙРОСЕТЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Нейросетевыми технологиями называют комплекс информационных технологий, основанных на применении искусственных нейронных сетей. Искусственная нейронная сеть – математическая модель, а также ее программная или аппаратная реализация, построенная по принципу организации и функционирования биологических нейронных сетей нервных клеток живого организма. Это понятие возникло при изучении процессов, протекающих в мозге, и при попытке смоделировать эти процессы.

Искусственная нейронная сеть представляет собой сеть соединенных между собой искусственных нейронов, имитирующих свойства биологических нейронов. На вход искусственного нейрона поступает некоторое множество сигналов, каждый из которых является выходом другого нейрона. Каждый вход умножается на соответствующий вес, и все произведения суммируются, определяя уровень активации нейрона. Некоторые входы нейронов являются внешними входами сети, а некоторые выходы – внешними выходами сети. Подавая на входы сети числовые значения, можно получать набор числовых значений на выходе сети.

Искусственные нейронные сети имеют свойство обучаться. После формирования базы обучающих примеров и формирования сети на ее вход подаются входные параметры примеров, посредством сети производятся расчеты выходных параметров. Они сравниваются с выходными параметрами обучающих примеров. Если ошибка расчетов превышает заданную (допустимую), производится подстройка весов сети. Когда ошибка расчетов становится меньше или равной допустимой ошибке, считается, что сеть обучена. После этого, подавая на вход сети значения входных параметров, отличающиеся от параметров обучающих примеров, на выходе сети можно получить прогнозные значения выходных параметров.

Учитывая трудоемкость вычислительных процедур при работе с искусственными нейронными сетями, разработаны десятки универсальных нейросетевых пакетов программ. К нейросетевому программному обеспечению для персональных компьютеров в настоящее время

относятся следующие из них: NeuroShell, NeuroSolutions, BrainMaker и другие.

Искусственные нейронные сети применяются там, где нужно решать задачи прогнозирования, классификации или управления (экономика и бизнес, медицина, промышленное производство, энергетика, социология, политические технологии и т.д.). Это объясняется их преимуществами перед традиционными аналитическими математическими моделями:

- возможностью воспроизведения чрезвычайно сложных зависимостей;
- устойчивостью к «шумам» во входных данных;
- возможностью решения задач при неизвестных закономерностях;
- высоким быстродействием и т.д.

В машиностроении нейросетевые технологии нашли применение для решения следующих задач:

- экспресс-нормирование операций механической обработки;
- нейросетевое распознавание объектов;
- прогнозирование качества термообработки сталей и сплавов, ресурса металлорежущего инструмента, загрузки оборудования, развития машиностроения;
- разработка автоматизированных систем управления процессами механической обработки деталей, электроприводами, робототехническими системами, другими процессами и системами;
- создание нейросетевых технологических справочников и «советчиков» технолога;
- разработка интеллектуальных САПР, тренажеров и т.д.;

Суть некоторых перечисленных разработок заключается в следующем. Нейросетевое нормирование операций механообработки в тяжелом машиностроении производится для повышения качества технологической подготовки производства. Для каждого выходного компонента (параметра) строится отдельная сеть. Обучение сетей производится по данным технологических процессов изготовления деталей, составленных ранее на предприятии. Применение предложенной методики позволяет учесть особенности конкретного предприятия (состав и характеристики оборудования, величины вспомогательного времени и др.). При этом значительно сокращается трудоемкость нормирования операций.

Задачи выделения и распознавания объектов возникают, в частности, при автоматической обработке цифровых изображений поверхностей крупногабаритных узлов и деталей. Для их решения используется

автоматизированная нейросетевая система анализа изображений текстуры поверхностей, полученных в оптическом и инфракрасном диапазоне, применяемая для поиска микродефектов.

*Е.А. Булгачев, студ.; рук. А.С. Орлов, к.т.н., доцент
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СВЕРЛ ИЗ СТАЛИ Р6М5, УПРОЧНЕННЫХ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКОЙ

В условиях рыночной экономики повышение износостойкости и долговечности металлообрабатывающего инструмента в машиностроении имеет чрезвычайно большое значение. Улучшение качества инструментов можно достичь легированием материалов, а также с применением всех известных механизмов объемного упрочнения при термической обработке. Причины отказов инструментов чаще всего связаны не с их поломкой, а с утратой ими своей первоначальной поверхностной конфигурации вследствие износа, сколов, смятия, растрескивания, т. е. в связи с разрушением или деформацией тонких поверхностных слоев металла. Именно этими обстоятельствами объясняется интенсивное развитие многочисленных методов и разработок в области поверхностного упрочнения инструментов, которые основаны на использовании сложных физических явлений как в процессе резания, так и при его изготовлении. [2]

Прогресс современного машиностроительного производства приводит к ужесточению условий эксплуатации режущего инструмента и возрастанию требований, предъявляемых к его работоспособности. Быстрорежущие стали остаются одним из наиболее распространенных материалов для изготовления инструментов.

Одним из прогрессивных методов упрочнения деталей является магнитная импульсная обработка (МИО). Применяемые на практике методы магнитной обработки материалов различны как по своим физическим и технологическим принципам, так и по конструктивным исполнениям установок. Импульсная магнитная обработка отличается низкой стоимостью процесса, высокой производительностью, простой технологии. В то же время в научных публикациях недостаточно информации о механизмах упрочнения МИО, и о трибологических эффектах данного вида обработки, что требует накопления нового теоретического и практического материала в этой области.

Установлено, что из всего спектра режущих материалов применение метода МИО оправдано только для одной группы – быстрорежущие стали. Это обусловлено наличием ферромагнитного компонента и технологией изготовления сверл из быстрорежущей стали, включающей пластическую деформацию, а именно накатку канавок и скручивание. Попытки применить МИО для твердых сплавов успехом не увенчались.

В результате МИО происходит образование субзерен в зернах исходной структуры. Считается, что в поверхностном слое металла уже имеются микротрещины, возникшие в результате пластической деформации при изготовлении резцов из быстрорежущей стали. При увеличении внешнего напряжения (например, при резании металла) на границе между зерном 1 и субзерном 1 в зерне 2 возникает концентрация растягивающих напряжений. В результате МИО происходит уменьшение граничной энергии на границах зерен и потому они становятся более устойчивы к межзеренному разрушению. Кроме того, в результате дробления исходного зерна возникли новые малоугловые и специальные границы субзерен. Эти границы являются менее жесткими барьерами для дислокаций по сравнению с границами зерен, и поэтому они менее эффективные концентраторы напряжений. Это значит, что напряжение растяжения в конце полосы скольжения будет значительно ниже. Таким образом, МИО увеличивает критическое разрушающее напряжение и уменьшает возможность образования новых и развитие уже имеющихся микротрещин за счет увеличения напряжения сопротивления движению дислокаций в сплаве.

Объектом испытаний являлись сверла из быстрорежущей стали Р6М5 диаметром 6 мм. Режимы механической обработки для легированных конструкционных сталей (40Х, 12Х18Н10Т): $s = 0,12 - 0,2$ мм/об, $v = 6 - 10$ м/мин; для углеродистых качественных конструкционных сталей (20, 30, 45): $s = 0,18 - 0,22$ мм/об, $v = 14 - 18$ м/мин. Эксперименты проводили на радиально-сверлильном станке 2А135 с автоматической подачей инструмента и охлаждением СОТС «Эмульсол ОТ» при концентрации 5 %. Были выбраны заготовки в форме пластин толщиной 15 мм.

Испытываемые сверла обрабатывали на установке МИО, конструкция которой позволяла варьировать количество импульсов (2 – 10), их длительность (0,1 – 0,2 с), время между импульсами (1 – 2 с) и напряженность магнитного поля (100 – 800 кА/м).

МИО сверл проводили с использованием ферромагнитного компонента и без него при сверлении отверстий в заготовках из сталей 20, 45, 40X и 12X18H10T; без вибрации и с вибрацией сверла во время обработки стали 30. В дальнейшем принцип комбинированной обработки был еще более усложнен: наряду с МИО одновременно использовали вибрацию обрабатываемого сверла и применяли ферромагнитные порошковые концентраторы магнитного поля.

Проводили измерения фаски износа по задней поверхности сверла через каждые 100 мм глубины сверления и на пределе стойкости сверла, а также фотографировали кромки сверла через каждые 100–300 мм глубины сверления

Далее представлены результаты исследований влияния импульсной магнитной обработки на стойкость и величину износа фаски задней поверхности сверл диаметром 6 мм из быстрорежущей стали Р6М5 при резании углеродистых качественных конструкционных сталей (20, 30, 45) и легированных конструкционных сталей (40X, 12X18H10T).

Проведены исследования относительной стойкости сверл, обработанных и не обработанных МИО напряженностью магнитного поля 100 – 800 кА/м, количеством импульсов 3, длительностью импульса – 0,1 с ферромагнитным компонентом при сверлении стали 45. Исследования показали наибольшую относительную стойкость сверл при МИО напряженностью магнитного поля 500 кА/м. Далее все исследования с использованием ферромагнитного компонента проводились МИО напряженностью магнитного поля 500 кА/м.

Анализ результатов исследования показывает, что при обработке стали 45 износ задних поверхностей кромок сверла при обработке МИО с применением ферромагнитного компонента напряженностью $H=500$ кА/м и с разным количеством импульсов находится в пределах 0,34 – 0,42мм, а суммарная глубина сверления в пределах 800 – 1200 мм. Причем наименьший износ фаски задней поверхности сверла происходит при количестве импульсов равным трем. При этих же режимах обработки МИО наблюдается наименьший крутящий момент.

На основании этого все дальнейшие исследования со сталями 20, 40X, 12X18H10T проводились при режимах МИО с применением ферромагнитного компонента для сверл \varnothing 6 мм из стали Р6М5: напряженность магнитного поля $H=500$ кА /м; количество импульсов 3. В результате проведенных экспериментов выявлено различие в величине износа задних поверхностей кромок сверл и в суммарной глубине сверления при обработке разных сталей.

При обработке стали 20 величина износа задней поверхности кромки без упрочнения МИО составляет 0,35 мм, а суммарная глубина сверления 800 мм, стали 40Х – 0,4 мм при суммарной глубине сверления 600 мм, стали 12Х18Н10Т – 0,48 мм при суммарной глубине сверления 550 мм. Использование ферромагнитного компонента при упрочнении сверл приводит к уменьшению износа фасок задней поверхности кромки до 0,27 мм, 0,32 мм и 0,36 мм, при суммарной глубине сверления 1250 мм, 950 мм и 800 мм соответственно для сталей 20, 40Х и 12Х18Н10Т.

В исследованиях по испытанию сверл на стойкость использовались также следующие виды упрочнения МИО: с вибрацией и без вибрации испытуемого сверла. При упрочнения МИО с вибрацией сверло опускалось в магнитную катушку и под воздействием магнитного поля совершало колебания.

При проведении экспериментов были выявлены оптимальные режимы обработки: напряженность магнитного поля $H=415$ кА /м; количество магнитных импульсов $t=4$; длительность импульса – 0,1 с; промежутки времени между импульсами – 1 с.

Экспериментами установлено, что при обработке стали 30 сверлами, упрочненными МИО с применением комбинации вибрации и ферромагнитного порошка, суммарная глубина сверления без упрочнения МИО составляет 800мм. После обработки МИО суммарная глубина сверления составляет 1300 мм. Величина износа задней поверхности кромки без упрочнения МИО составляет 0,42мм, а после упрочнения МИО – 0,34 мм.

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод, что МИО значительно увеличивает прочность и износостойкость испытуемого инструмента, так же были найдены оптимальные параметры для обработки сверл диаметром 6мм из быстрорежущей стали Р6М5. [2]

Библиографический список

1. **Орлов, А.С.** Повышение работоспособности режущего инструмента путем упрочнения импульсной магнитной обработкой / А.С. Орлов. - Иваново.: На правах рукописи, 2012. – 184 с.
2. **Кинденко, Н.И.** Классификация методов магнитной обработки режущих инструментов / Н.И. Кинденко. - Краматорск: Научный вестник ДГМА, 2011. – 204 с.

*А.А. Хахалин, студ.; рук. А.А. Киселев, к.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ВАРИАНТ РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ СТВОЛА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ДЫМОВОЙ ТРУБЫ С ОТТЯЖКАМИ

Расчеты напряженно деформированного состояния дымовой трубы выполняются на основе метода предельных состояний несущих конструкций трубы при действии ветровых, весовых и конструктивных нагрузок с учетом эксплуатационных повреждений и износа ствола трубы [1].

1. Исходные данные для расчета

- тип местности (А, В, С) (разд. 2.4.3 [1]);
- нормативное значение ветрового давления для соответствующего ветрового района, определяемое по табл. 2.2 [1] W_0 , кгс/м²;
- высота дымовой трубы Z_k (Н), м;
- наружный диаметр трубы D , м;
- эффективное значение толщины стенки трубы $t_{эф}$, мм;
- высотная отметка наиболее нагруженного сечения ствола трубы Z_0 , м;
- диаметр круглого сечения ходовых ступеней $d_{ст}$, мм;
- число оттяжек, m ;
- наибольшее значение угла между растяжками и поверхностью земли α , град;
- отметка крепления оттяжек к стволу трубы $Z_{от}$, м;
- диаметр круглого сечения оттяжек $d_{от}$, мм;
- коэффициент снижения нагрузки за счет оттяжек для местности типа (А, В, С) - $\beta^{от}$ (разд. 2.4.3 [1]);
- коэффициент нагрузки на гладкоствольную трубу для типа местности (А, В, С) - β (разд. 2.4.3 [1]).

2. Определение силовых факторов в стволе дымовой трубы при действии ветровой нагрузки

Наиболее нагруженное сечение ствола трубы, на которое действуют наибольшие ветровые, весовые, конструктивные и эксплуатацион-

ные нагрузки, расположено в уровне верхнего обреза ребер жесткости цокольной части ствола трубы в отметке Z_0 .

Изгибающий момент и перерезывающая сила от ветровой нагрузки в нижнем сечении ствола дымовой трубы в отметке Z_0 при наличии оттяжек, уменьшающих нагрузки на ствол трубы, согласно формулы (1.3.30) [1] имеют вид:

$$M(Z_0) = \frac{4}{9} \beta \beta^{\text{от}} DW_0 Z_k^{2.25} \left(1 + 0.8 \bar{Z}_0^{2.25} - 1.8 \bar{Z}_0 \right) - P_{\text{от}} \cos \alpha (Z_{\text{от}} - Z_0), \quad (1)$$

$$Q_n(Z_0) = 0.8 \beta \beta^{\text{от}} DW_0 Z_k^{1.25} \left(1 - \bar{Z}_0^{1.25} \right) - P_{\text{от}} \cos \alpha. \quad (2)$$

Для частного случая при усреднении измеренной толщины стенки ствола трубы принимается, что изгибная жесткость ствола постоянна, а ветровая нагрузка распределена по всей высоте ствола трубы.

Тогда растягивающее усилие в одной растяжке определяется по формуле 1.4.22 [1]

$$P_{\text{от}} = \frac{3}{4} \cdot \frac{q^W H \xi_{\text{от}}}{\bar{Z}_{\text{от}} (1 + \alpha_{\text{от}}) \cos \alpha}, \quad (3)$$

где распределенная равномерная ветровая нагрузка на ствол трубы находится по формуле 1.4.26 [1]

$$q^W = \frac{Q(Z_0)}{H}. \quad (4)$$

Подставив (4) в (3), получим растягивающее усилие в растяжке в виде

$$P_{\text{от}} = \frac{3}{4} \cdot \frac{Q(Z_0) \xi_{\text{от}}}{\bar{Z}_{\text{от}} (1 + \alpha_{\text{от}}) \cos \alpha}, \quad (5)$$

где перерезывающая сила в нижнем сечении ствола трубы без учета составляющей перерезывающей силы от растягивающего усилия $P_{\text{от}}$

$$Q(Z_0) = 0.8 \beta \beta^{\text{от}} DW_0 Z_k^{1.25}, \quad (6)$$

$$\text{где } \bar{Z}_0 = \frac{Z_0}{Z_k}.$$

Отметим, что при расчете $Q(Z_0)$ принимают D и Z_k в (м), W_0 - в (кгс/м²).

Определим другие параметры формулы (5):

$$\xi_{\text{от}} = 1 - \frac{2}{3} \bar{Z}_{\text{от}} + \frac{1}{6} \bar{Z}_{\text{от}}^2, \quad (7)$$

$$\bar{Z}_{от} = \frac{Z_{от}}{Z_k};$$

где:

$$\alpha_{от} = \frac{3EJ}{C_{от} H^2 \bar{Z}_{от}^2 \sin \alpha \cos^2 \alpha}, \quad (8)$$

где $J = \pi D^4 \frac{t_{ср}}{8}$ - момент инерции поперечного сечения ствола, мм⁴;

$C_{от} = 2\chi_{от} E_{от} F_{от} \cos^2 \left(\frac{\varphi}{2}\right)$ - жесткость оттяжки на растяжение, кгс,

где: $E_{от} = 20000$ кгс/мм² - модуль упругости стали оттяжки;

$F_{от} = \frac{\pi d_{от}^2}{4}$ - площадь поперечного сечения оттяжки, мм²;

$\chi_{от} = 0,9$ - коэффициент, учитывающий конструктивное исполнение оттяжек, например, наличие проушин.

Для упрощения расчетов примем, что три оттяжки выполнены из одинакового материала, имеют одинаковые размеры, к анкерным якорям закреплены на уровне земли, а углы между растяжками одинаковы и составляют угол $\varphi = 120^\circ$.

Тогда, исходя из принятых допущений, можно определить с относительной погрешностью не более 5%:

- минимальное значение жесткости оттяжек по (1.4.24) [1]:

$$C_{от}^{min} = \frac{1}{2} \chi_{от} E_{от} F_{от}, \quad \text{кгс}; \quad (9)$$

- максимальное значение жесткости оттяжек по 1.4.25 [1]:

$$C_{от}^{max} = \chi_{от} E_{от} F_{от}, \quad \text{кгс}. \quad (10)$$

Далее определим максимальное и минимальное значения $\alpha_{от}$:

$$\alpha_{от}^{max} = \frac{3EJ}{C_{от}^{max} H^2 \bar{Z}_{от}^2 \sin \alpha \cos^2 \alpha}.$$

$$\alpha_{от}^{min} = \frac{3EJ}{C_{от}^{min} H^2 \bar{Z}_{от}^2 \sin \alpha \cos^2 \alpha},$$

а затем максимальное и минимальное значения растягивающей силы в растяжках

$$P_{от}^{max} = \frac{3}{4} \cdot \frac{Q(Z_0) \xi_{от}}{\bar{Z}_{от} (1 + \alpha_{от}^{max}) \cos \alpha}, \quad \text{кгс}; \quad (11)$$

$$P_{от}^{min} = \frac{3}{4} \cdot \frac{Q(Z_0) \xi_{от}}{\bar{Z}_{от} (1 + \alpha_{от}^{min}) \cos \alpha}, \text{ кгс.} \quad (12)$$

При расчете нагрузок на ствол дымовой трубы согласно выражению (1.4.24) [1] необходимо принимать минимальное значение растягивающей силы $P_{от}^{min}$, а при расчете прочности оттяжек и узлов их крепления к стволу дымовой трубы согласно выражению (1.4.25) [1] необходимо принимать максимальное значение растягивающей силы $P_{от}^{max}$.

3. Расчет ствола трубы на прочность

Расчет выполняется для нижнего наиболее нагруженного сечения в отметке Z_0 для двух случаев:

- 1) от изгибающего момента и суммарных сжимающих нагрузок;
- 2) от суммарных перерезывающих сил.

В первом случае условия прочности ствола трубы проверяется при действии изгибающего момента $M(Z_0)$ и суммарной сжимающей силы $G_n(Z_0)$:

$$\frac{M(Z_0)}{W_{изг}} + \frac{G_n(Z_0)}{A_n} \leq R_y \cdot \gamma_c, \quad (13)$$

где: $R_y = 2400 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$ - предел текучести стали;

$\gamma_c = 0,9$ - коэффициент запаса по условиям работы и по материалу (стали) конструкции.

Изгибающий момент $M(Z_0)$ в нижнем сечении ствола в отметке Z_0 рассчитывается по (1).

$W_{изг} = F \cdot \left(\frac{D}{4}\right)$ - момент сопротивления изгибу определен по

п.2.4.7 [11], где $F = \pi D^2 t_{эф}$, откуда $W_{изг} = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot t_{эф}$.

$A_n = \pi/4 [D^2 - (D - 2t_1 t_{эф})^2]$ - площадь нижнего сечения ствола.

Сжимающими силами, действующими на наиболее нагруженное сечение ствола, являются суммарные вертикальные нагрузки $G_n(Z_0)$: вес ствола трубы G_c , суммарный вес оттяжек и ходовых ступеней G_p и сумма вертикальных составляющих от растягивающих сил $P_{от}^{min}$ трех оттяжек $G_{верт}$.

Определим эти значения:

$$1. G_c = A_n \cdot H \cdot q, \quad \text{кгс},$$

где $q=7870 \text{ кг/м}^3$ – удельный вес стали; H – высота ствола.

$$2. G_p = \frac{\pi}{4} [q \cdot (d_{от}^2) \cdot L_{от} + d_{ст}^2 \cdot L_{ст}], \quad \text{кгс},$$

где: $L_{от} = 1,1 \cdot \frac{Z_{от}}{\sin \alpha}$ – длина прутков оттяжек;

$L_{ст} = 0,5 \cdot \frac{H}{0,35}$ – длина прутков ходовых ступеней,
где $0,35 \text{ м}$ – стандартный шаг между ступенями.

$$3. G_{вэрт.} = 3 \cdot P_{от}^{min} \cdot \sin \alpha, \quad \text{кгс}.$$

$$\text{Тогда } G_n(Z_0) = G_c + G_p + G_{вэрт.}, \quad \text{кгс}.$$

Далее неравенство (13) определяется в численном виде и проверяется условие прочности ствола трубы при действии изгибающего момента и сжимающих нагрузок.

Во втором случае условия прочности ствола трубы проверяется при действии полной перерезывающей силы $Q_n(Z_0)$

$$\frac{Q_n(Z_0)}{A_n} \leq R_y \cdot \gamma_c, \quad (14)$$

где: $R_y = 2400 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$ – предел текучести стали;

$\gamma_c = 0,9$ – коэффициент запаса по условиям работы и по материалу (стали) конструкции.

A_n – площадь нижнего наиболее нагруженного сечения ствола.

Q_n – полная перерезывающая сила, рассчитанная по (2).

Далее неравенство (14) определяется в численном виде и проверяется условие прочности ствола при действии перерезывающих сил.

Библиографический список

1. **Методика** расчета нагрузок, прочности и остаточного ресурса стволов дымовых и вентиляционных труб. Сатьянов В.Г. и др. Изд. ЦИТ "Универсум", 2005.–262 с.

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

УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДАМИ ГАЛЬВАНОСТЕГИИ

Если через электролит (раствор), в который погружены электроды, пропустить электрический ток, то ионы электролита будут двигаться: катионы к катоду, а анионы к аноду. На электродах ионы или совсем теряют заряд, выделяясь в виде нейтральных атомов или изменяют заряд и образуют новые соединения. Если катодом служит восстанавливаемая деталь, то при определенных условиях на ее поверхности можно осадить слой того или иного металла требуемой толщины.

Качество осажденного металла определяется прежде всего его микроструктурой, и, в частности, размерами кристаллов. Размеры кристаллов зависят от соотношения скоростей образования центров кристаллизации и их роста. Когда скорость образования центров кристаллизации опережает скорость их роста, получается мелкокристаллический осадок, а в обратном случае - крупнокристаллический. Плотные мелкокристаллические осадки равномерной толщины обладают лучшими антикоррозионными и износостойкими свойствами, чем крупнокристаллические пористые осадки [1].

Высокая твердость, низкий коэффициент трения и большая сопротивляемость износу – ценные свойства твердого хромового покрытия. Они дают возможность широко использовать хромирование при изготовлении новых и восстановлении изношенных деталей, работающих на истирание.

Покрытие электролитическим хромом имеет высокую твердость, которая не меняется с изменением глубины слоя. Коэффициент трения хрома на 30-50 % меньше коэффициента трения стали. Износостойкость хромовых покрытий в 50 раз выше износостойкости стальных нехромированных деталей. Хромовое покрытие отличается высокой коррозионной стойкостью, высокой теплопроводностью, хорошей прочностью соединения с основным металлом.

При восстановлении деталей хромированием нужно также иметь в виду, что с увеличением толщины слоя хрома прочность покрытия уменьшается. Одновременно с этим уменьшается и усталостная прочность деталей [1].

Свойства хромовых покрытий зависят от режима осаждения хрома на поверхности металла, т.е. от катодной плотности тока и температуры электролита. Изменение плотности тока и температуры влияет на

внешний вид осадка, который бывает серым, блестящим и молочным, и на свойства осаждаемого слоя.

Блестящий осадок получается на катоде при средних температурах электролита 45...65 °С и широком диапазоне плотностей тока. Осадки блестящего хрома обладают наиболее высокой твердостью (600..900 кг/мм²), высокой износостойкостью и меньшей хрупкостью. Скорость осаждения хрома зависит от плотности тока и выхода по току.

Матовые осадки, получаемые при высокой плотности тока и низкой температуре электролита, обладают развитой пористостью, высокой твердостью, хрупкостью и низкой износостойкостью. Молочные осадки, получаемые при малой плотности тока и высокой температуре электролита, являются малопористыми, обладают повышенной вязкостью и высокой износостойкостью.

Некоторые авторы советуют после хромирования детали подвергать ее отпуску путем нагрева ее в масляной ванне при температуре 150 -200 °С с 2-3 часовой выдержкой. Предполагается при этом уменьшить хрупкость хрома, которая возникает вследствие поглощения выделяющегося на катоде водорода хромом в процессе хромирования, и тем самым повысить служебные свойства хромированных деталей, в частности износостойкость. Однако работоспособность гладкого и пористого хрома с крупной сеткой определяется способностью трущихся материалов противостоять молекулярному схватыванию. При отпуске склонность хрома к схватыванию увеличивается, что ведет к снижению износостойкости. При мелкой сетке пористости работоспособность хрома ограничивается вследствие хрупкого скалывания покрытий. При отпуске увеличивается пластичность хрома, уменьшается возможность скалывания, а следовательно, и возможность заедания, что способствует повышению износостойкости детали [2].

Для повышения износостойкости хромовых покрытий предложен метод карбидизации. Сущность его заключается в науглероживании слоя хрома путем воздействия паров бензина при высокой температуре. Благодаря этому на поверхности хрома образуется слой карбидов хрома, придающий покрытию повышенные механические и антифрикционные свойства. Опыты показали, что карбидизацией можно повысить износостойкость хромовых покрытий в 50 и более раз; было выявлено также превышение их жаростойкости и кислотоупорности [3].

Осталиванием (железнением) называют процесс электролитического осаждения железа на поверхность детали. Осаждение производят в электролите, представляющем собой водный раствор соли железа. Осталиванием можно получать толстые слои (2-3 мм и более), отличаю-

щиеся гладкостью и хорошим сцеплением с основным металлом. Такой слой можно подвергать химико-термической обработке (цементации, цианированию и др.) и последующей термической обработкой (закалкой, отпуском) придавать ему необходимые служебные свойства. Электролитическое железо хорошо покрывается слоем хрома, хорошо осаждается на стальных, чугунных и бронзовых деталях. Прочность сцепления осажденного железа с деталью в некоторых случаях превышает прочность сцепления слоя напыленного металла с основанием. Прочность сцепления может быть доведена до прочности стали путем рекристаллизационного отжига (при температуре нагрева 800°) [1].

Также применяется метод двухслойного покрытия: нанесение электролитического железа на подслоя из пористого хрома. Электролитическое железо заполняет поры хромового слоя, вследствие чего образуется своеобразный гетерогенный материал, состоящий из твердой основы (хром) и мягких включений (железо). Такие комбинированные покрытия обладают хорошей прирабатываемостью и малым износом. Прирабатываемость их еще более улучшается, если после осталивания производится оксидирование.

Процесс химического никелирования основан на способности гипофосфитов восстанавливать соли никеля. Этот процесс позволяет наносить весьма равномерные по толщине, износостойкие и защитные покрытия на детали любой конфигурации, изготовленные как из металлов, так и неметаллов. Введение в состав электролита соединений фосфора (гипофосфита натрия NaH_2PO_2 , фосфорной кислоты) способствует образованию в структуре фосфидов никеля, повышающих их твердость. Никель-фосфатные покрытия имеют низкий коэффициент трения (на 30% ниже хромового покрытия) по стали и чугуну и довольно высокую твердость до HRC 55..60.

Получаемый осадок представляет сплав никеля (90..95 %) с фосфором (10..5 %). Как и при электролитическом никелировании, нагрев осадка до температуры $350..400^{\circ}\text{C}$ при часовой выдержке повышает его твердость до HRC 67 и увеличивает прочность сцепления с основным металлом [4].

Это объясняется прежде всего изменением структурного состояния никельфосфорных покрытий и возникновением диффузионного процесса. Структура термообработанного покрытия представляет собой твердый раствор фосфора в никеле и химическое соединение NiP_3 . Наличие частиц NiP_3 существенно повышает твердость покрытия, снижает его износ и уменьшает возможность молекулярного схватывания.

Библиографический список

1. **Лобанов С.А.** «Практические советы гальванику». – Л.: Машиностроение, 1983. – 248 с.
2. **Коротин А.И.** Технология нанесения гальванических покрытий. – М.: Высшая школа, 1984. – 200 с.
3. **Дасоян М.А.,** Пальмская И.Я., Сахарова Е.В. «Технология электрохимических покрытий». – Л.: Машиностроение, 1989. – 391 с.
4. **Гамбург Ю.Д.** «Гальванические покрытия». Справочник по применению. – М.: Техносфера, 2006. – 215 с.

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

ПОЛУЧЕНИЕ УПРОЧНЯЮЩИХ ПОКРЫТИЙ НА ДЕТАЛЯХ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Разработка новых экологически чистых технологий нанесения высокоэффективных и надежных покрытий для защиты и упрочнения металлических изделий, бесспорно, является сегодня одной из самых актуальных задач современной науки и техники в связи с ростом жесткости условий эксплуатации, агрессивности применяемых технологических сред и соответственным повышением требований к конструкционным материалам. Применительно к алюминиевым сплавам возможна реализация следующих методов повышения износостойкости: химическое полирование, электрохимическое полирование, поверхностное анодирование, микродуговое оксидирование, эматалирование, газопламенное напыление, никелирование, глубокое анодирование.

Микродуговое оксидирование (МДО) - сравнительно новый вид поверхностной обработки и упрочнения главным образом металлических материалов, берущий свое начало от традиционного анодирования, и соответственно относится к электрохимическим процессам. Микродуговое оксидирование позволяет получать многофункциональные керамикоподобные покрытия с уникальным комплексом свойств, в том числе износостойкие, коррозионностойкие, теплостойкие, электроизоляционные и декоративные покрытия.

МДО берет начало от более распространенной на сегодняшний день технологии анодирования в электролитах, сохранив ряд общих с ней черт и формальных признаков. Вместе с тем, технология микродугового оксидирования существенно отличается от известных способов анодирования, начиная с предварительной подготовки поверхности и заканчивая электролитами, параметрами режимов, оборудованием и

достигаемыми результатами. Можно сказать, что МДО, наряду с анодированием, следует считать одним из методов электрохимического модифицирования поверхности материалов. Для аргументации сказанного рассмотрим более подробно разновидности анодирования. В зависимости от вида и состояния кислородосодержащей среды, заполняющей межэлектродное пространство, различают анодирование в водных растворах электролитов; в расплавах солей; в газовой плазме и плазменно-электролитическое анодирование.

Анодирование в водных растворах электролитов – классический и наиболее распространенный способ анодирования. Его проводят обычно на постоянном токе в потенцио- или гальваностатическом режимах, т.е. при постоянных формирующих напряжениях (Уф) или плотностях анодного тока (ia). В качестве электролитов чаще всего используют водные растворы кислот (серноокислотное, хромовокислотное, щавелевокислотное анодирование), реже – щелочные растворы – для получения тонких АОП специального назначения. Перед анодированием для получения необходимого качества АОП проводят предварительную подготовку поверхности деталей, включающую в себя грубую очистку; шлифование; механическое, химическое или электрохимическое полирование; обезжиривание органическими растворителями от остатков масел, СОЖ и консервантов; химическое или электрохимическое обезжиривание, ультразвуковую очистку; травление химическое или электрохимическое; промывку горячей и холодной водой. По толщине получаемых анодных оксидных пленок (h) различают тонкослойное анодирование – получение тонких беспористых (барьерных, конденсаторных) АОП толщиной до 3 мкм, простое анодирование – получение АОП средней толщины до 20 - 50 мкм и толстослойное (твердое, глубокое) анодирование - получение малопористых, относительно твердых АОП толщиной более 20 - 50 мкм, которое проводится при низких температурах (-10 ÷ +100 °С), причем для получения толщины покрытий порядка 150 мкм и выше необходимо кроме интенсивного охлаждения и перемешивания электролита охлаждать непосредственно саму деталь изнутри. Тонкослойное анодирование выполняется в электролитах почти не растворяющих анодный оксид (сода, бура, борная кислота) при высоких формирующих напряжениях Уф – до 300 В и выше, а простое и толстослойное анодирование – в электролитах, слабо или умеренно растворяющих анодный оксид (серная, хромовая, щавелевая кислота, их смеси и т.д.) при Уф порядка 20 и 100 В, соответственно. Кроме того, выделяют специальные виды анодирования [4]: эматалирование – получение непрозрачных эмалеподобных АОП характерного молочного цвета в кислых электролитах сложного состава; анодирование в растворах ор-

тофосфорной кислоты перед нанесением гальванических покрытий (используют вместо цинкатного метода подготовки поверхности алюминиевых сплавов для повышения прочности сцепления гальванопокрытий) и в щелочных содовых растворах перед точечной сваркой; цветное анодирование – один из способов получения окрашенных АОП в процессе их формирования за счет включения в состав пленки продуктов электрохимического разложения компонентов электролита. Кроме окрашивания, распространенным методом последующей обработки является наполнение анодных оксидных пленок с целью повышения их коррозионной стойкости. Наполнение проводят обработкой АОП паром или горячей водой; в растворах пассиваторов (хроматов, бихроматов и т.д.); в растворах солей тяжелых металлов; пропиткой лаками, воском, парафином, вазелином (при этом образуется еще и гидрофобный поверхностный слой) [1].

Отличительной особенностью микродугового оксидирования является участие в процессе формирования покрытия поверхностных микроразрядов, оказывающих весьма существенное и специфическое воздействие на формирующееся покрытие, в результате которого состав и структура получаемых оксидных слоев существенно отличаются, а свойства значительно повышается по сравнению с обычными анодными пленками. Другими положительными отличительными чертами процесса МДО являются его экологичность, а также отсутствие необходимости тщательной предварительной подготовки поверхности в начале технологической цепочки и применения холодильного оборудования для получения относительно толстых покрытий.

Технология микродугового оксидирования довольно хорошо отрабатана только для группы вентильных металлов (т.е. металлов, на которых оксидные пленки, сформированные электрохимическим путем, обладают униполярной или асимметричной проводимостью в системе металл-оксид-электролит – МОЭ, причем положительный потенциал на металле, на котором образована анодная оксидная пленка – АОП, соответствует запирающему или обратному направлению, аналогичному полупроводниковому вентилю) и их сплавов, прежде всего алюминиевых. МДО-покрытия находят все более широкое применение в самых различных областях – от производства товаров бытового назначения и медицины до приборостроения и аэрокосмической промышленности [3].

В основе микродугового оксидирования лежит процесс анодного окисления (анодирования) металлов. В настоящее время однозначно установлено, что анодные оксидные пленки на алюминии, формируемые в умеренно растворяющих оксид электролитах, состоят из двух

слов: так называемого барьерного слоя – тонкого плотного беспористого слоя, непосредственно прилегающего к металлу и наружного пористого слоя.

В целом процесс МДО, обладающий достаточно сложным механизмом, можно условно разбить на несколько стадий, протекающих последовательно или параллельно: 1 – химическое взаимодействие материала основы и формирующегося покрытия с электролитом; 2 – электрохимические процессы, происходящие до зажигания электрического разряда и в местах, где электрического разряда в данный момент нет (анодирование в водных растворах электролитов, электролиз); 3 – собственно микродуговое оксидирование, включающее в себя короткие начальные этапы люминесценции и искрения; основной этап горения микродуговых разрядов и, наконец, после формирования покрытия определенной толщины, переход микродугового разряда в дуговой.

На стадии обычного анодирования электролит контактирует с естественной (воздушной) оксидной пленкой, и идут процессы анодирования в водных растворах электролитов, механизм которого рассмотрен выше, что сопровождается ростом толщины пленки, в первую очередь барьерного слоя, который, согласно физико-геометрическим представлениям, образуется путем срастания линзообразных микроячеек. На этой стадии характерен резкий подъем напряжения на формовочных кривых, соответствующий росту электросопротивления пленки и уменьшению свободной металлической поверхности [4]. При определенной толщине пленки (для алюминия – около 0,5-1 мкм) возникают искровые разряды с одновременным протеканием двух процессов: электрохимического окисления и разрыхления искрами формирующегося покрытия. При малой толщине из-за большого теплоотвода наблюдается только искровой разряд, который при росте толщины пленки (для алюминия ~2 мкм) переходит в микродуговой [2].

Библиографический список

1. **Марков** Г.А., Терлеева О.П., Шулепко Е.К. Микродуговые и дуговые методы нанесения защитных покрытий // избирательного переноса и создания износостойких покрытий. М., 1985. - Вып. 185. С. 54-64. -(Сб. научн. тр./ Моск. ин-т нефтехимической и газовой пром-сти им. И.М. Губкина, Вып. 185).
2. **Миронова** М.К. О формировании пленки при анодном микродуговом оксидировании // Защита металлов. 1990. Т. 26, №2. С. 320-323.
3. **Саакиян** Л.С., Ефремов А.П., Эпельфельд А.В. Повышение долговечности деталей газоперерабатывающего и газопромыслового оборудования защитными покрытиями // Физико-химическая механика материалов. 1986. Т. 22, №6. С. 92-94.
4. **Аверьянов** Е.Е. Справочник по анодированию. М.: Машиностроение, 1988. 224 с.

СЕКЦИЯ 24

ДИНАМИКА, ПРОЧНОСТЬ, ВИБРОДИАГНОСТИКА

Председатель – к.т.н., доц. **Ноздрин М.А.**
Секретарь – асс. **Круглов А.В.**

*А.Б. Закирова, асп; рук. Р.Р. Аскарлов к.т.н., доц.
(КГЭУ, г. Казань)*

ИССЛЕДОВАНИЯ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРОСТЕНДОВ ПРИ НАГРУЖЕНИИ ИЗДЕЛИЕМ

Современные требования по отработке вибронадежности аппаратуры приводят к необходимости модернизации существующих виброиспытательных систем, а также проведения испытаний с помощью методов для воспроизведения вибрации, наиболее полно имитирующих условия эксплуатации. Однако необходимо учитывать специфические особенности вибрационных установок и испытываемых образцов, в частности, существенные неравномерности амплитудно-частотных характеристик трактов системы вибростенд-изделие, которые могут повлиять на достоверность результатов испытания.

Задача разработки цифровых автоматизированных систем для испытаний, адаптированных под действующие на предприятиях электродинамические вибростенды, точно воспроизводящих требуемые характеристики вибрации и позволяющих получать достоверные оценки вибрационной надежности аппаратуры транспортных средств, актуальна и имеет важное значение.

Целью работы является измерение амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) электродинамического вибростенда ВЭДС-1500 по всем трем осевым направлениям и исследование этих характеристик на наличие неравномерностей.

Для измерения амплитудно-частотных характеристик создан аппаратно-программный комплекс (АПК), состоящий из ПК с платой АЦП-ЦАП и специализированного программного обеспечения, который позволяет устранить отмеченные недостатки классической аналоговой схемы, автоматизировать процесс измерения и поднять его точность.

Состав разработанной системы для измерения АЧХ вибростенда и основные характеристики входящих в нее устройств следующие:

- компьютер Packard bell (INTEL CORE i5 – 430 M processor, DDR3 4 GB, HDD 320 GB, RAM 512 Мб, 3xUSB 2.0);
- плата АЦП-ЦАП NI USB-6251 (16 недифф. входов $\pm 10\text{В}$, 1.25 МГц, 16 бит, 2 выхода $\pm 10\text{В}$, 2.8 МГц, 16 бит);
- вибропреобразователь со встроенной электроникой AP2038P-100, пьезоэлектрический, трёхосевой, кабель АК21 3 м, 12 кГц, 100 мВ/г, 34 г, $\pm 50\text{г}$, М5, корпус титановый сплав).

Разработано программное обеспечение для аппаратно-программного комплекса, предназначенное для формирования частотно-модулированного сигнала с постоянной амплитудой. Одновременно, измерительная часть программы осуществляет оцифровку и регистрацию сигнала с датчика вибрации и его сохранение.

Перед началом работы программы необходимо указать частоту дискретизации для платы АЦП-ЦАП, начальную и конечную частоту и скорость свипирования, диапазоны входных и выходных значений напряжения, количество выборок, поступаемых для обработки.

По окончании работы формируются необходимые отчетные документы, содержащие данные об измерении. Сохраненный файл открывается с помощью дополнительной программы, позволяющей представить данные в графической форме, на рисунке 1 в качестве примера приведены результаты измерений вибротракта ВЭДС-1500 по всем трем осевым направлениям. Рассматриваемые АЧХ являются типичными для всех вибростендов, содержат механические резонансы (не учитывая электрические): 3 основных резонанса, резонансы крепления и собственные резонансы изделий, испытываемых на вибростенде.

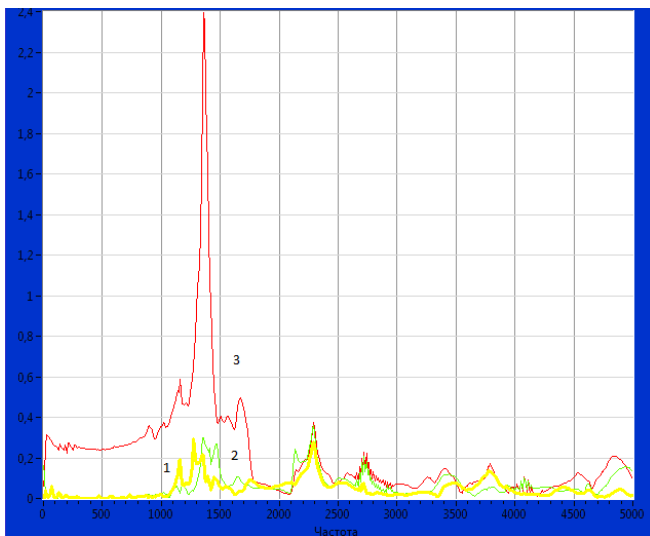


Рис. 1. АЧХ вибростенда ВЭДС-1500 по трем осевым направлениям (1 – ось X, 2 – ось Y, 3 – рабочее направление (ось Z))

Для исследования АЧХ электродинамического вибростенда ВЭДС-1500 была написана программа для нахождения неравномерностей характеристик в Дб на разных частотных диапазонах (до 1 кГц, до 2 кГц, до 3,5 кГц, до 5 кГц). Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Неравномерности АЧХ вибростенда ВЭДС-1500

АЧХ по осевым направлениям	Неравномерность АЧХ в Дб в диапазоне до 1 кГц	Неравномерность АЧХ в Дб в диапазоне до 2 кГц	Неравномерность АЧХ в Дб в диапазоне до 3,5 кГц	Неравномерность АЧХ в Дб в диапазоне до 5 кГц
Ось X	2,3117	8,4241	7,6833	7,8773
Ось Y	2,5569	7,9841	7,3609	7,5004
Ось Z	1,3376	7,9948	9,5709	10,5319

По результатам таблицы 1 можно сделать следующие выводы:

1. Амплитудно-частотная характеристика в диапазоне до 1000 Гц наиболее равномерна и не имеет существенных неравномерностей.
2. АЧХ ВЭДС-1500 соответствует паспортным данным и имеет три резонанса в диапазоне до 2000 Гц.

В результате проведенного исследования разработаны компьютерная программа и устройство для управления электродинамическим вибростендом, с помощью которой измерены и исследованы АЧХ электродинамического вибростенда ВЭДС-1500. Измеренные АЧХ имеют неравномерности, существенные в диапазоне более 2 кГц.

*В.Ф. Огай, В.Е. Тунцев, студ.;
рук. М.А. Ноздрин, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ПРОЧНОСТНОЙ РАСЧЕТ СЕКЦИИ КОРПУСА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Беспилотный летательный аппарат можно определить как устройство, движущееся в пространстве без экипажа и обладающее средствами управления собственной траекторией. Как правило, подобные аппараты состоят из следующих элементов: двигательная установка, система наведения и стабилизации, отсек для размещения полезной нагрузки, силовой корпус, комплекс стартового оборудования.

Данная секция относится к силовому корпусу. Силовой корпус предназначен для размещения грузов, оборудования, восприятия нагрузок, действующих на аппарат во время полета, также он связывает все части беспилотного аппарата.

Внешний вид секции корпуса беспилотного летательного аппарата представлен на рис. 1

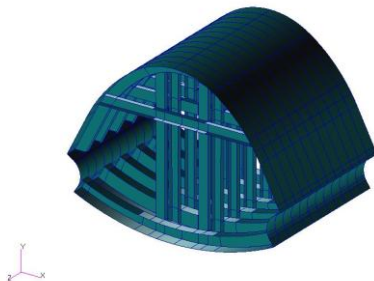


Рис. 1. Внешний вид модели отсека топливного бака

Данная часть корпуса состоит из рядовых шпангоутов, обшивки, стоек.

Рядовые шпангоуты, обшивка и стойки изготовлены из титанового сплава марки BT20. Физические и механические характеристики используемого сплава приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики используемого сплава

Т, °С	BT20		
	Е	$\sigma_{0.2}$	σ_B
	кг/мм ²		
20	12000	85	95
500	8200	50	65
700	7500	35	45

Обозначение расчетных случаев, их соответствие нагрузкам, ограничителям и температуре, приведено в таблице 2.

Таблица 2. Описание расчетных случаев

Р С.	Наименование	Т, °С	Крите- рий проч- ности	Р, кгс/мм ²
1	Нагрузочный случай №1	70 0	σ_B	0,025
2	Нагрузочный случай №2	20	σ_B	0,06

Для анализа секции корпуса беспилотного летательного аппарата использовались программные продукты такие как, MSC.Patran и MSC.Nastran [1].

MSC.Patran - интерактивный программный продукт с открытой архитектурой, обеспечивающий интеграцию автоматизированных систем проектирования, моделирования, анализа и оценки результатов расчетов. Использование MSC.Patran в комбинации с другими программными продуктами компании MSC.Software (например, MSC.Nastran) позволяет достичь наибольшей эффективности в оценке работоспособности и оптимальности конструкции изделий при их разработке, производстве и эксплуатации еще до того, как начнутся изготовление и испытания опытных образцов.

В MSC.Patran моделируется исследуемый объект. Далее объект разбивается на конечные элементы. Сетка конечно-элементной модели

состоит из 4-х узловых 2D shell элементов и 8-и узловых 3D hex элементов. Шаг сетки конечно-элементной модели 10 мм. Накладываются граничные условия ограничением перемещений по всем трем осям на краях отсека (рис. 2, а) и задается нагрузка (рис. 2, б).

Используя в MSC.Patran линейный анализ находятся напряжения по Мизесу, главные и касательные напряжения всех шпангоутов, стоек и обшивки, а также перемещения обшивки корпуса для всех расчетных случаев.

Для обработки результатов выходных файлов MSC.Patran использовался расчетный комплекс в среде Microsoft Office Excel и Visual Basic Application. Данная программа формирует таблицу с наименьшим запасом прочности.

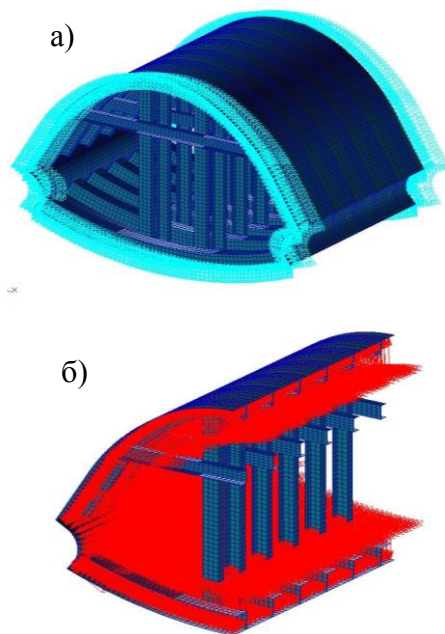


Рис. 2. Модель исследуемого объекта: а) схема закрепления; б) давление во внутреннем контуре корпуса

Таблица 3. Сводка запасов прочности первого рядового шпангоута

Критерий	Расчетный случай	Действующее значение, кгс/мм ²	Допустимое значение, кгс/мм ²	Запас прочности
Растяжение, по Мизесу	1	$\sigma_v = 18,5$	$\sigma_v = 35,0$	1,89
Сжатие	2	$\sigma_{кр} = 44,0$	$\sigma_{кр} = 60,3$	1,37
Сдвиг	1	$\tau_{кр} = 10,1$	$\tau_{кр} = 19,3$	1,91

Аналогичные расчеты проводятся для оставшихся шпангоутов, стоек и обшивок корпуса.

Библиографический список

1. Сайт MSCsoftware [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mscsoftware.com/product/patran>

*Е.А. Гусева, студ.; рук. Л.Б. Маслов, д.ф.-м.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

РАСЧЁТ НА ПРОЧНОСТЬ УПОРА АВАРИЙНОЙ ДВЕРИ ОТСЕКА ФЮЗЕЛЯЖА Ф1 САМОЛЁТА МС-21-300

Рассчитаны максимальные напряжения при нагрузке упора аварийной двери отсека фюзеляжа Ф1 самолёта МС-21-300. Построение конечно-элементной модели и расчеты проводились в программе Femap. Это передовая программная среда для решения задач инженерного анализа, позволяющая создавать конечно-элементные модели сложных изделий и систем и анализировать полученные результаты.

Нагрузка на упор $F=1753$ кг была взята из расчета глобальной модели самолета МС-21-300 на внутреннее избыточное давление $p = 1,39$ кг/см².

Общий вид модели упора приведен на рис. 1 в составе аварийной двери.

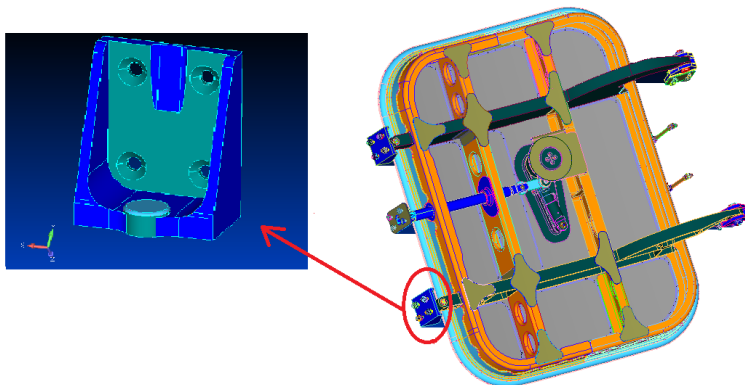


Рис. 1. Общий вид модели упора

Конечно-элементная модель содержит упор и его ответную часть, болты, на которых он крепится к двери. Упор и его ответная часть моделировались как единое целое объемными Solid-элементами: линейными четырехузловыми тетраэдрами и параболическими десятиузловыми тетраэдрами. Упор и болты изготовлены из дюралюминия и стали соответственно.

Болты моделируются Вар-элементами $\phi = 6$ мм. Податливость болтов вычислялась по формуле Хьюта:

$$f = \left(\frac{t_A + t_B}{2d} \right)^a b \left(\frac{1}{t_A E_A} + \frac{1}{t_B E_B} + \frac{1}{2t_A E_F} + \frac{1}{2t_B E_F} \right),$$

где t_A – толщина первой соединяемой детали, t_B – толщина второй соединяемой детали, d – диаметр болта, E_A – модуль упругости материала первой детали, E_B – модуль упругости материала второй детали, E_F – модуль упругости материала болта, a – показатель степени для болта, b – коэффициент для соединения металлических деталей болтом.

Связь узлов болтов с узлами Solid-элементов осуществлялась при помощи RBE2-элементов. Один узел Вар-элементов закреплялся по всем степеням свободы (рис. 2, а), второй соединялся с узлами упора, лежащими на поверхности гайки с помощью RBE2-элемента.

Крепление упора к двери моделировалось следующим образом: на поверхности соединения упора с дверью моделировались Гар-элементы (рис. 2, в). Один узел которых фиксировался по всем степеням свободы, другой – соединялся с узлами Solid-элементов упора.

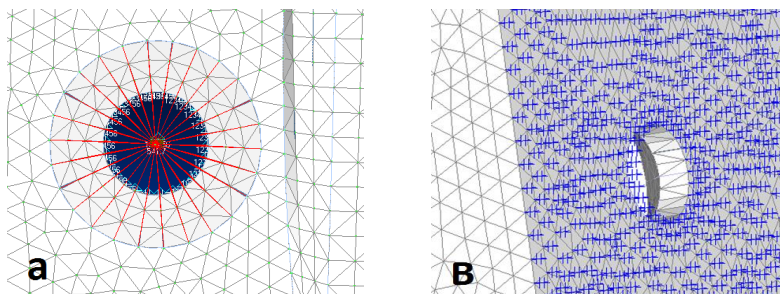


Рис. 2. Конечно-элементная модель: а) связь болтов с упором; в) Гар-элементы

Нагрузка на упор $F=1753$ кг была пересчитана в давление $p=8,719$ кг/мм².

На болты воздействует сила затяжки крепежа $Q_{зат}$, зависящая от прикладываемого момента затяжки [1]:

$$Q_{зат} = \frac{M_{зат}}{\mu d_б} = 541,7 \text{ кг},$$

где $M_{зат}$ – момент затяжки крепежа ($M_{зат} = 0,65 \text{ кг} \cdot \text{м}$); μ – коэффициент трения между элементами крепежа (для стали 0,2); $d_б$ – диаметр болта ($d_б = 6$ мм).

Статический расчет показал, что наиболее нагруженными местами в конструкции являются радиальные скругления упора. Для определения эквивалентных напряжений в концентраторах были установлены поверхностные датчики. Датчики были моделированы Plate-элементами малой толщины $t=0,001$ мм, лежащими на внешних гранях Solid-элементов (рис. 3, рис. 4).

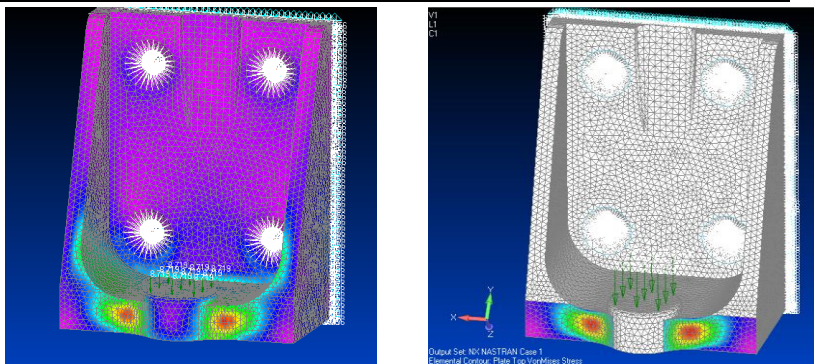


Рис. 3. Напряжения на Solid-элементах и напряжение на датчиках (Plate-элементы)

Сравнение результатов линейной и параболической КЭ-сеток позволило сделать вывод о точности решения. Поскольку результаты двух вариантов расчётов близки – погрешность составляет 4%, то из этого следует, что напряжения определены верно и дальнейшее разбиение сетки на еще более мелкие элементы не требуется.

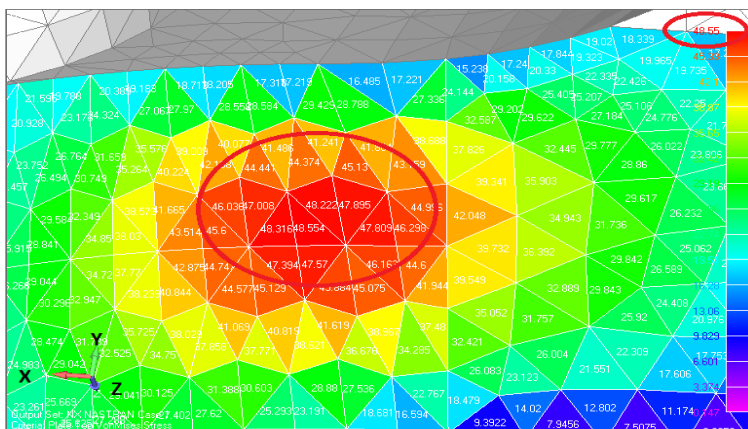


Рис. 4. Максимальное значение эквивалентного напряжения на датчике

В результате работы были получены максимальные значения эквивалентных напряжений упора люка фюзеляжа самолета МС-21-300, равные $\sigma_{max} = 48,55 \text{ кг/мм}^2$. Расчёт проводился с целью проверки

упора на статическую прочность и уточнения геометрических параметров. Полученные данные используются для дальнейшего исследования модели.

Библиографический список

1. **Феодосьев В.И.** Сопротивление материалов: Учеб. для вузов. – 10-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 592 с.

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ В СРЕДЕ САТИА

САТИА – система автоматизированного проектирования (САПР) французской фирмы Dassault Systemes. Система САТИА первоначально разрабатывалась для проектирования в авиационной промышленности, однако результативность использования, удобство интерфейса и гибкость предлагаемых решений позволили существенно расширить область применения системы. САТИА фактически стала стандартом в мировой аэрокосмической и автомобильной промышленности – 75 % рабочих мест САПР в авиационной промышленности и около 50 % в автомобильной промышленности занимают рабочие места САТИА. Это не есть консерватизм старых пользователей, а реальность выбора лучшего продукта в условиях необходимости жесткой конкуренции за конечных потребителей продукции.

САТИА V5 R3 (платформа 3) наиболее полная и функциональная конфигурация САТИА., позволяющая использовать передовые инновации с уникальными и очень специализированными приложениями для интеграции профессиональных знаний продуктов и процессов. Она включает специализированные модули высокой производительности для целевого применения в разных отраслях промышленности.

Реализуемые возможности и преимущества:

- выбор методов проектирования;
- высокий потенциал средств модификации;
- параллельное проектирование;
- эффективность пространственного анализа и контроля;
- создание базы знаний;
- реализация электронной модели предприятия;
- единая передовая технология.

Для построения детали в САТІА V5 P3 используются следующие инструменты:

- построение эскизов (Sketcher):
 - а) непозиционированный эскиз;
 - б) позиционированный эскиз;
- построение призмы и карманов (Part Design):
 - а) прямой метод;
 - б) метод «вычитания»;
- построение поверхностей (Generative Shape Design).

Пример построения детали приведён на рис. 1.

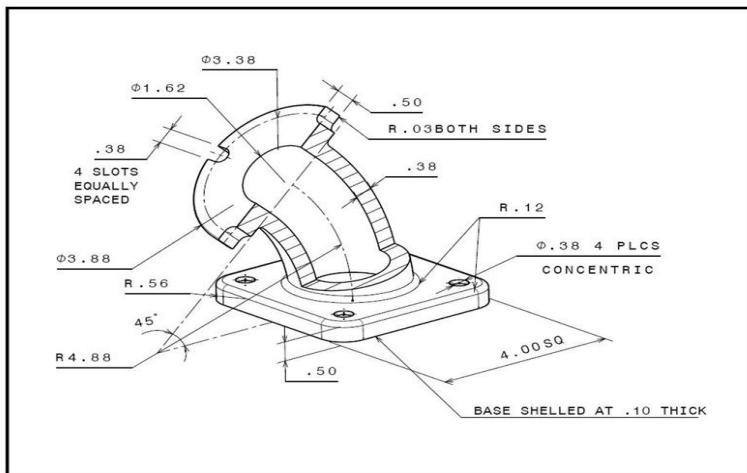


Рис. 1. Чертеж детали

На рис. 2 показан пример выполнения с помощью САТІА построения призмы, а затем создания из призмы оболочки со скругленными кромками и отверстиями в основании детали.

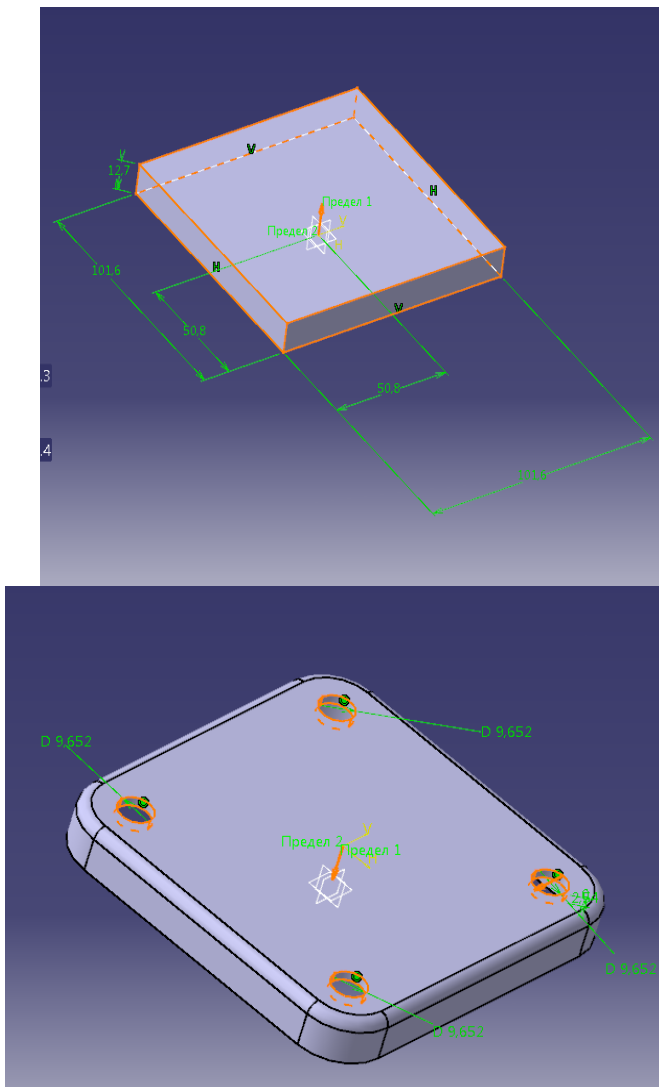


Рис. 2 Пример построения призмы, создания оболочки и отверстий в основании детали

Построение призмы (круга, трубы) в основании детали, создание

карманов в призме (круг) и выполнение скругления кромок приведены на рис. 3.

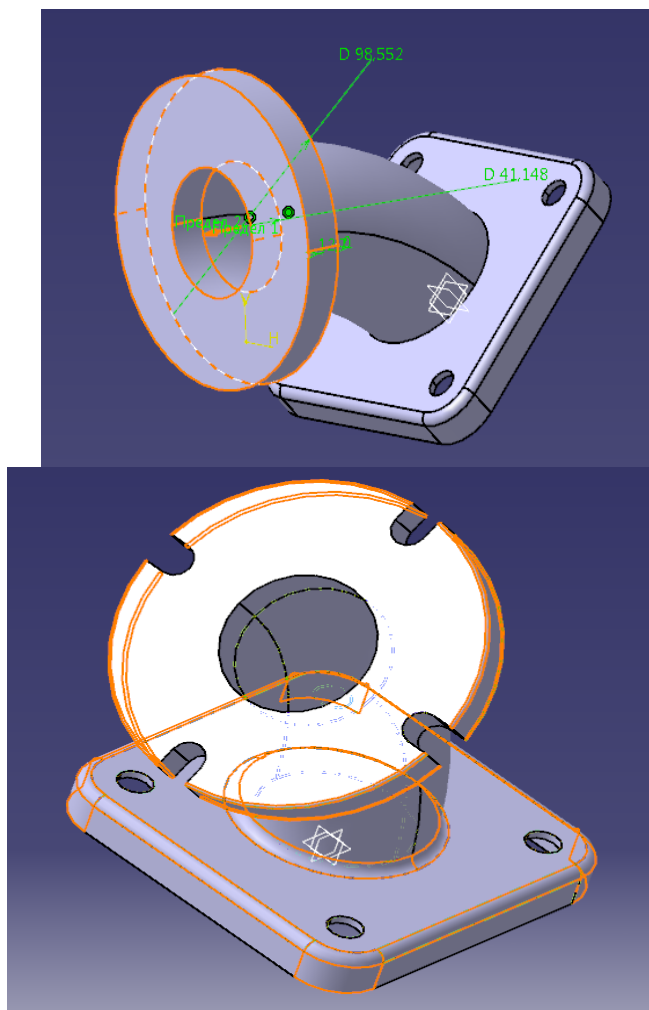


Рис. 3 Дальнейшие этапы построения детали: создание карманов и скругление кромок

Окончательно построенная модель детали представлена на рис. 4. В дальнейшем она используется для прочностного анализа в системе Patran/Nastran.

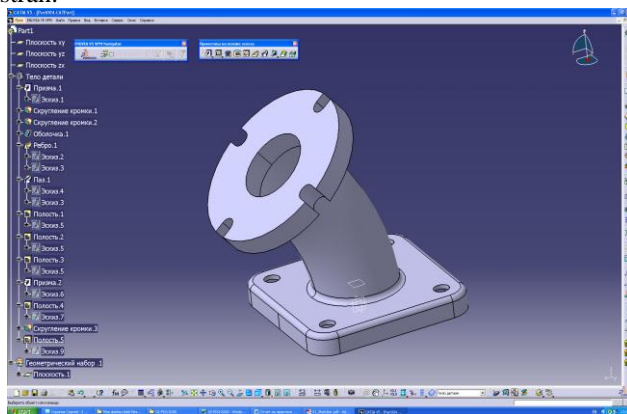


Рис. 4. Построенная модель детали

Таким образом, система CATIA V5 R3 позволяет эффективно решать задачи технической подготовки производства от внешнего (концептуального) проектирования до выпуска чертежей, спецификаций, монтажных схем и управляющих программ для станков с ЧПУ.

Библиографический список

1. Сайт CATIA [электронный ресурс]. – Режим доступа <http://www.catia.ru/>

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

РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ КОМПОЗИТНОЙ МОДЕЛИ ЗАКРЫЛКА САМОЛЕТА

С развитием современных технологий совершенствуются используемые материалы в самолетостроении. На смену старым материалам приходят новые, интеллектуальные материалы. К ним относятся полимерные, керамические, металлокерамические композиты, а также материалы с памятью формы [1].

Композитный материал – искусственно созданный неоднородный сплошной материал, состоящий из двух или более компонентов с чет-

кой границей раздела между ними [2]. В большинстве композитов (за исключением слоистых) компоненты можно разделить на матрицу и включенные в нее армирующие элементы. В композитах конструкционного назначения армирующие элементы обычно обеспечивают необходимые механические характеристики материала (прочность, жесткость и т.д.), а матрица (или связующее) обеспечивает совместную работу армирующих элементов и защиту их от механических повреждений и агрессивной химической среды.

Область применения композитных материалов в авиастроении весьма обширна. Они применяются для высоконагруженных деталей самолетов (обшивки, лонжеронов, нервюр, панелей и т. д.) и двигателей (лопатки вентиляторов и компрессоры.), в космической технике для узлов силовых конструкций аппаратов, подвергающихся нагреву, для элементов жесткости, панелей [3].

Закрылки – отклоняемые поверхности, симметрично расположенные на задней кромке крыла (рис. 1). Используются для улучшения несущей способности крыла во время взлёта, набора высоты, снижения и посадки, а также при полёте на малых скоростях. Выпуск закрылков является эффективным способом снизить взлётную и посадочную скорости.

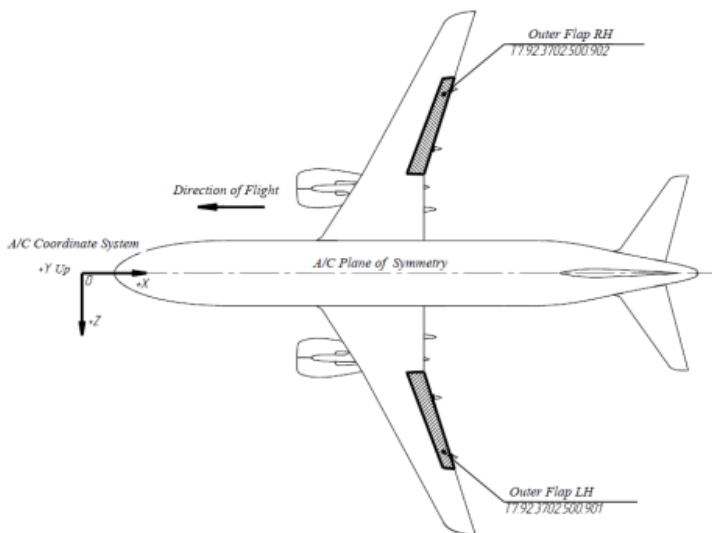


Рис. 1. Закрылки в конструкции самолета

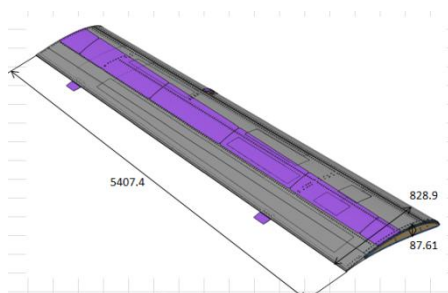


Рис. 2. Модель закрылка

В работе проводится расчет на прочность композитной модели закрылка самолета (рис. 2). Прочностью называется способность материала не поддаваться разрушению под действием внешних нагрузок. Величина прочности указывает, какая сила необходима, чтобы преодолеть внутреннюю связь между молекулами. Прочность зависит также от химического состава, структуры и формы конструкции, от состояния её поверхности, технологии изготовления и влияния окружающей среды.

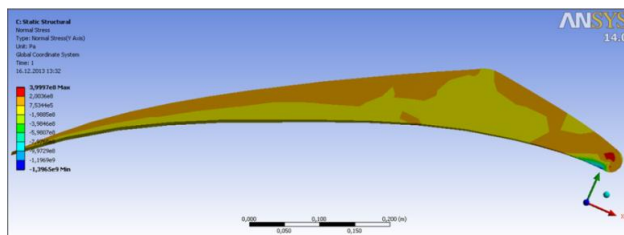


Рис. 3. Нормальные напряжения

После построения закрылка самолета, его закрепления и задания распределенной нагрузки был произведен расчет на прочность. В ходе этой работы выяснилось, что большее напряжение возникает в заделке и равно $4 \cdot 10^8$ Па, а максимальное перемещение конца закрылка равно 0,5 м (рис. 3).

Библиографический список

1. Страна РОСАТОМ НАУКА, № 12-13, ноябрь 2013
2. Карпинос Д. М. Композиционные материалы. Справочник. - Киев, Наукова думка
3. Васильев В. В. Механика конструкций из композиционных материалов. - М.: Машиностроение, 1988. - 272 с.

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

УСТАЛОСТНЫЙ РАСЧЁТ КРОНШТЕЙНА НАВЕСКИ ЗАКРЫЛКА КРЫЛА САМОЛЁТА

Усталостному разрушению подвержены многие детали машин и элементы конструкций. Усталость – это явление разрушения материала в результате постепенного накопления в нем повреждений (микротрещин), приводящих к возникновению усталостной трещины при многократном повторном нагружении.

При решении задачи оценки усталостной долговечности традиционно выделяют ряд основных этапов [1]:

- определение опасной точки (сечения) в конструкции, в которой локализован процесс разрушения при многоциклового усталости;
- определение истории нагружения в выбранной опасной точке;
- задание свойств материала;
- задание характеристик конструкции или ее элемента, влияющих на изучаемый процесс;
- расчет усталостной долговечности.

При описании процесса многоциклового усталости основной характеристикой материала, используемой для описания его способности сопротивления процессу многоциклового усталости, является кривая Велера (кривая усталости).

Объектом исследования является кронштейн навески закрылка крыла самолета (рис. 1).

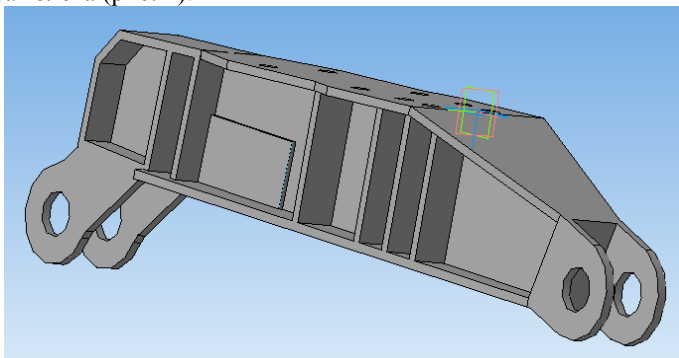


Рис. 1. Кронштейн навески

Закрылки – отклоняемые поверхности, симметрично расположенные на задней кромке крыла. Закрылки в убранном состоянии являются продолжением поверхности крыла, тогда как в выпущенном состоянии могут отходить от него с образованием щелей. Используются для улучшения несущей способности крыла во время взлёта, набора высоты, снижения и посадки, а также при полёте на малых скоростях. Основным назначением кронштейна навески является закрепление закрылка крыла на подъемниках, приводящих закрылок в движение. В процессе полета диапазон значения нагрузок, действующих на закрылок, и как следствие на кронштейн навески, изменяется от максимального (при выпущенном состоянии) до минимального (при сложенном состоянии). Отсюда вытекает важность усталостного расчета кронштейна навески, для определения его усталостной долговечности и определения допустимого ресурса работы, что позволит обеспечить безопасность полетов.

В результате расчета на усталостную долговечность [2] накопленное за 10^4 циклов нагружения повреждение получилось равно 10^3 м, при амплитуде эквивалентной нагрузке 0,57 МПа, а рассчитанное на основании этих данных число циклов до разрушения 10^7 , что для материала дюралюминий, учитывая условность заданного цикла нагружения, является достаточно хорошим показателем.

Библиографический список

1. **Когаев, В.П.** Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. / Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П.//– М.: Машиностроение, 1985. – 563 с.
2. **Берендеев, Н.Н.** Применение системы ANSYS к оценке усталостной долговечности. / Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Новые подходы в исследованиях и разработках информационно-телекоммуникационных систем и технологий».–Нижний Новгород: НГУ им. Н.И. Лобачевского 2006.–83 с.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ТИПОВЫХ НЕРВЮР САМОЛЕТА С УЧЕТОМ УСТОЙЧИВОСТИ

Прочность и устойчивость конструкций в авиации является одним из основных факторов обеспечения безопасности полета любого летательного аппарата.

Крыло самолета является несущей поверхностью, создающей основную аэродинамическую подъёмную силу. К основным нагрузкам относятся массовые и аэродинамические силы. Крылья различных типов представляют собой наборы однотипных элементов, которые участвуют в восприятии внешних нагрузок и составляют конструктивно-силовую схему крыла. К продольному набору относят лонжероны, стрингеры и продольные стенки. Поперечный же набор состоит из нервюры.

Нервюры предназначены для сохранения аэродинамической формы крыла и обеспечения прочности конструкции.

Нервюры соединяются с обшивкой и стенками лонжеронов, которые являются для них опорами. Из условий технологичности и облегчения сборки в крыльях с работающей обшивкой нервюры обычно выполняют из нескольких частей. Например, для двухлонжеронного крыла – носовой, межлонжеронной и хвостовой (рис. 1). Основной деформацией для нервюры является сдвиг [1].

Нагрузкой нервюры (вдали от сечений заделки или вырезов) является распределенная по поверхности крыла воздушная нагрузка и силы от прикрепленных к ней агрегатов: шасси, двигателя, баков, фюзеляжа и др. При приближенных расчетах на прочность нервюры рассматривается как балка, лежащая на двух опорах. Балка нагружена распределенной нагрузкой, а также силами и моментами, которые приходят на балку со стороны консольных участков [2].

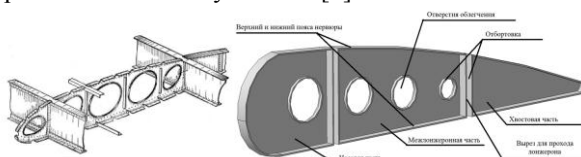


Рис. 1. Типовые нервюры крыла самолета

Под устойчивостью следует понимать сохранение формы конструкции, исключающее возможность таких остаточных деформаций, которые делают конструкцию непригодной для эксплуатации или приводят к ее разрушению. Потеря устойчивости может появиться при разных режимах под воздействием различных уровней нагрузки.

В качестве инструмента исследования устойчивости конструкции нервюры используются САПР SolidWorks и SolidWorks Simulation–CAE – модуль, основанный на методе конечных элементов и предназначенный для проведения прочностного анализа.

Результатом исследования являются коэффициенты запаса прочности конструкции, полученные по разным критериям прочности.

Критическая нагрузка найдена согласно формуле критической нагрузки при потере устойчивости (рис. 2).

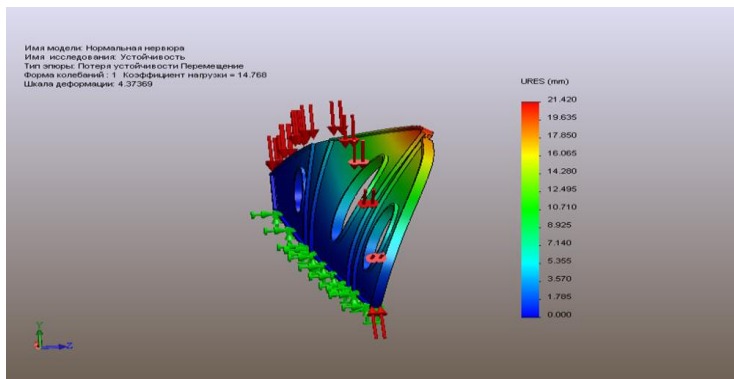


Рис. 2. Профиль формы потери устойчивости (перемещение узлов)

При нагружении модели нагрузкой 147680 Н/м^2 коэффициент критической нагрузки принимает значение 1. Приложенные нагрузки равны вычисленным критическим нагрузкам. Ожидается потеря устойчивости.

Минимальный коэффициент запаса прочности по критерию максимального напряжения сдвига составляет 1,3. Минимальный коэффициент запаса по критерию Мизеса составляет 1,4. Разница между минимальными коэффициентами 0,1.

Библиографический список

1. **Стригунов, В.М.** Расчет самолета на прочность: Учебник для авиационных вузов. – М.: Машиностроение, 1984. – 376 с.
2. **Кан, С.Н.** Расчет самолета на прочность: Учебник для авиационных вузов/ С.Н. Кан, И.А. Свердлов// – М.: Машиностроение, 1966 – 520 с.

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

РАСЧЁТ ПЛАСТИНЫ В СРЕДЕ MSC.PATRAN /NASTRAN

MSC. Patran позволяет контролировать все стадии CAE (Computer Aided Engineering) процесса. CAE – комплекс программных продуктов, которые способны дать пользователю характеристику того, как будет вести себя в реальности разработанная на компьютере модель изделия. Иначе CAE можно назвать системами инженерного анализа. В своей работе они используют различные математические расчеты: метод конечных элементов, метод конечных разностей, метод конечных объемов. Комплекс – интегрирующая различные пакеты анализа среда, обеспечивающая прямой доступ к геометрическим моделям из разных CAD систем. MSC. Patran объединяет в себе следующие возможности: создание или импорт геометрической модели, построение конечно-элементной сетки конструкции, построение конечно-элементной модели конструкции (выбор свойств материалов, граничных условий, нагрузок), а также Patran предоставляет обширный инструментарий для обработки результатов расчетов, проведенных в системах инженерного анализа [1].

Структура CAE проекта:

- создание конечно-элементной (КЭ) модели;
- создание геометрической модели изделия;
- создание конечно-элементной сетки;
- моделирование материалов;
- моделирование нагружения;
- анализ модели с учетом внешних нагрузок;
- выбор программы-решателя;
- запуск конечно-элементного анализа;
- обработка результатов анализа;
- визуализация численных результатов.

Поставлена задача расчёта в среде MSC.Patran /Nastran пластины. На рис. 1 изображена пластина длиной $L=500$ мм и шириной $h=200$ мм, толщиной $t=1$ мм. Материал пластины сталь с модулем Юнга $E=10^7$ МПа и коэффициентом Пуассона $\nu=0,33$. Она нагружается силой $P=500$ Н, жестко закрепляется, и разбивается на конечные элементы типа shell (оболочка). Это четырехугольный, линейный (без срединных узлов) тип элементов. Используется в двухмерных моделях. Проводит

тепло в плоскости X-Y элемента. Возможна редуцированная форма в виде треугольника.

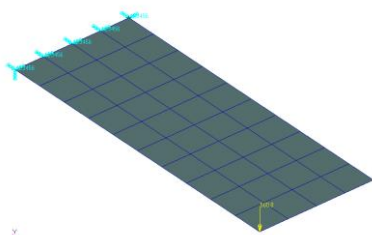


Рис.1. Модель пластины разбитая на конечные элементы, нагруженная и закреплённая

На рис. 2 изображена конечно-элементная модель пластины, нагруженная, закреплённая с вызванными перемещениями.

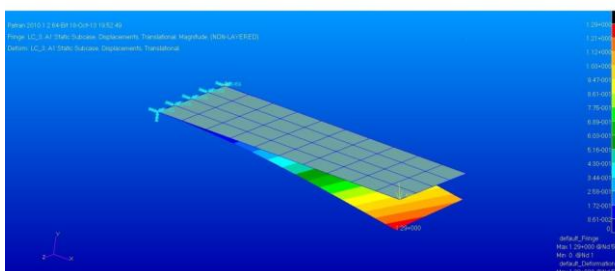


Рис.2. Модель пластины с вызванными перемещениями

На рис. 3 изображена модель пластины с вызванными напряжениями.

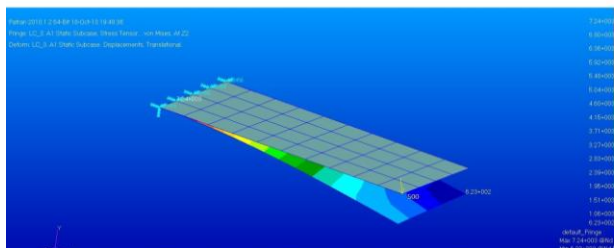


Рис.3. Модель пластины с вызванными напряжениями

В результате расчёта получены следующие величины: максимальное перемещение 1,29 мм; максимальное напряжение 7,24 МПа; минимальное напряжение 6,23 МПа.

Библиографический список

1. Брук, С.А. Основы среды MSC.Patran. – М.: Наука, 2010. – 312 с.

*С.И. Скрипов, А.В. Харьков, студ.
рук. М.А. Ноздрин, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ УЗЛОВ ФЕРМЫ

В работе ставится задача сравнения расчетов перемещений узлов фермы с использованием различных программных продуктов. Решение проводится с применением метода конечных элементов. Поставленная задача решается 2-мя способами:

– первый реализуется с помощью разработки программного продукта, выполненного на языке программирования Visual Basic for Applications (VBA);

– второй заключается в решении задачи с помощью программной среды MSC.Patran/Nastran, предназначенной для расчета на прочность твердых тел, пластин, балочных систем.

Первым этапом решения задачи является разбиение рассматриваемой области на конечные элементы [2]. Для разбиения фермы были выбраны балки, имеющие три степени свободы по узлам – два перемещения и один угол поворота в рассматриваемой плоскости.

Далее создается матрица элементов и узлов. Матрица узлов представляет собой матрицу размерностью $M(2 \times N)$, где N – количество узлов. Далее на основе полученных узлов создается матрица элементов. Матрица элементов имеет размерность $M(E \times N)$, где E – количество узлов в элементе, а N – количество элементов. После составления матриц узлов и элементов пластина представляется разделенной на конечные элементы.

Вторым этапом решения задачи является составление локальной матрицы жесткости, для составления которой используются некоторые зависимости из сопротивления материалов.

Матрица жесткости K устанавливает связь между силами и перемещениями Δl согласно уравнению:

$$P = K * \Delta l, \quad (1)$$

или в развернутом виде

$$\begin{pmatrix} P_{x_1} \\ P_{x_2} \\ M_{z_1} \\ P_{y_1} \\ P_{y_2} \\ M_{z_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E * F / l & 0 & 0 & -E * F / l & 0 & 0 \\ 0 & 12 * E * J_z / l^3 & 6 * E * J_z / l^2 & 0 & -12 * E * J_z / l^3 & 6 * E * J_z / l^2 \\ 0 & 6 * E * J_z / l^2 & 4 * E * J_z / l & 0 & -6 * E * J_z / l^2 & 2 * E * J_z / l \\ -E * F / l & 0 & 0 & E * F / l & 0 & 0 \\ 0 & -12 * E * J_z / l^3 & -6 * E * J_z / l^2 & 4 * E * J_z / l & 12 * E * J_z / l^3 & -6 * E * J_z / l^2 \\ 0 & 6 * E * J_z / l^2 & 2 * E * J_z / l & 0 & -6 * E * J_z / l^2 & 4 * E * J_z / l \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta y_1 \\ \Delta \phi_1 \\ \Delta x_2 \\ \Delta y_2 \\ \Delta \phi_2 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где E – модуль упругости; J_z – момент инерции относительно оси z ; l – длина балки; F – площадь поперечного сечения.

Матрица жесткости K справедлива для горизонтальной балки. Для преобразования её к углу наклона α применяется матрица направляющих косинусов:

$$C = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Локальная матрица жесткости в локальной системе координат преобразуется в матрицу жесткости в глобальной системе координат:

$$[K'] = [C]^T * [K] * [C], \quad (4)$$

где K' – новая локальная матрица жесткости, записанная в общей для всего тела системе координат.

Третьим этапом решения задачи является получение глобальной матрицы жесткости, которая имеет размерность $(A \cdot N \times A \cdot N)$, где A – количество степеней свободы в узле, N – количество узлов.

Четвертым этапом решения является получение матрицы податливости, которая устанавливает связь между перемещениями и деформациями:

$$[\Delta U] = [U] * [P]. \quad (5)$$

Из выражений (1) и (5) находим матрицу податливости:

$$[U] = [K]^{-1}. \quad (6)$$

Результат решения задачи в среде VBA показан на рис. 1.

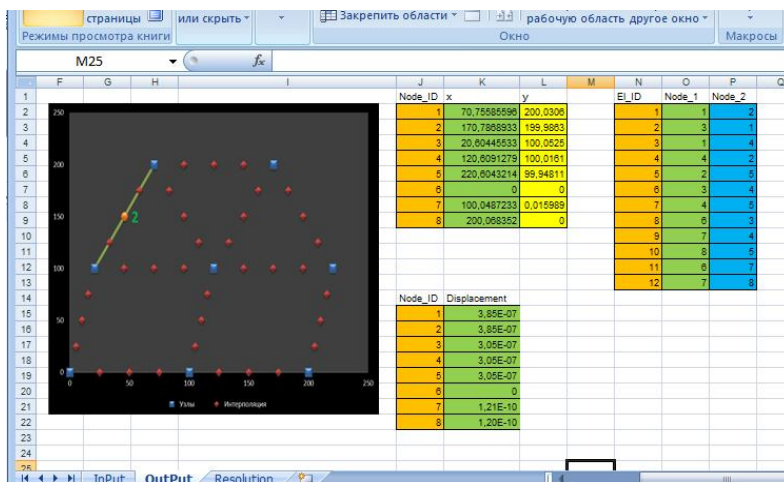


Рис. 1. Результаты расчета в среде VBA

В работе проводится также расчет фермы в среде MSC.Patran/Nastran[1]. Строится модель фермы, которая разбивается на конечные элементы типа Beam, после чего задаются свойства материала и его характеристики ($E=200$ ГПа, $\mu = 0,3$).

На стадии решения задачи проводится статический анализ, задаются граничные условия и внешние нагрузки (рис.2).

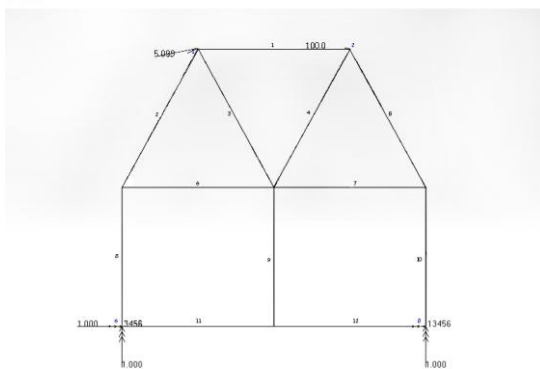


Рис.2. Элементная модель фермы

Результаты расчетов перемещений элементов конструкции приведены на рис.3.

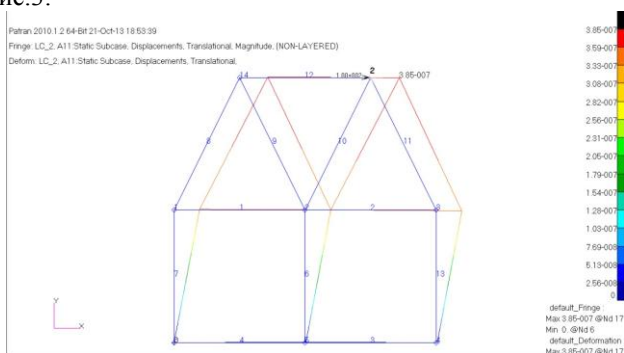


Рис.3. Результат определения перемещений в среде MSC.Patran/Nastran

Расчет фермы в программе MSC.Patran/Nastran и в разработанном программном продукте позволяет сравнить полученные результаты. Например, максимальные перемещения наблюдаются в узле номер 2, которые равны $3,85 \cdot 10^{-7}$ м в обоих расчетах.

Библиографический список

1. Жилкин, В.А. Азбука инженерных расчетов в MSC.Patran-Nastran-Marc: Учебное пособие / В. А. Жилкин. – СПб. : Проспект науки, 2013. – 576 с.
2. Зенкевич, О.И. Метод конечных элементов в технике – М.: Мир, 1975. – 541 с.

*С. Е. Воробьев, А. М. Селезнев, студ.
рук. А.Б. Колобов, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ЛАБОРАТОРИИ ТЕХНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ ОАО «АКРОН»

Направлениями работы ОАО «Акрон-ремонт» в области диагностики является проведение контроля оборудования и материалов неразрушающими методами при изготовлении, строительстве, монтаже, ремонте, реконструкции и техническом диагностировании объектов методами акустического контроля, проникающими веществами, вихретоковым методом, методом визуального и измерительного контроля, проведение вибродиагностики, тепловизионный контроль.

Ниже приведены этапы проведения вибродиагностики роторного оборудования и этапы радиографического контроля сварных соединений.

Вибродиагностика была проведена для роторного оборудования, в частности для центробежных вертикальных и горизонтальных насосов, предназначенных для перекачки воды, кислоты или жидкого аммиака.

Этапы вибродиагностики роторного оборудования:

- 1) выбираются точки измерения для диагностируемого агрегата, которые заносятся в программу виброанализатора;
- 2) проводятся замеры СКЗ виброскорости и виброускорения;
- 3) сравниваются полученные данные и границы вибрационного состояния по ГОСТу;
- 4) даются рекомендации.

Этапы радиографического контроля сварных соединений:

- 1) разметка сварного соединения;
- 2) укладка рентгеновской пленки;
- 3) установка маркировочных знаков и эталонов чувствительности;
- 4) просвечивание шва источником ионизирующих излучений;
- 5) фотообработка пленок;
- 6) оценка дефектов и заключение по результатам контроля.

После проведения испытаний выявлено, что из дефектов роторного оборудования самыми распространенными являются дефекты подшпикников качения. Самые распространенные дефекты сварных соединений – скопления пор. Даны рекомендации согласно результатам контролей.

*И.С. Цветков, А.С. Морозов студ.
рук. Ф.Б. Огурцов, к.т.н., доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РОТОРНЫХ МАШИН

Спектральный анализ – это математический аппарат для исследования периодических процессов и выявления в них отдельных компонент, имеющих характерные частоты.

Для диагностики роторных машин используются спектры виброускорения, так как именно в них для большинства типов узлов роторных машин оказываются сопоставимыми величины составляющих вибрации на низких, средних и высоких частотах. Объясняется это тем, что разрушающее действие на узлы машин оказывают в основном силы, действующие на массу, вызывающие ускорение, а не движение или перемещение. Скорость и смещение, значительно зависят от того, как долго действовала сила в одном направлении: чем больше частота действующей силы, тем меньше скорость и смещение, вызванное силой. Таким образом, сравнивать силы, действующие с разными частотами, желательно по спектрам виброускорений. Спектральный анализ может производиться с помощью виброанализатора СД-12 (рис. 1).



Рис.1. Виброанализатор СД-12

Объектами диагностики являются узлы роторных машин:

- ротор и соединительные муфты;
- подшипники качения;
- подшипники скольжения;

- ременные, зубчатые, червячные и другие виды механических передач;
- рабочие колеса насосов, турбин и других типов роторных машин;
- электромагнитные системы электрических машин переменного и постоянного тока.

Диагностика узлов роторных машин предполагает наличие дополнительного программного обеспечения.

С помощью виброанализатора СД-12 производятся замеры в двух точках (осевое и вертикальное направления). Рассмотрено применение прибора на примере сушильного цилиндра бумагоделательной машины, представленной на рис. 2.



Рис. 2. Сушильный цилиндр БДМ: 1 – вертикальное, 2 – осевое направления

Результаты замеров подвергаются обработке с помощью компьютерного обеспечения, которое позволяет выявить определенный дефект в работе роторной машины.

На рис. 3 показана численная обработка данных замера.

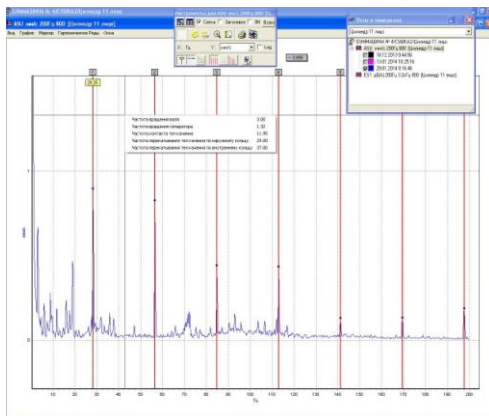


Рис.3 Обработка замеров проведенного исследования узла машины

Маркеры на графике показывают значительный разнос между частотой и перемещением в определенных узлах исследуемого объекта. Присутствие множества гармоник вибрации свидетельствует о наличии дефекта [1]. В данном случае это дефект раковины на наружном кольце. Подобный дефект подшипника является результатом износа кольца, появления трещин, ударных нагрузок при ремонте, транспортировке и т. п. Он характеризуется появлением ударных импульсов, возникающих от столкновения тел качения с наружным кольцом в поврежденной зоне и быстрым развитием дефекта.

Дефект может появиться на любом этапе эксплуатации подшипника и значительно сократить его рабочий ресурс.

Аналогичным образом проводится спектральный анализ и для других узлов роторных машин.

Библиографический список

1. **Вибрации в технике:** Справочник. В 6-ти т. / Ред. Совет: В.Н. Челомей (пред.). – М.: Машиностроение, 1978. - Т. 1. Колебания линейных систем / Под. ред. В.В. Болотина. 1978. – 352 с.: ил.

*В. М. Седов, студ.; рук. Л. Б. Маслов, д.ф.-м. н, доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ИЗМЕНЕНИЕ КОСТНЫХ ТКАНЕЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВИБРАЦИИ

Известно, что живые ткани в процессе своего роста и развития существенным образом реагируют на внешнее силовое поле, в котором они функционируют. Механический фактор оказывает стимулирующее и регулирующее воздействие на специфические клетки тканей, что приводит к запуску и развитию процессов трансформации органа в макроскопическом масштабе. Структурная перестройка неразвитой мягкой субстанции в плотную костную ткань происходит в результате дифференциации костных клеток, например, во время восстановления целостности кости после перелома и вживления скелетных имплантатов в твердое вещество костной ткани, что приводит к запуску процесса репаративной регенерации кости в зоне соприкосновения с поверхностью инородного предмета или между костными отломками.

Методологические основы исследования представлены теорией деформируемых гетерогенных сред и концепцией современной биомеханики тканей, согласно которой многие биологические ткани могут быть математически представлены в виде двухфазного упругого материала, насыщенного жидкостью. Предполагается, что в пористом материале могут быть выделены твердая фаза, представляющая собой упругий формообразующий скелет и воспринимающая основную силовую нагрузку и жидкая фаза, полностью или частично заполняющая поры. Для расчета эффективных тензоров упругих и гидростатических констант сплошной среды используются математические методы теории композитных материалов.

Костная ткань – это разновидность специализированной соединительной ткани, которая вместе с хрящевой тканью составляет скелетную систему. Органические вещества придают кости мягкость, эластичность, неорганические – твердость. Костная ткань выполняет в организме следующие функции: механическую, защитную и метаболическую [1].

Для математической формализации описанных процессов существующие модели структурной перестройки костной ткани предполагают, что доставка активных клеток-предшественников, способных к формоизменению, осуществляется непрерывно в течение заданного срока реконструкции. Уравнение диффузии представляет собой

классическое уравнение Фурье и может быть записано следующим образом:

$$\nabla \cdot (J \cdot \nabla \psi) - \frac{d\psi}{dt} = 0$$

где ψ – объемная концентрация клеток; J – коэффициент диффузии,

мм²/день; ∇ – оператор Лапласа.

Пусть в крайних сечениях зоны репарации $x = \pm l$ значение концентрации активных клеток-предшественников, мигрирующих внутрь области, поддерживается постоянным и равным ψ_{max} . Краевые условия могут быть записаны следующим образом:

$$\psi(0, t) = 0, \quad \psi(l, t) = \psi_{max}$$

При подстановке граничных и начальных условий получено решение в виде:

$$\tilde{\psi}(x, t) = \frac{\psi(x, t)}{\psi_{max}} = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k-1}}{2k-1} \cos \frac{(2k-1)\pi x}{2l} \exp\left(-\frac{J(2k-1)^2 \pi^2 t}{4l^2}\right)$$

Как следует из проведенного анализа, при $J = 0,67$ мм/день за клинически достоверный период времени $T = 120$ суток костная мозоль будет полностью заполнена активными дифференцирующимися клетками. Это означает, что концентрация костных тканей приблизительно равна 100% [2].

Библиографический список

1. **Маслов, Л.Б.** Математическое моделирование колебаний пороупругих систем: монография.– Иваново: Изд-во ИГЭУ, 2010.– 264 с.
2. **Маслов, Л.Б.** Математическая модель структурной перестройки костной ткани. Российский журнал биомеханики. 2013. Т. 17, № 2 (60). С. 39–63

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

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЙ В КОСТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АППАРАТА ИЛИЗАРОВА

В медицине используется большое количество приспособлений для восстановления здоровья человека. Биомеханика – это наука объединяющая механику и медицину. Биомеханические исследования охватывают различные уровни организации живой материи: биологические макромолекулы, клетки, ткани, органы, системы органов, организмы и

их сообщества. Объектом исследования биомеханики могут быть как движения животных и человека, так и механические явления в тканях, органах иных системах. Под механическим движением понимается движение всей биосистемы в целом, а также движение отдельных частей системы относительно друг друга – деформация системы.

Аппарат Илизарова (рис. 1) – медицинский аппарат, использующийся для сращения, вытягивания, фиксации костей [3]. Аппарат представляет собой металлические «кольца», на которых крепятся «спицы», проходящие через костную ткань. Кольца соединены механическими стержнями, позволяющими менять их ориентацию со скоростью порядка одного миллиметра в день [2]. Случай излома кости – самый частый. Наибольшее напряжение возникает именно в месте слома. В работе найдены напряжения, возникающие именно в месте слома кости при разных комбинациях стержней, соединяющих кольца аппарата. Силы приложены на стержни, поэтому такой случай сжатия называется внецентренным.

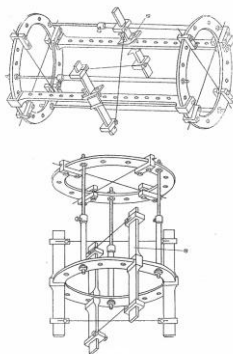


Рис.1. Схема аппарата Илизарова

Внецентренное растяжение (сжатие) стержня, деформация, возникающее при действии на стержень двух равных и противоположно направленных продольных сил, параллельных оси стержня; один из видов сложного сопротивления. Внецентренное растяжение (сжатие) характеризуется сложением деформаций от изгиба и от продольных сил. При внецентренном растяжении (сжатии) в точках поперечного сечения с текущими координатами y и z , взятыми относительно главных центральных осей, нормальные напряжения определяются по формуле [1]:

$$\sigma = \frac{N}{F} + \frac{My_c}{I_x} y + \frac{Mz_c}{I_y} z = \frac{N}{F} \left(1 + \frac{y_c y}{i_y^2} + \frac{z_c z}{i_z^2} \right),$$

в которой F — площадь поперечного сечения, I_y и I_z — моменты инерции сечения, i_y и i_z — радиусы инерции сечения, y_c и z_c — координаты точки приложения продольной силы N [4].

Координаты y и z — координаты точек середины твердой части кости, находящиеся на линии, соединяющей точку приложения силы с началом координат.

Аппарат имеет 12 отверстий на каждом кольце, нумерация их задана от 1 до 12 по часовой стрелке.

Всего рассмотрено 3 комбинации расположения трех стержней аппарата:

- «4, 8, 12»
- «2, 5, 8»
- «3, 6, 12»

Приложенная сила P взята равной 1 Н.

Сравнение полученных значений напряжений

$$2,787 \cdot 10^{-3} < 2,107 \cdot 10^{-3}$$

говорит о том, что нормальное напряжение в случае второй комбинации («2, 5, 8») осевых сил меньше, чем в случаях первой и третьей. Следовательно, вторая комбинация наиболее благоприятна для сращения кости аппаратом Илизарова.

Библиографический список

1. **Феодосьев, В.И.** Сопротивление материалов: Учеб. для вузов. 10-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 592 с.
2. **Каплунов, А.Г.** Неизвестный Илизаров: штрихи к портрету: записки очевидца. Волгоград: Издатель, 2008. 240 с.
3. **Илизаров, Гавриил Абрамович** // Википедия. [2013-2013]. Дата обновления: 30.11.2013. URL: <http://ru.wikipedia.org/?oldid=60143265> (дата обращения: 30.11.2013)

*М. А. Воробьев, студ.; рук. В.И. Шапин, к.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СИСТЕМЫ КОСТЬ-ФИКСАТОР ПРИ НАКОСТНОМ ОСТЕОСИНТЕЗЕ

Повреждение голеностопного сустава в силу больших статико-динамических нагрузок, составляющих от 2,9 до 4,7 массы тела человека, относится к числу наиболее распространенных повреждений опорно-двигательной системы у лиц молодого возраста. Несмотря на

внимание к этой патологии, о чём свидетельствует большое число публикаций в отечественной и зарубежной литературе, остается высоким удельный вес негативных и инвалидизирующих результатов, обусловленных неадекватной репозицией, несовершенным остеосинтезом и вторичным смещением отломков [1].

Остеосинтез – (др.-греч. ὀστέον – кость; σύνθεσις – сочленение, соединение) хирургическая репозиция костных отломков при помощи различных фиксирующих конструкций, обеспечивающих длительное устранение их подвижности. Цель остеосинтеза – обеспечение стабильной фиксации отломков в правильном положении с сохранением функциональной оси сегмента, стабилизация зоны перелома до полного сращения. Метод является одним из основных при лечении нестабильных переломов длинных трубчатых костей, а, часто, единственно возможным при внутрисуставных переломах с нарушением целостности суставной поверхности. В качестве фиксаторов обычно используются штифты, гвозди, шурупы, винты, спицы и т.д., изготавливаемые из материалов, обладающих биологической, химической и физической инертностью. Показаниями к применению остеосинтеза являются переломы, не срастающиеся без оперативного вмешательства, переломы, при которых есть риск повреждения костными отломками кожи, мышц, сосудов, нервов и т.д., неправильно сросшиеся переломы, также остеосинтез может применяться в случаях медленно срастающихся переломов, вторичного смещения отломков, при невозможности закрытой репозиции отломков, при коррекции плоскостопия, вальгусной деформации [2].

Целью данной работы является изучение напряженно-деформированного состояния системы кость-фиксатор при накостном остеосинтезе. В качестве инструмента исследования используется САПР SolidWorks и SolidWorks Simulation – CAE-модуль, основанный на методе конечных элементов и предназначенный для проведения прочностного анализа.

Средствами системы автоматизированного проектирования SolidWorks была построена модель малоберцовой кости и смоделирован перелом ее дистального отдела на уровне 30 мм от нижнего края, плоскость перелома перпендикулярна оси кости. Так же был смоделирован фиксатор (рис. 1), наложенный на кость (пластина).

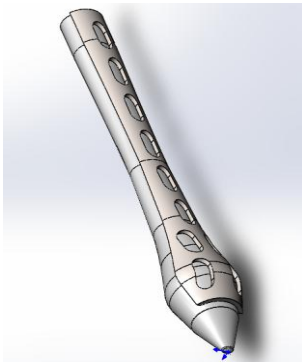


Рис. 1. 3D-модель рассматриваемой кости с наложенным на нее фиксатором

Нижняя часть кости моделировалась как жесткозакрепленная (рис. 2). Нагрузка прикладывалась в виде давления к верхней части рассматриваемой модели вдоль оси кости, значение ее взято равным 30 МПа (рис. 3). К модели прикладывалось дополнительно сжимающее давление, равное 15 МПа (рис. 4) и растягивающее – 15 МПа (рис. 5).

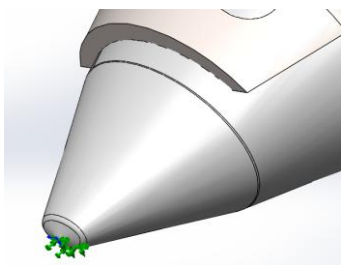


Рис. 2. Жесткое закрепление кости

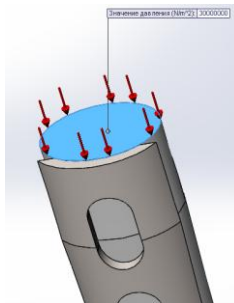


Рис. 3. Нагрузка, прикладываемая вдоль оси кости

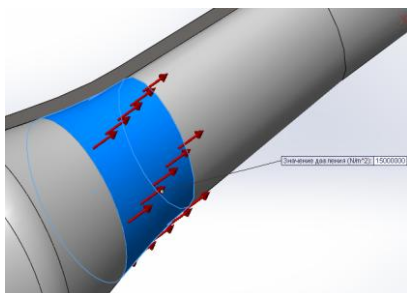


Рис. 4. Сжимающее давление, имитирующее действие блока таранной кости на малоберцовую кость

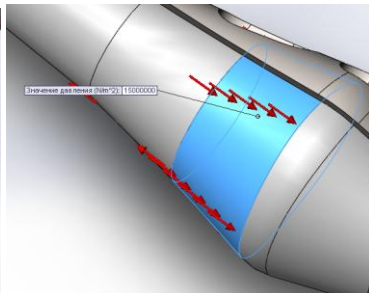


Рис. 5. Растягивающее давление, имитирующее равнодействующую реакции связок латеральной группы

В результате расчетов были получены картины напряженно-деформированного состояния системы «кость-фиксатор»: эпюры напряжений (рис. 6), деформаций (рис. 7) и перемещений (рис. 8).

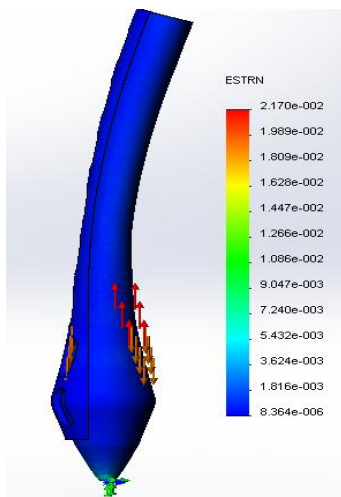


Рис. 6. Вид деформированной модели и эпюра напряжений, возникающих в кости

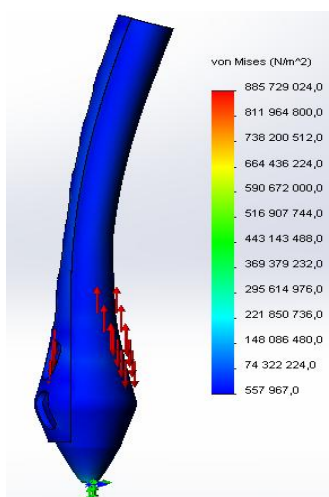


Рис. 7. Вид деформированной модели и эпюра деформаций, возникающих в кости

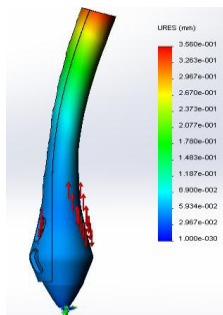


Рис. 8. Вид деформированной модели и эпюра перемещений, возникающих в кости

Наибольшие перемещения получены в верхней части модели, уменьшаются они сверху вниз: от 0,356 мм в верхней части кости до 0,001 мм – в нижней. Напряжения распределены, в основном, равномерно по всей модели (0,558 МПа) и только в нижней части, где кость жестко закреплена, наблюдается возрастание, достигающее величины 230 МПа. Деформации распределяются аналогично – $8,364e-06$ по большей части кости. Увеличение значения деформации до $6e-03$ также наблюдается в нижней части кости.

Библиографический список

1. **Лоскутов, О.А.** Биомеханическое обоснование накостного остеосинтеза при переломах наружной лодыжки / О.А. Лоскутов, С.П. Панченко, В.Л. Красовский // Ортопед. травматол. - 2009. - № 4. - С. 55-61.
2. **Остеосинтез** // Википедия. [2013-2013]. Дата обновления: 13.12.2013. URL: <http://ru.wikipedia.org/?oldid=59486438> (дата обращения: 13.12.2013).

*О.Г. Бизяева, студ.; рук. А.В. Круглов, асс.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ТЕПЛОВОЙ РАСЧЁТ ФОРМЫ ДЛЯ ЛИТЬЯ ВОСКОВЫХ ФИГУРНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Основным восковым изделием является свеча. Изначально главной функцией свечи являлось освещение помещения. Как источник света свечи применялись, начиная с третьего тысячелетия до н. э. и до появления электрических ламп накаливания с 1880-х годов.

Восковые изделия используются в декоративных целях, как украшение, а также для наполнения помещения запахом. Свечи часто применяются на различных праздниках. Например, в православии на церемонии венчания используются так называемые венчалные свечи (рис. 1).



Рис. 1. Образец свечи

Сегодня самым популярным материалом, из которого изготавливаются свечи, является парафин. Свечи изготавливают из смеси высокоочищенного (снежно-белого или слегка прозрачного) парафина с небольшим количеством стеарина, либо из малоочищенного (желтого) парафина, как с добавкой стеарина, так и без нее. Первые более эстетичны и менее пахучи, вторые не так сильно оплывают. Изредка производятся свечи из неочищенного парафина (красно-желтого) без добавок, которые очень сильно оплывают, и поэтому не пользуются спросом [1]. Существуют разные способы изготовления свечей, наиболее распространенным из которых является применение литейных форм (рис. 2).



Рис. 2. Литейная форма

Литейная форма для изготовления свечей представляет собой систему элементов, образующих рабочую полость с внешними контурами получаемой отливки. После заливки в такую полость жидкого материала он охлаждается и затвердевает, образуя отливку. Литейная форма состоит из нескольких, обычно из двух, частей (полуформ), собранных в одно целое.

Работа посвящена созданию 3D модели литейной формы для изготовления венечной свечи в программе КОМПАС-3D и тепловому расчёту формы при помощи программной системы конечно-элементного анализа – SolidWorks с модулем Solidworks Simulation.

Тепловой расчёт формы для литья свечи позволяет оценить правильность выбора материала свечи или степень пригодности материала для изготовления формы. Основным параметром выбора материала свечи является минимальная деформация при воздействии температур, что определяет минимальное искажение формы свечи. При расчёте с учётом приложенной к форме температуры получены эпюры напряжений и перемещений при расширении.

Расчёт показал, что под действием температуры модель расширяется и деформируется. Минимальное перемещение составляет 0,009 мм. Деформация происходит посредством сдвига при расширении.

Проведённый расчёт используется при проектировании литейных форм.

Библиографический список

1. Свеча // Википедия. [2013-2013]. Дата обновления: 29.10.2013. URL: <http://ru.wikipedia.org/?oldid=59199761> (дата обращения: 10.11.2013).

*Е.Э. Ильина, студ.; рук. З.В. Зарубин, ст.преп.
(ИГЭУ, Иваново)*

РАСЧЁТ КОНСТРУКЦИИ ИЗ ЭЛЕМЕНТОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

Существует ряд материалов, которые при нагреве после предварительной деформации демонстрируют явление возврата к первоначальной форме. Такие сплавы обладают свойством, позволяющим им проявлять своеобразную память. Эффект нашел практическое применение и создал новый класс сплавов, обладающих эффектом памяти формы (ЭПФ).

В исходном состоянии в материале существует определенная структура. При деформации (в данном случае изгибе) внешние слои материала вытягиваются, а внутренние сжимаются (средние остаются без изменения). Вытянутые структуры – мартенситные пластины, обычное явление для металлических сплавов. Необычным является то, что в материалах с памятью формы мартенсит термоупругий.

При нагреве начинает проявляться термоупругость мартенситных пластин, то есть в них возникают внутренние напряжения, которые стремятся вернуть структуру в исходное состояние, то есть сжать вытянутые пластины и растянуть сплюснутые. Поскольку внешние вытянутые пластины сжимаются, а внутренние сплюснутые растягиваются, материал в целом проводит автодеформацию в обратную сторону и восстанавливает свою исходную структуру, а вместе с ней и форму.

Эффект памяти формы характеризуется двумя основными параметрами: маркой сплава со строго выдержанным химическим составом и температурами мартенситных превращений.

В 1962 году был разработан сплав из никелида титана с ЭПФ. Принятое за рубежом название – «Нитинол» происходит от аббревиатуры NiTiNOL, где NOL – сокращенное название лаборатории морской артиллерии США, в которой материал был разработан. Данный элемент может исполнять функции как датчика, так и исполнительного механизма [1].

Объектом исследования в данной работе является двигатель Гинеля с кривошипно-шатунным механизмом (рис. 1). В двигателе используются пружины с ЭПФ из сплава Нитинол с температурным переходом 45 °С.

Рассмотрено уравнение движения модели. Для расчетов использована программа Mathcad [2].

Уравнение имеет вид:

$$J \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2} = M(\varphi) - K \cdot \frac{d\varphi}{dt},$$

где: K – коэффициент сопротивления воды; J – момент инерции данной модели; φ – угол вращения, зависящий от времени t ; $M(\varphi)$ – крутящий момент, зависящий от угла поворота.

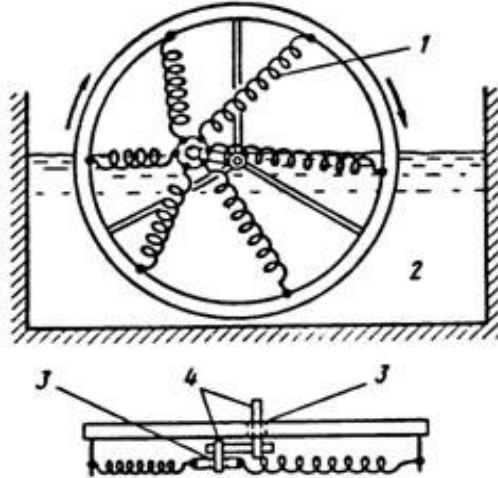


Рис. 1. Двигатель Гинеля: 1– спираль из сплава Ni-Ti; 2 – горячая вода; 3 – подшипник; 4 – фиксированные оси

Данное уравнение решается методом Рунге-Кутты.[3] Метод Рунге-Кутты можно использовать только для работы с дифференциальными уравнениями первого порядка, поэтому порядок уравнения методом замены переменных понижается:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \psi \quad (1)$$

Уравнение принимает вид:

$$J \cdot \frac{d\psi}{dt} = M(\varphi) - K \cdot \psi \quad (2)$$

Для исключения времени уравнение (2) преобразовано:

$$\frac{d\psi}{d\varphi} = \frac{M(\varphi) - K}{J \cdot \psi} \quad (3)$$

Уравнение первого порядка функции $f(\varphi, \psi)$. Для нахождения более точного решения выбран четырехшаговый метод Рунге- Кутта:

$$\psi_{i+1} = \psi_i + (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4),$$

где:

$k_{1i} = h \cdot f(\varphi_i, \psi_i)$ – первая точность, считаемая в данной точке;

$k_{2i} = h \cdot f(\varphi_i + h/2, \psi_i + k_1/2)$ – вторая точность, считаемая с отступом в полшага от данной точки;

$k_{3i} = h \cdot f(\varphi_i + h/2, \psi_i + k_2/2)$ – третья точность, считаемая с отступом в полшага от данной точки;

$k_{4i} = h \cdot f(\varphi_i + h, \psi_i + k_3)$ – четвертая точность, считаемая с отступом в шаг от данной точки.

Шаг для данного расчета выбран: $h = 0,131$.

Для решения уравнения необходимо задать начальные условия задачи Коши: $\varphi_0 = 0$; $\psi(\varphi_0) = \psi_0$.

Для решения уравнения в программе Mathcad необходимо задать

$$\frac{2\pi}{h} = 48$$

цикл Θ для φ и ψ с периодичностью шага: $N = \frac{2\pi}{h} = 48$.

Результат вычислений выводится на экран в виде графика движения системы (рис. 2)

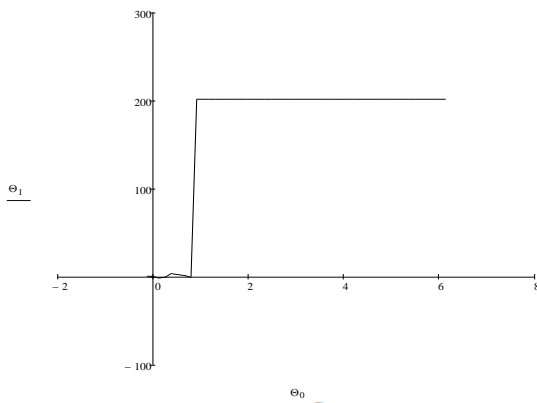


Рис.2. График движения модели: по оси θ_0 – значение угла поворота двигателя (рад); по оси θ_1 – скорость движения двигателя (рад/с)

Из график движения следует, что двигатель в начальный момент времени находится в состоянии покоя, затем при малейшем изменении угла поворота скорость движения возрастает до определенного значения и в дальнейшем не изменяется, так как температура воды неизменна.

Библиографический список

1. **Ильина, Е.Э.** Энергия-2013. Сплавы с эффектом памяти формы / Е.Э. Ильина, Е.С. Шильцев; ИГЭУ.– Иваново, 2013.- с. 180-182
2. **Зарубин, З.В.** Деформационные расчеты материалов с эффектом памяти формы. / З.В. Зарубин, М.А. Ноздрин: ИГЭУ.- Иваново, 2012
3. **Самарский, А.А.** Введение в численные методы./ А.А. Самарский.- СПб.: Машиностроение, 2005. – с.176-183

*А.В. Дремченко, студ.; рук. Н.А. Сабанеев, ст. преп.
(ИГЭУ, Иваново)*

**РАЗРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ НА ПЕРСОНАЛЬНОМ
КОМПЬЮТЕРЕ В СИСТЕМЕ T-FLEX CAD**

T-FLEX CAD – полнофункциональная система автоматизированного проектирования, обладающая всеми современными средствами разработки проектов любой сложности [1]. Система объединяет мощные параметрические возможности 2D и 3D-моделирования со средствами создания и оформления чертежей и конструкторской документации [2]. Возможности параметризации в T-FLEX CAD очень широки, что обеспечивает максимальную эффективность при проектировании моделей с различными исполнениями и набором типоразмеров. Система обладает удобным и не сложным интерфейсом, напоминающим «Компас».

Работа в T-FLEX CAD предполагала создание деталей: корпус, фланец, шпиндель, пробка, сильфон. Создание 3D моделей выполнялась в два этапа [3]:

1. ознакомление с предоставленными рабочими чертежами, на которых указаны все возможные размеры (рис. 1);
2. выполнение по размерам детали в 3D (рис. 2).

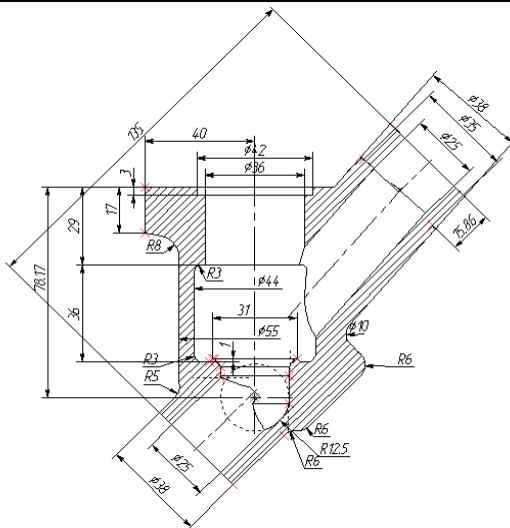


Рис. 1. Корпус (рабочий чертеж)

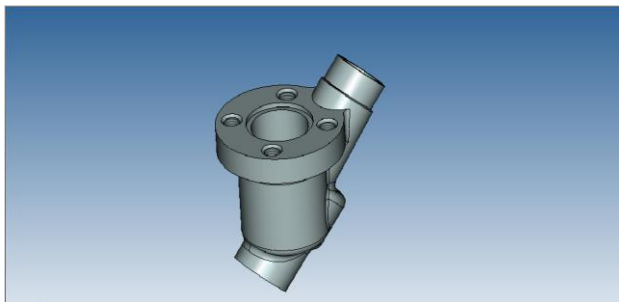


Рис. 2. Корпус (3D модель)

В результате работы были получены навыки проектирования на ПК в системе T-FLEX CAD 3D моделирования и проанализированы методы создания двухмерных чертежей в 2D модуле.

Библиографический список

1. www.tflex.ru
2. **Основы T-Flex CAD.** Двухмерное проектирование и черчение, «АО Топ Системы», 2011г.
3. **T-Flex CAD.** Трехмерное моделирование. Руководство пользователя, «АО Топ Системы», 2006г.

*Е. О. Мясникова, студ.; рук. А.В. Крузлов, асс.
(ИГЭУ, Иваново)*

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ НА РАСТЯЖЕНИЕ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ И ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА ТРУБЫ

Испытания на растяжения проводят с целью выявления брака в образце, наибольшей нагрузки до разрыва и нагрузки, соответствующей пределу текучести материала.

Образцы лабораторных испытаний изготовлены в центральной заводской лаборатории. Исследование проходило в лаборатории механических испытаний. Схематические изображения образцов даны на рис. 1 и рис. 2.

Образец со сварным соединением был помещен в разрывную машину ИР–6055–500 и закреплен верхним подвижным захватом. Далее образец подвергается растяжению до момента разрыва. В данном случае разрыв произошел в зоне термического влияния (вне зоны шва).

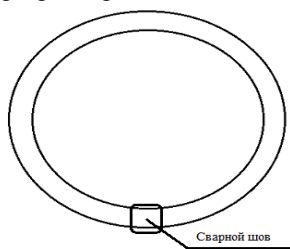


Рис. 1. Образец на растяжение сварного соединения до испытания

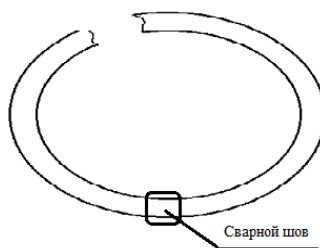


Рис. 2. Образец на растяжение сварного соединения после испытания

Перед испытанием основного металла трубы на образец были нанесены метки методом кернения. Затем образец помещен в разрывную машину ИР–5143–200, закреплен штангой активного захвата, нагружен и растянут. После испытания производился замер длины разорванного образца (рис. 3), который сравнивался с исходным.



Рис. 3. Образец основного металла трубы после испытания на растяжение

Площадь поперечного сечения:

$$F = (a \times b) + (a_0 \times b_0),$$

где a – толщина образца в основном металле, мм; b – ширина образца в основном металле, мм; a_0 – толщина образца в ОШЗ (околошовная зона); b_0 – ширина образца в ОШЗ.

Расчет предела прочности на разрыв:

$$\sigma_B = P \setminus F.$$

При расчете временного сопротивления используют формулу

$$\sigma_B = P_{\max} \setminus F, \text{ где } F = a \times b.$$

Относительное удлинение:

$$l = (l_k - l_0) / l_0 * 100\%,$$

где l_k – измеренная величина между точками кернения после испытания, мм.

В протоколе испытаний указывают начальные размеры образца, место разрыва, нагрузку, при которой произошёл разрыв. Лабораторные испытания позволяют выявить механические характеристики, используемые для расчета сварных соединений.

А.П. Алешина, асп.; М.А. Гриценко, асп.

рук. Е.Р. Брик, к.т.н., доц.;

(ИВГПУ, г. Иваново)

рук. В.А. Огурцов, д.т.н., проф.

(ИГЭУ, г. Иваново)

МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ СРЕД С ПОЗИЦИИ КРИВОЙ РАЗДЕЛЕНИЯ ГРОХОТА

Фракционирование сыпучего сырья и промежуточных продуктов осуществляется на грохотах различных принципов действия, где эффективность разделения материала на фракции входит в противоречие с производительностью грохота: чем больше производительность, тем больше одни фракции материала загрязнены другими. В большинстве случаев характеристики грохочения рассчитывают, исходя из разделения полного спектра размеров частиц всего на две фракции: подрешетную с размерами частиц меньше размера отверстий сита грохота и надрешетную с размерами частиц больше этого размера. При этом неявно предполагается, что все частицы подрешетной фракции одинаково быстро проходят в отверстия сита, что не соответствует действительности. Этого противоречия можно избежать, если рассматривать выход узких фракций, принадлежащих подрешетной фракции, по от-

дельности и строить кривую разделения грохота, связывающую степень извлечения с ее средним размером проходовых частиц. Кривые разделения широко используются как характеристики классификаторов других типов, например, воздушных. Построение модели кривых разделения грохота базируется на теории цепей Маркова, как наиболее соответствующей природе процесса грохочения.

Весь слой материала разбит на несколько подслоев-ячеек идеального смешения. Толщина подслоя должна быть больше размера самой крупной частицы, но существенно меньше толщины слоя. Таким образом, все ячейки цепи определяют полное пространство возможных состояний частицы. Рассмотрим процесс изменения состояний ячеек цепи через последовательные малые, но конечные промежутки времени (время перехода), в течение которых частицы успевают проникнуть только в соседнюю ячейку, но не далее. Тогда текущее время определится как номер временного перехода, который может рассматриваться как дискретный аналог времени. Вероятности того, что частица окажется в некоторый момент времени в i -й ячейке, различны. Считаем эти вероятности адекватными относительной концентрации частиц в слое. Их полный набор образует вектор-столбец состояния. Изменение состояния ячеек цепи описывается матричным рекуррентным равенством, в которое входит матрица переходных вероятностей. Наглядное представление о процессе, определяющее также способ его экспериментального исследования, дает введение в одну из ячеек меченых проходовых частиц – трассера с последующим отслеживанием эволюции его состояния. К ячейкам цепи слоя добавлена ячейка, соответствующая подситовому пространству. Попавшие в нее проходовые частицы остаются в ней. Вероятность выхода в эту ячейку из нижней ячейки, принадлежащей слою материала, отличается от других вероятностей перехода вниз. Если известны производительность грохота и характеристика крупности исходного сыпучего материала, скорость транспортирования материала по грохоту, то определяется извлечение проходовых частиц, то есть эффективность работы грохота и засоренность товарного продукта некондиционными мелкими частицами. Данная модель позволит вести целенаправленный поиск эффективных решений в технологии оптимальной эксплуатации промышленного классифицирующего оборудования.

А.П. Алешина, асп., М.А. Гриценко, асп.

(ИВГПУ, г. Иваново)

рук. В.А. Огурцов, д.т.н., проф.

(ИГЭУ, г. Иваново)

КИНЕТИКА ПРОЦЕССА ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ НА БАРАБАННЫХ ГРОХОТАХ

Процессы грохочения сыпучих материалов широко распространены в энергетической, химической, строительной и других отраслях промышленности. Во многих технологических процессах преимущество отдается вибрационным грохотам. Данные грохоты традиционны для исследования. Несмотря на высокую эффективность их работы, долговечность виброгрохотов и их просеивающих поверхностей невелика. С точки зрения долговечности и простоты обслуживания, особенно в условиях работы в карьерах, более предпочтительными являются вращающиеся барабанные грохоты, которые не подвержены негативному влиянию вибрации. Несмотря на кажущуюся простоту, процесс фракционирования в таких аппаратах мало изучен. Основные показатели процесса: производительность грохота и эффективность классификации определяются эмпирическими методами

Наиболее информативной характеристикой барабанного грохота является кинетика классификации, которая определяет конечный гранулометрический состав товарного продукта. Кинетика грохочения, то есть зависимость степени извлечения проходových частиц от времени классификации (пребывания сыпучего материала в аппарате), обычно не является предметом исследования и описания. Однако кинетика классификации является наиболее информативной характеристикой барабанного грохота, так как определяет конечный гранулометрический состав товарного продукта. Поэтому представляется актуальным расчетно-экспериментальное исследование процессов грохочения сыпучих материалов на основе математических моделей процессов, происходящих в таких аппаратах, учитывающих основные реальные факторы, влияющие на кинетику классификации, к которым можно отнести локальную интенсивность продольной и поперечной миграции частиц по слою сыпучего материала и процесс его транспортирования по просеивающей поверхности барабанного грохота.

Одним из эффективных математических аппаратов, описывающих поведение дисперсных сред со случайными свойствами, является теория цепей Маркова, базовые принципы которой использовались в работах В.Е. Мизонова, З. Бернотата, А. Бертъе и ряда других отечест-

венных и зарубежных исследователей. Предлагаемая модель кинетики фракционирования сыпучих материалов является дальнейшим развитием данного подхода, уточняющим описание процессов, происходящих на сите вращающегося барабанного грохота. Для доказательства адекватности предлагаемой модели реальному процессу было проведено расчетно-экспериментальное исследование закономерностей грохочения сыпучих материалов на лабораторной установке периодического действия, реализующей процессы фракционирования сыпучих материалов во вращающемся барабане. Осуществлялось фракционирование пробы гравийно-песчаной смеси, взятой на входе промышленного грохота. Результаты экспериментов позволили определить стохастические параметры модели для расчета режимов работы промышленного барабанного грохота и оптимизировать технологические параметры аппарата, обеспечивающие повышение качества продуктов классификации.

СЕКЦИЯ 25

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ

Председатель – д.т.н., проф. **Мизонов В.Е.**

Секретарь – доц. **Митрофанов А.В.**

*С.В. Жуков, студ.; А.Н. Росляков, асп.
рук. проф. В.П. Жуков, Е.В. Барочкин
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ФОРМИРОВАНИЕ МЕЖФАЗНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В БАРБОТИРУЕМОМ СЛОЕ

Интенсивность большинства процессов в слое барботируемой жидкости определяется площадью поверхности раздела фаз: чем больше эта площадь, тем интенсивней протекают процессы. Межфазная поверхность в слое может варьироваться за счет изменения размеров пузырьков, их гибели или рождения. Модели, описывающие эволюцию межфазной поверхности, позволяют ставить и решать задачи расчета и оптимального управления технологическими процессами в барботажных аппаратах, что является весьма актуальным для энергетики и смежных отраслей промышленности.

На первом этапе решения задачи [1] для расчетной схемы модели, представленной на рис.1, получена система дифференциальных уравнений относительно трех неизвестных функций ($x(t)$, $v(t)$, $T(t)$). Для численного решения система представляется в формализованном машинном виде: каждое уравнение разрешается относительно первых производных неизвестных функций, а правые части не содержат производных этих функций:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{dt} = v \\ \frac{dv}{dt} = -g - \frac{3}{8} \frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{г}}(x, T)} \frac{c_f}{r(x, T)} |v|v + \frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{г}}(x, T)} g, \\ \frac{dT}{dt} = \frac{3\alpha}{c_{\text{г}} r(x, T) \rho_{\text{г}}(x, T)} (T_{\text{ж}} - T) \end{array} \right.$$

где x – координата пузырька, v – скорость пузырька газа радиусом r ; T – температура газа; t – время, ρ_r и $\rho_{ж}$ – плотности газа и жидкости соответственно; $c_f = f(Re)$ – коэффициент сопротивления в функции от числа Рейнольдса, g – ускорение свободного падения, m – масса газа в пузырьке. Формализованная запись системы позволяет получить ее численное решение стандартными методами. В нашем случае для решения системы используется метод Рунге-Кутты четвертого порядка. Решение системы получено для следующих исходных данных: $\alpha=3000$ Вт/м²К, $r_0=0,005$ м; $\rho_{ж}=1000$ кг/м³; $h_0=1$ м; $c = 1918$ Дж/кгК; $T_{ж} = 373$ К; $T_r = 293$ К. Результаты решения найдены сначала в виде зависимостей искомых функций от времени процесса: $x(t)$, $v(t)$, $T(t)$. Анализ полученных зависимостей показывает, что для условий, характерных для атмосферных деаэраторов, температура газа и скорость пузырька практически мгновенно за время 10^{-3} и 10^{-4} с соответственно достигают установившихся значений.

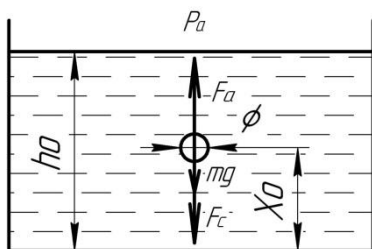


Рис.1 Резервуар с жидкостью и пузырьком с действующими на него силами

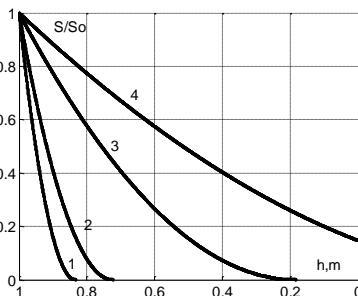


Рис.2. Зависимость относительной поверхности раздела фаз ансамбля пузырьков от глубины

погружения при разной температуре жидкости слоя: 1 - 95; 2 - 97; 3 - 99; 4 - 99,5 °С

Результаты расчетного анализа приведены на рис.2 в виде зависимости относительной площади межфазной поверхности от глубины погружения пузырьков при разных температурах барботируемой жидкости. Результаты анализа показывают, что при низких значениях температуры жидкости происходит схлопывание пузырьков внутри слоя жидкости. Для эффективной организации массообмена при деаэрации необходима температура воды более 99 °С.

Таким образом, проведенные предварительные расчетные исследования продемонстрировали работоспособность подхода для определения рабочих режимов барботажных аппаратов. Кроме этого,

разработанный подход позволяет ставить и решать задачи оптимального конструирования ступеней барботажных аппаратов.

Библиографический список

1. Балакирев И.А., Ненаездников А.Ю., Жуков В.П. Эволюция межфазной поверхности в барботируемом слое// Материалы 8-й международной НТК студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-13», т.4, Иваново, 25-25 апреля 2013г. т.4.-с.327-330.

*Ю.И. Бондаренко, А.Д. Лапин, студ.; Д.А. Уланов, асп.;
рук. В.П. Жуков, проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

**ЗАДАЧА ОПТИМАЛЬНОЙ ГЕНЕРАЦИИ И
ТРАНСПОРТА ТЕПЛОВОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ЭНЕРГИИ**

Цель исследования – постановка и решение задачи оптимальной выработки и передачи энергии в энергетической системе, обеспечивающие минимальные затраты топлива при заданных электрической и тепловой нагрузках потребителей.

Пусть тепловая и электрическая энергии генерируются n производителями (источниками), в качестве которых рассматриваются тепловые электрические станции или котельные. Тепловые и электрические сети заданной структуры обеспечивают передачу тепловой и электрической энергии m промышленным или бытовым потребителям (рис. 1).

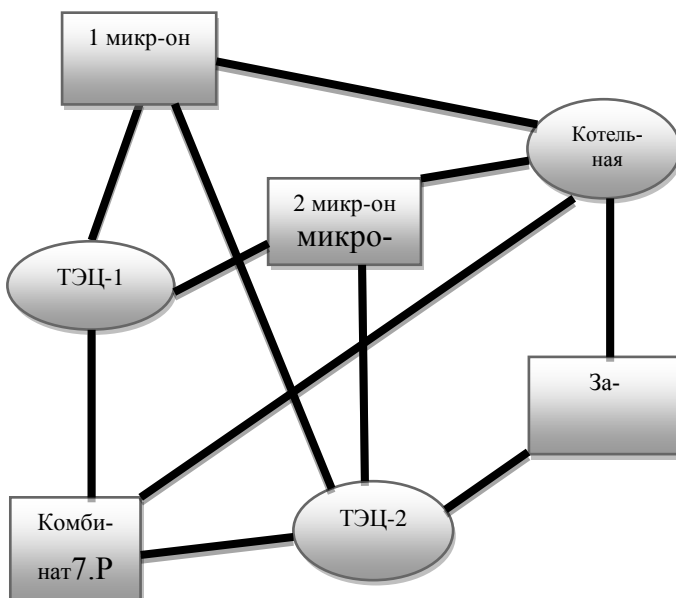


Рис. 1. Расчетная схема передачи энергии от источников к потребителям

Поток электрической энергии от i -го производителя к j -му потребителю обозначим через N_{ij} , поток тепловой энергии – Q_{ij} . Суммарные нагрузки каждого потребителя (N_j, Q_j) считаются заданными:

$$\sum_i N_{ij} = N_j, \quad \sum_i Q_{ij} = Q_j. \quad (1)$$

Удельные затраты на генерацию и транспорт электрической (c_{ij}^N) и тепловой (c_{ij}^Q) энергии от i -го производителя j -му потребителю определяются суммой затрат на генерацию и транспорт единицы энергии между указанными элементами системы. Верхний индекс в обозначениях соответствует потокам тепловой (Q) и электрической (N) энергии. В качестве целевой функции оптимизации выбирается сумма затрат, которая обеспечивает заданные нагрузки потребителей. В ходе решения задачи определяются параметры оптимизации, в качестве которых рассматриваются потоки тепловой Q_{ij} и электрической N_{ij} энергии. С учетом сделанных замечаний задача оптимальной генерации и транспорта энергии записывается в виде:

$$F = \sum_{i,j} (c_{ij}^N \cdot N_{ij} + c_{ij}^Q \cdot Q_{ij}) \rightarrow \min_{N_{ij}, Q_{ij}}, \quad (2)$$

$$\sum_i N_{ij} = N_j, \quad \sum_i Q_{ij} = Q_j.$$

Если удельные затраты (c_{ij}^N и c_{ij}^Q) по условиям задачи считаются постоянными величинами (укрупненная оценка структуры и режима работы энергетической системы), то задача (2) относится к классу задач линейного программирования, для решения которых существуют апробированные методы.

При генерации электрической энергии на ТЭЦ удельный расход тепловой энергии, расходуемый на выработку электрической энергии, существенно зависит от величин тепловой и электрической нагрузок турбоагрегата ($c_{ij}^N = f_i(N_i, Q_i)$), которые определяются суммой заре-

нее неизвестных величин $Q_i = \sum_j Q_{ij}$ и $N_i = \sum_j N_{ij}$. При такой постановке задача (2) относится к задачам нелинейного программирования. Для решения задачи (2) в нелинейных постановках ниже предлагается следующий подход.

При некоторых допущениях для нелинейной задачи (2) удастся получить аналитическое решение методом неопределенных множителей Лагранжа [1]. Пусть нагрузки агрегатов известны, а удельные затраты на генерацию и транспорт энергии представляются линейными зависимостями вида: $c_{ij}^N = a_{1ij}^N + a_{2ij}^N N_{ij}$ и $c_{ij}^Q = a_{1ij}^Q + a_{2ij}^Q Q_{ij}$. Коэффициент a_{1ij}^N определяется удельными затратами тепловой энергии на генерацию электрической энергии и находится по энергетическим характеристикам генерирующего оборудования $a_{1ij}^N = f(N_i, Q_i)$. Коэффициент a_{2ij}^N определяется конструктивными характеристиками линий электропередачи. Аналогичный смысл имеют коэффициенты a_{1ij}^Q , a_{2ij}^Q в выражении для удельных затрат топлива на генерацию и транспорт тепловой энергии от i -го производителя и j -му потребителю.

Отдельные потребители и производители могут иметь или не иметь связи между собой. Для указания существующих связей между элементами системы вводятся матрицы коммутации по тепловой (K^Q) и электрической (K^N) энергии размером $n \times m$ (n -число источников, m -число потребителей энергии), каждый элемент которой указывает на наличие ($k_{ij} = 1$) или отсутствие ($k_{ij} = 0$) связи между i -м источником и

j -м потребителем. Такой способ задания структуры транспортной сети позволяет описывать уже существующие связи и прогнозировать эффективность сооружения новых линий электропередач или трубопроводов тепловой сети.

В проведенных расчетных исследованиях проанализированы следующие варианты схем снабжения потребителей тепловой и электрической энергией. Первый вариант соответствует случаю, когда каждый источник соединен трубопроводом и линией электропередач с каждым потребителем. Котельные при этом могут поставлять потребителю только тепловую энергию, а ТЭЦ - тепловую и электрическую. В двух других проанализированных вариантах выборочно демонтируются «ненужные» теплотрассы по сравнению с исходным (первым) вариантом. В одном из этих вариантов демонтируется теплотрасса от ТЭЦ-1 к 1-му микрорайону, в другом – от ТЭЦ-2 к комбинату (рис. 1).

Удельные затраты тепловой энергии на выработку электрической энергии выбираются согласно общей тепловой и электрической нагрузке каждого агрегата по энергетическим характеристикам. Потери электрической энергии при передаче считаются одинаковыми для всех линий. Потери тепловой энергии на транспорт приняты равными 1% от передаваемого теплового потока на каждый километр трубопровода тепловой сети.

Проведенный расчетный анализ показал, что оптимальным вариантом снабжения тепловой и электрической энергией является первый вариант, поскольку он имеет наименьшую величину целевой функции.

Библиографический список

1. Жуков В.П. и др. Оптимальная генерация и транспорт энергии в тепловых и электрических сетях //Теплоэнергетика, 2011, №8, С.8-12.

*И.А. Балагуров, магистрант; рук. В.Е. Мизонов, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ СМЕШИВАНИЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ В СМЕСИТЕЛЕ С НЕЗАВИСИМЫМ ПРИВОДОМ

Процессы смешивания сыпучих материалов широко распространены в химической, фармацевтической, строительной, пищевой и других отраслях промышленности. Среди разнообразных смесителей непрерывного действия значительными преимуществами обладают лопасть-

ные смесители, где вращающиеся аксиальные лопасти осуществляют одновременно достаточно эффективное перемешивание компонентов в поперечном направлении и транспорт смеси в продольном направлении.

Целью данной работы является разработка простой, но информативной математической модели процессов смешивания сыпучих материалов в смесителе с независимым приводом^[1,2] (см. рис. 1).

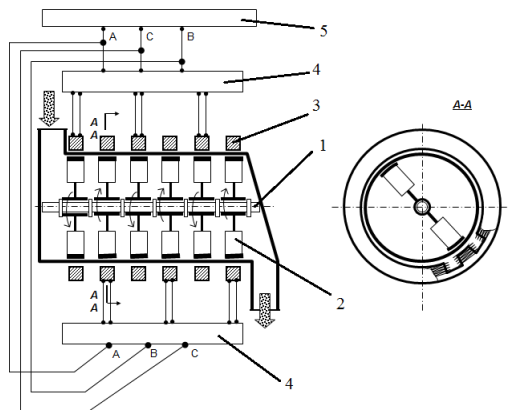


Рис. 1. Лопастной смеситель с независимым приводом: 1 – Ось, 2 – лопаточное колесо, 3 – индуктор, 4 – преобразователь частоты, 5 – источник 3х фазного напряжения.

Инструментом моделирования выбрана теория цепей Маркова для одномерной цепи ячеек, схематично показанной на рисунке 2. Текущее распределение содержания частиц по ячейкам описывается вектором столбцом S размером $(m+1) \times 1$, где $(m+1) \times 1$ ячейка зарезервирована как поглощающая, или ячейка вывода смеси.

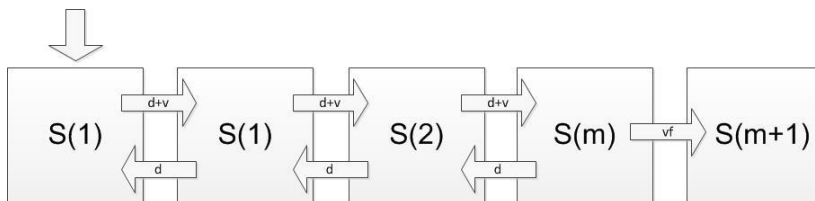


Рис.2. Структурная схема переходов между ячейками цепи.

Начальное распределение содержание частиц по ячейкам задается вектором столбцом S_0 . Обычно присваивается какое-либо значения ячейке с индексом (1,1).

Эволюция состояния процесса описывается рекуррентным матричным равенством:

$$S^{k+1} = P \cdot S^k \quad (1)$$

которое связывает состояния, разделенные малым промежутком времени Δt , где k – номер временного перехода, а P – матрица переходных вероятностей, являющаяся основным оператором модели.

Эта матрица имеет размер $(m+1) \times (m+1)$. Каждый ее столбец относится к определенной ячейке. В этом столбце в строках с номерами ячеек, куда возможен переход из данной ячейки, размещены вероятности этих переходов. Схематично набор переходов и их вероятностей показан на рисунке 1. Из ячейки возможны переходы с вероятностями d , относящиеся к чистой изотропной диффузии, и несимметричные переходы с вероятностью v , относящиеся в вынужденной диффузии частиц. Вынужденная диффузия – это как раз процесс транспортировки смеси из одной ячейки в другую под средством лопаток.

Элементы матрицы P рассчитываются по следующим отношениям:

вероятность перехода из одной ячейки в другую по направлению транспортировки – диффузия с параметром d плюс вынужденная диффузия с параметром v

$$P(i+1,i)=d+v, \quad i=1:m; \quad (2)$$

вероятность перехода из одной ячейки в другую против направления транспортировки – диффузия с параметром d

$$P(i,i+1)=d, \quad i=1:m; \quad (3)$$

вероятность перехода из предпоследней ячейки в последнюю, поглощающую – вынужденная диффузия с параметром vf

$$P(m,m+1)=0; \quad P(m+1,m)=vf; \quad (4)$$

вероятности остаться (главная диагональ матрицы)

$$P(i,i)=1-\text{sum}(P(:,i)), \quad i=1:m. \quad (5)$$

Учет скоростей вращения лопаток смесителя с независимым приводом выполняется подбором параметров v и v_f . Варьируя эти параметры можно добиться наилучшего качества перемешивания.

Библиографический список.

1. **Мизонов В.Е., Казаков Ю.Б., Шелатонова К.А., Балагуров И.А.** Патент RU №119642 от 07.03.2012 МПК В01F 13/08
2. **Балагуров И.А., Мизонов В.Е.** Новые подходы к организации механики перемешивания сыпучих материалов. Тезисы 8 международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Энергия – 2013»

*А.П. Океанский, А.В. Абросимов;
рук. А.В. Митрофанов, доц.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

**РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОГО
ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА
«ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ КОЛЬЦА НЬЮТОНА»**

Развитие информационных технологий делает возможным замену натурального эксперимента виртуальным. Надо признать, что в ряде случаев такая замена выглядит оправданной, так как виртуальный эксперимент оказывается наглядней, позволяет учащимся в более широком диапазоне изменять исходные данные, в реальном времени наблюдая за процессом.

Настоящая работа направлена на создание виртуального лабораторного стенда для изучения явления интерференции и определения с ее помощью длины волны. Интерференционный способ определения длины световой волны основан на измерении радиусов темных и светлых колец Ньютона.

Расположим на плоской стеклянной пластине выпуклой стороной вниз плосковыпуклую линзу с большим радиусом кривизны R . Сверху линзу осветим монохроматическим светом.

Луч света, пройдя сквозь линзу, через точку M частично переходит в воздушную полость между линзой и пластиной практически вертикально из-за большого радиуса кривизны линзы. Через воздушную полость луч доходит до точки F и отражается. Расстояние MF луч проходит дважды и в конце этого пути (точке M) интерферирует с отраженным на границе стекло-воздух светом. Схема этого процесса показана на рис. 1.

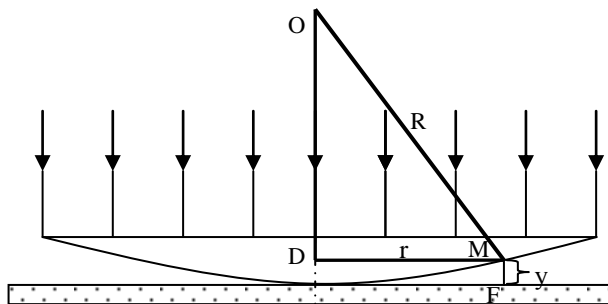


Рис. 1. Схема установки для наблюдения интерференционных колец Ньютона

Расстояние $MF=y$ связано с радиусом горизонтально расположенного интерференционного кольца r , содержащего точку M :

$$r^2 = R^2 - (R-y)^2 = (2R-y)y. \quad (1)$$

Так как $R \gg y$, то значением величины « y » в разности $(R-y)$ можно пренебречь, тогда

$$y = \frac{r^2}{2R}. \quad (2)$$

Геометрическая разность хода интерферирующих в точке M лучей составляет

$$\Delta d = \frac{r^2}{R}. \quad (3)$$

Отражение в точке F происходит от оптически более плотной среды и поэтому сопровождается обращением фазы колебаний на π . Учитывая это, для светлых колец Ньютона имеем

$$\frac{r^2}{R} = (2m-1) \frac{\lambda}{2}. \quad (4)$$

Тогда длину волны можно рассчитать как

$$\lambda = \frac{2r^2}{R(2m-1)}. \quad (5)$$

Аналогично для темных полос, имеем

$$\lambda = \frac{r^2}{Rm}. \quad (6)$$

Для того чтобы определить длину волны, необходимо измерить радиус m -го кольца. При построении программы проведем обратный расчет: считая, что нам известна длина волны и радиус кривизны линзы, найдем радиусы самих колец Ньютона. Рассмотрим темные кольца с номерами $m=1, 2, \dots, 5$.

Таким образом, необходимо выразить r из формулы (6) и организовать ввод λ и R . Для указанной вычислительной процедуры предложим пользовательский интерфейс (см. рис. 2).

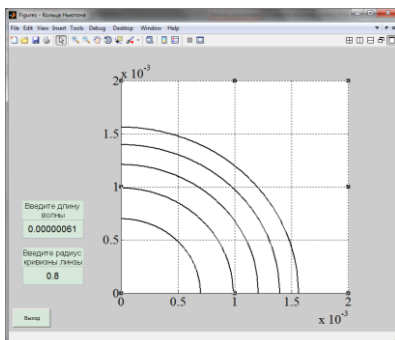


Рис. 2. Расчет величины колец Ньютона

Мы организовали ввод длины волны и радиуса кривизны пользователем, при этом не создали никаких специальных «кнопок» для запуска вычислений. После того, как пользователь введет значение длины волны, станет видимо окно «введите радиус кривизны линзы». А после того, как будет введено значение радиуса кривизны – будет выведен график.

Легко убедиться, что при значении длины волны $\lambda=610$ нм и радиусе кривизны линзы $R=0,8$ м, радиус, например, четвертого темного кольца Ньютона будет составлять $r=1,4 \cdot 10^{-3}$ м, что несложно проверить, воспользовавшись зависимостью (6).

Библиографический список

1. **Трофимова, Т.И.** Курс физики : учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. – изд. 9-е, перераб. и доп. – М. : Академия, 2004. – 560 с.
2. **Резников, Л.И.** Физическая оптика в средней школе. Пособие для учителей / Л.И. Резников. – М. : Просвещение, 1971. – 263 с.

*В.В. Костарев, асп., рук. В.Е. Мизонов, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

КОНВЕКТИВНЫЙ ВЛАГОПЕРЕНОС ПРИ НАМОТКЕ ТКАНИ НА РУЛОН

Рассматривается построение модели процесса, в котором материал наматывается слоями на бобину радиусом R_2 , а полный радиус рулона после окончания намотки равен R_1 . Считается, что конвективный влагоперенос полностью определяется действием центробежной силы инерции, а влияние силы тяжести пренебрежимо мало по сравнению с ней. Последнее позволяет свести задачу к осесимметричной и рассматривать процесс в угловом секторе с углом $\Delta\varphi$ при вершине. Полная ожидаемая толщина рулона разбита на m ячеек идеального перемешивания $\Delta r = (R_1 - R_2)/m$ со средними радиусами $r_j = R_2 + j\Delta r/2$. Состояние процесса фиксируется через малые промежутки времени Δt , то есть в дискретные моменты времени $t_k = (k-1)\Delta t$, где номер состояния k может рассматриваться как целочисленный аналог текущего времени. По мере протекания процесса в секторе в общем случае через разные промежутки времени появляется очередной слой наматываемого влажного материала, который обменивается влагой с предыдущими слоями и из которого возможен выход влаги в окружающую среду.

Для построения модели используется стратегия ячеечного моделирования. Расчетная схема процесса и структура ячейки показана на рис.1.

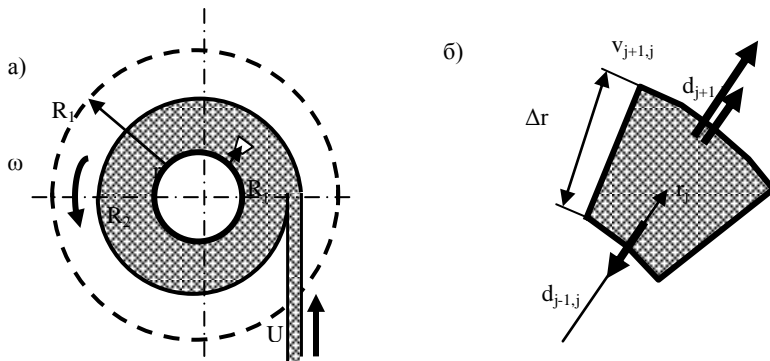


Рис. 1. Расчетная схема процесса (а) и структура элементарной ячейки (б)

Кинетика процесса описывается рекуррентным матричным равенством

$$\mathbf{M}^{k+1} = \mathbf{P}(k, \mathbf{S}^k) (\mathbf{S}^k + \mathbf{S}_{in}^k - \mathbf{S}_{out}^k), \quad (1)$$

где \mathbf{M}^k – текущий вектор распределения влаги по ячейкам, \mathbf{S}_{in}^k – вектор поступления влаги в цепь ячеек, вносимой с вновь появляющимися слоями, \mathbf{S}_{out}^k – вектор удаления влаги из периферийного слоя в окружающую среду, \mathbf{P} – матрица конвективной влагопроводности, зависящая как от номера временного перехода, так и от текущего распределения влаги по ячейкам (нелинейная модель). Эта матрица строится для всех ячеек полного рулона, но в процессе намотки открываются только те ячейки, которые в текущем состоянии уже намотаны на рулон. Периодичность открывания ячеек зависит от режима намотки, который может быть с постоянной угловой скоростью рулона или с постоянной линейной скоростью наматываемой ткани. В первом случае периодичность появления в цепи новых ячеек рассчитывается по формуле

$$K = \text{int} \left(\frac{2\pi}{\omega \Delta t} \right), \quad (2)$$

во втором – по формуле

$$K_j = \text{int} \left(\frac{2\pi r_j}{U \Delta t} \right) \quad (3)$$

и представляет собой линейно возрастающую последовательность.

В модели предусмотрен выход влаги через периферийные ячейки как в процессе намотки, так и после ее окончания.

На рис.2 показан пример эволюции распределения содержания влаги в материале, состоящем из 15 слоев при $R_1=0,5$ м и $R_2=0,1$ м. Относительное содержание влаги в исходном материале (по отношению к максимально возможному) принято равным 0,7. Приведены результаты расчетов для двух вариантов намотки: с постоянной угловой скоростью 1 с^{-1} (а) и с постоянной скоростью движения материала $0,3\text{ м/с}$ (б). Эти параметры подобраны таким образом, чтобы полное время намотки рулона было одинаковым (94 с). Считается, что после окончания намотки рулон продолжает вращаться с такой же угловой скоростью, как при ее завершении. Кинетика процесса при $\omega=\text{const}$ отличается от таковой при $U=\text{const}$. В первом случае центробежная сила инерции линейно возрастает с радиусом, влага быстрее движется к периферии, освобождая место для влаги, поступающей из более близких к оси вращения ячеек. Во втором случае угловая скорость должна уменьшаться по мере намотки материала (в рассматриваемом примере от $2,65\text{ с}^{-1}$ в начале намотки до $0,67\text{ с}^{-1}$ в ее конце), что приводит к более медленному конвективному переносу влаги при больших радиусах, то есть более равномерному распределению влаги по радиусу рулона.

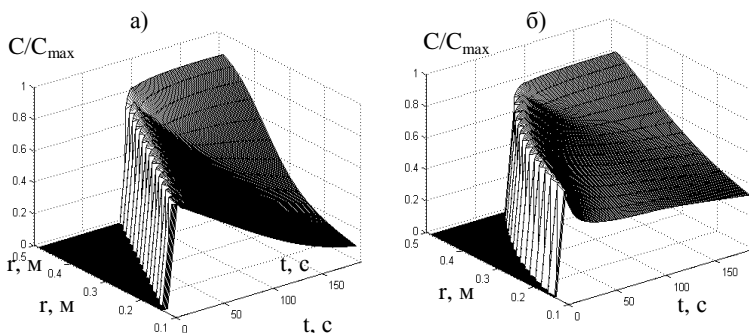


Рис.2. Эволюция распределения содержания влаги при режиме намотки $\omega=\text{const}$ (а) и $U=\text{const}$ (б)

Таким образом, предложенная модель оценивать влажностное состояние рулона, как в процессе его намотки, так и после ее завершения и выбирать режимы намотки, благоприятные для предыдущих и последующих технологических операций.

*А.С. Чернявская, аспирант; рук. С.П. Бобков, проф.
(ИГХТУ, г. Иваново)*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ДВИЖУЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ

Среди процессов теплопереноса в движущейся жидкости можно выделить макропроцессы - перемещение тепловой энергии как следствие перемещения массы, и микропроцессы – тепловую диффузию между частицами жидкости, а также между жидкостью и стенками сосуда, в котором она находится.

Очевидно, что моделирование макропроцессов неразрывно связано с моделированием движения жидкости. Одним из методов, позволяющих успешно моделировать течение жидкости, является метод решетчатого газа Больцмана.

В модели LBM плоская сплошная среда разбивается на малые объемы-ячейки жидкости (газа). Количество материальных частиц в каждой ячейке характеризуется локальной плотностью ρ . Для каждой ячейки предусмотрено наличие девяти направлений (скоростных каналов), по которым могут двигаться частицы. Это сама клетка и восемь ее соседей. Такая решетка получила название D2Q9 (2 измерения, 9 соседей)[1].

Векторы c_i имеют единичную длину и задают следующие направления скоростных каналов:

$$c_0=(0;0); c_{1,3}=(\pm 1;0); c_{2,4}=(0;\pm 1); c_{5,6,7,8}=(\pm 1;\pm 1). \quad (1)$$

Количество частиц, движущихся по каждому из скоростных каналов i , характеризуется плотностью распределения частиц по скоростным каналам $f_i(r,t)$, где r и t – координаты ячейки потока в пространстве и времени соответственно. Локальная плотность потока для ячейки в целом вычисляется как сумма значений плотности распределения по всем скоростным каналам:

$$\rho = \sum f_i(r,t). \quad (2)$$

Сумма произведений плотности распределения потока на векторы скоростных каналов составляет плотность импульса. Разделив плотность импульса на плотность частиц, мы получим вектор локальной скорости для ячейки потока:

$$v = \frac{1}{\rho} \sum c_i f_i(r,t). \quad (3)$$

Итерацию клеточного автомата, функционирующего по методу ре-

шотчатого газа Больцмана, можно записать следующим образом:

$$f_i(r+c_i, t+1) - f_i(r, t) = \Omega_i(f), \quad (4)$$

где $\Omega_i(f)$ - оператор столкновений.

Выражение (4) является дискретным аналогом известного из статистической физики уравнения Больцмана.

Физический смысл оператора столкновений можно трактовать, как релаксацию плотностей распределения к равновесному состоянию. Поэтому он вычисляется следующим образом:

$$\Omega_i(f) = \frac{-1}{\tau} (f_i(r, t) - f_i^{eq}(r, t)), \quad (5)$$

где τ - время релаксации, которое связано с вязкостью жидкости ν следующей формулой:

$$\nu = \frac{(\tau - 0,5)}{3}. \quad (6)$$

Функция f_i^{eq} обозначает равновесное распределение частиц по скоростным каналам и зависит от локальной скорости и плотности среды. Для решетки 2D9Q ее можно вычислить по следующей формуле:

$$f_i^{eq} = W_i \rho \left(1 + 3c_i v + \frac{9}{2} (c_i v)^2 - \frac{3}{2} v^2 \right). \quad (7)$$

Коэффициенты W_i выбираются исходя из распределения Максвелла таким образом, чтобы получаемые моменты импульса соответствовали моментам импульса по распределению Максвелла-Больцмана вплоть до четвертого порядка. Они равняются следующим величинам:

$$W_0 = \frac{4}{9}, \quad W_{1,2,3,4} = \frac{1}{9}, \quad W_{5,6,7,8} = \frac{1}{36}. \quad (8)$$

Пусть каждая ячейка жидкости характеризуется количеством теплоты Q , причем данное количество теплоты распределено по скоростным каналам i . Таким образом, частицы каждого скоростного канала, перемещаясь, будут переносить некоторое количество теплоты q_i , осуществляя тем самым макропроцесс теплопереноса.

Чтобы учесть микропроцессы теплообмена между частицами внутри ячейки, введем оператор теплообмена

$$\Lambda_i(f) = \frac{-1}{\tau_q} (q_i(r, t) - q_i^{eq}(r, t)), \quad (9)$$

где q^{eq} – плотность равновесного распределения количества теплоты по скоростным каналам, τ_q - температурное время релаксации.

По своему смыслу данный оператор аналогичен оператору столкновений и описывает релаксацию плотности распределения количества теплоты к равновесному состоянию.

Для выбранной нами модели движения плотность равновесного распределения будет рассчитываться следующим образом:

$$q_i^{eq} = W_i Q (1 + 3c_i v), \quad (10)$$

где u – вектор скорости для данной ячейки, c_i – единичный вектор, задающий направление скоростного канала, W_i - коэффициент, принимающий значения (8).

Температурное время релаксации связано с теплопроводностью жидкости по следующей формуле:

$$\lambda = \frac{(\tau_q - 0,5)}{3}.$$

То есть для процессов передачи тепла теплопроводность выполняет те же функции, что и вязкость в процессах переноса массы.[2].

Что касается процессов теплообмена между частицами потока и стенкой, то он также будет описываться оператором теплообмена, однако в данном случае температурное время релаксации будет определяться теплопроводностью материала твердой стенки.

Таким образом, моделирование процессов теплопереноса с использованием данной модели сводится к следующим шагам:

- 1) вычисление перераспределение частиц по скоростным каналам на основании оператора столкновений;
- 2) вычисление перераспределения количества теплоты внутри ячейки на основании оператора теплообмена;
- 3) перенос тепла частицами между ячейками.

Библиографический список

1. **Dieter A. Wolf-Gladrow.** Lattice-Gas Cellular Automata and Lattice Boltzmann Models: An Introduction / Editors: A. Dold, Heidelberg, F. Takens, Groningen, B. Teissier, Paris. Lecture Notes in Mathematics. Berlin: Springer-Verlag, 2000, 1725. – 2005.
2. **Ehsan Fattahi, Mousa Farhadi, Kurosh Sedighi, Hasan Nemat.** Lattice Boltzmann simulation of natural convection heat transfer in nanofluids / International Journal of Thermal Sciences 52 (2012) - 137 – 144.

*И.В. Полищук, аспирант; рук. С.П. Бобков, проф.
(ИГХТУ, г. Иваново)*

МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕТОДОМ ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Среди численных методов моделирования получил большое распространение метод дискретных элементов. Его особенность состоит в том, что он позволяет выполнять интерактивные деформации и обрабатывать довольно сложные взаимодействия, используя всего несколько уравнений. Задача моделирования с использованием метода дискретных элементов сводится к вычислению силы, действующая на каждый элемент со стороны его соседей, а затем в соответствии со вторым закон Ньютона, вычисления нового положения элементов.

Рассмотрим процесс упругого деформирования изотропного по материалу твердого тела в двухмерной постановке. Представим твердое тело как совокупность элементов, в которых сосредоточена вся масса моделируемого тела, соединенных друг с другом посредством пружин.

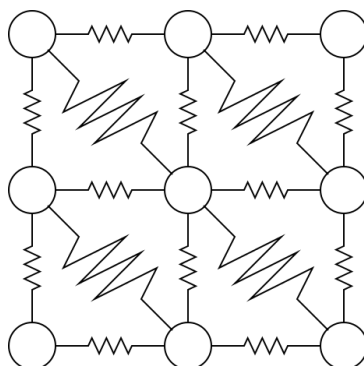


Рис. 1. Схема дискретной модели двухмерного тела.

Проанализируем отдельно взятую пару взаимодействующих элементов:

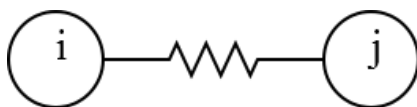


Рис. 2. Изолированная пара элементов.

Так как элементы связаны друг с другом посредством невесомой упругой пружины, подчиняющейся закону Гука, то результирующую силу пружины, можно рассчитать следующим образом:

$$F_{ij} = K \frac{h_{ij} - h_{ij}^0}{h_{ij}^0} \quad (1)$$

где K описывает жесткость пружины, h_{ij} – расстояние между двумя соединенными элементами p_i и p_j ; h_{ij}^0 – длина пружины между элементами в ее начальной, не напряженной конфигурации.

Поскольку силы, действующие на элемент p_i со стороны ее соседей, должны быть в балансе с внешними силами F_{ext} (гравитация, реакции опоры и т.д.), то получаем уравнение движения произвольного элемента:

$$m_i a_i + \sum_{n \in N} F_n = F_{ext} \quad (2)$$

где m_i – масса элемента p_i ; a_i – ускорение элемента p_i ; N – количество элементов связанных с элементом p_i посредством пружин. Для вычисления, обновленного положения элементов воспользуемся методом численного интегрирования Верле.

Применив метод Верле, новое положение элемента, можно вычислить как:

$$x(t + dt) = 2x(t) - x(t - dt) + \frac{F_{tot}(t)}{m} dt^2 \quad (3)$$

где общее результирующая сила F_{tot} определяется как:

$$F_{tot} = F_{ext} - \sum_{n \in N} F_n \quad (4)$$

Разбивая тело на клетки необходимо учитывать, что скорость распространения возмущения в твердом теле ограничена скоростью звука в нем. Таким образом, расстояние между центрами масс соседних клеток в ненапряженном состоянии определяется из соотношения:

$$h = C \Delta t \quad (5)$$

где h – расстояние между соседними клетками в ненапряженном

состоянии, C – скорость звука в теле, Δt – временной шаг модели.

Адекватность полученной модели была проверена численными экспериментами. Ниже представлены результаты моделирования упругой деформации в плоском теле прямоугольной формы с дефектом, в результате падения с высоты на неподвижную платформу. При моделировании были приняты следующие основные параметры: размер пластины $0,03 \times 0,05$ м; количество элементов 77; масса элемента $0,025$ кг; коэффициент упругости $50 \cdot 10^3$ Н/м; шаг по времени $0,1 \cdot 10^{-3}$ с; ускорение падения $9,81$ м/с².

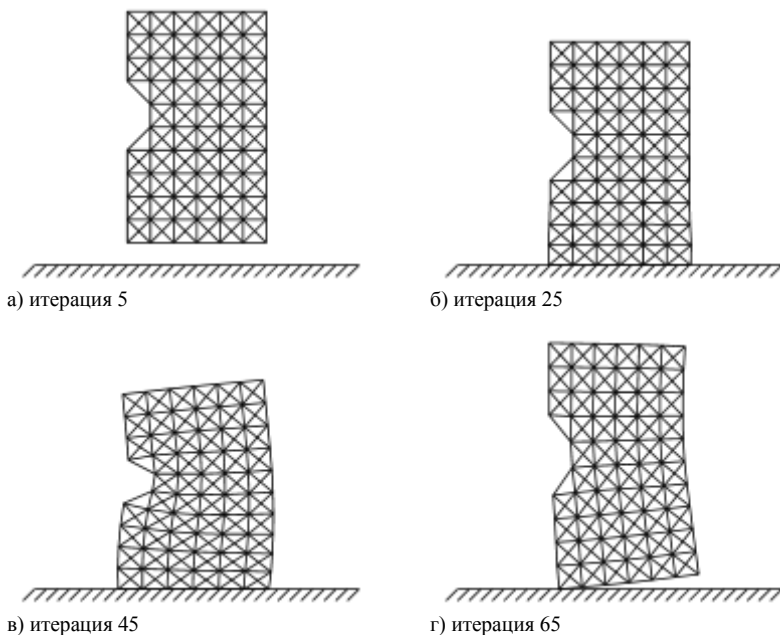


Рис. 3. Иллюстрация реализации численного моделирования.

На представленном рисунке показано, как моделируемое тело деформируется после удара.

Использование предложенного подхода позволяет исследовать напряженное состояние тел при динамическом воздействии, процессы распространения упругих волн и разрушения, не прибегая к физическим экспериментам.

*К.В. Пискарев, С.А. Маянцев, М.В. Сахаров, студ.;
рук. В.Е. Мизонов, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРОСТЕЙШЕЙ ВИБРОУДАРНОЙ СИСТЕМЫ

Рассматривается задача о моделировании динамики простейшей виброударной системы, схематично показанной на рис.1. Движение тела ограничено расположенными слева и справа отбойниками, взаимодействие с которыми описывается соотношениями идеально упругого или неупругого удара.

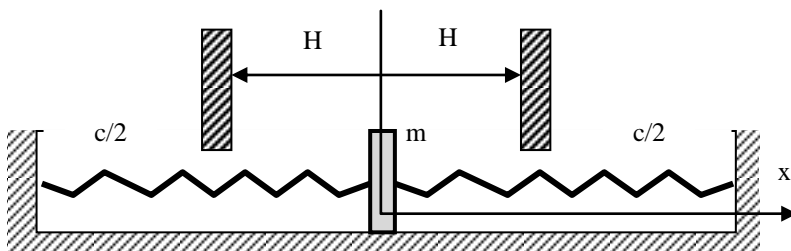


Рис.1. Расчетная схема виброударной системы

Уравнения движения тела имеют вид:

$$m \frac{dv}{dt} = -cx - k_d v, \quad (1)$$

$$\frac{dx}{dt} = v \quad (2)$$

и сопровождаются начальными условиями $v(0)=v_0$, $x(0)=0$ и соотношениями удара об отбойники:

$$\text{если } x > H, \text{ то } x=H \text{ и } v = -v(H)k_r, \quad (3)$$

где k_d – коэффициент линейного сопротивления, k_r – коэффициент восстановления скорости при ударе.

Система уравнений (1),(2) с начальными условиями и соотношениями удара (3) решалась численно. На рис.2 показаны некоторые ре-

зультаты численных экспериментов с моделью. Расчеты выполнены для $c=1\text{Н/м}$, $m=1\text{кг}$, $H=1\text{м}$, $v_0=2\text{м/с}$.

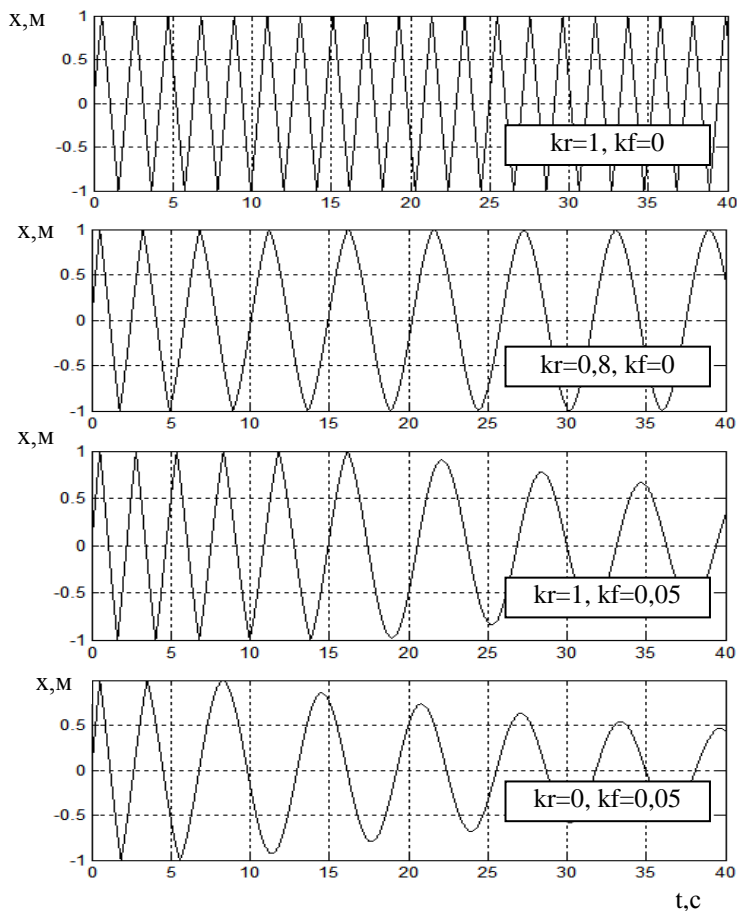


Рис.2. Графики колебаний при различных параметрах системы

На верхнем графике показан закон движения тела при отсутствии какой-либо диссипации, когда $k_r=1$, $k_f=0$. Линии имеют излом в точке удара, но не являются прямыми, как это может показаться: это начальные участки синусоид, соответствующие движению тела между отбойниками. Ниже показан закон движения при неидеальном ударе, ко-

гда $k_f=0,8$, $k_r=0$. Скорость тела уменьшается при ударе, и когда амплитуда свободных колебаний убывает до H , появляются стационарные синусоидальные колебания. Еще ниже рассмотрен случай, когда удар идеальный, но присутствует линейное сопротивление ($k_r=1$, $k_f=0,02$). Некоторое время амплитуда остается равной H , а затем тело перестанет взаимодействовать с отбойниками и дальше идут обычные затухающие колебания. Самый нижний график соответствует наличию обоих факторов, вызывающих диссипацию энергии. Здесь переход от ударных к обычным затухающим колебаниям, естественно, происходит быстрее. Таким образом, на простейшей модели виброударной системы можно исследовать влияние вызывающих диссипацию факторов.

*А.А. Каржевин, А.О. Кулагин, В.В. Цветков, студ.;
рук. В.Е. Мизонов, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

НЕКОТОРЫЕ ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ ЦЕПИ МАРКОВА

Моделирование некоторых процессов линейной цепью Маркова с постоянной матрицей переходных вероятностей может приводить к неустранимым физическим противоречиям. В частности, это относится к моделированию смешивания сегрегирующих компонентов, когда переходные вероятности наряду с чисто стохастическими симметричными вероятностями переходов содержат конвективные составляющие в направлении сегрегации. Кинетика процесса всегда описывается рекуррентным матричным равенством

$$\mathbf{S}^{k+1} = \mathbf{P}\mathbf{S}^k, \quad (1)$$

где \mathbf{S} – текущий вектор состояния, \mathbf{P} – матрица переходных вероятностей, k – номер временного перехода. Матрица \mathbf{P} имеет следующий вид (пример для цепи из четырех ячеек)

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1-d-v & d & 0 & 0 \\ d+v & 1-2d-v & d & 0 \\ 0 & d+v & 1-2d-v & d \\ 0 & 0 & d+v & 1-d \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где d – вероятность чисто стохастического симметричного переноса

са, а v – вероятность конвективного переноса.

Пусть первоначально сегрегирующим компонентом полностью заполнена первая ячейка. Тогда при $d=0$ этот компонент асимптотически будет полностью перенесен в последнюю ячейку, что не противоречит, на первый взгляд, физике процесса. Однако, если этот компонент первоначально занимает две верхние ячейки, матрица (2) все равно асимптотически перенесет материал в одну нижнюю ячейку, чего уже не может быть.

Это противоречие может быть устранено, если предположить, что вероятность конвективного переноса в ячейку зависит от уже наличного в ней сегрегирующего компонента, причем при его отсутствии $v=v_0$ и максимальна, а при полностью заполненной ячейке $v=0$, то есть конвективный переход в нее невозможен. Иначе говоря, следует положить $v=f(S_{j+1}^k)v_0$, где f должна удовлетворять описанным выше условиям. Если считать, что полное заполнение ячейки соответствует $S=1$, то можно описать f степенной функцией $f=(1 - S_{j+1}^k)^z$. Расчетная схема вероятностей выходов из ячейки и характер функции f для трех значений z показаны на рис. 1

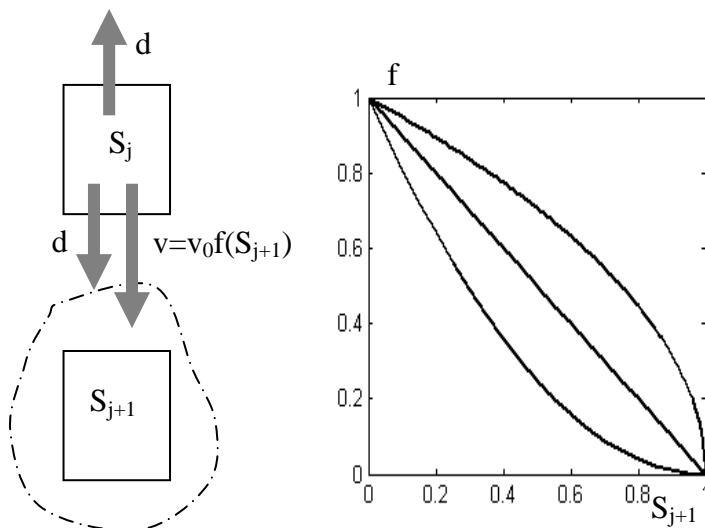


Рис. 1. Расчетная схема вероятностей выходов из ячейки и характер функции f для трех значений z

При этих гипотезах матрица (2) приобретает вид

$$P = \begin{bmatrix} 1-d-v_0(1-S_2^k)^z & d & 0 & 0 \\ d+v_0(1-S_2^k)^z & 1-d-2v_0(1-S_3^k)^z & d & 0 \\ 0 & d+v_0(1-S_3^k)^z & 1-2d-v_0(1-S_4^k)^z & d \\ 0 & 0 & d+v_0(1-S_4^k)^z & 1-d \end{bmatrix}, \quad (3)$$

то есть становится зависящей от текущего вектора состояния, а цепь становится нелинейной.

Если цепь относится к модели процесса смешивания сегрегирующих компонентов, то объектом моделирования является эволюция однородности смеси, которая может быть охарактеризована среднеквадратичным отклонением распределением содержания сегрегирующего компонента. Результаты расчетного исследования кинетики формирования качества смеси показаны на рис.2.

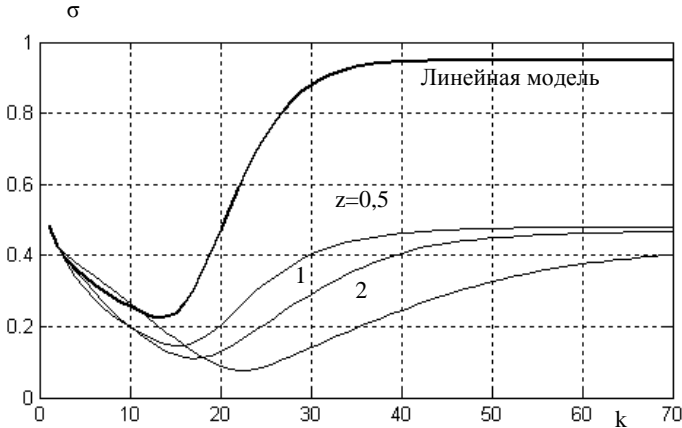


Рис.2. Кинетика формирования качества смеси при линейной модели и при нелинейной для трех значений z

Нелинейная модель дает существенные отличия от линейной модели, не противоречащие физике процесса. Внутри нелинейной модели уже меньшее, но все-таки заметное влияние оказывает принятый вид нелинейности. Именно раскрытие этого вида является задачей экспериментальной идентификации модели, однако это выходит за рамки настоящей работы, в которой предполагалось только разработать математический инструмент для учета нелинейности процесса.

*А.А. Уланов, С.С. Брыксин, А.В. Балакирев, студ.;
рук. В.Е. Мизонов, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

МАРКОВСКАЯ ЦЕПЬ С БЛУЖДАЮЩИМ ПОГЛОЩАЮЩИМ СОСТОЯНИЕМ

Рассматривается обобщение классической задачи о пьяном матросе на следующий случай. Пусть в процессе случайных блужданий матроса от стойки бара до выходной двери в какой-то промежуточной ячейке периодически с периодом K временных переходов в полу открывается люк, в который матрос проваливается, если в данный момент находится в этой ячейке. Требуется оценить вероятность матроса оказаться за дверью или в люке после определенного числа шагов (временных переходов) от стойки бара. Несмотря на экзотичность формулировки модели, она является аналогом моделирования ряда технологических процессов. Расчетная схема цепи (пример для пяти состояний внутри бара) показана на рис. 1.

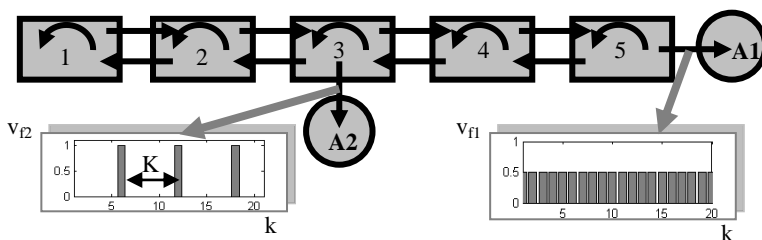


Рис. 1. Расчетная схема исследуемой цепи

В цепи появилось две поглощающих ячейки: одна за дверью бара ($A1$) и другая под люком ($A2$). Для моделирования процесса используем матрицу для эргодической цепи (для состояний внутри бара), а выход из цепи опишем функциями источников. В соответствии с правилами игры о пьяном матросе матрица переходных вероятностей для соответствующей эргодической цепи (ячейки 1 – 5) имеет вид

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1-d & d & 0 & 0 & 0 \\ d & 1-2d & d & 0 & 0 \\ 0 & d & 1-2d & d & 0 \\ 0 & 0 & d & 1-2d & d \\ 0 & 0 & 0 & d & 1-2d \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $d=0,5$, а эволюция состояния описывается рекуррентным матричным равенством

$$S^{k+1}=PS^k, \tag{2}$$

где k – номер временного перехода (номер шага матрицы).

После каждого временного перехода происходит «извлечение» вероятности из цепи:

из ячейки 5 в A1: $q_{A1}(k+1)=S_5^{k+1}d$ - на каждом переходе;

из ячейки 3 в A2: $q_{A2}(k+1)=S_3^{k+1}1$ - на переходе с номером, кратным K .

Соответственно, $S_5^{k+1}:=S_5^{k+1}-q_{A1}(k+1)$ при любом k и $S_3^{k+1}=0$ при k кратном K . Вероятность оказаться в той или иной поглощающей ячейке оценивается как кумулятивная сумма величин q .

На рис.2 показаны примеры моделирования процесса, суть которых видна из комментариев к графикам.

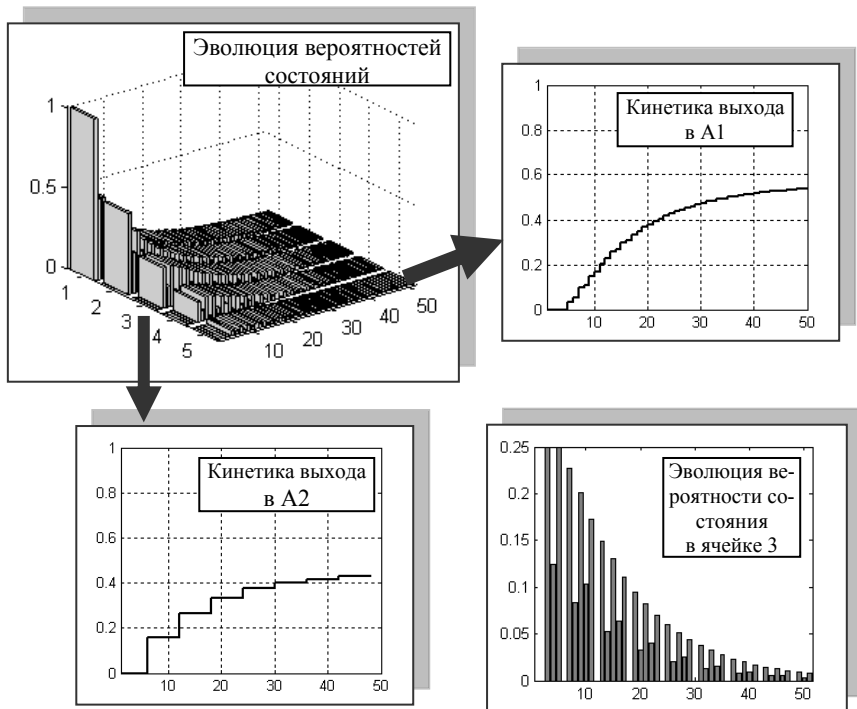


Рис.2. Некоторые результаты численных экспериментов с моделью

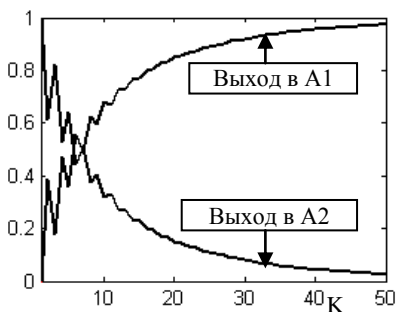


Рис.3 Влияние периода открывания ячейки 3 на полный выход в поглощающие ячейки

На рис.3 показано влияние периода открывания люка K на полный выход в ту или иную поглощающую ячейку. Очевидно, что с ростом K вероятность матроса достичь выходной двери увеличивается (в пределе стремится к единице), а провалиться в люк — уменьшается (в пределе стремится к нулю).

Таким образом, построена и численно исследована модель цепи Маркова с двумя поглощающими ячейками, одна из которых работает в периодическом режиме.

*А.В. Казаков, Д. А. Белков, студ.;
рук. В.Е. Мизонов, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА В ЦЕПИ МАРКОВА С НЕСТАЦИОНАРНЫМ ВЫХОДОМ В ПОГЛОЩАЮЩЕЕ СОСТОЯНИЕ

В классической задаче о пьяном матросе вероятность выхода матроса за дверь бара считается такой же, как и сделать шаг вправо из текущей ячейки. Рассмотрим модель цепи, в которой вероятность выхода в поглощающую ячейку является не стационарной и меняется, например, по синусоидальному закону от нуля до единицы. Расчетная схема цепи с пятью состояниями внутри бара показана на рис. 1.

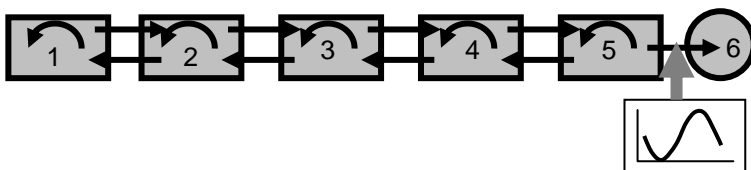


Рис.1. Расчетная схема моделируемой цепи

Эволюция состояния описывается рекуррентным матричным ра-

венством

$$\mathbf{S}^{k+1} = \mathbf{P}\mathbf{S}^k, \quad (1)$$

где k – номер временного перехода (номер шага матроса), \mathbf{S} – текущий вектор состояния – распределение вероятностей состояния по ячейкам цепи, \mathbf{P} – матрица переходных вероятностей. Для моделирования процесса используем матрицу для эргодической цепи (для состояний внутри бара), а выход из цепи опишем функциями источников. В соответствие с правилами игры о пьяном матросе матрица переходных вероятностей для соответствующей эргодической цепи (ячейки 1 – 5) имеет вид

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1-d & d & 0 & 0 & 0 \\ d & 1-2d & d & 0 & 0 \\ 0 & d & 1-2d & d & 0 \\ 0 & 0 & d & 1-2d & d \\ 0 & 0 & 0 & d & 1-2d \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $d=0,5$ – симметричная вероятность сделать шаг из ячейки вправо или влево.

$$\mathbf{S}^{k+1} = \mathbf{P}\mathbf{S}^k, \quad (3)$$

где k – номер временного перехода (номер шага матроса).

«Выход» вероятности из последней ячейки цепи на каждом временном переходе опишем функцией стоков следующим образом:

$$q(k+1) = S_5^{k+1} p_{65}(k), \quad (4)$$

где $p_{65}(k)$ – переменная вероятность выхода в поглощающую ячейку, подчиняющаяся в нашем случае синусоидальному закону

$$p_{65}(k) = 0,5(1 + \sin(2\pi k/K)), \quad (5)$$

По окончании временного перехода вероятность состояния в последней ячейке перед поглощающей рассчитывается как

$$S_5^{k+1} := S_5^{k+1}(1 - q(k+1)). \quad (6)$$

Функция $q(k)$ называется дифференциальной кривой выхода в поглощающую ячейку, или распределением времени пребывания. Собственно вероятность выхода после k переходов рассчитывается как кумулятивная сумма величин $q(k)$:

$$Q(k) = \sum_1^k q(k). \quad (7)$$

Некоторые результаты численных экспериментов с моделью показаны на рис.2, где приведены дифференциальная и интегральная (кумулятивная) гистограммы вероятностей выхода.

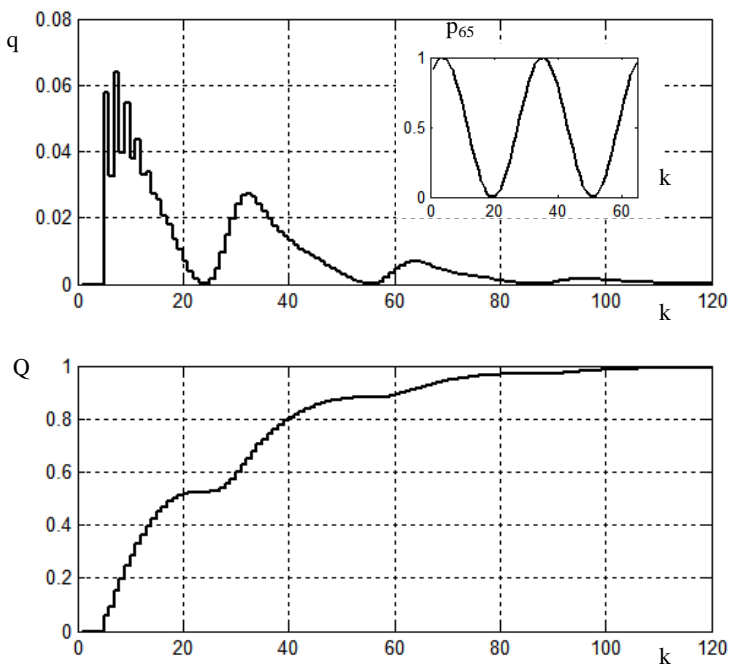


Рис.2. Расчетная схема моделируемой цепи

Обе кривые вполне соответствуют физической сущности процесса: дифференциальная кривая носит волнообразный характер с периодом, совпадающим с периодом вероятности выхода, а на кумулятивной кривой в соответствующих местах (при вероятности выхода, равной нулю) наблюдаются точки перегиба.

*А.В. Абросимов, А.С. Метлов, С.А. Степанов, студ.;
рук. В.Е. Мизонов, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)*

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДВИЖЕНИЯ ТОЧКИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СЛУЧАЙНОЙ СИЛЫ

Рассмотрим движение материальной точки массой m вдоль оси Ox под действием случайной силы с нулевым математическим ожиданием, распределение которой подчинено нормальному закону. Уравнения движения точки в простейшей разностной форме имеют следующий вид

$$v(i+1)=v(i)+F_0\text{randn}(i)\Delta t/m, \quad (1)$$

$$x(i+1)=x(i)+v(i)\Delta t, \quad (2)$$

где Δt – шаг численного интегрирования, $F_0\text{randn}(i)$ – случайная сила, подчиненная нормальному закону распределения и генерируемая в среде MATLAB оператором `randn`. Моменты ее появления могут совпадать с шагом интегрирования, но она может и появляться через K шагов. Величина $F_0\text{randn}(i)\Delta t$ является импульсом этой силы на i -м временном шаге.

На рис.1 показаны три индивидуальных реализации процесса при периоде случайной силы $K=1$. Из графиков видно, что эти реализации существенно отличаются друг от друга, так как идет случайный процесс. Поэтому для накопления статистики нужно большое количество испытаний.

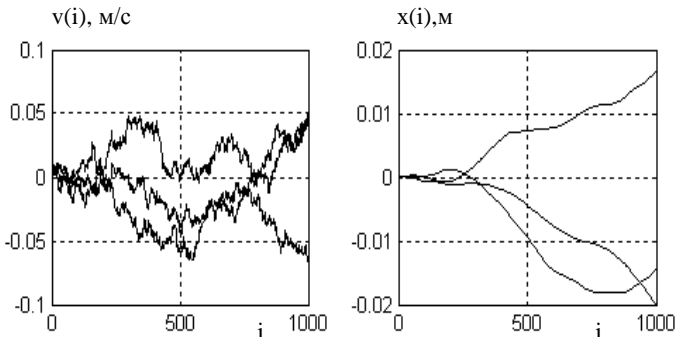


Рис.1. Три индивидуальных реализации закона движе-
На рис.2 показано смещение точки $x(1000)$ после 1000 шагов в 1500

испытаниях. Из графика видно, что точки более густо группируются около нулевого смещения, то есть его математическое ожидание стремится к нулю. Для оценки распределения смещений по испытаниям, на этом рисунке мысленно проведены полосы, соответствующие определенным интервалам смещения, рассчитано количество точек, принадлежащих каждой полосе, и поделено на число испытаний. Получившееся распределение показано на рис.3, из которого видно, что оно близко к нормальному.

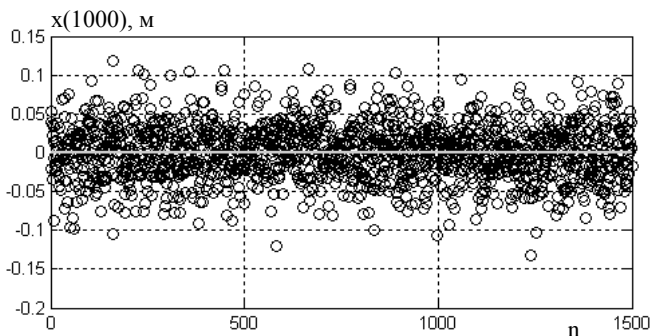


Рис.2. Величина конечного смещения точки в 1500 индивидуальных реализациях процесса

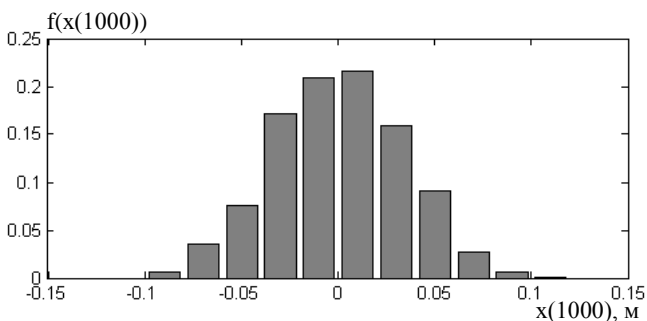


Рис.3. Распределение конечных смещений точки по испытаниям

На рис.4 на примере индивидуальной реализации показано, как влияет период приложения случайной силы на характеристики движения: левый столбец графиков относится к периоду $K=1$ (случайная сила прикладывается на каждом временном шаге); справа – к периоду $K=20$, когда сила прикладывается поле каждых девятнадцати шагов, в течение которых точка движется по инерции. Видно, что с ростом периода

разброс кинематических характеристик движения резко уменьшается.

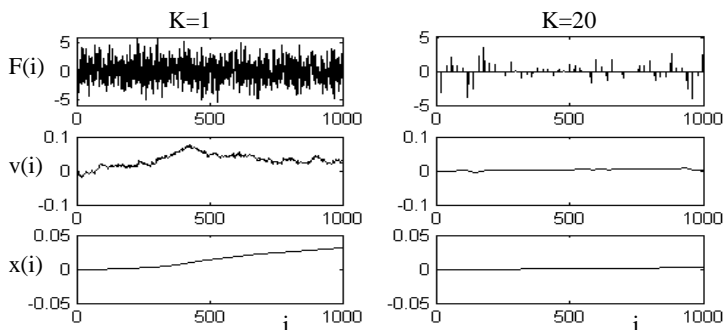


Рис.4. Индивидуальные реализации процесса при двух периодах случайной силы

Разработанная модель позволяет оценивать распределение положения точки в различные моменты времени и строить облако вероятностей ее нахождения, однако эта задача выходит за рамки настоящей работы.

А.П. Океанский, А.В. Белоусова, А.А. Симакова, студ.;
рук. В.Е. Мизонов, д.т.н., проф.
(ИГЭУ, г. Иваново)

БРАХИСТОХРОНА: ВЛИЯНИЕ РЕДКО УЧИТЫВАЕМЫХ ФАКТОРОВ

Задача о кривой наискорейшего спуска (брахистохроне) является одной из задач, с которых началось вариационное исчисление. В ней отыскивается форма кривой, по которой материальная точка *без начальной скорости, вязкого сопротивления и сухого трения* соскользнет с более высокого уровня на более низкий за минимальное время. Она сводится к минимизации функционала

$$t = \int_0^1 \frac{\sqrt{1+y'^2}}{\sqrt{2g(h-y)}} dx, \quad (1)$$

где (0,h) и (1,0) – зафиксированные начальная и конечная точки кривой. Она имеет аналитическое решение [1], которое, однако, не-

возможно, если учитывать сопротивление движению точки. Расчетная схема сил, действующих на точку при ее скольжении по кривой, с учетом диссипативных сил показана на рис.1.

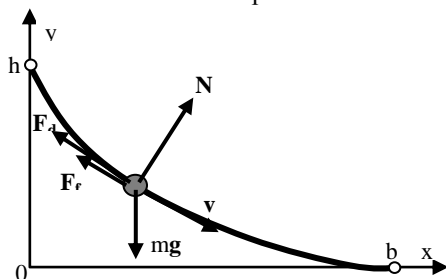


Рис.1. Схема сил, действующих на точку

Ниже предлагается численное решение этой задачи методом Рунге на классе парабол $y(x)=ax^2+bx+c$, где постоянные b и c определяются из координат крайних точек, а параметр a является свободным параметром оптимизации.

Численная процедура состоит из следующих равенств:

- длина отрезка кривой

$$\Delta l_i = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y_i^2}; \quad (2)$$

- скорость после его прохождения (определяется по теореме об изменении кинетической энергии)

$$v_{i+1} = \sqrt{v_i^2 + 2g(y_i^2 - y_{i+1}^2) - 2kf\Delta x - 2kv_i\Delta l_i}, \quad (3)$$

где k – коэффициент линейного сопротивления, f – коэффициент сухого трения;

- время прохождения отрезка

$$\Delta t_i = \frac{2\Delta l_i}{v_{i+1} + v_i}; \quad (4)$$

- полное время прохождения параболы

$$t = \sum_1^n \Delta t_i. \quad (5)$$

По этой схеме для каждого a находится $t(a)$, а затем выбирается a_0 , при котором достигается минимальное время t_{\min} .

На рис.2 показаны некоторые результаты численных экспериментов с моделью (2)-(5), демонстрирующие принципиально различное влияние силы сухого трения и вязкого сопротивления на вид брахи-

стохроны (слева) и на изменение времени соскальзывания с вариацией параметра a в уравнении параболы (справа; на оси ординат отмечены времена соскальзывания по прямой).

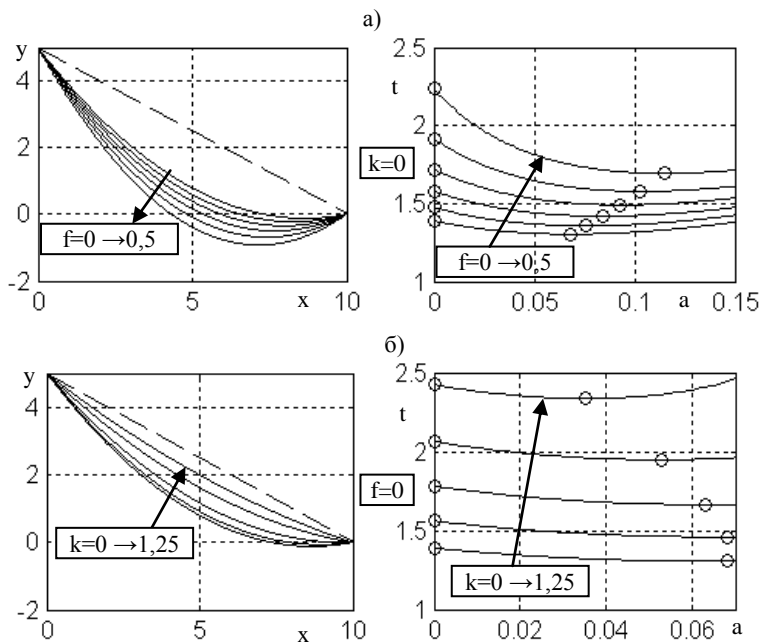


Рис.2. Влияние коэффициента сухого трения (а) и вязкого сопротивления (б) на вид и характеристики брахистохроны ($v_0=5\text{м/с}$)

По мере роста коэффициента сухого трения (рис.2а) брахистохрона становится все более вогнутой, а выигрыш в полном времени соскальзывания при переходе от прямой к оптимальной параболе возрастает. При этом само полное время соскальзывания, естественно, увеличивается. При наличии только вязкого сопротивления (рис.2б) с ростом его коэффициента брахистохрона все более выпрямляется, стремясь к прямой, соединяющей крайние точки.

Библиографический список

1. Зельдович Я.Б., Мышкис А.Д. Элементы математической физики// М: Наука, 1967. 648 с.

*К.В. Большаков, студ; рук. Л.Н. Овчинников, проф.
(ИГХТУ, г. Иваново)*

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ АППАРАТОВ СО ВЗВЕШЕННЫМ СЛОЕМ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА

Многие технологические процессы предусматривают прохождение жидкости или газа через слой твердых зернистых частиц. Поведение сыпучего материала при этом может быть различным: он может находиться в плотном, полувзвешенном, псевдооживленном состоянии, а также может транспортироваться потоком жидкости (газа). Переход из одного состояния в другое определяется характеристиками самого сыпучего материала (размером, формой и т.д.), а также режимом движения омывающей его жидкости (газа).

Несмотря на то, что изучению гидродинамики движения потока в слое сыпучего материала посвящены многочисленные исследовательские работы, вопросы, связанные с изучением прохождения газового потока через плотный слой частиц исследованы к настоящему времени в недостаточной степени. Зачастую, в инженерной практике режимные карты работы аппаратов со взвешенным слоем строятся экспериментально, что объясняется не только недостаточной изученностью вопроса, но и сложностью существующих математических моделей для использования инженерными работниками.

В связи с этим, в настоящей работе проведены расчетно-экспериментальные исследования основных гидродинамических характеристик плотного и расширяющегося слоя.

Аппарат для исследований был выполнен в виде цилиндрической акриловой колонны высотой 1 м с внутренним диаметром $D=0,81$ м. Площадь опорной решётки $S = 0.00668$ м², диаметр отверстий в решетке $d_{\text{отв}}=3$ мм, доля живого сечения отверстий решетки $\phi=11\%$. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1.

Исследуемыми сыпучими материалами были: фракционированный карбамид, керамзит и сорбент.

Основная цель исследований по изучению гидравлических характеристик аппаратов с плотным и расширяющимся слоем мелкозернистых частиц состояла в получении экспериментальных зависимостей коэффициента аэродинамического трения λ от критерия Рейнольдса Re , $\lambda(Re)$.

Получаемые экспериментальные значения использовались для выбора зависимости, обеспечивающей минимальное расхождение между расчетными и экспериментальными значениями (методом наименьших квадратов). Искомые зависимости имели вид:

$$\lambda(\text{Re}) = \frac{A}{\text{Re}^B} \quad (1)$$

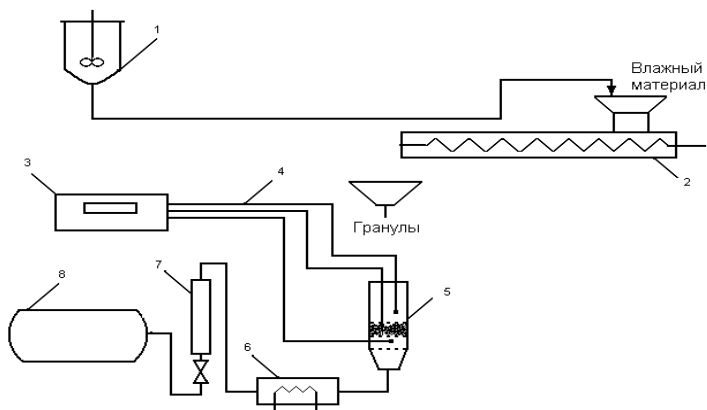


Рис. 1. Схема лабораторной установки для получения гранулированных органоминеральных сорбентов: 1 – реактор для приготовления пасты торф-вода-глина; 2 – экструдер; 3 – прибор для измерения температуры УКТ-38; 4– термопары; 5 – сушилка с плотным слоем; 6– электрокалорифер; 7–ротаметр РС-7; 8–газодувка РГН-427.

Экспериментальные зависимости $\lambda(\text{Re})$ представлены ниже.
Для плотного слоя:

$$\lambda = \frac{958}{\text{Re}^{0,62}}, \quad (2)$$

керамзит, $\text{Re} = 90-370$, $G_{\text{сл}} = 0,1-0,3$ кг, $\rho_k = 1089$ кг/м³, $d_3 = 6,6$ мм;

$$\lambda = \frac{201}{\text{Re}^{0,75}}, \quad (3)$$

сорбент, $\text{Re} = 90-370$, $G_{\text{сл}} = 0,1-0,3$ кг, $\rho_k = 1051$ кг/м³, $d_3 = 5$ мм;

$$\lambda = \frac{443}{\text{Re}^{0,49}}, \quad (4)$$

карбамид, $\text{Re} = 90-300$, $G_{\text{сл}} = 0,1-1$ кг, $\rho_k = 1350$ кг/м³, $d = 2$ мм.
Для псевдооживленного слоя:

$$\lambda = \frac{69,5}{\text{Re}^{0,2}}, \quad (5)$$

керамзит, $\text{Re} = 500-640$, $G_{\text{сл}} = 0,1-0,3$ кг, $\rho_k = 1089$ кг/м³, $d_3 = 6,6$ мм;

$$\lambda = \frac{51,5}{\text{Re}^{0,2}}, \quad (6)$$

сорбент, $\text{Re} = 454-607$, $G_{\text{сл}} = 0,1-0,3$ кг, $\rho_k = 1051$ кг/м³, $d_3 = 5$ мм;

$$\lambda = \frac{188}{\text{Re}^{0,38}}, \quad (7)$$

карбамид, $\text{Re} = 270-490$, $G_{\text{сл}} = 0,1-1$ кг, $\rho_k = 1350$ кг/м³, $d = 2$ мм.

На рис. 2 приведено сравнение расчетных и экспериментальных значений коэффициентов аэродинамического трения, расхождение между расчетом и экспериментом не превышает 5%, что говорит об адекватности расчета эксперимента.

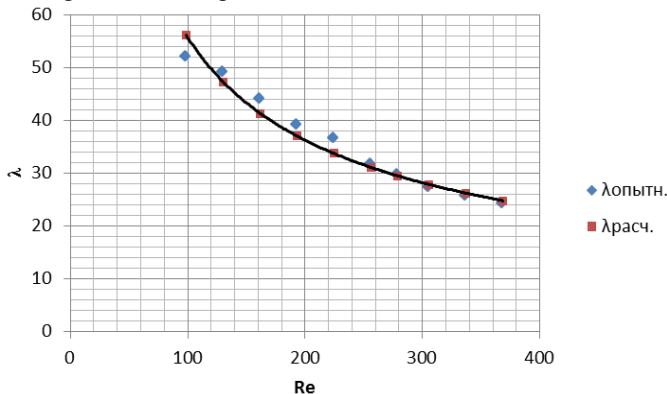


Рис. 2. Расчетные и экспериментальные значения коэффициентов аэродинамического трения частиц керамзита

Библиографический список

1. **Тодес, О.М.** Аппараты с кипящим зернистым слоем / О.М. Тодес, О.Б. Цитович – Л. : Химия, 1981. – 296.

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 20. Анализ и синтез систем электроприводов

<i>В.В. Гуляев, С.С. Котов.</i> Исследование характеристик вентильно-емкостных преобразователей для электроприводов.	
<i>Рук. И.С. Саватеева</i>	3
<i>И.Ю. Баганов, А.А. Савельичев.</i> Исследование конструкции и характеристик LEGO MINDSTORMS NXT 2.0. <i>Рук. С. К. Лебедев</i>	6
<i>И.Ю. Баганов.</i> Наблюдатели механической нагрузки для электромехатронных систем. <i>Рук. С. К. Лебедев</i>	7
<i>Ю.А. Родионов.</i> Проект лабораторного стенда «электропривод и автоматика систем вентиляции». <i>Рук. А.А. Репин</i>	9
<i>В.Е. Мягков.</i> Автоматизация системы электропривода механизма перемещения режущей головки раскройного стола с использованием шаговых двигателей. <i>Рук. А.В. Пруднов</i>	11
<i>Д.М. Зенкин.</i> Исследование временных и частотных характеристик стандартных форм распределения корней для систем управления электроприводом. <i>Рук. С. К. Лебедев</i>	16
<i>И.А. Балакирев.</i> Исследование электромагнитных процессов в электроприводе с преобразователями частоты. <i>Рук. Б.С.Курнышев</i>	18
<i>Е.С. Шарпанов.</i> Ограничение уровня электромагнитного излучения в электроприводах с преобразователями частоты. <i>Рук. Б.С.Курнышев</i>	19
<i>Д.С. Туманов.</i> Некоторые вопросы (аспекты) применения тиристорного асинхронного электропривода с фазовым управлением. <i>Рук. В.Т.Филичев</i>	21
<i>М.А. Сибирцев.</i> Электромеханическая трансмиссия гусеничного трактора. <i>Рук. А.Б. Виноградов</i>	23
<i>П.А. Колосов.</i> Эксплуатационные испытания комплекта тягового электрооборудования трактора «БЕЛАРУС-3023». <i>Рук. А.Б. Виноградов</i>	28
<i>А.С. Ушков.</i> Микропроцессорная реализация системы управления асинхронным электроприводом с корректором коэффициента мощности. <i>Рук. А.Р. Колганов</i>	31
<i>А.С. Ушков.</i> Алгоритм работы системы управления асинхронным электроприводом с корректором коэффициента мощности на основе модуля CLA процессора TMS320F28035. <i>Рук. А.Р. Колганов</i>	35
<i>В. Е. Русаков, К. С. Шишков.</i> О влиянии уплотняющего вала на электропривод механизма намотки сновальной паковки. <i>Рук. В.Ф. Глазунов</i>	37

<i>В. А. Замков, А. С. Короткевич, Л. Е. Малинин.</i> Разработка систем дистанционного копирующего управления по BLUETOOTH манипуляторами LEGO MINDSTORMS NXT 2.0. Рук. <i>С. К. Лебедев</i>	40
<i>Д.С. Головцов, А.В. Введенский.</i> Анализ характеристик мехатронного модуля микро-сервопривода. Рук. <i>А.А. Репин</i>	41
<i>А.В. Алейников.</i> Модель привода высокоточного металлорежущего станка на основе численного метода расчета поля в активной зоне. Рук. <i>А.В. Пруднов</i>	46
<i>С.М. Васильев, М.А. Захаров.</i> Энергосбережение в системе водоснабжения средствами электропривода. Рук. <i>А.М. Захаров</i>	50
<i>С.М. Пискунов, М.А. Захаров.</i> Моделирование электропривода турбомеханизма средствами комплексного учебного стенда. Рук. <i>А.М. Захаров</i>	51
<i>С.Н. Абрамов.</i> Стабилизация натяжения гибкого материала в системе двухдвигательного электропривода. Рук. <i>В.Ф. Глазунов</i>	52
<i>Д.А. Кудрин.</i> Электропривод насосной станции для водоснабжения. Рук. <i>А.Н. Ширяев</i>	57
<i>А.Н. Алексеев.</i> Электропривод насоса для перекачки нефтепродуктов. Рук. <i>А.Н. Ширяев</i>	60
<i>С.А. Петровский, А.А. Фадеев.</i> Электропривод и автоматизация термоформовочной машины. Рук. <i>А.В. Пруднов</i>	62
<i>А.Ю. Крючкова.</i> Вопросы модернизации электропривода главного движения токарно-карусельного станка модели 1512Ф3. Рук. <i>М.А. Соломаничев</i>	65
<i>С.Ф.Панченко.</i> Векторно-управляемый асинхронный электропривод линии по производству конденсаторной пленки. Рук. <i>Ю.П. Спичков</i>	69
<i>М.Ю. Васильев.</i> Векторно-управляемый асинхронный электропривод металлорежущего станка. Рук. <i>Ю.П. Спичков</i>	71
<i>А.Н. Мальцев.</i> Применение мотор-редукторов в электроприводе механизма подъема мостового крана. Рук. <i>П.В. Вилков</i>	72
<i>Е.А. Маргацкая.</i> Анализ возможности применения оптического датчика и датчика магнитного поля для реализации обратной связи по положению. Рук. <i>С.Г. Воронин</i>	74
<i>В.Г. Никоноров, Д.С. Макеева.</i> Модернизация схемы частотно-регулируемого электропривода применением многоуровневого активного выпрямителя. Рук. <i>В.В. Рожков</i>	78
<i>И.К. Лаптев.</i> Использование частотно-регулируемых приводов в гостиничном комплексе "SULEIMAN". Рук. <i>Н.В. Рожнецова</i>	82

<i>С. Х. Ле.</i> К выбору рациональных систем тягового электропривода вагонов метрополитена. Рук. <i>В. Д. Тулунов</i>	85
<i>Ю.Н. Митрофаненков, Д.С. Исаев.</i> Лабораторный стенд с бездатчиковым управлением вентиляльно-индукторной машиной. Рук. <i>А.Е. Малиновский</i>	88
<i>Н.В. Савельев.</i> Особенности алгоритмов управления транзисторными преобразователями в составе электроприводов. Рук. <i>В.В. Рожков</i>	91
Секция 21. Электромеханика и магнитожидкостные устройства	
<i>Е.Е. Тулинова, Н.С. Иванов.</i> Сравнительная характеристика СГ С ПМ и электромагнитным возбуждением на основе ВТСП проводов. Рук. <i>К.Л. Ковалев</i>	96
<i>Ю.И. Бондаренко.</i> Расчетные исследования виброшумовых характеристик асинхронного двигателя. Рук. <i>Ю.Б. Казаков</i>	99
<i>А.Д. Лапин.</i> Визуализация магнитного поля в однофазном асинхронном двигателе с пусковым конденсатором. Рук. <i>В.П. Шишкин</i>	104
<i>П.В. Кулешов, Д.М. Севрюгов.</i> Разработка комбинированной модели тепловых процессов в трансформаторе на основе метода конечных элементов и метода Монте-Карло. Рук. <i>А.И. Тихонов</i>	107
<i>С.В. Жуков.</i> Поверочный расчёт гибридного шагового двигателя методом конечных элементов в ANSYS MAXWELL. Рук. <i>В.Н. Караулов</i>	111
<i>М.Л. Шаров.</i> Разработка тяговых электрических двигателей электромеханической трансмиссии гусеничного трактора «БЕЛАРУС-1502Э». Рук. <i>В.Н. Караулов</i>	116
<i>И. А. Балагуров.</i> Расчет и анализ элетромагнитных сил в торцевом вентиляльном двигателе. Рук. <i>Ю.Б. Казаков</i>	122
<i>А.С. Перминова.</i> Новый способ формирования магнитного поля в рабочих зазорах уплотнений. Рук. <i>Ю.И. Страдомский</i>	125
<i>В.Н. Кадилов.</i> Анализ электромеханических процессов в синхронных генераторах с продольно-поперечным возбуждением. Рук. <i>А.К. Громов</i>	129
<i>С.Г. Романов.</i> Библиотека функций для подсистем оптимизации силовых трансформаторов. Рук. <i>А.И. Тихонов</i>	131
<i>И.А. Пайков.</i> Расчет усилий в проводниках обмотки электротехнических устройств на основе конечно-элементной модели электромагнитного поля. Рук. <i>А.И. Тихонов</i>	136

<i>И.В. Трофимович.</i> Разработка подсистемы параметрической генерации технической документации САПР силовых трансформаторов. Рук. <i>А.И. Тихонов</i>	142
<i>А.В. Стулов.</i> Учет нелинейности в процессах теплопередачи в цепных моделях силовых трансформаторов сухого типа с обмотками из ленты. Рук. <i>А.И. Тихонов</i>	146
<i>И.В. Еремин.</i> Экономическое обоснование эффективности использования силовых трансформаторов с сердечником из аморфной стали. Рук. <i>Г.В. Попов, конс. А.И. Тихонов</i>	150
 <i>Секция 22. Микроэлектронные и микропроцессорные информационно-управляющие системы</i>	
<i>А.Р. Галиев.</i> Интегрирование элементов системы управления освещением – главный критерий энергоэффективности. Рук. <i>В.Р. Иванова</i>	155
<i>Р.А. Хуснутдинов, А.А. Туркия.</i> Система возбуждения радиочастотных импульсов в экспериментальной ЯКР установке. Рук. <i>М.Ф. Садыков</i>	158
<i>Evgeny Shchukine.</i> Les architectures à base de molécules. <i>Superviseur scientifique Anisimov Anatoly, Adviser française Natalia Antipova</i>	160
<i>Shchukin Evgeny.</i> Low-pass amplifier realized on a TDA1558q chip. <i>Scientific supervisor Terehov Anatoly, English adviser Tyurina Svetlana</i>	162
<i>Shchukin Evgeny.</i> LED multivibrator for security alarm. <i>Scientific supervisor Terehov Anatoly, English adviser Tyurina Svetlana</i>	164
<i>Д.В. Буханова.</i> Микроконтроллеры и их применение в современной промышленности. Рук. <i>А.И. Терехов</i>	165
<i>А.С. Исакова.</i> Микропроцессорная система управления антенной станции спутниковой связи. Рук. <i>Л.Г. Копылова</i>	166
<i>Р.А. Крайнов.</i> Системы цифровой обработки сигналов на базе FPGA. Рук. <i>А.П. Бурков</i>	168
<i>Д.В. Кукушкин.</i> Системы контроля управления доступом. Рук. <i>А.А. Анисимов</i>	174
<i>И.А. Малыгин.</i> MES = автоматизация бизнес-процессов. Рук. <i>А.И. Краснушкин</i>	176
<i>В.С. Радыгин.</i> Разработка силового модуля асинхронного электропривода мощностью до 2,2 квт. Рук. <i>Н.В. Салахутдинов</i>	177
<i>А.А. Топников.</i> Магнитоэлектрические компоненты. Рук. <i>С.А. Капустин</i>	181

<i>А. Р. Тюрин.</i> Обеспечение статических и динамических показателей качества нелинейных систем. <i>Рук. В.В. Тютиков</i>	182
<i>А. Р. Тюрин.</i> Исследование параметрической грубости нелинейных САУ с различными типами регуляторов. <i>Рук. В.В. Тютиков</i>	189
<i>С.В. Швецов.</i> Автоматизированная система распределения силикатной массы	197
<i>А.А. Муравьева.</i> Сверхпроводящие материалы 1,5 рода. <i>Рук. А.П. Бурков</i>	199
<i>С. А. Самаринский.</i> Разработка стенда на основе платы ввода-вывода NI PCe-6343 и библиотеки реального времени ПК MATLAB для исследования электромеханотронных систем. <i>Рук. Л. Г. Копылова</i>	203
 <i>Секция 23. Технология машиностроения</i>	
<i>А.А. Подолян.</i> Анализ формирования акустических колебаний системой дискретных элементов в ЭМА преобразователях. <i>Рук. Г.С. Тымчик</i>	205
<i>А.П. Баранов.</i> Влияние поверхностно-активных веществ на свойства минеральных масел. <i>Рук. Т.Ю. Степанова</i>	207
<i>М.В. Смирнов, А.И. Бобков.</i> Перспективы применения новых материалов в экипировке пожарных. <i>Рук. А.В. Топоров, Е.А. Топорова</i>	209
<i>Д.А. Дуда, А.Н. Малышкин.</i> Влияние повышенной температуры при пожаре на прочностные свойства металлоконструкций. <i>Рук. В.В. Киселев, А.В. Топоров</i>	211
<i>А.Н. Малышкин, Д.А. Дуда.</i> Анализ конструкций цепных бензопил для проведения спасательных работ. <i>Рук. В.В. Киселев, А.В. Топоров</i>	215
<i>А.П. Марусин.</i> Конструкции уплотнений магнитожидкостных устройств. <i>Рук. В.А. Полетаев</i>	219
<i>А.А. Киселева.</i> Современные тенденции стилового украшения интерьеров. <i>Рук. В.В. Марков</i>	222
<i>А.В. Мухин.</i> Методы упрочнения резцов. <i>Рук. В.А. Полетаев</i>	225
<i>Д.А. Окладин.</i> Нанотехнологии в машиностроении. <i>Рук. Н.В. Третьякова</i>	229
<i>А.П. Сошников.</i> Методы упрочнения сверл, метчиков, разверток. <i>Рук. В.А. Полетаев</i>	232
<i>А.М. Власов.</i> Исследование влияния температуры на изменение моментов трения магнитожидкостных устройств. <i>Рук. В.А. Полетаев</i>	235

<i>Л.К. Чернов.</i> Исследование влияния качества поверхности электрических контактов на величину переходного сопротивления. <i>Рук. В.А. Полетаев</i>	239
<i>Ю.В. Ланевский.</i> О возможности применения магнитожидкостных герметизаторов в узлах трения автокранов. <i>Рук. В.А. Полетаев</i>	242
<i>А.В. Тихомирова.</i> Конструкции измерительных токосъемников для измерения температуры вращающихся деталей. <i>Рук. В.А. Полетаев</i>	246
<i>И.А. Зиновьева.</i> Моделирование синхронного двигателя с постоянными магнитами в пространстве состояний. <i>Рук. А.М. Шурыгин</i>	250
<i>Е.А. Булгачев.</i> Оценка влияния СОТС на процесс стружкообразования. <i>Рук. Е.В. Башмакова</i>	252
<i>М.Н. Карпинский.</i> Нейросетевые технологии в машиностроении. <i>Рук. В.Н. Копосов</i>	257
<i>Е.А. Булгачев.</i> Повышение работоспособности сверл из стали Р6М5, упрочненных магнитно-импульсной обработкой. <i>Рук. А.С. Орлов</i>	259
<i>А.А. Хахалин.</i> Вариант расчета прочности ствола металлической дымовой трубы с оттяжками. <i>Рук. А.А. Киселев</i>	263
<i>А.С. Костромин.</i> Упрочнение деталей методами гальваностегии. <i>Рук. И.И. Ведерникова</i>	268
<i>Сабра Махмуд.</i> Получение упрочняющих покрытий на деталях из алюминиевых сплавов. <i>Рук. И.И. Ведерникова</i>	271
 <i>Секция 24. Динамика, прочность, вибродиагностика</i>	
<i>А.Б. Закирова.</i> Исследования амплитудно-частотных характеристик вибростендов при нагружении изделием. <i>Рук. Р.Р. Аскарлов</i>	275
<i>В.Ф. Огай, В.Е. Тунцев.</i> Прочностной расчет секции корпуса беспилотного летательного аппарата. <i>Рук. М.А. Ноздрин</i>	278
<i>Е.А. Гусева.</i> Расчёт на прочность упора аварийной двери отсека фюзеляжа Ф1 самолёта МС-21-300. <i>Рук. Л.Б. Маслов</i>	281
<i>Е.Н. Фирсов.</i> Моделирование в среде САПА. <i>Рук. М.А. Ноздрин</i>	285
<i>В.И. Иванова.</i> Расчет на прочность композитной модели закрылка самолета. <i>Рук. М.А. Ноздрин</i>	289
<i>А.В. Швед.</i> Усталостный расчёт кронштейна навески закрылка крыла самолёта. <i>Рук. М.А. Ноздрин</i>	292
<i>Д.В. Корепов.</i> Исследование прочности типовых нервюр самолета с учетом устойчивости. <i>Рук. М.А. Ноздрин</i>	293

<i>О.А. Созонова.</i> Расчёт пластины в среде MSC.PATRAN /NASTRAN. <i>Рук. М.А. Ноздрин</i>	296
<i>С.И. Скрипов, А.В. Харьков.</i> Сравнительный анализ численных расчетов узлов фермы. <i>Рук. М.А. Ноздрин</i>	298
<i>С. Е. Воробьев, А. М. Селезнев.</i> Деятельность лаборатории технического контроля и диагностики ОАО «АКРОН». <i>Рук. А.Б. Колобов</i>	302
<i>И.С. Цветков, А.С. Морозов.</i> Спектральный анализ роторных машин. <i>Рук. Ф.Б. Огурцов</i>	303
<i>В. М. Седов.</i> Изменение костных тканей под действием вибрации. <i>Рук. Л. Б. Маслов</i>	306
<i>К. Ю. Азаренкова.</i> Расчет напряжений в кости при использовании аппарата Илизарова. <i>Рук. М.А. Ноздрин</i>	307
<i>М. А. Воробьев.</i> Деформированное состояние системы кость-фиксатор при накомстом остеосинтезе. <i>Рук. В.И. Шапин</i>	309
<i>О.Г. Бизяева.</i> Моделирование и тепловой расчёт формы для литья восковых фигурных изделий. <i>Рук. А.В. Круглов</i>	313
<i>Е.Э. Ильина.</i> Расчёт конструкции из элементов с эффектом памяти формы. <i>Рук. З.В. Зарубин</i>	316
<i>А.В. Дремченко.</i> Разработка деталей на персональном компьютере в системе T-FLEX CAD. <i>Рук. Н.А. Сабанеев</i>	319
<i>Е. О. Мясникова.</i> Лабораторные испытания на растяжение сварного соединения и основного металла трубы. <i>Рук. А.В. Круглов</i>	321
<i>А.П. Алешина, М.А. Гриценко.</i> Моделирование кинетики фракционирования сыпучих сред с позиции кривой разделения грохота. <i>Рук. Е.Р.Брик, В.А. Огурцов</i>	322
<i>А.П. Алешина, М.А. Гриценко.</i> Кинетика процесса фракционирования на барабанных грохотах. <i>Рук. В.А. Огурцов</i>	324

Секция 25. Математические методы в технике и технологиях

<i>С.В. Жуков, А.Н. Росляков.</i> Формирование межфазной поверхности в барботируемом слое. <i>Рук. В.П. Жуков, Е.В. Барочкин</i>	326
<i>Ю.И. Бондаренко, А.Д. Лапин, Д.А. Уланов.</i> Задача оптимальной генерации и транспорта тепловой и электрической энергии. <i>Рук. В.П. Жуков</i>	328
<i>И.А. Балагуров.</i> Математическая модель процессов смешивания сыпучих материалов в смесителе с независимым приводом. <i>Рук. В.Е. Мизонов</i>	331

<i>А.П.Океанский, А.В. Абросимов.</i> Разработка виртуального лабораторного стенда «Интерференционные кольца Ньютона».	
<i>Рук. А.В. Митрофанов</i>	334
<i>В.В. Костарев.</i> Конвективный влагоперенос при намотке ткани на рулон. <i>Рук. В.Е. Мизонов</i>	337
<i>А.С. Чернявская.</i> Моделирование процесса теплопереноса в движущейся жидкости. <i>Рук. С.П. Бобков</i>	340
<i>И.В. Полищук.</i> Моделирование упругой деформации методом дискретных элементов. <i>Рук. С.П. Бобков</i>	343
<i>К.В. Пискарев, С.А. Маянцев, М.В. Сахаров.</i> Численное исследование динамики простейшей виброударной системы.	
<i>Рук. В.Е. Мизонов</i>	346
<i>А.А. Каржевин, А.О. Кулагин, В.В. Цветков.</i> Некоторые задачи моделирования нелинейной цепи Маркова. <i>Рук. В.Е. Мизонов</i>	348
<i>А.А. Уланов, С.С. Брыксин, А.В. Балакирев.</i> Марковская цепь с блуждающим поглощающим состоянием. <i>Рук. В.Е. Мизонов</i>	351
<i>А.В. Казаков, Д. А. Белков.</i> Моделирование процесса в цепи Маркова с нестационарным выходом в поглощающее состояние. <i>Рук. В.Е. Мизонов</i>	353
<i>А.В. Абросимов, А.С. Метлов, С.А. Степанов.</i> Статистический анализ движения точки под действием случайной силы.	
<i>Рук. В.Е. Мизонов</i>	356
<i>А.П. Океанский, А.В. Белоусова, А.А. Симакова.</i> Брахистохрона: влияние редко учитываемых факторов. <i>Рук. В.Е. Мизонов</i>	358
<i>К.В. Большаков.</i> Расчетно-экспериментальное исследование работы аппаратов со взвешенным слоем сыпучего материала.	
<i>Рук. Л.Н. Овчинников</i>	361

ЭЛЕКТРОМЕХАНОТРОНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Девятая международная научно-техническая конференция
студентов, аспирантов и молодых учёных
«ЭНЕРГИЯ-2014»

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Печатается в авторской редакции

Составитель – к.т.н., доцент Ведерникова И.И.

Подписано в печать .2014. Формат 60x84 ¹/₁₆ .

Печать плоская. Усл. печ. л..

Тираж 140 экз. Заказ № .

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический
университет имени В.И. Ленина».

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.