

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«ИВАНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ В.И. ЛЕНИНА»

ЭЛЕКТРОМЕХАНОТРОНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

РЕГИОНАЛЬНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ СТУДЕНТОВ И АСПИРАНТОВ

**«ЭНЕРГИЯ 2012»
ИВАНОВО, 18–19 апреля 2012 г.
МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ**

ТОМ 4

ИВАНОВО ИГЭУ 2012

ЭНЕРГИЯ 2012: Материалы региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов / ФГБОУВПО Ивановский государственный университет имени В.И. Ленина. – Иваново, 2012. 284 – с.

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

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

Члены оргкомитета: декан электроэнергетического факультета, к. т. н., проф. **А. Ф. СОРОКИН**, декан теплоэнергетического факультета к. т. н., доц. **С. Б. ПЛЕТНИКОВ**, декан инженерно-физического факультета к. т. н., проф. **С. Г. АНДРИАНОВ**, декан электромеханического факультета к. т. н., доц. **В. Н. ЕГОРОВ**, декан факультет информатики и вычислительной техники к. т. н., доц. **В. М. КОКИН**, декан факультета экономики и управления д. э. н., проф. **А. М. КАРЯКИН**, ответственный за НИРС ИГЭУ, к. т. н., доц. **А. В. МАКАРОВ**, председатель СМУС д. э. н., проф. **Н. В. Ключкова**, ст. преп. **Н. Н. Смирнов**, к. э. н., асс. **О. Е. ИВАНОВА**, ответственный за научную работу студентов ЭМФ ИГЭУ, **В. В. АПОЛОНСКИЙ.**

Содержание

СЕКЦИЯ 18. АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ.....	11
Влияние качества электроэнергии на метрологические характеристики позиционных систем частотно-регулируемых электроприводов.....	11
Электромеханический привод для запорно-регулирующей арматуры	13
Влияние цифрового дифференцирования и сглаживания дискретных сигналов на процесс идентификации параметров в электроприводе переменного тока.....	17
Современные методы энергосбережения в асинхронных электроприводах.....	21
Энергосберегающий асинхронный электропривод с корректором коэффициента мощности.....	25
Расчет и моделирование нагрузки воздухоудовки средствами комплексного учебного стенда	29
Совершенствование лабораторного стенда на базе высоковольтного преобразователя частоты «ВЧРП»	30
Наблюдатели нагрузки в комбинированных системах позиционирования электромеханотронных модулей.....	31
Цифровое возбудительное устройство синхронных двигателей ВТЦ-СД-Щ.....	33
Определение статических деформаций в кинематических узлах механизма подачи с шариковинтовой парой	36
Динамическая модель беспилотного мини-вертолета	39
Управление намоткой ленточных текстильных материалов.....	41
Исследование комбинированных систем позиционирования манипулятора промышленного робота.....	44
Лабораторный практикум «Компьютерные технологии в математике и технических расчетах» для студентов профиля «Электропривод и автоматика».....	47
Измеритель углового рассогласования на базе синусно-косинусного вращающегося трансформатора	49
Частотно-регулируемый электропривод и автоматизация браковочно-мерильной машины.....	52
О применении преобразователей частоты в механизмах подъема	53
Разработка математической модели узла упреждающего токоограничения в системе подчиненного регулирования	56
Метод расчета фильтров в асинхронных электроприводах	59

Метод расчета скин-эффекта в роторе асинхронного двигателя.....	60
Выходные фильтры для преобразователей частоты	63
Исследование систем управления вытяжкой	64
Электропривод и автоматизация перемоточного станка	65
Частотно-регулируемый электропривод поточной линии	66
Применение частотно-регулируемых электроприводов в отделочном производстве.....	67
СЕКЦИЯ 19. ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И МАГНИТОЖИДКОСТНЫЕ УСТРОЙСТВА	69
Оптимизация комбинированной динамической модели асинхронной машины	69
Динамическая модель силового трансформатора на основе расчета магнитного поля методом конечных элементов	73
Особенности проектирования трансформаторов с сердечником из аморфной стали	77
Комбинированная полевая модель магнитоожидкостного герметизатора	81
Уточненная тепловая модель магнитной системы силового трансформатора	85
Система оптимального проектирования сухих трансформаторов	87
Расчет магнитного поля и оптимизация геометрии магнитопровода в торцевом магнитоэлектрическом генераторе	88
Расчет проводимостей рассеяния постоянного магнита в торцевом генераторе.....	91
Исследование электромеханических процессов в синхронных генераторах с продольно-поперечным возбуждением	93
Асинхронизированные генераторы	96
Турбгенераторы для АЭС мощностью 1000 МВт и более.....	99
Параметрическая модель для расчета электромеханических процессов в асинхронной машине с массивным ферромагнитным ротором.....	103
Работа тягового асинхронного двигателя (170 кВт) от преобразователя частоты с широтно-импульсным модулированием напряжения.....	107
Влияние пазов на электромагнитный момент асинхронного двигателя с массивным ротором.....	110
Математическое моделирование процесса движения немагнитных частиц в рабочем зазоре гидростатического сепаратора на основе нанодисперсных магнитных жидкостей ..	113

СЕКЦИЯ 20. МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ И МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ	120
Модернизация системы управления продольно-резательного станка	120
Микропроцессорная система охранно-пожарной сигнализации с использованием GSM модуля	121
Разработка электропривода подачи станка с ЧПУ	122
Микропроцессорная система сбора информации для медицинского прибора	124
Система управления приточной вентиляцией склада	126
Интерактивная информационная панель с беспроводным интерфейсом	127
Система управления линией по нанесению ПВХ покрытия на перчатки	129
ШИМ-преобразователь на основе IGBT-транзисторов в системе возбуждения тягового генератора	130
Микропроцессорное управление шаговыми двигателями	132
Периферийные модули ввода/вывода	133
Модуль осевого положения	134
Исследование элементов мажоритарности	135
Система управления питанием отклоняющего магнита ускорителя	139
Энергосбережение на предприятии на примере НТЦ «Арго» ..	140
Разработка силового преобразователя электропривода для станка с ЧПУ	141
Разработка бесконтактной системы взвешивания стеклянной капли	143
Методика проверки и настройки силового преобразователя электропривода	146
Использование двунаправленного буфера NXP P82B96 для передачи высокоскоростных дифференциальных сигналов на большие расстояния	148
Пакет прикладных программ Actel Libero IDE	150
Разработка микропроцессорной системы мониторинга состояния котла-утилизатора для Краснодарской ТЭЦ	153
Компенсация гармонических колебаний момента нагрузки в электромеханических системах	154
Анализ и синтез робастных систем автоматического управления с комбинированными регуляторами состояния	158
Подчиненное регулирование координат электромеханических систем на базе метода АКАР	160

Обзор промышленных контроллеров	161
Управление электромеханической системой с упругими связями при активной компенсации возмущений	162
Комплекс лабораторных стендов для освоения курса мехатроника	164
Исследование системы импульсно-фазового управления тиристорами на базе настольной рабочей станции NIEIVIS	165
Ионисторы и их применение	166
СЕКЦИЯ 21. ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ И ТЕХНИЧЕСКОГО ДИЗАЙНА	168
Исследование магнитных моментов магнитожидкостных уплотнений	168
Исследование магнитной галтовки деталей из цветных металлов	170
Разработка технологического процесса изготовления корпусной детали с помощью CAD/CAM-системы	173
Комплексная оценка физико-химических свойств смазочного материала	175
Исследование влияния негативных воздействий окружающей среды на бронзовые скульптуры	177
Возможности электрохимической обработки при обработке деталей	179
Применение методов консервации при реставрации бронзовых скульптур	182
Повышение триботехнических показателей масел применением металлоплакирующих присадок	185
Исследование основных принципов и закономерностей стиля классицизм	187
Использование САПР в технологических процессах изготовления деталей	189
Требования к качеству изготовления ювелирных изделий	192
Исследование художественнойковки как древнего способа обработки металла	196
Применение магнитоэластомерного материала в комбинированных магнитожидкостных уплотнениях	198
Исследование вопросов изготовления древних серебряных изделий	202
Анализ возможностей электронно-лучевых методов обработки	204
Исследование коррозии изделий из серебра и сплавов на основе серебра	207
Новые инструментальные решения	209

Скульптура	212
Ковка в городах ивановской области	214
Современные металлорежущие инструменты	215
Получение износостойких покрытий на деталях из алюминиевых сплавов	218
Возможность моделирования физических и технологических процессов в пакете COMSOL MULTIPHYSICS	222
Поляризационный трибометр для исследования оптических и трибологических характеристик смазочных материалов	224
СЕКЦИЯ 22. ДИНАМИКА, ПРОЧНОСТЬ, ВИБРОДИАГНОСТИКА	227
Конечно-элементное решение контактных задач теории упругости	227
Математическое моделирование контактного взаимодействия авиационной шины и жесткого покрытия	230
Разработка алгоритмов диагностирования дефектов роторных машин	234
Контактная задача для системы неровностей и полупространства	238
Вибрационные характеристики биомеханических систем в естественных условиях	240
Оценка динамического состояния конструкций по измерениям вибрации	244
Описание кинетики классификации сыпучих строительных материалов на вибрационных грохотах	249
Повышение качества классификации сыпучих материалов на виброгрохотах	250
Моделирование движения частиц над вибрирующей поверхностью сита грохота	251
Стратегия структурно-параметрической оптимизации процесса виброклассификации сыпучих материалов	252
Моделирование периодического грохочения с помощью одномерных цепей Маркова	253
Исследование деформация и напряжений в сварной конструкции	254
Расчет элемента механизации крыла самолета	256
Повышение достоверности вибродиагностики высоковольтного оборудования в условиях нечеткой исходной информации	258
Исследование вибрационных свойств мягких тканей голени человека	260
Метод магнитной памяти металла как новое направление в технической диагностике	264

Бездемонтажное диагностирование трансформаторного масла	267
СЕКЦИЯ 23. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ	270
Некоторые задачи ячеечного моделирования процессов переноса	270
Двухмерная ячеечная модель периодического смешивания сегрегирующих сыпучих материалов	272
Влияние поперечных перегородок на равномерность диффузионного осаждения частиц	275
Оптимальное распределение нагрузки с учетом потокораспределения циркуляционной воды между турбоагрегатами ТЭЦ	278
Исследование влияния граничных условий на результаты моделирования теплового состояния вращающихся роликов ...	281
К вопросу о расчете динамики двигателей с продолженным расширением	283

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

СЕКЦИЯ 18. АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

Н. В. Андреева, аспирантка, Д. Д. Ахунов;
В. Ю. Корнилов, д. т. н., профессор

Влияние качества электроэнергии на метрологические характеристики позиционных систем частотно-регулируемых электроприводов

С постоянным ростом степени автоматизации быта современного общества и производства, внедрением новых электронных устройств, остро встает проблема электропитания оборудования, чувствительного к качеству напряжения. Реализация современных методов управления невозможно без применения цифровых электронно-вычислительных средств, которые ориентированы исключительно на работу в нормальных эксплуатационных режимах. Поэтому любое возмущение со стороны электрической сети приводит к немедленному аварийному прерыванию управляющих систем и технологических процессов, так как возникающие переходные электромагнитные и электрохимические процессы, пусть и кратковременные, разрушают заданную технологию и рассматривают работу систем автоматического управления. Таким образом, становится очевидной актуальность решения задачи контроля показателей качества электроэнергии с последующим поиском решения по улучшению данных показателей [1].

В работе была рассмотрена система «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» (ПЧ–АД) как приемник электрической энергии от электрической сети. Эффективность работы этой системы зависит от качества электроэнергии (КЭ).

Среди показателей КЭ различают:

- установившееся отклонение напряжения δU_y ;
- размах изменения напряжения δU_t ;
- доза фликера P_f ;
- коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения K_U ;
- коэффициент n-ой гармонической составляющей напряжения $K_{U(n)}$;

- коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} ;
- коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} ;
- отклонение частоты Δf ;
- длительность провала напряжения Δt_n ;
- импульсное напряжение $U_{имп}$;
- коэффициент временного перенапряжения $K_{перU}$ [2].

И в том показатель несимметричной нагрузки, связанный с несимметричным режимом. Несимметричные режимы в электрических сетях возникают по следующим причинам:

- 1) неодинаковые нагрузки в различных фазах;
- 2) неполнофазная работа линий или других элементов в се-

ти;

- 3) различные параметры линий в разных фазах.

Для рассматриваемого случая, эффективность функционирования ПЧ–АД зависит от нагрузки, вызывающей несимметричный режим. Рассматривается подход к оценке погрешностей функционирования системы «ПЧ–АД» при различных установочных моментах сопротивления на валу АД.

В работе обсуждается вопрос о соответствии новых норм КЭ. С 1 января 2013 г. В Российской Федерации вводится в действие новый государственный стандарт по качеству электрической энергии ГОСТ Р 54149-2010 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». В настоящее время продолжает действовать стандарт 13109-97 с тем же наименованием.

Новый ГОСТ Р 54149-2010 имеет несколько важных отклонений от действующего в настоящее время ГОСТа 13109-97, В связи с этим, вступление в действие нового ГОСТа скажется на различных этапах измерения показателей качества КЭ, начиная с выбора измерительных средств и заканчивая ответственностью поставщиков и потребителей за отклонения данных показателей [3].

Качество электроэнергии является сложной и многогранной областью. В настоящее время позиционные системы частотно-регулируемых электроприводов страдают от проблем качества энергии, которые приводят к прямым и косвенным материальным потерям.

Развитие электрических сетей во всем мире, рост числа межсетевых соединений предъявляют новые требования к

надежности, защищенности и в особенности к качеству управления энергопотоками. Для удовлетворения этих требований XXI века появляются современные средства как на уровне проектов, так и на уровне готового оборудования.

Библиографический список

1. Гизатуллин, З. М. Анализ качества электроэнергии в однофазной сети электропитания 220 В 50 Гц / З. М. Гизатуллин, Р. М. Гизатуллин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2010. – №3–4.
2. ГОСТ 13109-97 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах. Электроснабжения общего назначения».
3. Наумов, А. А. Проблемы сертификационных и периодических испытаний качества электрической энергии по новой ГОСТу / А. А. Наумов, В. Г. Жуков, Ю. Г. Кубарев, Н. А. Тарасова // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2010. – №3–4.

В. С. Федотов, магистрант; В. Е. Тюленев, к. т. н., доцент

Электромеханический привод для запорно-регулирующей арматуры

В связи с работами по энергосбережению в настоящее время разрабатываются проекты интеллектуальных зданий, тепловых пунктов, пожарных и вентиляционных систем, которые оснащаются локальными системами управления температурой, расходом, давлением и другими технологическими параметрами. В этих системах в качестве исполнительных механизмов используются электромеханические приводы для различного вида запорно-регулирующей арматуры.

На практике широко применяются электромеханические микроприводы зарубежных фирм Belimo [1], Danfoss [2], Gruner [3], PolarBear [4], Neptonic [5], Siemens [6] и российской компании ALLFA [7]. К положительным качествам этих приводов можно отнести обширную номенклатуру выпускаемых моделей с широкой гаммой скоростей при большом диапазоне условных диаметров регулирующей арматуры.

Большинство из упомянутых приводов обладают специфичностью по отношению к управляющему сигналу, то есть они управляются либо дискретными сигналами, либо аналоговыми [1]. Известны также автоматические приводы с универсальным управлением, имеющие при этом и большую стоимость. Кроме того, имеются приводы, реализующие в комплексе с внешними регуляторами локальные автоматические системы регулирования

(АСР) со сложными законами управления [5]. Как правило, все эти приводы обладают большой насыщенностью электронными элементами, что повышает их стоимость и снижает надежность.

В связи с этим задача по разработке импортозамещающей системы управления электромеханическим микроприводом для запорно-регулирующей арматуры с близкими или превосходящими зарубежные аналоги характеристиками является актуальной.

Нами предложена оригинальная схема управления приводом запорно-регулирующей арматуры на базе микроконтроллера ATmega8535 фирмы ATMEL. Микроконтроллер выполняет функции измерения, формирования сигналов ошибки и управляющего воздействия на микродвигатель как низшую ступень в иерархии управления. Применение микроконтроллера исключает необходимость использования сложных электронных схем, что в целом повышает надежность системы управления. При этом появляется возможность реализации в одном приборе как дискретного, так и аналогового управления и непосредственного подключения интеллектуальных датчиков с целью конфигурирования локальных, каскадных и комбинированных АСР. Разработана оригинальная программа для микроконтроллера на языке Си, которая осуществляет универсальное управление электромеханическим приводом с коррекцией по нагрузке.

В ходе выполнения работ были проведены экспериментальные исследования механических характеристик микродвигателя модели RK-370CA-081150 (рис. 1), а так же двигателей LRF500TB-12560, LRF500TB-10840.

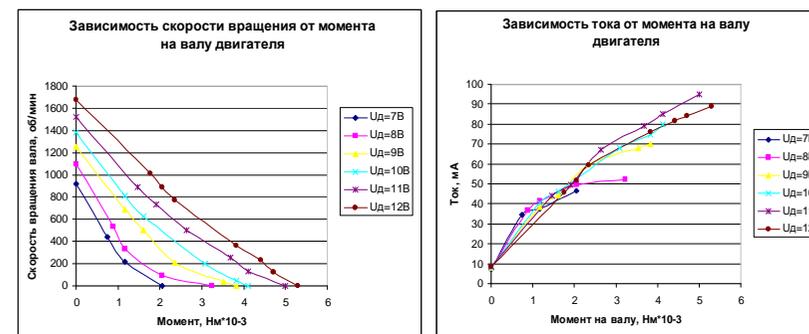


Рис. 1. Семейство нагрузочных характеристик RK-370CA-081150

В результате аппроксимации этих характеристик и измерения параметров двигателя были получены коэффициенты для

составления линейной модели электродвигателя с редуктором (рис. 2):

- $R = 160 \text{ Ом}$ – сопротивление якоря двигателя;
- $T = 0,0000937 \text{ с}$ – электрическая постоянная двигателя;
- $K_m = 0,057 \text{ Нм/а}$ – коэффициент преобразования тока в движущий момент;
- $I = 0,24 \cdot 10^{-6} \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ – приведенный момент инерции двигателя;
- $K = 9,55 \text{ об} \cdot \text{с/мин}$ – коэффициент преобразования угловой скорости в скорость вращения вала двигателя; $i_p = 3600$ – передаточное отношение редуктора.

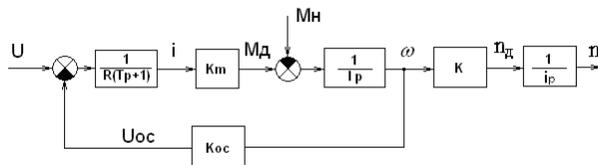


Рис. 2. Структурная схема микродвигателя с редуктором

На основании модели электродвигателя в среде Matlab проведено исследование динамики электромеханического привода, работающего в следящем режиме (рис. 3).

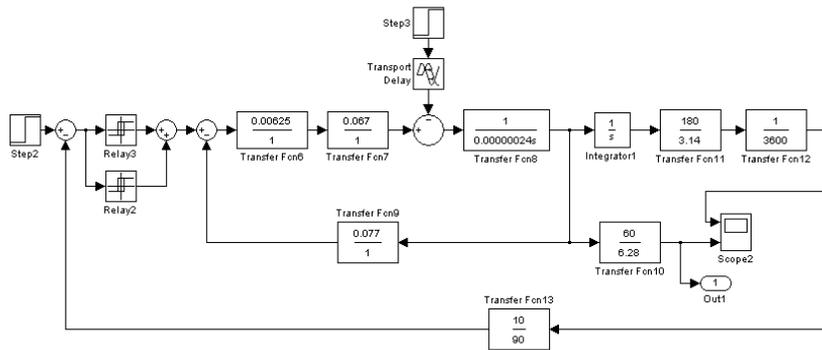


Рис. 3. Модель следящего электропривода в среде Matlab

Получены кривые переходных процессов следящего электропривода по каналу управления при наличии возмущения по моменту на валу двигателя. На рис. 4 показаны переходные процессы изменения выходной координаты (угла поворота выходного вала редуктора в градусах) и скорости вращения вала двигателя в

об/мин при входном управляющем сигнале 10 В после нанесения возмущения 0,001 Нм с задержкой 10 с.

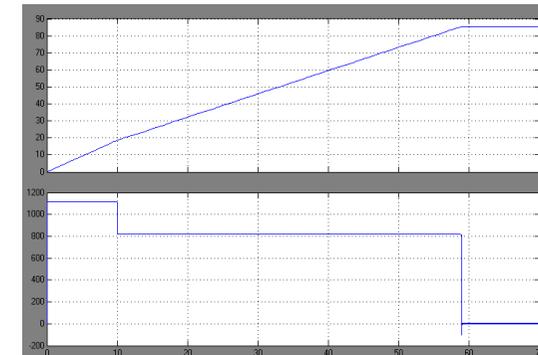


Рис. 4. Переходные процессы в следящем электроприводе

Макет электромеханического привода в стадии доработки и отладки конструкции представлен на рис. 5.



Рис. 5. Макетная плата электропривода

Разработка данного электропривода проводилась по заказу компании ООО «Риарм» (г. Рыбинск). Имеется также заинтересованность компании «ПромАвт» (г. Ярославль) в применении электропривода при создании локальных систем управления температурным режимом в жилых зданиях (проект «Умный дом») и в производственных помещениях.

Библиографический список

1. Каталог продукции фирмы Belimo (<http://www.belimo.ru>).
2. Каталог продукции фирмы Danfoss (<http://ru.heating.danfoss.com>).
3. «Электроприводы GRUNER – дружественная альтернатива», журнал «Мир климата», 43, 2005.
4. Электроприводы фирм Belimo и Polar Bear (http://www.topclimat.ru/brands/vings_m).
5. Электроприводы фирмы Neptronic, Спецификация. (<http://www.rst-s.ru/catalog/clapans/elektroprivody>).
6. Каталог продукции фирмы Siemens (<http://www.av-avtomatika.ru>).
7. Сайт фирмы Allfa (<http://www.allfa-privod.ru>).

Д. С. Однолько, аспирант; О. Ф. Опейко к. т. н., доцент

Влияние цифрового дифференцирования и сглаживания дискретных сигналов на процесс идентификации параметров в электроприводе переменного тока

Современный уровень развития микропроцессорной техники открывает широкие возможности для совершенствования уже имеющихся и создания новых алгоритмов решения в реальном масштабе времени многих прикладных задач. Частотно-регулируемый электропривод на базе асинхронной машины представляет собой интеллектуальную систему с микропроцессорным ядром управления и предполагает в своей структуре устройство оперативной идентификации электромагнитных параметров (активного сопротивления и индуктивности статора и ротора, взаимной индуктивности) и переменных состояния (потокосцепления и угловой скорости вращения ротора) [1]. Динамическая модель асинхронной машины, которая зачастую лежит в основе структуры наблюдателя, оперирует информацией о производных тока и напряжения обмоток статора, поэтому для таких систем необходимы алгоритмы цифрового дифференцирования, реализуемые в режиме реального времени. Однако такой объект идентификации, как частотно-регулируемый электропривод, предполагает решение труднопреодолимых проблем реального дифференцирования негладких сигналов (тока и напряжения) [2].

В данной работе проведен анализ методом имитационного моделирования проблемы цифрового дифференцирования и сглаживания дискретных сигналов в системах идентификации электромагнитных параметров и переменных состояния частотно-регулируемого асинхронного электропривода, а также исследовано влияние полученных результатов на качество работы идентификационной модели, синтезированной на основе метода наименьших квадратов [3].

Записанная в неподвижной системе координат статора (α - β) динамическая модель асинхронного двигателя (АД) имеет вид:

$$\begin{aligned}\sigma L_s \frac{di_{s\alpha}}{dt} &= u_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha} - k_r \frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt}; \\ \sigma L_s \frac{di_{s\beta}}{dt} &= u_{s\beta} - R_s i_{s\beta} - k_r \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt}; \\ \frac{d\Psi_{r\alpha}}{dt} &= -\alpha \Psi_{r\alpha} - n_p \omega_r \Psi_{r\beta} + \alpha L_m i_{s\alpha}; \\ \frac{d\Psi_{r\beta}}{dt} &= -\alpha \Psi_{r\beta} + n_p \omega_r \Psi_{r\alpha} + \alpha L_m i_{s\beta},\end{aligned}\quad (1)$$

где $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$ – токи статора; $\Psi_{r\alpha}$, $\Psi_{r\beta}$ – потокосцепление ротора; $u_{s\alpha}$; $u_{s\beta}$ – напряжение статора; ω_r – механическая угловая скорость ротора; n_p – число пар полюсов; J – суммарный момент инерции механической части АД; M_c – момент нагрузки.

В (1) использовано общепринятое определение положительных коэффициентов:

$$\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s L_r); k_r = L_m / L_r; \alpha = R_r / L_r = 1 / T_r, \quad (2)$$

где R_s , R_r – активные сопротивления статора и ротора; L_s , L_r , L_m – индуктивность статора, ротора и взаимная индуктивность; σ – коэффициент рассеяния; T_r – постоянная времени короткозамкнутого ротора.

Структура исследуемого наблюдателя предполагает доступным измерение переменных $i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$, $u_{s\alpha}$, $u_{s\beta}$. Вместе с тем, получение информации о значении $\Psi_{r\alpha}$, $\Psi_{r\beta}$ предполагается напрямую невозможным. В динамической модели АД необходимо избавиться от переменных $\Psi_{r\alpha}$, $\Psi_{r\beta}$, $d\Psi_{r\alpha}/dt$, $d\Psi_{r\beta}/dt$ недоступных для измерения (подробные математические преобразования можно найти в [3]). Получаем:

$$\begin{aligned}-\alpha u_{s\alpha} + R_s n_p \omega_r i_{s\beta} + \sigma L_s n_p \omega_r \frac{di_{s\beta}}{dt} + \sigma L_s \frac{d^2 i_{s\alpha}}{dt^2} + \\ + (R_s + \alpha \sigma L_s + k_r \alpha L_m) \frac{di_{s\alpha}}{dt} + (\alpha R_s) i_{s\alpha} = \frac{du_{s\alpha}}{dt} + n_p \omega_r u_{s\beta}.\end{aligned}\quad (3)$$

Рекуррентный алгоритм наименьших квадратов (4) имеет вид:

$$\begin{aligned}X_n &= X_{n-1} + R_n q_n Q_n (z_n - Q_n^T X_{n-1}); \\ R_n^{-1} &= R_{n-1}^{-1} + q_n Q_n Q_n^T.\end{aligned}\quad (4)$$

где X – вектор неизвестных параметров; $z_{(n)}$ – наблюдение на n -ом измерительном интервале; $Q_{(n)}$ – матрица «информационного»

состояния на n -ом измерительном интервале; $q_{(n)}$ – произвольный весовой коэффициент; n – число измерений.

В рамках проводимых исследований на основании (3) принимаются следующие обозначения:

$$z_{(k)} = -\alpha u_{s\alpha} + \sigma L_s \frac{d^2 i_{s\alpha}}{dt^2} + (R_s + \alpha \sigma L_s + k_r \alpha L_m) \frac{d i_{s\alpha}}{dt} + (\alpha R_s) i_{s\alpha} - \frac{d u_{s\alpha}}{dt};$$

$$Q_{(k)} = -R_s n_p \omega_r i_{s\beta} - \sigma L_s n_p \omega_r \frac{d i_{s\beta}}{dt} + n_p \omega_r u_{s\beta}; \quad X = \omega_r.$$

Таким образом, в алгоритме (4) в качестве идентифицируемой величины выступает угловая скорость вращения ротора АД (ω_r). Параметры схемы замещения АД (R_s, R_r, L_s, L_r, L_m) предполагаются известными с точностью до каталожных данных. Как видно, в модели (3) на точность получаемых оценок значительно влияние будет оказывать качество информации о первой и второй производной от сигналов тока статора, и первой производной от сигналов напряжения статора. При этом вопрос об оптимальном дифференцировании функции напряжения статора от времени решается, путем использования непосредственно управляющего сигнала напряжением статора на выходе системы управления преобразователем частоты. Данный сигнал после дифференцирования на прямую классическими методами [6] успешно можно использовать в основном алгоритме без дополнительной обработки. Что же касается обработки сигнала тока статора, то тут возникают определенные трудности.

При исследовании реальных процессов в электроприводе, как правило, вместо истинного значения сигнала тока регистрируется случайная величина, представляющая собой аддитивную смесь самой величины и помехи. Помеха может генерироваться непосредственно в исследуемом объекте (широтно-импульсная модуляция (ШИМ) питающего напряжения), попадать в него извне или быть случайной наводкой в цепях измерения. Наличие помехи в последовательности, полученной в результате дискретизации, затрудняет получение достоверной информации об исследуемом процессе. Поэтому важно подвергнуть последовательность первичной обработке, целью которой является сглаживание, то есть полное или частичное устранение помехи.

Для предварительного сглаживания дискретной последовательности токового сигнала (при частоте ШИМ 1 кГц) был использован цифровой фильтр в виде инерционного звена первого порядка с передаточной функцией:

$$W(s) = 1/(T_z s + 1),$$

где T_z – постоянная времени фильтра.

Анализ функционирования наблюдателя при различных настройках фильтра показал высокую степень влияния T_z на точность получаемых оценок переменной ω_r , вплоть до потери работоспособности алгоритма идентификации (асимптотической расходимости) и существенного увеличения итоговой погрешности формируемых оценок.

На рис. 1, а показаны графики переходных процессов кривой тока статора после дифференцирования (двойного дифференцирования (рис. 1, б)) при отсутствии сглаживающего фильтра (кривая 1) и с ним при $T_z = 0,005$ (кривая 2).

На рис. 2 показано влияние цифрового дифференцирования на процесс оценки угловой скорости вращения ротора без предварительной фильтрации сигнала тока (кривая 1) и после обработки фильтром (кривая 2), при этом истинное значение $\omega_r = 305$ рад/с.

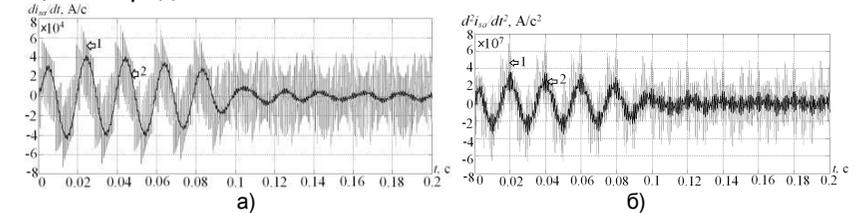


Рис. 1. Переходные процессы тока статора: а) после дифференцирования; б) после двойного дифференцирования: 1 – без предварительной фильтрации сигнала тока статора; 2 – после обработки фильтром сигнала тока статора

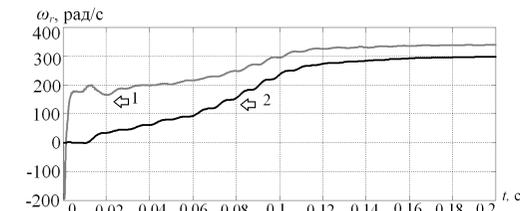


Рис. 2. Процесс оценки угловой скорости вращения ротора: 1 – без предварительной фильтрации сигнала тока статора; 2 – после обработки фильтром сигнала тока статора

Таким образом, проведенные исследования позволили выявить степень влияния качества используемых при идентификации сигналов тока статора на точность получаемых оценок. Было установлено, компромиссное соотношение между постоянной времени фильтра и допустимой ошибкой идентификации. А также из результатов анализа можно сделать вывод о критической

необходимость предварительного сглаживания дискретной последовательности сигналов, используемых в алгоритмах наблюдения.

Библиографический список

1. **Виноградов, А. Б.** Адаптивно-векторная система управления бездатчикового асинхронного электропривода серии ЭПВ / А. Б. Виноградов, И. Ю. Колодин, А. Н. Сибирцев // Силовая электроника. – 2006. – № 3. – С. 46–51.
2. **Пересада, С. М.,** Серета А.Н. Новый алгоритм идентификации электрических параметров асинхронного двигателя методом наименьших квадратов // Електромеханічні та електродинаміка. – 2005. – № 5. – С. 32–40.
3. **Однолько, Д. С.** Моделирование и анализ системы идентификации электромагнитных параметров асинхронного двигателя методом наименьших квадратов // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації. Збірник наукових праць IX Між. Наук.-тех. конф. мол. уч. і спец. – Кременчук, 2011. – С. 125–126.
4. **Цыпкин, Я. З.** Основы информационной теории идентификации / Я. З. Цыпкин. – М.: Наука, 1984. – 320 с.
5. **Сергиенко, А. Б.** Цифровая обработка сигналов: учебное пособие / А. Б. Сергиенко. – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.

А. С. Ушков, аспирант; А. Р. Колганов, д. т. н., профессор

Современные методы энергосбережения в асинхронных электроприводах

На современном этапе развития науки и техники системы электропривода прочно занимают лидирующее положение среди приводных устройств и обеспечивают бесперебойную и надежную работу технологических механизмов во многих отраслях промышленности и специальной техники.

В качестве приводного двигателя наибольшее распространение находит асинхронный двигатель (АД) с короткозамкнутым ротором.

Повсеместное применение АД обусловлено их высокой надежностью, сравнительно низкой стоимостью и приемлемыми эксплуатационными расходами. По экспертным оценкам на предприятиях Российской Федерации используются от 120 до 150 млн. единиц АД. До 70 % АД сосредоточено в энергоемких отраслях: горно-, нефте-, газодобывающей, металлургической, строительной промышленности и жилищно-коммунальном хозяйстве.

В настоящее время повышение энергоэффективности работы оборудования выдвигается на первый план развития национальной экономики.

Использование энергоэффективных асинхронных электроприводов (ЭП) и их эксплуатация с минимальным потреблением

энергии позволит сэкономить в РФ до 6 ТВт·час в год или более 12 млрд. руб. Поэтому, повышение эффективности работы электромеханических систем и эксплуатация их в энергосберегающих режимах являются, несомненно, актуальными.

Основным документом в Российской Федерации, регулирующим отношения, возникающие при осуществлении деятельности в области энергосбережения, является *Федеральный закон № 261-ФЗ от 23 ноября 2009 года «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности...»* [1]. Цель этого закона – создать экономические и организационные условия для эффективного использования энергетических ресурсов. Также на повышение энергосбережения направлена действующая в настоящее время *Федеральная целевая программа «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года»* [2].

Кроме того, область энергосбережения *регулируют ГОСТ 13109-97 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения»* [3] и *ГОСТ Р 51317.3.2-2006 «Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе). Нормы и методы испытаний»* [4].

ГОСТ Р 51317.3.2-2006 устанавливает ограниченное количество высших гармоник потребляемого тока, т.е. ток должен быть практически синусоидальным и синфазным с напряжением питающей сети, обеспечивая коэффициент мощности K_M устройства близкий к единице. По сути, коэффициент мощности – это показатель, характеризующий линейные и нелинейные искажения, вносимые нагрузкой в электросеть.

Главными показателями энергоэффективности асинхронных электроприводов являются: потребляемый из электросети ток, электрический КПД, коэффициент мощности.

Главный недостаток асинхронных электроприводов с точки зрения энергоэффективности – это потребление реактивной мощности из питающей сети, что обуславливает снижение коэффициента мощности.

Кроме того, подавляющее большинство современных асинхронных электроприводов реализованы на базе двухзвенных преобразователей частоты (ПЧ), которые, как правило, выполнены по схеме «неуправляемый выпрямитель – ёмкостный фильтр – тран-

зисторный автономный инвертор с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) выходного напряжения».

Наличие неуправляемого выпрямителя, сильно искажает форму потребляемого тока, что приводит к отрицательному влиянию преобразователей на сеть и на окружающую среду.

Таким образом, современные методы энергосберегающего управления асинхронными электроприводами должны обеспечивать высокий коэффициент мощности электропривода, а также хорошую электромагнитную совместимость полупроводникового преобразователя с сетью.

Анализ современного состояния проблемы построения энергосберегающего электропривода переменного тока позволил выделить два основных подхода в рассмотрении современных методов энергосбережения в асинхронных электроприводах.

Первый подход связан с модификацией и улучшением аппаратной части ЭП.

Здесь наиболее простым методом решения проблемы энергосбережения является замена традиционного АД на АД с повышенным классом энергоэффективности.

Одной из причин невысокого энергетического КПД АД является их конструктивная особенность – наличие электротехнической стали и катушек индуктивности обмоток электрической машины, а также проектирование и изготовление их по критерию минимума затрат, выгодной только для производителя. Ведущие зарубежные производители электрических машин AEG, ABB, Siemens, изготавливают АД с повышенным КПД классов EFF1, EFF2, EFF3, Premium. Повышение КПД в АД осуществляется за счет увеличения массы активных материалов двигателя – меди и электротехнической стали.

Следующим методом повышения энергоэффективности асинхронных электроприводов является модификация топологии силовых преобразователей или алгоритмов ШИМ.

Все ПЧ по уровню напряжений можно разделить на низковольтные и высоковольтные. Практически все низковольтные ПЧ, как правило, выполнены по двухзвенной схеме – неуправляемый выпрямитель с автономным инвертором напряжения (АИН), реже – с автономным инвертором тока (АИТ), выполненными по мостовой схеме. В свою очередь высоковольтные ПЧ также содержат промежуточное звено постоянного напряжения, а улучшение энергосбережения достигается за счет модификации инверторов напряжения. Наилучшей энергоэффективности электропривода получается добиться за счет применения многоуровневых АИН.

Одним из эффективных способов решения задачи повышения энергоэффективности – применение корректоров коэффициента мощности (ККМ). Назначение ККМ – повысить значение коэффициента мощности. Существует множество видов ККМ, но по устройству их все можно разделить на активные и пассивные. Пассивные ККМ представляют собой LC-фильтры, и не позволяют достичь высоких значений коэффициента мощности. Активные ККМ, по своей сути, являются DC-DC преобразователями. Достоинством применения ККМ в качестве средства энергосбережения в электроприводе является то, что при своей относительной простой и дешевой конструкции они не требуют значительных изменений в структуре электропривода, но при этом позволяют достичь очень высоких значений коэффициента мощности (порядка 0,98–0,99).

Второй подход повышения энергоэффективности асинхронного электропривода связан с применением энергоэффективных стратегий управления. Энергоэффективные стратегии управления можно разделить на три класса [5]:

- простой контроль состояния (simple state control);
- модельно-ориентированное управление (model-based control);
- поисковое управление (search control).

Класс энергоэффективных стратегий управления с *простым контролем состояния* исторически появился первым, и все методы в этом классе в основном применимы к скалярным частотно-регулируемым электроприводам. В основе этих стратегий лежит следующее: при работе асинхронного электропривода легко вычислить некоторые его энергетические параметры – самые очевидные из них это cosφ и величин скольжения ротора s.

Модельно-ориентированные стратегии управления основываются на использовании в структуре электропривода математической модели двигателя или его части, используемой для создания энергетически-оптимального управления.

Поисковые стратегии управления основываются на оптимизации в процессе работы некоторых параметров электропривода в соответствии с заданным критерием. Примером таких критериев могут быть максимум КПД, минимум потребляемой мощности, минимум потребляемого тока, минимум потерь энергии и т. п.

Оба перечисленных выше подхода к повышению энергетических показателей представляют существенный интерес для разработчиков современных ЭП. В этой связи кажется наиболее

перспективной тенденция совместного применения обоих подходов, что обеспечит максимально эффективное использование ЭП по мощности, а также минимизацию потерь при электромеханическом преобразовании.

Библиографический список

1. **Федеральный закон** от 23.11.2009 N 261-ФЗ (ред. от 03.12.2011) «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_122620/#cont, свободный.
2. **Распоряжение Правительства РФ** от 27.12.2010 N 2446-р (ред. от 18.08.2011) Об утверждении государственной программы «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_118503, свободный.
3. **ГОСТ 13109-97**. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2006.
4. **ГОСТ Р 51317.3.2-2006 (МЭК 61000-3-2:2005)**. Совместимость технических средств электромагнитная. Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе). Нормы и методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2007.
5. **Abrahamsen F.** Energy Optimal Control of Induction Motor Drives / F. Abrahamsen. – Institute of Energy Technology, Denmark, 2000. – ISBN 87-89179-26-9.

А. С. Ушков, аспирант; С. А. Столбов, магистрант;
А. Р. Колганов д. т. н., профессор

Энергосберегающий асинхронный электропривод с корректором коэффициента мощности

На современном этапе развития науки и техники системы электропривода прочно занимают лидирующее положение среди приводных устройств и обеспечивают бесперебойную и надежную работу технологических механизмов во многих отраслях промышленности и специальной техники.

В качестве приводного двигателя наибольшее распространение находит асинхронный двигатель (АД) с короткозамкнутым ротором.

Главными показателями энергоэффективности асинхронных электроприводов являются: потребляемый из электросети ток, электрический КПД, коэффициент мощности.

Главный недостаток асинхронных электроприводов с точки зрения энергоэффективности – это потребление реактивной мощности из питающей сети, что обуславливает снижение коэффициента мощности.

Кроме того, подавляющее большинство современных асинхронных электроприводов реализованы на базе двухзвенных преобразователей частоты (ПЧ), которые, как правило, выполнены по схеме «неуправляемый выпрямитель – ёмкостный фильтр – транзисторный автономный инвертор с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) выходного напряжения».

Наличие неуправляемого выпрямителя, сильно искажает форму потребляемого тока, что приводит к отрицательному влиянию преобразователей на сеть и на окружающую среду.

Современный асинхронный электропривод реализуется на базе силовой полупроводниковой техники с применением микропроцессорного управления. Его возможности позволяют организовать регулирование выходных координат привода в широком диапазоне, с высокой точностью и быстродействием. Однако, далеко не каждая система управления (СУ) обеспечивает работу электропривода (ЭП) с максимальными энергетическими показателями.

Одним из эффективных способов решения задачи повышения энергоэффективности асинхронного электропривода – применение корректоров коэффициента мощности (ККМ). На практике это означает, что во входную цепь практически любого импульсного преобразователя (в том числе и преобразователя частоты) включается специальное устройство, обеспечивающее снижение потребления реактивной мощности и искажения формы тока питающей сети.

ККМ принято классифицировать по трём основным группам [1]:

- пассивные корректоры мощности;
- низкочастотные активные корректоры мощности;
- высокочастотные активные корректоры мощности.

Пассивные ККМ являются самыми простыми. Они не содержат элементов, регулирующих ток или напряжение. Основной принцип их работы основан на фильтрации потребляемого тока. Пассивная коррекция позволяет достичь значения коэффициента мощности до 0,8. Такая схема требует включения индуктивных элементов, имеющих высокие массогабаритные показатели. Кроме того, требуется изменение индуктивности (подстройку) при изменении тока нагрузки.

Главное отличие активных ККМ является наличие в схеме силовых ключей, с помощью которых происходит регулирование выходного напряжения и потребляемого тока.

Низкочастотные активные ККМ позволяют регулировать выходное напряжение и улучшить коэффициент мощности, однако они так же как пассивные ККМ требуют крупногабаритных реактивных элементов и коэффициент мощности не может превышать значения 0,9.

Для уменьшения размеров элементов фильтра необходимо увеличить частоту преобразования. Высокочастотный ККМ представляет собой обычный выпрямитель (диодный мост) и DC/DC преобразователь. При этом DC/DC преобразователь, имея определённый закон управления, обеспечивает необходимую форму тока и стабилизирует выходное напряжение (рис. 1).

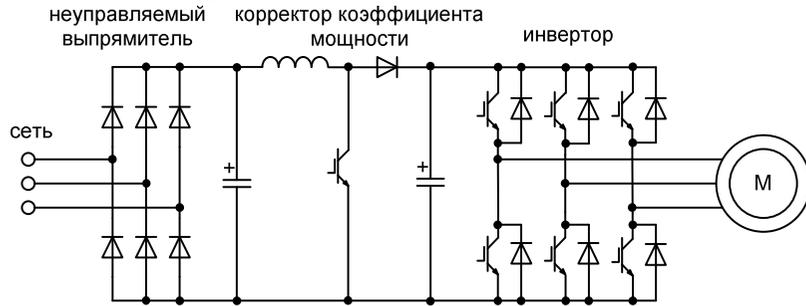


Рис. 1. Силловая схема асинхронного электропривода с корректором коэффициента мощности

Для исследования влияния неуправляемого выпрямителя ПЧ на форму потребляемого из сети тока была создана его математическая модель в пакете расширения *Simulink* среды инженерных расчетов *Matlab* (рис. 2, а). Форма потребляемого из сети тока представлена на рис. 2, б, а его гармонический состав на рис. 4. Гармонический анализ был проведен с помощью инструмента *FFT Analysis*, входящего в состав блока *Powergui*. Анализ показал, что в потребляемом токе в значительной степени содержатся нечетные гармоники, величина 1-ой гармоники всего 0,6256, а величина *THD* (суммарное гармоническое искажение) равна 212,36 %. Коэффициент мощности равен 0,42.

Математическая модель неуправляемого выпрямителя с ККМ представлена на рис. 3, а, а форма потребляемого из сети тока на рис. 3, б. Закон управления ККМ – переключение при нуле тока дросселя. В отличие от системы без ККМ, в данном случае форма потребляемого тока наиболее приближена к синусоиде, о чем говорит анализ гармонического состава тока, а также коэффициент мощности, равный 0,89.

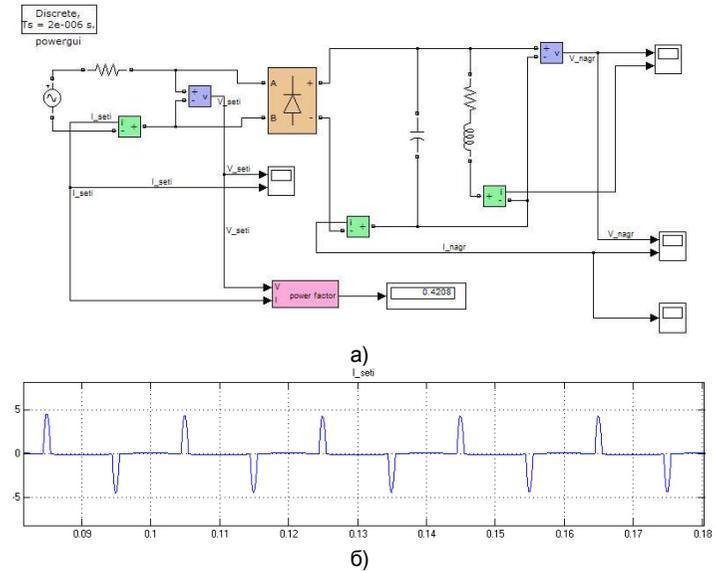


Рис. 2. Математическая модель неуправляемого выпрямителя (а) и форма потребляемого тока (б)

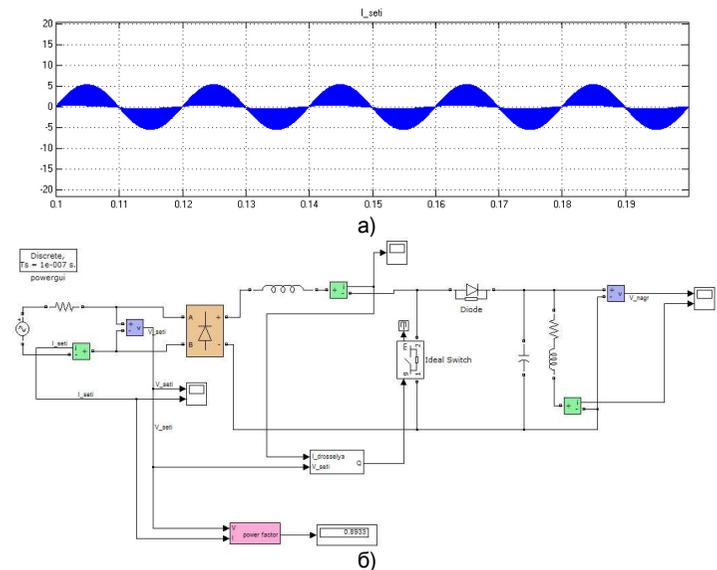


Рис. 3. Математическая модель неуправляемого выпрямителя с ККМ (а) и форма потребляемого тока (б)

Гармонический состав тока представлен на рис. 4. Величина 1-ой гармоники равна 2,901, 3-ей гармоники – 0,08, остальные практически равны нулю. Величина THD составляет 26,16 %.

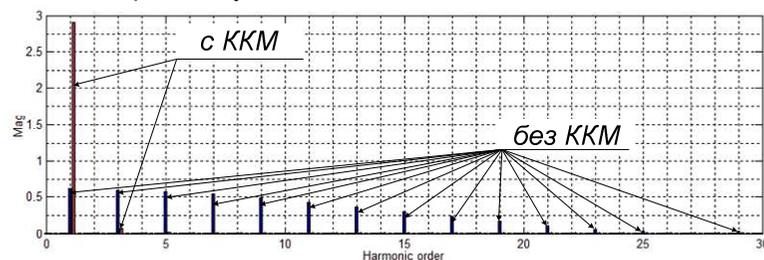


Рис. 4. Гармонический состав потребляемого тока

Библиографический список

1. Малаханов, А. А. Математическое моделирование импульсно-модуляционных систем с коррекцией коэффициента мощности: дис. канд. техн. наук. Брянск, 2007. – С. 16.
2. Семенов, Б. Ю. Силовая электроника: от простого к сложному / Б. Ю. Семенов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 416 с.

П. С. Морозов, студент, М. А. Захаров, соискатель;
А. М. Захаров к. т. н., доцент

Расчет и моделирование нагрузки воздуходувки 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 моделей нагрузок, адекватно отражающих работу реальных производственных механизмов.

В качестве нагрузочного устройства используется электропривод типа ПЧ – АД с КЗР. В качестве преобразователя частоты применяется преобразователь частоты с рекуперацией энергии типа MITSUBISHI FR-F741-7.5K-EC. Исследуемый и нагрузочный двигатели идентичны и имеют жёсткую связь с помощью соединительной муфты.

В студенческой научно – исследовательской работе проведен анализ нагрузочных характеристик электропривода воздуходувки. Разработан закон регулирования нагрузочного двигателя, адекватно отражающий поведение реального исследуемого объекта.

Проведена апробация полученного закона в ходе научно-исследуемой работы.

С. А. Крюков, студент, М. А. Захаров, соискатель;
А. М. Захаров, к. т. н., доцент

Совершенствование лабораторного стенда на базе высоковольтного преобразователя частоты «ВЧРП»

На кафедре ЭП и АПУ Ивановского государственного энергетического университета им. В.И. Ленина установлен высоковольтный преобразователь частоты ВЧРП 0,38/020-А-УХЛ4. Преобразователь состоит из многообмоточного фазосдвигающего трансформатора, силовых модулей и контроллера. Каждый силовой модуль является источником напряжения с преобразованием переменного напряжения входного трансформатора в постоянное напряжение с последующим преобразованием в переменное напряжение регулируемой частоты. Выпрямитель силового модуля собран на основе диодного трехфазного двухполупериодного неуправляемого выпрямителя. Электролитический конденсатор сглаживает выпрямленное напряжение. Регулирование частоты и выходного напряжения осуществляется широтно-импульсной мо-

дуляцией, выполненной на 4-х IGBT модулях, соединенных по схеме полного моста. Частота выходного напряжения силового модуля регулируется за счет изменения периода циклов с положительным и отрицательным напряжениями меандра ШИМ. Величина базового переменного выходного напряжения силового модуля регулируется за счет изменения скважности импульсов ШИМ. Выходы соседних силовых модулей подключаются последовательно, разные фазы соединяются звездой, что позволяет получить на выходе высокое напряжение. Каждый силовой модуль вырабатывает $\frac{1}{4}$ фазного напряжения.

В результате научно-исследовательской работы рассчитаны и установлены датчики напряжения, снимающие входные напряжения в каждой фазе и на каждом силовом модуле многоуровневого высоковольтного преобразователя частоты. Рассчитаны и установлены датчики тока в каждой фазе ВЧРП. Установлен датчик скорости на валу двигателя. Произведено согласование сигналов и их передача на плату сбора данных, установленную на персональном компьютере. Проведённая работа позволяет в реальном времени снимать осциллограммы тока и напряжения, а также показания датчика скорости и выводить их на компьютер, что позволяет существенно расширить лабораторный практикум по дисциплине «Высоковольтный автоматизированный электропривод».

И. С. Илюхин, студент; С. К. Лебедев, к. т. н., доцент

Наблюдатели нагрузки в комбинированных системах позиционирования электромехатронных модулей

Использование электромехатронных модулей на основе электрических машин переменного тока, преобразователей частоты с интеллектуальными силовыми модулями и микропроцессорным управлением на *DSP* контроллерах позволяют реализовать заданные статические и динамические показатели, существенно повысить полосу пропускания, обеспечивая тем самым технологическое оборудование новыми, конкурентоспособными достоинствами. Особенно актуально использование электромехатронных модулей в системах позиционирования для использования в станкостроении и робототехнике, где возрастают требо-

вания к статическим и динамическим характеристикам в условиях возрастания количества осей управления на единицу оборудования. При этом характерным фактором влияния на характеристики каждой оси является кинематические и динамические связи между осями в виде переменных нагрузок сложной формы.

Классическая теория автоматического управления говорит о двух основных принципах управления:

- регулирование по отклонению;
- регулирование по возмущению.

Долгие годы системы управления автоматизированным электроприводом строились на основе использования принципа регулирования по отклонению при построении контуров регулирования тока, скорости и положения, а влияние нагрузки на характеристики определялось жесткостью механических характеристик при использовании статических регуляторов. Астатические регуляторы в рамках регулирования по отклонению обеспечивают контроль только статической ошибки. Альтернатива – принцип регулирования по возмущению на практике не применялся из-за сложности аналоговой технической реализации связи по возмущению и сложностей при определении мгновенных значений возмущений.

Реализация компенсирующей связи по возмущению на основе использования наблюдателей нагрузки и техническая реализация в рамках цифровых микропроцессорных систем позволяет перейти к практическому использованию комбинированного управления, что позволит контролировать качество динамических процессов по возмущению.

Произведена оценка эффективности различных вариантов построения комбинированных систем, как с различными регуляторами положения, так и с различными компонентами контура компенсации нагрузки.

Рассмотрены варианты построения комбинированной системы со статическими: модальным регулятором состояния и ПД регулятором, так и астатическими регуляторами с астатизмом первого и второго порядка. Для каждого варианта апробирована методика расчета параметров регулятора по заданной полосе пропускания системы позиционирования по положению.

В качестве наблюдателей нагрузки предлагается использование астатических наблюдателей состояния механической части электропривода с фильтрацией сигнала нагрузки для минимизации динамической ошибки оценивания. Предлагается методика синтеза блока компенсации нагрузки для мехатронных модулей

электропривода с векторным управлением, характеризующихся малой постоянной времени контура регулирования момента двигателя.

Выполнено сравнение характеристик по управлению и возмущению электропривода при использовании в качестве основного того или иного стандартного распределения корней характеристического уравнения замкнутой системы. Даны практические рекомендации распределений по Бесселю, Баттерворту, Чебышеву и биному Ньютона.

Произведен теоретический анализ динамики вариантов построения комбинированной системы по каналу возмущения. Анализ выполнен на основе использования методов пространства состояния и аналитических возможностей программного комплекса *MathCAD*. Получены аналитические соотношения, позволяющие выполнить инженерный расчет основных элементов комбинированной системы.

Имитационное моделирование в среде *Simulink Matlab* подтвердило правомерность технических решений в условиях принятых допущений.

Сделан анализ динамики системы, как по управлению, так и по возмущению в условиях действия механических нагрузок различной формы: постоянной, линейно нарастающей, параболической и синусоидальной. Осуществлена оценка робастных свойств комбинированной системы управления электроприводом при вариации основных параметров механической части электропривода. Предполагается реализация предложенных алгоритмов комбинированных систем на основе современных *DSP* контроллеров.

Т. Н. Андреева, студентка; А. В. Пруднов, к. т. н., доцент

Цифровое возбудительное устройство синхронных двигателей ВТЦ-СД-Щ

Цифровое возбудительное устройство типа ВТЦ-СД-Щ (в дальнейшем возбудительное устройство) предназначено для управления возбуждением синхронных двигателей (СД) мощностью от 200 до 4000 кВт и напряжением до 10 кВ со щеточной системой возбуждения, при прямом и реакторном пуске, при синхронной работе и в аварийных режимах.

Возбудительное устройство состоит из металлического шкафа двухстороннего обслуживания, представленного на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид возбудительного устройства, панели индикации и управления, главной страницы дисплея

В возбудительном устройстве имеется два равнозначных, как в схемотехническом, так и в функциональном плане, цифровых регуляторов возбуждения: основной и резервный. Оба регулятора имеют одинаковый набор законов регулирования и работают независимо друг от друга с приоритетом основного, резервный – в горячем резерве. Каждый регулятор имеет свой, независимый от другого, канал измерения на плате датчиков. Данный принцип построения обеспечивает 100 %-ое резервирование как по управлению возбуждением, так и по измерению параметров работы двигателя.

Плата датчиков обеспечивает подготовку к вводу в контроллеры по отдельному каналу для каждого: сигналов напряжения и тока статора, напряжения и тока возбуждения, фазных напряжений питания тиристорного преобразователя. При этом измерение тока статора осуществляется тороидальным датчиком тока, подключенным к входу АЦП микроконтроллера, а измеренные напряжения через входные трансформаторы поступают на входы гальванически развязанных повторителей переменного тока, что обеспечивает высокую надежность, стабильность и линейность измерительных каналов во всем диапазоне измерения.

Вычисление активной и реактивной составляющей тока статора и $\cos \varphi$ производится цифровой обработкой регуляторами возбуждения синусоидальных сигналов тока и напряжения статора СД.

Плата обмена служит для приема сигналов от высоковольтных систем плавного пуска разных типов. Она позволяет принимать как дискретные сигналы от силовых выключателей систем плавного пуска, так и аналоговые, используемые для дистанционного управления током возбуждения во время разгона ротора. Пассивный разветвитель предназначен для организации сети обмена с САУ по RS-485.

Плата обмена и пассивный разветвитель устанавливаются внутри шкафа возбудительного устройства на предназначенные для них посадочные места.

Оконечное устройство линии RS-485 служит для питания, защиты и обеспечения корректной работы гальванически развязанной линии сети обмена между несколькими возбудительными устройствами, расположенными в одном рабочем помещении, и устанавливается в удобном для потребителя месте рабочего помещения (или в шкафу возбудительного устройства).

Регулятор возбуждения выполнен на базе высокоскоростного 32-х разрядного RISC микропроцессора. Наличие на его борту широкого спектра устройств ввода-вывода, включая АЦП и ЦАП, большого объема постоянной и оперативной памяти, средств связи с периферийными устройствами, обеспечили высокую степень интеграции и надежность функционирования регулятора.

Передача управления с основного регулятора на резервный и обратно происходит либо по положению переключателя «ОСНОВНОЙ / РЕЗЕРВНЫЙ», либо при зависании программного обеспечения или выходе из строя работающего регулятора – автоматически.

Программа, управляющая работой регулятора, хранится во флэш-памяти микроконтроллера. После включения питания возбудительного устройства программа инициализирует все подконтрольные устройства, определяет режим работы и приступает к постоянному контролю и управлению работой возбуждения двигателя. Обработка цифровых и аналоговых сигналов происходит с частотой 1200 Гц и, в соответствии с текущим режимом, программа осуществляет выработку сигналов управления.

А. В. Алейников, студент; А. А. Репин, ассистент

Определение статических деформаций в кинематических узлах механизма подачи с шариковинтовой парой

Шариковая винтовая передача – наиболее распространенная разновидность передачи винт-гайка качения (винтовая пара с промежуточными телами качения: шариками или роликами).

Функционально шарико-винтовая передача (ШВП) служит для преобразования вращательного движения в возвратно-поступательное (и наоборот). ШВП обладает всеми основными техническими преимуществами передачи винт-гайка скольжения, и при этом не имеет ее главных недостатков, таких как низкий КПД, повышенные потери на трение, быстрый износ.

Повышение точности обработки изделий и производительности металлорежущих станков остается актуальной задачей современного машиностроения как в России, так и за рубежом. Ее решение в значительной степени зависит от динамических характеристик электроприводов (ЭП) подач, выполняемых, как правило, с установкой электродвигателя на вал механизма без использования коробки передач. Такое «безредукторное» исполнение, а также применение ШВП и направляющих качения в качестве элементов механизмов подач (МП), преобразующих вращательное движение вала двигателя в поступательное движение исполнительного органа (стола), позволило существенно повысить КПД и производительность многооперационных станков с числовым программным управлением (ЧПУ). При этом комплексное решение задачи повышения точности позиционирования связано с необходимостью анализа статических и динамических деформаций всех элементов и узлов системы электропривода, одним из которых является механизм подачи. Его типовая схема приведена на рис. 1.

Основными элементами здесь являются: Р – ротор синхронного электродвигателя с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ); М – сильфонная муфта; ШВП – шариковинтовая пара; З – заготовка; С – стол; Н – направляющие скольжения; П1...4 – подшипниковые узлы; $M_{эм}(t)$, $\omega_{дв}(t)$, – соответственно электромагнитный момент и угловая скорость ротора СДПМ; $M_b(\varphi, t)$, $\omega_b(\varphi, t)$ – момент и угловая скорость в сечении винта, соответствующем текущему положению гайки ШВП; $v_n(x, t)$, $F_n(x, t)$, $F_{рез}(x, t)$, $F_{тр-н}(x, t)$, – соответственно скорость, усилие подачи, передаваемое

мое винтом ШВП, усилие сопротивления, возникающее при обработке заготовки, и усилие трения о направляющие, соответствующие текущему положению линейно перемещаемого узла; $M_{тр_п1...4}(\omega_{дв})$, $M_{тр_швп}(\omega_в)$ – соответственно моменты трения в подшипниках и ШВП.

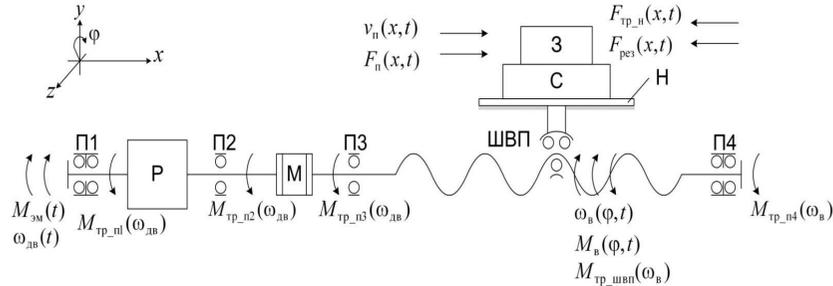


Рис. 1. Кинематическая схема механизма подачи

Определение статических узлов МП при заданном законе движения исполнительного органа было выполнено нами на основе расчетных схем рис. 2 и 3. При этом ошибка позиционирования определялась как сумма деформаций винта на растяжение-сжатие и кручение. В качестве входного задающего воздействия использовался угол поворота вала двигателя.

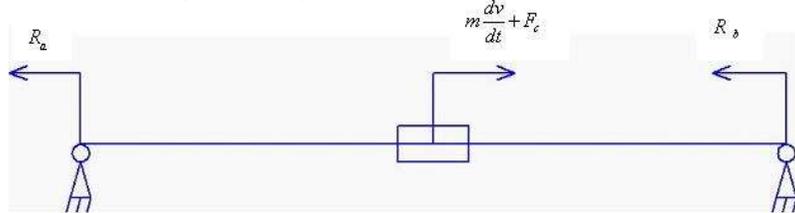


Рис. 2. Расчетная схема для определения продольных деформаций винта ШВП

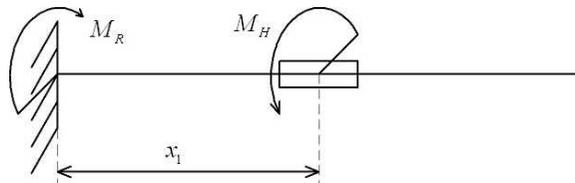


Рис. 3. Расчетная схема для определения крутильных деформаций винта ШВП

На рис. 2 и 3 введены следующие обозначения: R_a , R_b – силы реакций опор винта; m , v – масса и скорость движения линейно перемещаемого узла; F_c – сила сопротивления движению; M_R , M_H – моменты реакции и момент на валу двигателя.

Уравнения, определяющие реальное положение x_1 (с учетом деформаций) идеальное положение (без учета деформаций) имеют следующий вид:

$$x_{об} = x_1 + \frac{(m \frac{dv}{dt} + F_c) \cdot (l - x_1) \cdot x_1}{IEA},$$

откуда

$$x_1 = \frac{\left(1 + \frac{m \frac{dv}{dt} + F_c}{EA}\right) \pm \sqrt{\left(1 + \frac{m \frac{dv}{dt} + F_c}{EA}\right)^2 + 4 \frac{m \frac{dv}{dt} + F_c}{IEA} \cdot x_{об}}}{2 \frac{m \frac{dv}{dt} + F_c}{IEA}} \quad (1)$$

где $x_{об}$ – положение исполнительного органа без учета деформаций винта; l , E , A – соответственно длина, модуль Юнга на растяжение-сжатие и площадь сечения винта ШВП.

Исследования показали, что даже в статике ошибка из-за деформаций стержня может достигать значения в 6 мкм, что довольно существенно для современных требований точности изготовления.

Далее были рассмотрены деформации винта ШВП на кручение. Зависимости, связывающие идеальную и реальную координаты линейны и имеют следующий вид:

$$x_{об} = x_1 + \frac{M_H \cdot x_1 \cdot h}{GJ_p},$$

$$x_1 = \frac{x_{об} \cdot GJ_p}{M_H \cdot h + GJ_p}. \quad (2)$$

Рассчитанная по (2) максимальная ошибка позиционирования может достигать значения 0.12 (град), что в переводе в поступательное движение (через шаг гайки) равно 10 мкм.

Таким образом, разработанная математическая модель механизма подачи с шариковинтовой парой позволяет дать среднюю оценку влияния возможных деформаций винта на текущее положение исполнительного органа.

Соотношения (1) и (2), возможно использовать при построении замкнутых систем регулирования, не имеющих высокоточных

датчиков положения, а также при разработке бездатчиковых алгоритмов управления для следящих и позиционных систем.

Д. С. Головцов, И. Д. Поболелова, студенты;
А. А. Репин, ассистент

Динамическая модель беспилотного мини-вертолета

Современные беспилотные мини-вертолёты (рис. 1) находят все более широкое применение в качестве средств разведки и наблюдения при проведении полицейских и военных операций в городских условиях, где пространство зачастую имеет весьма сложную конфигурацию с множеством препятствий различной природы.



Рис. 1. Беспилотный мини-вертолёт

Аэродинамические схемы, используемые для построения беспилотных мини-вертолётов, отличаются значительным разнообразием, однако, в настоящее время наибольшее распространение получили две из них – схема с двумя соосными несущими винтами, и схема с одним несущим и одним рулевым хвостовым винтами (т. н. классическая схема). Сравнительная характеристика аэродинамических беспилотных мини-вертолетов представлена в табл. 1.

Таблица 1. Основные аэродинамические схемы беспилотных мини-вертолётов

	Соосная схема	Схема с рулевым винтом (классическая)
Достоинства	Более высокий КПД. Отсутствие потерь на рулевой винт. Большая маневренность	Простота конструкции. Большая распространённость
Недостатки	Конструктивная сложность	Повышенная аварийность из-за рулевого винта. Большая сложность в управлении

Для разработки проекта беспилотного мини-вертолета нами была выбрана классическая схема ввиду большей простоты ее конструкции в сравнении с соосной.

Необходимость решения не тривиальной задачи формирования траектории движения предъявляет весьма высокие требования как к собственным скоростным и маневровым характеристикам мини-вертолётов, так и к квалификации операторов, управляющих полетом. В этой связи разработка математической модели, отражающей основные статические и динамические характеристики автономного объекта рассматриваемого типа, является актуальной задачей. Система регулирования, синтезированная на базе такой модели, позволит значительно облегчить процесс управления для оператора за счёт автоматической идентификации, настройки и коррекции в реальном времени большинства параметров полёта.

Основой для предлагаемой нами модели мини-вертолёта послужило известное и широко используемое в виртуальных тренажерах для обучения пилотов математическое описание обычных «больших» вертолётов. За счет введения ряда упрощений и допущений [1], связанных с малыми габаритами и весом исследуемого объекта, а также за счет представления структуры общей системы в виде совокупности отдельных подмоделей мехатронных модулей, удалось разработать модель, включающую всего лишь 17 переменных состояния.

При составлении математического описания в первую очередь нами были установлены основные переменные состояния и параметры вертолета как динамической системы, определены основные силы и моменты, действующие на мини-вертолет, а также направление и характер их воздействия. Основой для построения уравнений движения послужила схема модели беспилотного мини-вертолёта как твердого тела, представленная на рис. 2.

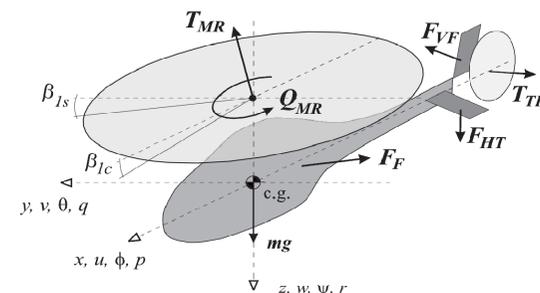


Рис. 2. Схема действующих сил и моментов

Далее модель твердого тела была расширена за счет учета вибрационной динамики главного несущего винта.

Исследования в среде Simulink MATLAB показали, что представленное нами математическое описание беспилотного мини-вертолета может быть использовано при разработке систем управления реального времени, обеспечивающих выполнение широкого класса полетных задач, в том числе и фигур высшего пилотажа.

К перспективам развития данного проекта можно отнести синтез системы управления на базе разработанной модели беспилотного мини-вертолета, а также создание физической модели для аэродинамической схемы, сопоставление данных, полученных от изучения математической модели с данными реальных экспериментальных исследований на базе физической модели.

Библиографический список

1. Gavrillets, V. Dynamic model for a miniature aerobatic helicopter / V. Gavrillets, B. Mettler, E. Feron // Proc. of AIAA Guidance Navigation and Control Conf. Montreal, 2001. – P. 1–22.

С. А. Добротин, магистрант; В. Ф. Глазунов, д. т. н, профессор

Управление намоткой ленточных текстильных материалов

В приготавительном и отделочном производствах текстильной промышленности широко используется оборудование для формирования сновальных валов и ткацких навоев, а также для намотки ткани при обработке ее в рулонах. Специфика технологических требований к указанному оборудованию во многом определяется как свойствами наматываемого в рулон материала, так и особенностями последующих технологических операций.

Известно, что качественная намотка ленточных материалов может быть получена на осевых накатах, позволяющих регулировать скорость и натяжение наматываемого материала.

Так при размотке сновальных валов на глихтовальном оборудовании и формировании ткацких навоев главными требованиями являются идентичность сновальных паковок по плотности намотки и длине намотанной основы. В свою очередь оборудование для обработки ткани в рулонах предъявляет жесткие требования к равномерности плотности намотки.

Сложность выполнения указанных требований связана, прежде всего, с ограниченным числом управляющих координат. Так при формировании сновальных валов такой управляющей координатой является давление, создаваемое в контакте уплотняющего и сновального валов при жестком ограничении на вариацию скорости намотки и натяжение основы, а в осевых накатах для намотки ткани – ее натяжение.

Используемые в промышленности системы, управляющие осевой намоткой ткани построены, как правило, на принципе стабилизации ее натяжения и линейной скорости намотки. Их основным недостатком является отсутствие учета внутренних напряжений в рулоне, обусловленных давлением слоев наматываемого материала и, как следствие, невозможность качественного формирования рулона и его равномерной структуры. Последнее, по видимому, можно объяснить свойствами текстильных материалов, анизотропная структура которых отличается большой подвижностью и малой плотностью.

Большинство известных математических моделей процесса намотки трудно применить в системе управления формированием ее плотности, так как они, как правило, оценивают плотность уже сформированного рулона.

Один из вариантов математической модели процесса намотки, ориентированной на микропроцессорную реализацию, основан на методе механических аналогий [1]. При этом формируемая паковка представляется в виде соединения элементарных упругостей и масс, отражающих деформационные свойства витков и их давление на нижележащие слои. Однако модель не учитывает касательные напряжения, вызванные действующим натяжением материала. Использование ее в системе управления возможно на базе микропроцессора с большим объемом оперативной памяти.

Разработанная модель позволяет исследовать влияние изменения натяжения наматываемого полотна на деформацию внутренних слоев и получить необходимую зависимость натяжения от числа оборотов рулона при условии его равномерной плотности. Известные способы измерения плотности по весу единицы объема рулона, отношению числа витков материала к единичному приращению радиуса рулона, а также межвитковому давлению, позволяют определить некоторое среднее значение плотности, не учитывая однако возможность образования внутри рулона отрицательных напряжений.

В настоящее время в качестве математической модели эталонного процесса гибких материалов используют спираль Архимеда [2]:

$$R = R_0 + c\varphi, \quad (1)$$

где R_0 и R – соответственно начальный и текущий радиус намотки; φ – угол поворота рулона; $c = \delta/(2\pi)$ (δ – толщина наматываемого материала).

При этом в процессе намотки измеряют реальный радиус рулона и его отклонение от эталонного значения (1), регулируя в зависимости от него натяжение материала и отвод уплотняющего вала. Реальный радиус рулона либо измеряют с помощью накладного роликового датчика, либо вычисляют на основе информации о числе оборотов рулона и длине наматываемого материала.

При намотке с постоянным натяжением по мере сжатия и проседания слоев уменьшается удлинение ранее намотанных витков, что приводит к изменению плотности намотки.

Стабилизировать плотность намотки материала 1 возможно в системе управления [3], содержащей датчики длины 2 наматываемого материала 3, числа оборотов 4 рулона 5 и электроприводы 6, 7 механизмов рулона и подающей валковой пары 8, а также задатчики 9 и 13 соответственно скорости и натяжения полотна.

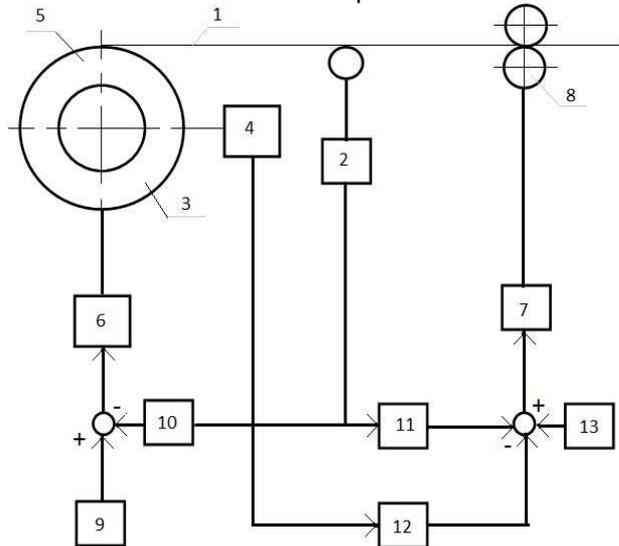


Рис. 1. Функциональная схема стабилизации плотности

При этом в качестве сигнала задания частоты вращения двигателя подающих валков используется разность напряжений, снимаемых с датчиков длины 2 и числа оборотов 4 рулона после их масштабирования (блоки 10, 11, 12). Это позволяет сформировать мягкую зависимость натяжения от частоты вращения рулона и таким образом улучшить структуру его формирования.

Процесс формирования теоретического радиуса намотки, реализуемый обычно с использованием спирали Архимеда (1) предполагает известную толщину наматываемого материала. Ее можно также вычислить по результатам измерения начального числа оборотов и радиуса рулона и в последующем использовать в качестве исходной информации для задания δ .

Библиографический список

1. Глазунов, В. Ф., Сидякин В.Ф., Куленко М.С. Разработка математической модели процесса формирования рулона ткани // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2001, № 5. – С. 80–87.
2. Кутын, А. Ю., Кутын Ю.К. О моделировании процесса формирования цилиндрических паковок рулонного типа // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2001, № 2, С. 113–117.
3. А. с. 1350097 СССР, МКИ В 65 Н 77/00. Устройство для регулирования плотности намотки материала в рулон // Литвинский А.Н., Александров В.П., Глазунов В.Ф. – № 3995523/31–12. Заявл. 24.12.85, опубл. 07.11.87, Б. пол. № 41.

Д. А. Панулин, студент; С. К. Лебедев, к. т. н., доцент

Исследование комбинированных систем позиционирования манипулятора промышленного робота

На современном этапе развития промышленного производства на первый план выходит использование промышленных роботов для автоматизации технологических, манипуляционных, транспортных и складских операций. Применение промышленных роботов, манипуляторов в современных технологических процессах позволяет коренным образом изменить технико-экономические показатели предприятий, их инфраструктуру, и в наилучшей степени отвечает государственной стратегии на модернизацию промышленности.

В связи с широким спектром технологических операций по габаритам и грузоподъемности манипуляторы промышленных роботов существенно отличаются по кинематической конфигурации. Разнообразие кинематических схем, нелинейность матема-

тических моделей затрудняет унификацию методик кинематического и динамического анализа при разработке систем управления движением звеньев манипулятора из чего в итоге складывается перемещение исполнительного органа или объекта манипулирования.

Поэтому качество функционирования промышленного манипулятора в максимальной степени определяется тактикой распределения движения схвата по приводам звеньев кинематической схемы. Применение в робототехнике современных электрических машин с частотными преобразователями и векторными системами управления расширяет возможности применения новых структур систем управления движением каждого звена манипулятора.

Современный комплектный электропровод с системой векторного управления обеспечивает практически безынерционный контур управления моментом на валу двигателя. Контур регулирования момента имеет заводские настройки, для систем позиционирования, к которым относится большинство применения приводов манипуляторов, основным становится контур регулирования положения звена манипулятора. Ограничение или задание скорости перемещения звена обеспечивается нелинейными свойствами регулятора положения или использованием S-образных задатчиков интенсивности на входе регулятора.

Преобладающими структурами контура регулирования положения являются:

- структура регулирования по отклонению с отрицательной обратной связью по положению и регуляторами положения на основе пропорционального, интегрального и дифференциального каналов воздействия на сигнал ошибки;
- структура регулирования на основе модального регулятора с обратной связью по состоянию объекта регулирования.

Такое традиционное построение системы позиционирования с использованием только обратных связей обеспечивает заданные показатели качества по управлению, но реакция на возмущения, присущие манипуляционным системам (центробежные, кориолисовы и гравитационные), не контролируется. Здесь можно только достигнуть сведения к нулю постоянной нагрузки на звено, то есть обеспечить астатизм системы по положению.

Теоретическую инвариантность, то есть независимость процессов от переменной нагрузки звена, может только комбинированная схема системы управления, когда обратная связь по положению обеспечивает заданную динамику по управлению, а

обратная связь по возмущению компенсирует ошибку при изменении нагрузки привода.

Использование принципа регулирования по возмущению, являющегося основой комбинированных систем управления, долгие годы сдерживалось отсутствием технических возможностей измерения возмущения действующего в тех или иных системах.

Применение наблюдателей нагрузки и их реализация в рамках микропроцессорных систем позволяет перейти к практическому применению комбинированного управления в системах управления движением манипуляторов при позиционировании схвата.

Выполнен анализ кинематики наиболее распространенной в робототехнике кинематической схемы с вертикальной двойной цилиндрической системой основных перемещений.

Разработаны структура и параметры преобразователей координат, позволившие в системе управления движением связать задание глобальных координат схвата и с заданиями на перемещение каждого привода звена, а также – связать сигналы датчиков положения звеньев с глобальными координатами положения схвата.

Средствами компьютерного моделирования в среде *Simulink Matlab* проведены всесторонние испытания разработанных преобразователей при работе во всех квадрантах глобальных координат по заданным траекториям движения схвата.

Разработана модель манипулятора как объекта управления, позволившая:

- оценить форму и величину нагрузок на звенья;
 - определить пределы изменения приведенных инерционных свойств каждого звена;
 - провести испытания системы управления движением звеньев при движении схвата робота по заданной траектории.
- Разработаны структуры, разработаны инженерные методы расчета основных элементов комбинированной системы:
- регуляторов положения;
 - наблюдателей нагрузки;
 - элементов контура компенсации нагрузки.

Проведены исследования различных вариантов комбинированной системы, отличающиеся типом регулятора положения, способами задания скорости движения и структурами наблюдателей нагрузки привода звена.

При этом были исследованы временные и частотные характеристики системы по каналам управления и возмущения, спосо-

бы задания и ограничения скорости, а также определена реакция на разные формы возмущающего воздействия:

- постоянная нагрузка;
- линейно нарастающая нагрузка;
- нагрузка, параболически изменяющаяся во времени;
- синусоидально пульсирующая нагрузка.

Выявлены преимущества, достигаемые при использовании систем управления движением звеньев, по сравнению с системами регулирования по отклонению, и основные закономерности при синтезе и анализе комбинированных систем управления в современном электроприводе с векторным управлением.

Комбинированная система с астатическими наблюдателями нагрузки обеспечивает отсутствие статической ошибки при основных видах нагрузки, а динамическая ошибка при пульсирующей нагрузке сводится к минимуму.

Наилучшие результаты в задании и ограничении скорости движения при позиционировании звена обеспечивает использование задатчиков интенсивности первого и второго порядка.

Совместное компьютерное моделирование манипулятора, приводов и системы управления в среде *Simulink* позволило произвести всесторонние исследования характеристик вариантов построения комбинированных систем. Анализ результатов исследований позволяет дать практические реализации по применению на практике того или иного варианта комбинированной системы.

Д. А. Фролов, студент; С. К. Лебедев, к. т. н., доцент

Лабораторный практикум «Компьютерные технологии в математике и технических расчетах» для студентов профиля «Электропривод и автоматика»

Современные промышленные электроприводы представляют собой сложную электромехатронную систему, при проектировании, наладке и эксплуатации которой специалисты должны рационально использовать возможности современных компьютерных технологий. Поэтому при обучении студентов профиля «Электропривод и автоматика» на кафедре «Электропривод и автоматизация промышленных установок» (ЭП и АПУ) Ивановского государственного энергетического университета (ИГЭУ) требу-

ется усиление как теоретической, так и практической подготовке в области использования компьютерной техники при выполнении профессиональной деятельности.

Высшее профессиональное образование в Российской Федерации в настоящее время находится в активной фазе внедрения новых Федеральных государственных образовательных стандартов третьего поколения (ФГОС-3), которые в своей структуре и содержании имеют профильно-компетентностную направленность. Такой подход предполагает формировать профиль подготовки, как многообразие компетенций, включающих теоретические знания, умения и навыки выполнения профессиональных задач.

Дисциплина «Компьютерные технологии в математике и технических расчетах» в ИГЭУ является частью математического и естественнонаучного цикла дисциплин общеобразовательных программ (ООП) очной и заочной форм обучения по направлению подготовки 140400 «Электроэнергетика и электротехника», профиль подготовки «Электропривод и автоматика», входит в вариативную часть цикла, состав которой определяется в ФГОС вузом, под кодом Б2.В.ОД.3.

Цель дисциплины состоит в формировании у будущих бакалавров навыков решения практических задач, связанных с использованием компьютерной техники, при разработке и анализе электротехнических и электромеханических объектов, а так же изучения основных концепций и принципов использования наиболее распространенных программных комплексов в математических и технических расчетах.

Достижение указанной цели требует решения в рамках дисциплины следующих задач:

- формирование знаний и практических навыков выполнения математических вычислений, построение и исследование графиков различных функций, визуализации математических операций в компьютерной среде;
- изучение методов компьютерного вычисления интегралов, производных, пределов, решения линейных и нелинейных, алгебраических и дифференциальных уравнений, а также систем алгебраических и дифференциальных уравнений;
- освоение процедур символьных преобразований скалярных и матричных математических объектов, символьных прямых и обратных преобразований Фурье и Лапласа, символьных дискретных преобразований;

- формирование начальных навыков и основных приемов работы в графической среде моделирования динамических систем;

- освоение виртуального моделирования электрических цепей с распределенными и сосредоточенными параметрами.

Лабораторный практикум по дисциплине основан на компьютерных программных комплексах *MathCAD*, *Matlab* и включает следующие лабораторные работы:

- арифметические, алгебраические, тригонометрические, комплексные и матричные операции. Решение уравнения, графики;

- интегралы, производные, пределы функций, вычисление сумм и произведений. Решение дифференциальных уравнений и систем дифференциальных уравнений;

- символьные преобразования выражений, решение уравнений и разложения. Матричные преобразования, Фурье и Лапласа;

- окно моделирования, библиотека элементов: источники и регистрация сигналов. Библиотека элементов: блоки математических операций, нелинейные элементы. Библиотека элементов: порты и подсистемы, переключение и мультиплексирование сигналов. Инструменты линейного анализа динамических звеньев и систем;

- моделирование электрических источников, однофазные и трехфазные пассивные элементы, измерительные приборы. Примеры моделирования однофазных и трехфазных цепей, моделирование цепей с распределенными параметрами;

Разработаны программы составных частей практикума, вопросы входного тестирования, пакеты индивидуальных заданий, шаблоны отчетов и контрольно-измерительные материалы.

К. Е. Смагин, Е. Д. Шаров, студенты; А. Н. Ширяев, к. т. н., доцент

Измеритель углового рассогласования на базе синусно-косинусного вращающегося трансформатора

В современных системах управления и измерения в качестве первичных датчиков угла широко используются синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы (СКВТ), представля-

ющие собой микромашины переменного тока. В пазах магнитопроводов ротора и статора СКВТ размещены, как правило, по две распределенные обмотки, сдвинутые на 90° . Первичные обмотки, одна из которых называется обмоткой возбуждения, а другая – квадратурной обмоткой, расположены на статоре, а вторичные обмотки – синусная и косинусная, расположены на роторе. Возможно и обратное расположение обмоток.

СКВТ бывают однополюсными и двухполюсными. Многополюсные СКВТ называют иначе СКВТ с электрической редуccionией. Принцип электрической редуccionии заключается в том, что одному периоду изменения положения (обороту ротора) соответствуют несколько периодов изменения выходного электрического параметра датчика. Угол поворота ротора многополюсного СКВТ, выраженный в электрических градусах $\Theta_{эл}$ (электрический угол поворота), связан с механическим углом φ поворота соотношением

$$\Theta_{эл} = p\varphi,$$

где p – число пар полюсов СКВТ.

В качестве выходного электрического параметра СКВТ, несущего информацию об угле поворота, может использоваться как амплитуда, так и фаза его выходных напряжений. В первом случае СКВТ работает в амплитудном режиме (режиме трансформатора), во втором – в фазовом режиме (режиме фазовращателя).

Использование первичных выходных электрических параметров СКВТ в системах измерения и управления возможно с помощью соответствующих преобразователей: фазочувствительных выпрямителей, формирователей импульсов, фазовых дискриминаторов, преобразователей «амплитуда – код» и «фаза – код».

Разработанный измеритель углового рассогласования входит в состав лабораторного стенда, который включает в себя макет для исследования СКВТ ПМБ-1, источник напряжений питания ПМБ-1 (звуковой генератор), фазочувствительный выпрямитель (ФЧВ), источник напряжений питания ФЧВ и электронный осциллограф.

Макет для исследования ПМБ-1 (рис. 1) состоит из синусно-косинусного вращающегося трансформатора 1 типа ПМБ-1, вмонтированного в корпус 2 с лицевой панелью. Лицевая панель содержит: принципиальную схему ПМБ-1; постоянный $R1$ и регулировочный $R2$ резисторы; контрольный разъем $X2$, на который выведены первичные ($S1$, $C1$) и вторичные ($S2$, $C2$) обмотки ПМБ-1; клеммы 3 (\perp) подключения общих точек питающих напряжений, преобразователей выходных сигналов и электронного осциллографа. Для отсчета угла поворота ротора ПМБ-1 служит подвиж-

ный транспортер 4. Поворот ротора осуществляется рукояткой 5, жестко связанной с валом ПМБ-1.

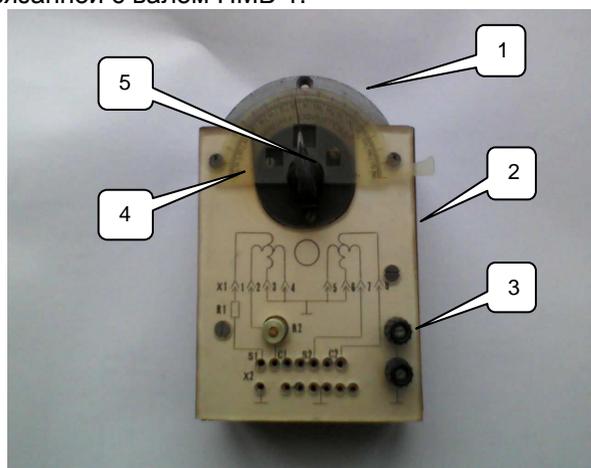


Рис. 1. Макет для исследования ПМБ-1: 1 – синусно-косинусный вращающийся трансформатор типа ПМБ-1; 2 – корпус макета; 3 – клеммы подключения общих точек; 4 – транспортер подвижный; 5 – рукоятка поворота ротора ПМБ-1; X1 – выходной разъем ПМБ-1; X2 – контрольный разъем; R1 – резистор постоянный; R2 – резистор регулировочный

В качестве источника напряжений питания ПМБ-1 используется звуковой генератор, например Г6-26, выдающий два напряжения, изменяющихся по законам синуса и косинуса с частотой (0,4–10) кГц и амплитудой (5–10) В.

Фазочувствительный выпрямитель позволяет реализовать измеритель углового рассогласования при использовании СКВТ в амплитудном режиме.

В ходе выполнения лабораторной работы снимаются осциллограммы основных сигналов измерителя углового рассогласования, фрагменты которых приведены на рис. 2.

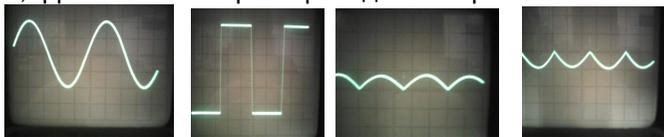


Рис. 2. Фрагменты осциллограмм основных сигналов измерителя углового рассогласования

С помощью осциллограмм студенты определяют экспериментально параметры СКВТ ПМБ-1 (число пар полюсов, коэффициент трансформации), изучая, таким образом, и первичный дат-

чик угла, и устройства обработки его сигналов, входящие в состав измерителя углового рассогласования.

А. Н. Шипулин, студент; А. В. Пруднов, к. т. н., доцент

Частотно-регулируемый электропривод и автоматизация браковочно-мерильной машины

Машина браковочно-мерильная предназначена для контроля качества полотна ткани, удаления дефектных участков и измерения метража, пропущенного через машину материала. Заправка ткани в машину может осуществляться как из тележки, так и из рулона. Выход ткани может быть также в тележку или наматываться в рулон. В частности, браковочно-мерильные машины модели Б-120-5 используются на завершающем этапе производства продукции после стадии ее отделки для формирования рулонов готовой ткани заданной длины перед их упаковкой и отправкой на склад для отгрузки потребителю. При этом контролируется надлежащее качество ткани, сматываемой в рулон.

Для эффективного решения возлагаемых на браковочно-мерильную машину задач, она должна обеспечивать заданное натяжение ткани, возможность регулирования скорости от 5 до 50 м/мин и изменения направления подачи ткани. В связи с этим электропривод машины должен быть регулируемым и реверсивным. Электропривод должен обеспечить диапазон регулирования скорости равный 10. Традиционно в таких машинах используется система электропривода с двигателями постоянного тока. Однако в связи развитием систем частотно-регулируемых электроприводов с асинхронными короткозамкнутыми двигателями, обладающими значительными преимуществами перед системами с двигателями постоянного тока, рассматривается вариант частотно-регулируемого электропривода. Произведен анализ существующих систем частотно-регулируемых электроприводов с асинхронными короткозамкнутыми двигателями. Исходя из технических характеристик электроприводов и экономических показателей, выбран частотно-регулируемый электропривод отечественной компании «Веспер» типа ЕЗ-8100-005Н.

Двигатель работает в продолжительном режиме на пониженных скоростях. Для исключения ударных нагрузок на кинематические звенья машины пуск двигателя осуществляется плавно с использованием задатчика интенсивности. Это обеспечивает от-

существование рывков, приводящих к вытяжке, а возможно и надрыву ткани, а также продляет срок службы редуктора и цепных передач.

Для контроля качества проходящей через машину ткани, она протягивается над стеклянным смотровым окном, которое подсвечивается лампой дневного света, что делает хорошо видимыми дефекты структуры и отделки ткани. Для измерения метража проходящей через машину ткани используется электронная система измерения. Основу этой электронной системы составляет микропроцессорное устройство измерения метража – восьмиразрядный микроконтроллер ATmega8 семейства AVR фирмы Amtel. Способ измерения метража – на основе измерения угла поворота тягового вала с помощью импульсного датчика угла поворота. Тип датчика – бесконтактный индуктивный выключатель. Направление счета метража автоматически меняется по внешнему сигналу, в зависимости от направления работы машины. Одновременно измеряются наработка за смену, метраж в рулоне и метраж в куске и обеспечивается запоминание значений подсчитанного метража при выключении питания устройства. При этом текущие значения указанных переменных сохраняются в энергонезависимой памяти EEPROM микроконтроллера. Устройство обеспечивает вычисление и отображение рабочей скорости машины в м/мин.

А. В. Кутурин, студент; П. В. Вилков, к. т. н., доцент

О применении преобразователей частоты в механизмах подъема

Для современной промышленности использование асинхронных электродвигателей является приоритетной задачей, ввиду их низкой стоимости, высокой надежности, оптимальности в массогабаритных показателях, просты в обслуживании, что выгодно отличает от двигателей постоянного тока.

Среди асинхронных двигателей, следует выделить двигатели с короткозамкнутым ротором, так как упрощенная конструкция ротора, позволяет сэкономить средства, вложенные в проект разработки электропривода. Неотъемлемой частью асинхронного электропривода является силовой преобразователь. Именно на силовом преобразователе лежит обеспечение заданных характеристик для механизма подъема.

На данный момент существует ряд систем управления асинхронными электродвигателями для механизмов подъема, например кранов и лифтов. Вот некоторые из них.

1. Контроллерные системы управления, которые различаются на системы непосредственного управления с помощью силовых кулачковых контроллеров и систем управления с использованием магнитных контроллеров – такие системы применяются для регулирования наиболее простыми электроприводами, применение таких систем ограничивается диапазоном регулирования и небольшим числом включений в час.

2. Системы переменного тока с тиристорным регулятором напряжения. В таких системах регулирование частоты вращения может быть выполнено двумя способами: за счет регулирования подводимого напряжения со стороны статора при постоянных параметрах роторной цепи и за счет регулирования тока ротора при постоянном напряжении статора. Однако электроприводы с такими регуляторами имеют низкие энергетические показатели, что и ограничивает их применение.

3. Системы с тиристорными преобразователями частоты. Использование таких систем в крановых электроприводах при применении асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором получить большой диапазон регулирования, и добиться высоких динамических показателей электропривода. Недостатками системы являются относительно высокая стоимость, сложная первоначальная наладка и необходимость квалифицированного обслуживания, а также передача в сеть помех.

Перечисленные системы управления обладают теми или иными недостатками.

В последнее время производителями электроприводов предлагается система частотного управления асинхронным электродвигателем. Эта система в силу своих широких функциональных возможностей становится одним из основных видов регулируемого электропривода. При не очень высоких требованиях к показателям, диапазону и точности регулирования переменных электропривода может применяться разомкнутая структура такой системы. При необходимости получения высоких показателей качества регулирования переменных, в частности диапазона регулирования скорости, создаются замкнутые структуры.

В общем случае частотное управление двигателя, реализуемое с помощью преобразователей частоты, может быть реализовано по трем вариантам:

– параметрическое управление, при котором управляющим воздействием на двигатель являются частота и действующее значение подаваемого на двигатель напряжения;

– частотно-токовое управление, при котором управляющим воздействием на двигатель являются частота и действующее значение тока двигателя;

– векторное управление, связанное с регулированием мгновенных значений питающих напряжений и токов для формирования электромагнитного момента двигателя нужной величины.

В представленных системах регулирование скорости может осуществляться при замкнутом контуре в форме ПИД-регулирования, которое требует подачи на вход сигнала обратной связи по скорости. Надлежащим образом оптимизированное регулирование с обратной с обратной связью по скорости обеспечивает более высокую точность, чем регулирование скорости без обратной связи. Принцип контроля тока в данной системе основан на измерении тока в звене постоянного тока или в фазе двигателя. Защита от замыкания на землю на стороне двигателя обеспечивается с помощью цепи предотвращения насыщения в IGBT-транзисторах, подключенной к плате управления.

Таким образом, проектируя электропривод для механизмов подъема, необходимо исходить из того, что для них будут применяться асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором с управлением от преобразователей частоты на основе IGBT-транзисторов.

Также нужно отметить, что вместо силовых кулачковых контроллерных систем управления механизмами подъема можно использовать программируемые контроллеры, что обеспечит гибкость, надежность и электробезопасность в работе преобразователя частоты.

В ходе выполнения работы для систем управления электроприводами механизмов подъема с преобразователями частоты планируется построить математические модели двух видов – с частотным регулированием и векторным регулированием.

Таким образом, можно будет сравнить работу преобразователей частоты при различном их управлении и выявить их положительные и отрицательные стороны для электропривода механизма подъема.

А. В. Кутурин, студент; П. В. Вилков, к. т. н., доцент

Разработка математической модели узла упреждающего токоограничения в системе подчиненного регулирования

Известно, что недостатком токовой отсечки в электроприводах с тиристорными преобразователями является возможность превышения мгновенным током стопорного значения в начале процесса пуска. Этот эффект возникает за счет нечувствительности тиристорного преобразователя к изменению управляющего сигнала на интервале проводимости при малой инерционности якорной цепи, когда ток может успеть возрасти до величины, превышающей стопорное значение.

Этот недостаток отсутствует в так называемом упреждающем токоограничении. Существующие способы реализации упреждающего токоограничения представлены в [1, 2].

В первом случае идея упреждающего токоограничения заключается в том, что соответствующий заданному допустимому уровню тока управляющий сигнал подается одновременно с задающим сигналом. Это осуществляется подачей на вход преобразователя управляющего сигнала, возрастающего одновременно с ростом скорости за счет положительной связи по скорости.

Во втором случае узел упреждающего токоограничения включается между конечным усилителем и входом системы импульсно-фазового управления (СИФУ) тиристорного преобразователя. Практически для этого на входе СИФУ включается узел с регулируемым порогом насыщения, величина которого изменяется в функции скорости или ЭДС вращения двигателя. Входное напряжение предварительного усилителя ограничивается диодом, который запирается суммой постоянного опорного напряжения и напряжения, пропорционального скорости двигателя

Постоянное опорное напряжения задает угол открытия тиристоров при пуске, когда скорость равна нулю. Изменяя полярность опорного напряжения, можно реализовать отрицательное и положительное упреждающие токоограничения.

Анализируя математическую модель системы управления электропривода с положительной обратной связью по скорости в качестве упреждающего токоограничения, не возникает вопросов при рассмотрении переходных процессов, как при пуске, так и при реверсе.

Во втором же случае при моделировании переходных процессов появляется несоответствие знаков напряжения задания с конечного усилителя, опорного напряжения и напряжения с тахогенератора. Поэтому при анализе переходных процессов при изменении полярности опорного напряжения или реверсе двигателя можно получить неустойчивую систему.

Таким образом, для согласования этих сигналов необходимо было значительно усложнить математическую модель системы управления с упреждающим токоограничением.

Разработанная в программном комплексе MatLab математическая модель системы подчиненного регулирования с упреждающим токоограничением представлена на рис. 1.

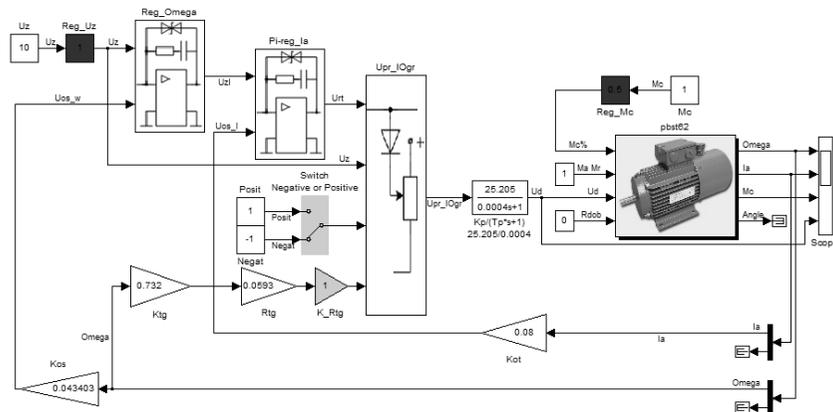


Рис. 1. Математическая модель системы подчиненного регулирования с упреждающим токоограничением

На узел упреждающего токоограничения Upr_Iogr подаются четыре сигнала:

- напряжение задания для учета знака;
- выбор полярности опорного напряжения;
- напряжение с конечного усилителя;
- напряжение с тахогенератора.

Полярность опорного напряжения можно поменять с помощью ключа «Switch Negative or Positive». Значение порога срабатывания узла упреждающего токоограничения можно изменить с помощью коэффициента K_Rtg.

Переходные процессы скорости и тока двигателя при его пуске в зависимости от разных коэффициентов порога срабатывания ($K_{Rtg} = 1, 5, 10$) с положительным и отрицательным

упреждающими токоограничениями представлены соответственно на рис. 2 и 3.

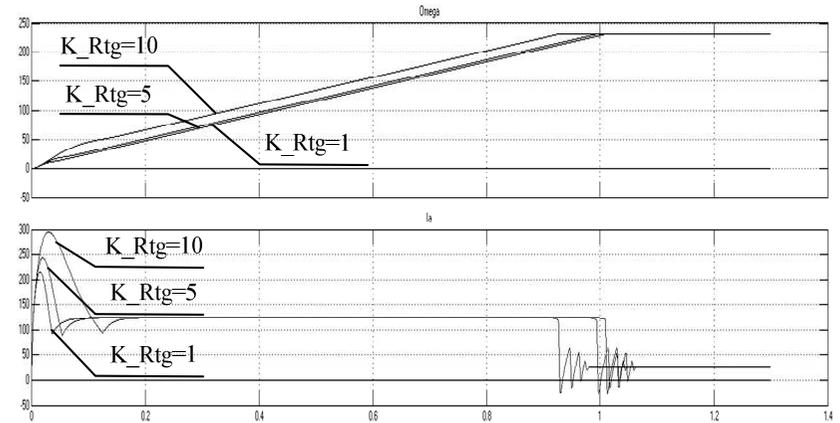


Рис. 2. Переходные процессы скорости и тока двигателя при его пуске с положительным упреждающим токоограничением

Как видно из рис. 2, положительное упреждающее токоограничение увеличивает при пуске двигателя пусковой ток, который увеличивается при увеличении коэффициента порога срабатывания. Это может отрицательно сказаться при пуске двигателя, так как может вызвать перегрев двигателя.

При действии отрицательного токоограничения пусковой ток наоборот уменьшается, но при увеличении коэффициента порога срабатывания уменьшается время работы узла токоограничения. С одной стороны нет превышения в начальный момент времени током максимально допустимого значения. С другой стороны происходит затягивание пуска.

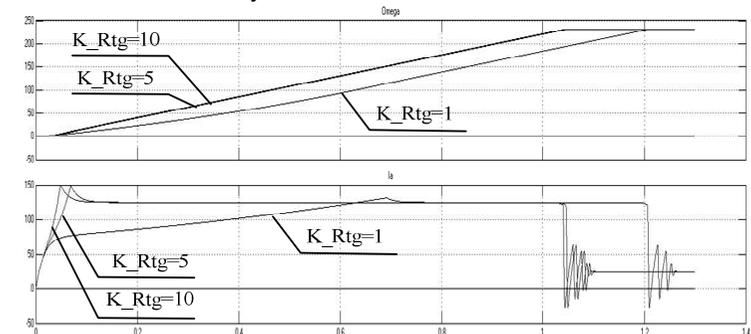


Рис. 3. Переходные процессы скорости и тока двигателя при его пуске с отрицательным упреждающим токоограничением

Полученная математическая модель подчиненной системы регулирования с упреждающим токоограничением используется в учебном процессе при исследовании свойств системы регулирования электропривода с подчиненным регулированием.

При этом студенты исследуют различное влияние упреждающего токоограничения как на статические, так и на динамические характеристики электропривода.

Библиографический список

1. Терехов, В. М. Системы управления электроприводов / В. М. Терехов, О. И. Осипов. М.: Издательский центр «Академия», 2006.
2. Архангельский, Н. Л. Анализ замкнутых систем управления электроприводами / Н. Л. Архангельский. Иваново: ИГЭУ, 2000.

А. В. Дошлыгин, магистрант; А. Н. Тимохин, студент;
Б. С. Курнышев, д. т. н., профессор

Метод расчета фильтров в асинхронных электроприводах

Широкое внедрение в промышленность регулируемых асинхронных электроприводов с преобразователями частоты неизбежно приводит, как показывает практика, к проблеме электромагнитной несовместимости, если не принимать специальных мер.

Под электромагнитной совместимостью (ЭМС), согласно международным стандартам и Российским ГОСТ [1, 2], в настоящее время понимают возможность электрооборудования действовать удовлетворительно в электромагнитной среде без производимых им электромагнитных помех таких уровней, которые были бы недопустимы для другого электрооборудования, находящегося в этой среде.

В решении такой задачи применение только экспериментального метода определения структуры и параметров фильтров ЭМС приводит к большим финансовым затратам. Поэтому в данном случае метод имитационного моделирования является хорошим дополнением к экспериментальному методу, и, следовательно, разработка математических и программных средств [3, 4] решения указанной задачи является актуальной не только в настоящее время, но и в обозримом будущем.

В работе применяются следующие методы: метод разбиения длинной линии с распределенными параметрами на участки

конечной длины с сосредоточенными параметрами, метод узловых потенциалов, метод контурных токов, метод численного интегрирования систем дифференциальных уравнений, метод имитационного эксперимента.

Библиографический список

1. 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.
2. ГОСТ Р 51524-99. Совместимость технических средств электромагнитная. Системы электрического привода с регулируемой скоростью вращения. Требования и методы испытаний.
3. Курнышев, Б. С. Электромагнитная совместимость регулируемых асинхронных электроприводов / Б. С. Курнышев, П. А. Фомин. Иваново: ИГЭУ, 2005. – 100 с.
4. Курнышев, Б. С. Электромагнитная совместимость в электроприводах переменного тока / Б. С. Курнышев, П. А. Фомин. // Вестник ИГЭУ. Иваново: ИГЭУ, 2005, вып. 3. – С. 16–17.

С. А. Косарев, А. Е. Крылов, А. В. Дошлыгин, магистранты;
В. Д. Карачёв, А. С. Лисин, студенты;
Б. С. Курнышев, д. т. н., профессор

Метод расчета скин-эффекта в роторе асинхронного двигателя

Традиционно для расчёта эффекта вытеснения тока в стержнях ротора короткозамкнутого асинхронного двигателя (АД) применяется полевой метод теоретических основ электротехники (полевой метод ТОЭ). Применение этого метода в разработках структур систем управления регулируемых асинхронных электроприводов при современном состоянии средств микропроцессорной техники ограничивается недостаточным быстродействием микропроцессоров. В то же время применение методов расчёта электрических цепей с сосредоточенными параметрами не даёт требуемой точности.

Повышение точности в предлагаемом методе обусловлено специфическим учётом эффекта вытеснения тока в стержнях ротора АД, а быстродействие – применением традиционных методов расчёта электрических цепей с сосредоточенными параметрами.

Исходные положения метода заключаются в следующем. По закону Ома на постоянном токе связь между напряжением и током в каждом стержне ротора даётся, как известно, следующим соотношением:

Можно доказать, что уравнение с максимально полным учётом эффекта вытеснения тока в стержнях ротора АД, полученное из (3) на основе методов цепей с сосредоточенными параметрами, имеет вид

$$\frac{d\vec{\Psi}}{dt} + \sum_{p=1}^{p=N} \sum_{m=1}^{m=N} \sum_{n=1}^{n=N} \Gamma_{mn}^p \Psi_p \frac{dx^n}{dt} \vec{e}^n + R\vec{i} = 0, \quad (5)$$

где $\vec{\Psi} \equiv \vec{\Psi}(x^1, x^2, \dots, x^N)$, $\vec{i} \equiv \vec{i}(x^1, x^2, \dots, x^N)$ – векторные поля потокоцепления и тока, соответственно; Ψ_p – компоненты векторного поля $\vec{\Psi}$; $x^n = x^1, x^2, \dots, x^N$ – координаты; t – время; Γ_{mn}^p – коэффициенты связности (символы Кристоффеля); $\vec{e}^n = [\vec{e}^1(x^1, x^2, \dots, x^N), \vec{e}^2(x^1, x^2, \dots, x^N), \dots, \vec{e}^N(x^1, x^2, \dots, x^N)]$ – локальный базис; $R \neq R(\omega)$, т.е. R , как и в (1) и (2), зависит только от конфигурации стержня, его температуры и материала.

А. Е. Крылов, магистрант; Б. С. Курнышев, д. т. н., профессор

Выходные фильтры для преобразователей частоты

В связи с внедрением силовой электроники возникает задача построения наиболее рациональных конфигураций выходных фильтров преобразователей частоты в современных электроприводах переменного тока. С этой целью в докладе рассмотрены основные технические решения и требования к устройствам подобного типа, приведены расчетные соотношения. Проведен анализ информации в Internet, периодической и иной научно-технической литературе, а также рассмотрены разработки ведущих фирм в данной области.

Назначение указанных выходных фильтров – подавление высокочастотных помех, возникающих на выходе работающих преобразователей и снижение скорости нарастания напряжения и тока на статорных обмотках двигателей, защита изоляции двигателей от пробоя, предотвращение преждевременного износа подшипников.

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

Основные формулы методики приведены ниже:

$$L_{k0} = \begin{cases} 50L_0 \text{ (мкГн)}, I_{\text{каб}} \leq 50 \text{ м;} \\ L_0 I_{\text{каб}} \text{ (мкГн)}, I_{\text{каб}} > 50 \text{ м;} \end{cases}$$

$$C_{k0} = \begin{cases} 2 \cdot 10^4 C_0 \text{ (мкФ)}, I_{\text{каб}} \leq 50 \text{ м;} \\ 4 \cdot 10^6 C_0 I_{\text{каб}} \text{ (мкФ)}, I_{\text{каб}} > 50 \text{ м;} \end{cases}$$

$$R_{C0} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$$

Библиографический список

1. Курнышев, Б. С. Электромагнитная совместимость регулируемых асинхронных электроприводов. / Б. С. Курнышев, П. А. Фомин. Иваново: ИГЭУ, 2005. – 100 с.
2. Курнышев, Б. С. Электромагнитная совместимость в электроприводах переменного тока / Б. С. Курнышев, П. А. Фомин // Вестник ИГЭУ. Иваново: ИГЭУ, 2005, вып. 3. – С. 16–17.

С. В. Семьянов, студент; А. В. Пруднов, к. т. н., доцент

Исследование систем управления вытяжкой

Одной из актуальных задач современной промышленности является обработка гибких материалов. Развивающиеся комплексы автоматических технологических комплексов (далее АТК.) линий по обработке полимерных материалов, машины текстильного производства и др., требуют доступных и простых решений для управления технологическими комплексами. Мы решили рассмотреть процесс непосредственного управления вытяжкой полуфабриката.

Для выполнения задачи управления вытяжкой материала достаточно создания секции на линии АТК. Поскольку управление вытяжкой осуществляется рассогласованием скоростей смежных приводных точек, то к системе электроприводов выдвигаются следующие требования:

- плавное регулирование скоростей электроприводов;
- простота настройки и обслуживания электроприводов;
- точность регулирования вытяжки до 0,2 %;
- оптимальная цена компонентной базы.

Разработан алгоритм управления секций управления вытяжкой, представленный ниже на схеме.

Подсчет и получение данных с цифровых датчиков осуществляет отдельно устройство, например Ф482, которое способ-

но вычислить относительную разность скоростей. Блок сравнения находится на пульте оператора линии. Далее формируется сигнал напряжения задания для электропривода и поступает непосредственно на силовой преобразователь электропривода.

Дальнейшим этапом создания системы управления вытяжкой следует детальное проектирование системы электроприводов.

А. С. Тимофеев, студент; А. В. Пруднов, к. т. н., доцент

Электропривод и автоматизация пермоточного станка

В данной работе рассматривается электропривод станка по перемотке провода разработанный специально для ОАО «Электрокабельный Кольчугинский завод».

Станок предназначен для перемотки и испытания провода на пробой. Для данного станка используются 4 типа барабанов (табл. 1).

Таблица 1. Параметры используемых барабанов

Тип барабана	Диаметр			Длина Шейки, мм	Масса Барабана, кг
	Щеки, мм	Шейки, мм	Осевого отверстия, мм		
400	400	165	70	270	18
500	500	217	70	220	22
630	630	355	56	475	28
760	760	400	40,5	291	37

Проведен анализ существующих систем электропривода подобных установок и выбран частотно-регулируемый электропривод фирмы EMOTRON.

Главный привод осуществляет вращение приемного устройства консольного типа с временем разгона за 30 с и номинальной скоростью двигателя 950 об/мин.

Используется асинхронный частотно-регулируемый электропривод. Скорость, натяжение, длина наматываемого провода на катушку приемного устройства задаются оператором на пульте управления. Автоматический цикл управления позволяет осуществлять, настройку скорости вращения приемного устройства и скорость отдающего устройства при реверсе. Управление пуском и частотой вращения асинхронным двигателем осуществляет с помощью преобразователя частоты VFB 40-010-20CE. Испытание

провода на пробой осуществляется прибором SPARK 2000 BS. Это устройство тестирования изоляции провода высоким напряжением для обнаружения дефектов в изоляции проводов во время производства. Устройство обнаруживает как один, так и серию пробоев и сигнализирует о них. Напряжение может быть установлено в диапазоне от 1,0 кВ до 30 кВ через один из различных интерфейсов устройства. Общий вид прибора SPARK 2000 BS приведен на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид прибора SPARK 2000 BS

Для осуществления высокого качества перемотки провода обеспечивающего плавное регулирование скорости и заданное натяжение провода используются 2 частотно-регулируемые электропривода с асинхронными короткозамкнутыми роторами. Один приводит в движение механизм приемного устройства, а другой механизм сматывающего устройства, с помощью которого осуществляется замедление и останов барабанов, а так же отмотка до обнаруженного места пробоя.

А. Н. Шилов, студент; Ю. П. Спичков, к. т. н., доцент

Частотно-регулируемый электропривод поточной линии

Современные достижения в области новых технологий обработки ткани являются основой для совершенствования и создания технологического оборудования, обладающего высокой производительностью, большей экономичностью и меньшими габаритами.

Интенсификация технологического процесса заключительной обработки тканей в поточном оборудовании, стремление к ведению процессов с минимальными потерями энергии обусловили необходимость совершенствования его электропривода.

В рассматриваемой поточной линии расправки и сушки тканей ЛРС-260, в настоящее время находят применение неревверсивные электроприводы постоянного тока с преобразователями

переменного тока в постоянный по системе ТП-Д. Такие электроприводы обладают малым к.п.д. и не высокой надежностью. В связи с переходом на рыночную экономику особую важность приобрели вопросы энерго- и ресурсосбережения.

Одну из ведущих позиций в этой области занимает применение регулируемых электроприводов на основе частотных преобразователей, который обеспечивает работу электродвигателя в режиме оптимального к.п.д. во всем диапазоне регулирования скорости линии. Наиболее подходящим для решения поставленной задачи является векторно-управляемый электропривод с асинхронными двигателями, и в частности отечественные электроприводы ЭПВ. Его использование позволяет до 40 % снизить энергопотребление.

Применение таких электроприводов, как показали проведенные исследования, позволяет улучшить процесс обработки тканей, обеспечить устойчивую работу всего взаимосвязанного электропривода линии на минимальных скоростях и малых нагрузках. При этом в сочетании с рациональным выбором параметров зоны обработки и датчиков натяжения, используемых для согласованности работы смежных машин, возможно снижение натяжения транспортируемого материала в зонах обработки. Задача снижения уровня натяжения приобретает в настоящее время особо актуальное значение в связи с интенсификацией технологических процессов и связанной с ней тенденцией к повышению скоростей обработки материала, качества выпускаемой продукции.

Проведенные исследования с использованием математических моделей в среде MATLAB показали, что такие электроприводы обладают более лучшей перегрузочной способностью и динамикой в сравнении с ранее используемым электроприводом постоянного тока.

Ю. А. Быков, студент; А. В. Пруднов, к. т. н., доцент

Применение частотно-регулируемых электроприводов в отделочном производстве

В настоящее время всё более широкое применение, как в отечественном, так и зарубежном производствах находят системы частотно-регулируемых электроприводов. В отделочном производстве фабрики «Шуйские ситцы» довольно значительное коли-

чество отдельного оборудования и поточных линий используют частотно-регулируемый электропривод.

Так на отбельной линии фирмы «Goller» (Германия) система электропривода и автоматизации построенная по принципу индивидуальных и централизованных приводов насчитывает 20 частотно-регулируемых электроприводов фирмы КЕВ (Германия).

На линии заключительной отделки фирмы Monforst (Германия) состоящей из: заправочного устройства, пропиточной ванны, отжима, утюжителя, сушильно-ширильной машины, гуммикаландра (Gummikalander), фильц-каландра (Filzkalander), охлаждающих барабанов, накатного устройства, используются системы частотно-регулируемых электроприводов фирмы Lenz (Германия).

На линии крепирования, модернизированной на фабрике, состоящей из печатной установки обрабатывающей ткань в расправку, конвейерной камеры, в которой ткань в расправленном состоянии вылеживается определенное время на трех ленточных конвейерах, четырех промывочных ванн, где ткань обрабатывается в жгуте, расправительного устройства и тканеукладчика, используется печатная установка для крепирования, оснащённая частотно-регулируемым электроприводом фирмы Lenz (Германия).

На печатной линии фирмы Zimmer (Австрия) состоящий из заправочного устройства, включающего тянущий вал, печатной машины состоящей из восьми печатных головок и устройства привода кирзы, сушильной машины и тканеукладчика, также применяется частотно-регулируемый привод фирмы Lenz (Германия).

На отдельно стоящем двухвалковом каландре фирмы ANDRITZ KUSTERS (Германия), применяется так же частотно-регулируемый электропривод фирмы SIEMENS (Германия).

Опыт эксплуатации рассмотренного выше оборудования показывает, что система частотно-регулируемого электропривода обеспечивает довольно высокую надежность работы. Приводы обслуживаются инженерами-наладчиками электроцеха. Мелкие неисправности устраняются своими силами. Для устранения серьезных неисправностей, требующих ремонта блоков или всего электропривода привлекаются представители фирмы поставщика оборудования.

СЕКЦИЯ 19. ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И МАГНИТОЖИДКОСТНЫЕ УСТРОЙСТВА

Л. Н. Булатов, аспирант; А. И. Тихонов, д. т. н., профессор

Оптимизация комбинированной динамической модели асинхронной машины

В основе разрабатываемой модели асинхронной машины лежит решение системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d\Psi_m}{dt} = U_m - I_m \cdot R_S - \sum_{k=1}^3 I_k \cdot R_{0S} & \left. \begin{matrix} m=3 \\ m=1 \end{matrix} \right\} \\ \frac{d\Psi_m}{dt} = -I_m \cdot R_R - \sum_{k=4}^{Z_2+3} I_k \cdot R_{0R} & \left. \begin{matrix} m=Z_2+3 \\ m=4 \end{matrix} \right\} \\ \frac{d\alpha}{dt} = \Omega \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} (M_{EM} - M_0 - M_H) \end{cases}$$

В этой системе:

$$\frac{d\Psi_m}{dt} = \sum_{j=1}^{3+Z_2 \cdot ns} \frac{\partial \Psi_m}{\partial i_j} \cdot \frac{di_j}{dt} + \frac{\partial \Psi_m}{\partial \alpha} \frac{d\alpha}{dt} = \sum_{j=1}^{3+Z_2 \cdot ns} L_{mj} \frac{di_j}{dt} + \frac{\partial \Psi_m}{\partial \alpha} \frac{d\alpha}{dt}$$

Элементы $\frac{\partial \Psi_m}{\partial i}$ и $\frac{\partial \Psi_m}{\partial \alpha}$ находятся с использованием расче-

та магнитного поля. Принимается, что $\frac{\partial \Psi_m}{\partial x} \approx \frac{\Delta \Psi_m}{\Delta x}$, где x – иско-

мая величина (угол поворота и токи в обмотках). Из этого следует,

что $\frac{d\Psi_m}{dt}$ для каждого уравнения можно определить, задавшись

приращениями искомых величин, поочередно закладывая их в конечно-элементную модель устройства, и получая в результате расчета магнитного поля приращения потокосцеплений каждой из обмотк.

Для нахождения искомых величин на каждой итерации необходимо провести $N + 2$ конечно элементных расчетов поля (базовый расчет, приращения N токов, угла поворота). В резуль-

тате выполнение одной итерации связано с большими временными затратами. Поэтому отдельное внимание при исследовании было уделено проблеме сокращения времени расчета.

Прежде всего, оптимизирован алгоритм конечно-элементного расчета поля. На каждой итерации выполняются следующие шаги:

1. С использованием найденных на прошлой итерации токов и угла поворота производится конечно-элементный расчет поля (базовый расчет). Результатом расчета является массив потокосцеплений обмоток, а так же массив магнитных сопротивлений элементов модели;

2. Поочередно дается приращение каждой из искомых величин токов, и производится расчет новых значений потокосцеплений. При этом магнитные сопротивления элементов берутся из результатов базового расчета и считаются неизменными. Это допущение не оказывает значительного влияния на точность расчета, так как приращения токов малы по сравнению с их реальными величинами, и мало влияют на насыщенность магнитной цепи.

Значительное ускорение при использовании этого метода объясняется следующим образом:

$J \cdot D \cdot t = -F \cdot t$ – система уравнений, которая решается на каждой итерации метода конечных элементов. Здесь J – матрица Якоби; D – вектор приращений магнитных потенциалов в узлах модели; F – вектор невязок.

Элемент матрицы Якоби рассчитывается по формуле:

$$J_{ij} = \frac{\partial F_i}{\partial A_j} \Big|_{\substack{j=1+N \\ j=1+N}} = \sum_{p=1}^{p=N} \frac{1}{4S_p} \left[\frac{\partial v_p}{\partial (B_p^2)} \frac{1}{2S_p^2} \sum_{r=1}^{r=3} [(b_{pj}b_{pr} + c_{pj}c_{pr})] \cdot A_{pr} \times \right. \\ \left. \times \sum_{r=1}^{r=3} (b_{pi}b_{pr} + c_{pi}c_{pr}) \cdot A_{pr} + v_p (b_{pi}b_{pj} + c_{pi}c_{pj}) \right]_{\substack{i=1+N \\ j=1+N}}$$

где $v = 1/\mu = f(B2)$.

Видно, что при неизменном магнитном сопротивлении члены матрицы Якоби остаются неизменными. Это значит, что система уравнений метода конечных элементов решается за одну итерацию. В среднем конечно-элементный расчет без упрощений производится за 5 и более итераций. Кроме того, отпадает необходимость постоянного обращения к кривым намагничивания. Это значительно снижает время расчета.

3. Производится расчет $\frac{\partial \Psi_m}{\partial \alpha}$ для каждой обмотки. В дан-

ном случае конечно – элементный расчет необходимо проводить без упрощений, поскольку изменение геометрии модели требует полного пересчета.

Точный расчет электромагнитного момента является основным условием для динамической модели электрической машины. После рассмотрения нескольких вариантов было решено рассчитывать электромагнитный момент ротора машины по формуле:

$$M = \frac{1}{2} \oint ((\vec{r} \times \vec{H})(\vec{n} \cdot \vec{B}) + (\vec{r} \times \vec{B})(\vec{n} \cdot \vec{H}) - (\vec{r} \times \vec{n})(\vec{H} \cdot \vec{B})) ds.$$

Для плоскопараллельной задачи данная формула имеет вид:

$$M = \frac{1}{2 \cdot R} \sum \left[\begin{aligned} & (X \cdot H_y - Y \cdot H_x)(X \cdot B_x + Y \cdot B_y) + \\ & + (X \cdot B_y - Y \cdot B_x)(X \cdot H_x + Y \cdot H_y) \end{aligned} \right] \Delta L \cdot L \delta.$$

Момент вычисляется относительно начала координат, которое совпадает с осью вращения ротора, а поверхность, ограничивающая заданный объем, выбирается цилиндрической, проходящей посередине зазора перпендикулярно плоскости модели. В качестве ограничивающей поверхности может быть так же выбрана поверхность ротора. Это сократит время, требуемое на расчет момента, однако значительно снизит точность расчета, поскольку в таком случае количество элементов модели, участвующих в расчете момента, сокращается вдвое.

Исследование показало, что количество элементов, которое является достаточным для точного расчета $\frac{d\Psi_m}{dt}$, не обеспечивает достаточной точности при расчете момента. Применение же модели повышенной точности при расчете матрицы серьезно замедляет расчет. В связи с этим было принято решение использовать для расчета момента отдельную конечно-элементную сетку. В этом случае замедление расчета незначительно.

Данные, полученные в результате расчета, могут быть выведены в любом необходимом пользователю виде и разрезе. Ниже приведены результаты расчета асинхронного двигателя с номинальной мощностью 3000 Вт и тремя парами полюсов.

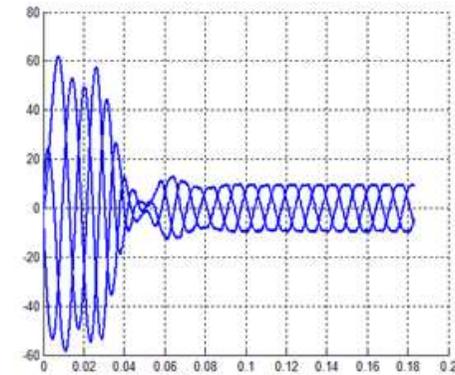


Рис. 1. Токи в фазах статора при пуске

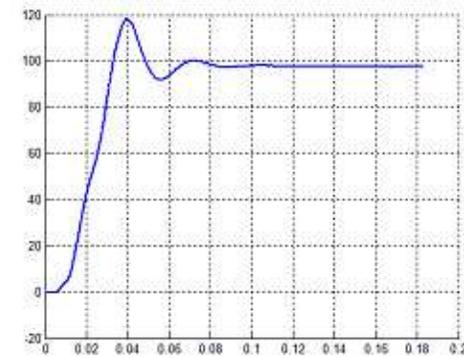


Рис. 2. Угловая скорость вращения ротора

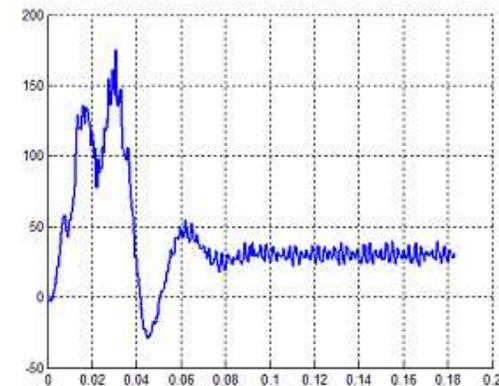


Рис. 3. Электромагнитный момент машины

Колебания в кривой момента являются следствием погрешности его расчета, а так же влияния зубцовых гармонических. Одной из целей дальнейшей работы является учет наличия скоса пазов.

Библиографический список

1. Тихонов, А. И. Программирование численного эксперимента с использованием конечно-элементной модели магнитного поля в объектах электромеханики / А. И. Тихонов, Ю. Б. Казаков. // ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – 80 с.

И. А. Пайков, аспирант; А. И. Тихонов, д. т. н., профессор

Динамическая модель силового трансформатора на основе расчета магнитного поля методом конечных элементов

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

$$\begin{cases} u_{12} = i_1 r_1 + \frac{d\Psi_1}{dt} - i_2 r_2 - \frac{d\Psi_2}{dt}, \\ u_{23} = i_2 r_2 + \frac{d\Psi_2}{dt} - i_3 r_3 - \frac{d\Psi_3}{dt}, \\ 0 = i_4 (r_4 + R_{н4}) + \frac{d\Psi_4}{dt} + L_{н4} \frac{di_4}{dt} - i_5 (r_5 + R_{н5}) - \frac{d\Psi_5}{dt} - L_{н5} \frac{di_5}{dt}, \\ 0 = i_5 (r_5 + R_{н5}) + \frac{d\Psi_5}{dt} + L_{н5} \frac{di_5}{dt} - i_6 (r_6 + R_{н6}) - \frac{d\Psi_6}{dt} - L_{н6} \frac{di_6}{dt}, \\ i_1 + i_2 + i_3 = 0, \\ i_4 + i_5 + i_6 = 0; \end{cases} \quad (1)$$

где u_{jk} – линейное напряжение между фазами с индексами k и j; i – ток обмотки; Ψ – потокосцепление обмотки; r – сопротивление обмотки; L – индуктивность рассеяния 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.

Согласно [1, 2] расчет динамических режимов трехфазного трансформатора осуществляется при наличии матриц потокосцеплений каждой m-й обмотки

$$\Psi_m = f(F_1, F_2, F_3), \quad (2)$$

где F_1, F_2 и F_3 – намагничивающие силы стержней трансформатора.

Будем считать, что первичная и вторичная обмотки, расположенные на k-м стержне, создают единую намагничивающую силу, рассчитываемую по формуле

$$F_k = \frac{i_k W_k + i_{k+3} W_{k+3}}{S_k + S_{k+3}} \cdot (S_k + S_{k+3}) = j_k \cdot (S_k + S_{k+3}), \quad (3)$$

где j_k – средняя плотность тока в обмотках k-го стержня; i_k, i_{k+3} – мгновенные значения токов в первичной и вторичной обмотках k-го стержня; W_k, W_{k+3} – число витков первичной и вторичной обмоток k-го стержня; S_k, S_{k+3} – площади сечений первичной и вторичной обмоток k-го стержня.

Варьируя j_k в пределах от $-j_{\max}$ до $+j_{\max}$, где j_{\max} – некоторая максимальная величина средней плотности тока, получаем зависимости, которые аппроксимируются трехмерными сплайнами (рис. 1).

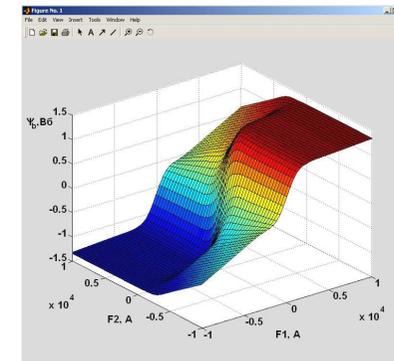


Рис. 1. Сплайновая аппроксимация матриц $\Psi_1(F_1, F_2, F_3)$ при $F_3 = 0$

Для каждой m-й обмотки можно записать

$$\frac{d\Psi_m}{dt} = \sum_{k=1}^3 \frac{\partial \Psi_m}{\partial F_k} \frac{dF_k}{dt} = \sum_{j=1}^6 L_{mj} \frac{di_j}{dt}, \quad (4)$$

где

$$L_{mj} = W_j \left. \frac{\partial \Psi_m}{\partial F_k} \right|_{k=\begin{cases} m, n_{pu} & m \leq 3 \\ m-3, n_{pu} & m > 3 \end{cases}}. \quad (5)$$

Частные производные $\frac{\partial \Psi_m}{\partial F_k}$ в (4) – (5) определяются из сплайнов. Система уравнений (1) после подстановки (4) – (5) принимает вид

$$\frac{di}{dt} = L^{-1}U, \quad (6)$$

где i – вектор токов; L – квадратная матрица индуктивностей; U – вектор правых частей.

Матрица L имеет вид

$$L = \begin{pmatrix} L_{11}-L_{21} & L_{12}-L_{22} & L_{13}-L_{23} & L_{14}-L_{24} & L_{15}-L_{25} & L_{16}-L_{26} \\ L_{21}-L_{31} & L_{22}-L_{32} & L_{23}-L_{33} & L_{24}-L_{34} & L_{25}-L_{35} & L_{26}-L_{36} \\ L_{41}-L_{51} & L_{42}-L_{52} & L_{43}-L_{53} & L_{44}-L_{54}+L_{14} & L_{45}-L_{55}-L_{15} & L_{46}-L_{56} \\ L_{51}-L_{61} & L_{52}-L_{62} & L_{53}-L_{63} & L_{54}-L_{64} & L_{55}-L_{65}+L_{15} & L_{56}-L_{66}-L_{16} \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Матрица U имеет вид

$$U = \begin{pmatrix} U_{AB} - i_1 r_1 + i_2 r_2 \\ U_{BC} - i_2 r_2 + i_3 r_3 \\ i_5 (r_5 + R_{H5}) - i_4 (r_4 + R_{H4}) \\ i_6 (r_6 + R_{H6}) - i_5 (r_5 + R_{H5}) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

На каждом шаге интегрирования системы уравнений (6) по (3) определяются НС стержней в данный момент времени, затем частные производные потокосцеплений обмоток по НС стержней, затем коэффициенты матрицы L . Для расчета коэффициентов L_{ij} используются функции определения величины соответствующих частных производных в данной точке трехмерного сплайна, аппроксимирующего соответствующую матрицу потокосцеплений. То есть эти величины вычисляются аналитически, а не численно, что позволяет избежать шумов, вызванных погрешностями конечно-элементного расчета поля.

Представленная модель трехфазного трансформатора позволяет производить расчет динамических процессов трансформатора с учетом нелинейности магнитных характеристик стали, особенностей конструкции трансформатора и несимметрии

нагрузки. Скорость расчета соизмерима со скоростью расчета при линейной постановке задачи.

Главная проблема описанной модели состоит в построении матриц потокосцеплений (2) от точности которых зависит точность динамической модели трансформатора. В [1, 2] для этого предлагается использовать серию расчетов двумерной модели магнитного поля в трансформаторе. Однако такая модель может быть неточна. В то же время расчет точной трехмерной модели трансформатора требует нескольких часов расчетного времени. Поэтому в настоящее время ведется работа по исследованию искажений, которые возникают в двумерной модели магнитного поля в трансформаторе. Для этого в среде системы конечно-элементного моделирования физических полей Maxwell была построена трехмерная модель магнитного поля (рис. 3). Разработана программа исследования данной модели и сравнения результатов расчета с результатами расчета двумерного поля.

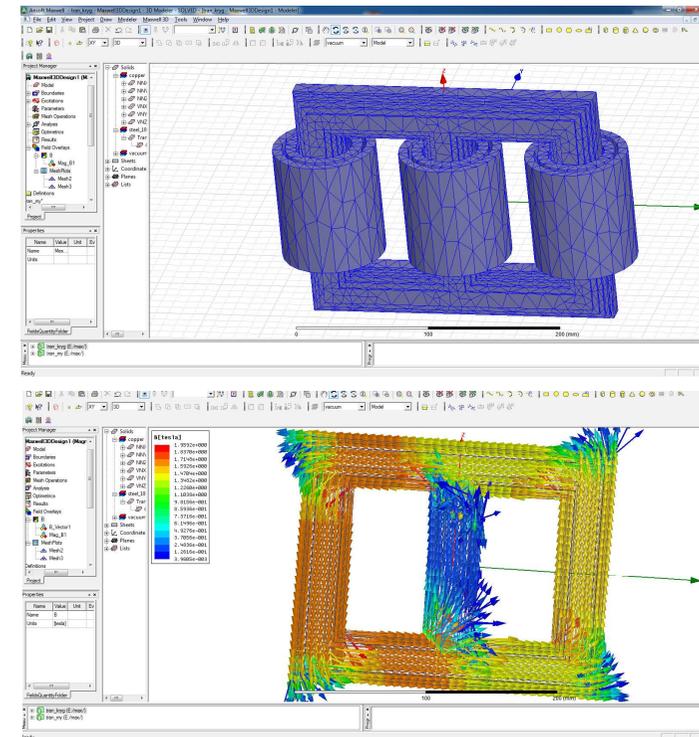


Рис. 2. Конечно-элементная модель магнитного поля в среде Maxwell

Библиографический список

1. Климов, Д. А. Методы автоматизированного моделирования динамических режимов трансформаторов / Д. А. Климов, Г. В. Попов, А. И. Тихонов. // ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2006. – 100 с.
2. Тихонов, А. И. Разработка моделей и методов анализа и синтеза решений в автоматизированном проектировании электрохимических устройств. Диссертация на соиск. уч. ст. д. т. н., специальность 05.13.12. – Системы автоматизации проектирования (электротехника и энергетика), Иваново, 2007 г.

С. В. Исламов, магистрант, И. В. Еремин, аспирант;
А. И. Тихонов, д. т. н., профессор

Особенности проектирования трансформаторов с сердечником из аморфной стали

Известно, что работа трансформатора всегда сопровождается потерями энергии. Суммарная установленная мощность трансформаторов в энергосетях превышает генераторную мощность в 5–6 раз. Потери в магнитной системе не зависят от нагрузки и присутствуют даже при работе трансформатора на холостом ходу, поэтому важным направлением энергосбережения является снижение потерь холостого хода в силовых трансформаторах. Одним из перспективных направлений совершенствования конструкции трансформаторов в целях снижения потерь холостого хода является использование сердечников из аморфной стали.

Использование аморфной стали позволяет существенно снизить основные магнитные потери за счет особенностей ее структуры, позволяющей получить форму кривой намагничивания, близкую к прямоугольной, и узкую петлю гистерезиса. Так, например, удельные потери на перемагничивание отечественной аморфной стали составляют 0,2–0,25 Вт/кг против 1,15 Вт/кг для электротехнической стали Новолипецкого металлургического комбината.

Использование аморфной стали при изготовлении магнитопроводов трансформатора требует изменения технологического процесса. Толщина ленты аморфной стали составляет 0,02–0,025 мм в сравнении с 0,2–0,27 мм для электротехнической стали, используемой в трансформаторостроении. Это накладывает ограничения на использование традиционных технологий сборки магнитной системы. Наиболее распространенной является витая конструкция магнитной системы с одним прямым стыком (рис. 1).



Рис. 1. Витой магнитопровод из аморфного сплава на основе железа

Особенности технологии сборки магнитной системы из аморфной стали требуют существенных изменений методик проектирования трансформатора, в частности:

- преимущественное использование магнитопроводов с прямоугольным сечением стержней и ярм предъявляет повышенные требования к методике расчета электродинамических усилий (следует отметить, что все современные методики расчета электродинамических усилий в обмотках силовых трансформаторов ориентированы на магнитные системы со ступенчатым сечением стержней, вписанным в круг);
- методика расчета потерь и тока холостого хода требует учета навивки магнитной системы с одним прямым стыком внахлест;
- отсутствие апробированной методики расчета магнитной системы трансформатора из аморфной стали требует использования точных моделей магнитного поля.

Учитывая специфику задачи, структура системы проектирования трансформаторов из аморфной стали может быть представлена так, как показано на рис. 2.

САПР трансформатора с магнитопроводом из аморфной стали (САПР ТАМ) реализована в среде MSExcel, на базе с помощью соответствующих интерфейсных элементов осуществляется управление всеми подсистемами САПР. Здесь же реализованы подсистема формирования технического задания и подсистема проектного расчета (рис. 3). Все расчетные операции организованы в форму функций и процедур, написанных в среде Visual Basic for Excel. Подсистема поверочного расчета реализована в форме m-файла в среде MatLab и вызывается из MSExcel с использованием стандартного интерфейса ExcelLink.

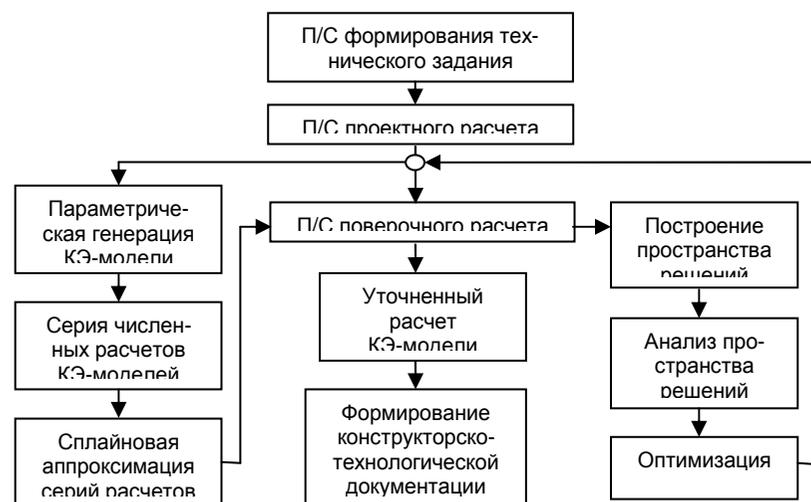


Рис. 2. Структура САПР трансформатора с магнитопроводом из аморфной стали

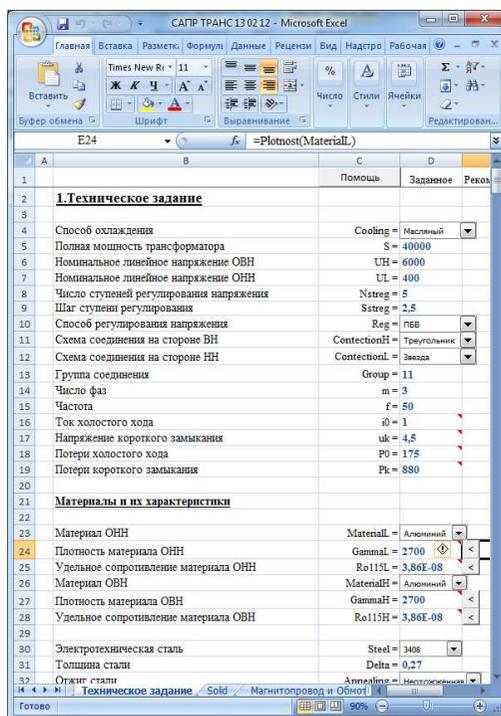


Рис. 3. САПР трансформатора в среде MSExcel

Подсистема поверочного расчета в свою очередь состоит из двух подсистем: подсистема упрощенного расчета и подсистема уточненного расчета. Математический аппарат подсистемы упрощенного расчета строится на основе РД, адаптированных для особенностей трансформаторов с сердечниками из аморфной стали. Математический аппарат подсистемы уточненного расчета строится на основе серии конечно-элементных расчетов магнитного поля, реализованных с помощью библиотеки конечно-элементного моделирования магнитного поля, интегрированной в среду MatLab. Серии расчетов поля аппроксимируются многомерными сплайнами, что позволяет использовать эти результаты в алгоритмах оптимизации. Конечно-элементная модель магнитного поля генерируется автоматически по результатам проектного расчета трансформатора.

Разработан алгоритм, позволяющий рассчитывать динамические режимы работы трансформатора. Это позволяет повысить точность расчета динамических усилий, действующих на обмотку и магнитопровод. Обмотку НН предлагается выполнять из алюминиевой ленты, обмотку ВН из прямоугольного или круглого провода или из галет, намотанных алюминиевой или медной фольгой. Трансформатор проектируется в сухом или масляном исполнении (с гофробаком).

Подсистема оптимизации трансформатора функционирует в среде MatLab. Предварительный анализ пространства решений осуществляется путем визуализации множества решений, полученных в ходе серии расчетов при варьировании ряда параметров, определяющих конструкцию трансформатора: диаметр и высота стержня, число витков в обмотках, количество и размеры каналов и т. п. На основе анализа решений выбирается стартовая точка оптимизационного процесса. Поиск оптимального решения осуществляется с использованием градиентного метода при варьировании непрерывных величин и координатного спуска при варьировании дискретных величин.

Разработанная в ИГЭУ система проектирования трансформаторов из аморфной стали позволяет рассчитывать трансформаторы до 3-го габарита класса напряжения до 35 кВ.

А. С. Мартынов, аспирант; А. И. Тихонов, д. т. н., профессор,

Комбинированная полевая модель магнитоидкостного герметизатора

Комбинированная модель магнитоидкостного герметизатора (МЖГ) строится на основе динамически подключаемой библиотеки конечно-элементного моделирования магнитного поля (БКЭММП), интегрированной в табличный процессор MSExcel, имеющий встроенную среду программирования на языке Visual Basic for Excel. Данная библиотека, с помощью которой можно рассчитать магнитное поле в плоскопараллельной и осесимметрической постановках, обеспечивает вызывающее ее приложение функциями, с помощью которых можно сгенерировать в пакетном режиме конечно-элементную модель исследуемого устройства, осуществить программу численного эксперимента и проанализировать его результаты.

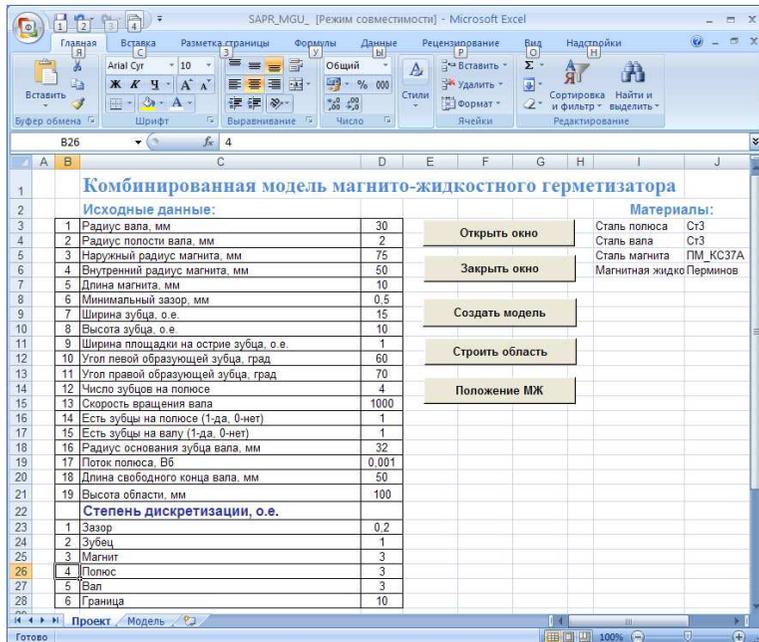


Рис. 1. Система формирования и исследования комбинированной модели МЖГ

Параметрический генератор конечно-элементной модели МЖГ представляет собой программный код, написанный в виде

макроса MSExcel. Данный макрос читает с листа MSExcel исходные данные МЖГ (см. рис. 1), рассчитывает координаты опорных точек графических примитивов (отрезков и дуг), разграничивающими подобласти расчетной области герметизатора, формирует списки параметров, характеризующих графические примитивы и подобласти, и вызывает из БКЭММП функции генерации соответствующих объектов конечно-элементной модели. Меняя исходные данные (геометрические размеры, количество и форму зубцов, степень дискретизации расчетной области и т. п.) можно сгенерировать модели для разных конструктивных исполнений МЖГ и для разной точности расчета (рис. 2)

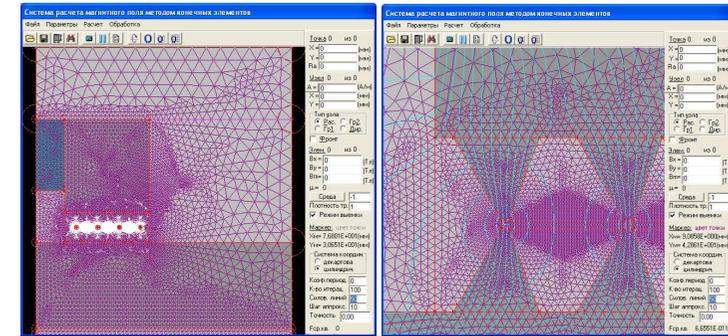


Рис. 2. Конечно-элементная модель МЖГ

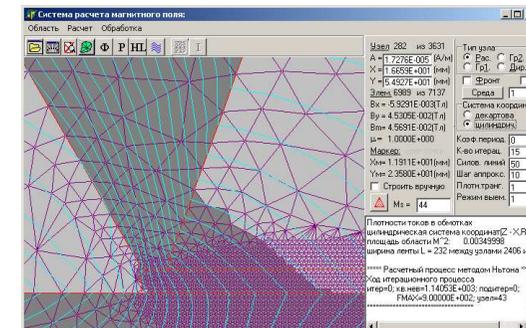


Рис. 3. Положение магнитной жидкости в МЖГ при заданном перепаде давления

На основе расчета магнитного поля в МЖГ для заданного перепада давления перепада давления определяется положение магнитной жидкости (МЖ) [1]. Расчет магнитного поля и положения МЖ итерационно уточняется, так как положение МЖ влияет на картину поля (на рис. 3. приведено положение МЖ для одного из исполнений МЖГ).

При рассчитанном таким образом положении МЖ и заданной скорости вращения вала рассчитывается момент вязкого трения МЖГ. Расчет осуществляется методом Монте-Карло [2].

Принимаемые допущения:

1. Расчетная область обладает осевой симметрией, что позволяет свести задачу к плоскомеридианной постановке.
2. Магнитная жидкость является несжимаемой ньютоновской жидкостью с заданным динамическим коэффициентом вязкости, величина которого является константой.
3. Положение магнитной жидкости не зависит от скорости вращения вала и однозначно определяется картиной магнитного поля.
4. Скорость вращения вала постоянна.
5. Скорость слоев магнитной жидкости, непосредственно примыкающих к твердым поверхностям равна линейной скорости движения данной поверхности, которая не достигает критических значений.
6. В течении жидкости отсутствуют вихревые составляющие.

Имитационная модель магнитной жидкости строится из множества частиц, обладающих одинаковой массой m_0 , совершающих броуновское движение с одинаковыми скоростями v_0 в пределах подобласти плоской конечно-элементной модели, занятой магнитной жидкостью. Изначально каждая i -я частица обладает нулевым моментом импульса относительно оси вращения вала, но при соударении с j -й границей раздела сред она увлекается этой границей, приобретая момент импульса относительно оси вращения.

Частицы переносят момент импульса по плоскости расчетной области в пределах подобласти, заполненной магнитной жидкостью. После определенного времени релаксации система частиц придет в состояние термодинамического равновесия, характеризующегося неизменным во времени значением среднего момента импульса относительно оси вращения вала в каждой элементарной области, занятой магнитной жидкостью. При этом распределение величины среднего момента импульса будет соответствовать уравнению Лапласа с граничными условиями Дирихле на поверхностях твердых тел ($L_0 = L_{0j}$) и граничными условиями Неймана на свободной границе жидкости.

Плоскость модели покрыта конечно-элементной сеткой. Каждый треугольный элемент является сечением кольца, ось которого совпадает с осью вращения вала. Это кольцо можно счи-

тать обособленной струей, угловая скорость вращения которой определяется средним моментом импульса всех частиц в пределах элемента

$$\omega_k = \frac{\sum_{i=1}^{N_k} L_{ki}}{N_k m_0 r_k^2} = \frac{\sum_{i=1}^{N_k} r_{ki}^2 \omega_{ki}}{N_k r_k^2} = \frac{\sum_{i=1}^{N_k} L'_{ki}}{N_k r_k^2}, \quad (2)$$

где L_{ki} , r_{ki} и ω_{ki} – момент импульса, расстояние до оси и угловая скорость i -й частицы, находящейся в пределах k -го треугольного элемента, относительно оси вращения вала; N_k – количество частиц в k -м треугольном элементе; r_k – расстояние от центра тяжести k -го элемента до оси вращения; $L'_{0i} = L_{0i}/m_0 = r_{0i}^2 \omega_{0i}$ – расчетная величина.

В соответствии с законом Ньютона для вязкого трения на каждую кольцевую струю, соответствующую k -му треугольному элементу конечно-элементной сетки, действует момент вязкого трения

$$M_k = -2\pi\eta r_k^3 \sum_{i=1}^{i=3} \left(\frac{\Delta\omega_{ki}}{\Delta r_{ki}} l_{ki} \right), \quad (6)$$

где η – динамическая вязкость жидкости; координатные оси x и y перпендикулярны друг другу, струя движется в направлении оси x ; r_k – расстояние от центра тяжести k -го элемента до оси вращения вала; $\Delta\omega_{ki}$ – разность угловых скоростей k -й струи и струи, примыкающей к i -й стороне k -го треугольного элемента; Δr_{ki} – расстояние между центрами тяжести k -го элемента и элемента, примыкающего к i -й стороне k -го элемента; l_{ki} – длина i -й стороны k -го треугольного элемента.

Общий момент трения находится путем суммирования моментов трения всех струй.

Библиографический список

1. Щелькалов, Ю. Я. Система расчета магнитоидкостного герметизатора с параметрически формируемой полевой моделью и определением критического положения магнитной жидкости / Ю. А. Щелькалов, Ю. Б. Казаков, А. И. Тихонов, С. М. Перминов // Сб. научн. трудов 10-ой Междун. Плесской конф. по магнитным жидкостям. – Плес. 9–12 сентября 2002. – С. 374–381.
2. Тихонов, А. И. Модель вязкого трения в магнитоидкостном герметизаторе на основе метода Монте-Карло / А. И. Тихонов, Ю. Б. Казаков, К. М. Пирогов, А. С. Мартынов. – «Вестник ИГЭУ», 2012, Вып. 2, с. 31–33.

А. В. Стулов, аспирант; А. И. Тихонов, д. т. н., профессор

Уточненная тепловая модель магнитной системы силового трансформатора

При тепловом расчете магнитной системы исходными данными являются геометрия сердечника, расчетные потери холостого хода и коэффициент, учитывающий качество производства сердечников.

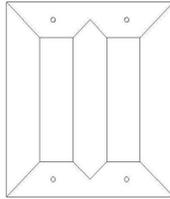


Рис. 1. Схема шихтовки магнитной системы силового трансформатора

Основные части магнитной системы: стержни, яра, стыки, технологические отверстия (рис. 1).

Для применения метода разветвленных тепловых цепей при тепловом расчете магнитной системы необходимо иметь картину распределения магнитного потока в сердечнике.

Уточненная тепловая схема замещения состоит из тепловых сопротивлений и источников потерь, подключенных к узлам, схемы замещения. В одну ветвь может входить несколько тепловых сопротивлений. В ветвях проставляются предполагаемые направления тепловых потоков. Ветви нумеруются.

К элементам тепловой схемы относятся:

1. Источники потерь – потери холостого хода (XX) соответственно в стержнях, ярах и стыках магнитной системы.

Значение выделяемой мощности P_n определяется произведением удельных потерь $p_{уд}$ при индукции $B = 1,7$ Тл и частоте $f = 50$ Гц на вес соответствующего элемента G_n :

$$P_n = p_{уд} \cdot G_n, \quad (1)$$

где $n = 1 \dots k$; k – количество элементов магнитной цепи.

2. Тепловые сопротивления:

- тепловые сопротивления теплопередачи через сердечник;
- тепловые сопротивления в стыках магнитопровода;
- тепловые сопротивления в зонах расположения отверстий в яре;

- тепловые сопротивления в зонах, близлежащих к отверстиям в яре.

Электрическая схема замещения тепловой цепи магнитной системы трансформатора приведена на рис. 2. Нахождение тепловых потоков в ветвях и температур в узлах производится методами контурных токов и узловых потенциалов.

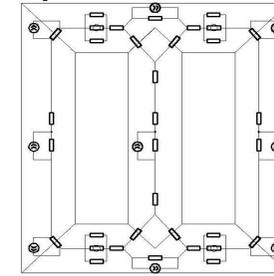


Рис. 2. Электрическая цепь для теплового расчета магнитной системы

Следует отметить, что на практике расчетные потери XX и измеренные на приемосдаточных испытаниях могут отличаться более чем в 1,2 раза. Это связано с тем, что электротехническая сталь, проходя технологический цикл продольной и поперечной резки, а также шихтовки, подвергается механическим воздействиям. В результате удельные потери становятся выше указанных в сертификате металлургического завода.

Уточненная тепловая модель магнитной системы трансформатора позволяет определить места локальных перегревов и выбрать способ шихтовки магнитопровода. В совокупности с уточненными моделями обмоток и конструктивных частей это позволяет получить при расчете оптимальные с точки зрения нагрева проекты.

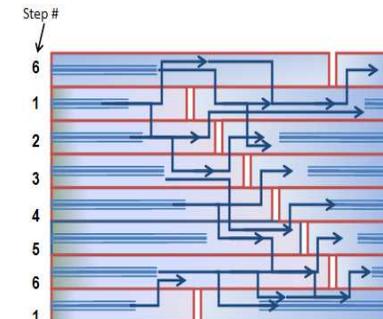


Рис. 3. Распределение магнитного потока в местах стыка магнитной системы (технология step-lap) [3]

Сложность возникает в определении тепловых сопротивлений в стыках магнитной системы.

В случае применения технологии step-lap при приближении к воздушному зазору магнитный поток имеет несколько вариантов «обтекания» воздушного зазора [3] (рис. 3). То, в какую из соседних пластин перетечет поток, помогут определить методы теории вероятностей.

В связи с этим калибровка модели может производиться только при проведении ряда экспериментов, построения на основе статистических данных зависимостей для расчетного определения коэффициента увеличения потерь.

Библиографический список

1. РД 16415-88 Трансформаторы силовые масляные. Остовы. Методика теплового расчета.
2. Тихомиров, П. М. Расчет трансформаторов: Учебное пособие для вузов. – 5-е издание – М.: Энергоатомиздат, 1986.
3. Reducing Building Factor by Using Step Lap (SL) Laminations By Saif Qureishi. Mumbai, 2010.

И. В. Трофимович, аспирант; А. И. Тихонов, д. т. н., профессор

Система оптимального проектирования сухих трансформаторов

Система проектирования сухих трансформаторов до 3-г гарбита класса напряжения до 35 кВ реализована в среде MathCad.

В основу расчета положена методика проектирования, изложенная в [1]. Поверочный расчет осуществляется на основе руководящих документов: расчет потерь и тока холостого хода осуществляется в соответствии с [2], электродинамическая стойкость обмоток – в соответствии с [3], тепловой расчет – в соответствии с [4]. Методика теплового расчета сухих трансформаторов с литой изоляцией обмотки ВН откорректирована в соответствии особенностями ее конструкции.

В отличие от методики, изложенной в [1] отсутствует этап определения главных размеров магнитной системы. Проектирование начинается с выбора аналога из архива готовых проектов. Раскладка стержней и ярма магнитопровода на пакеты осуществляется в соответствии с особенностями технологического процесса на ЗАО «Трансформер» (г. Подольск). Обмотка низшего напря-

жения выполняется из алюминиевой ленты. Обмотка высшего напряжения выполняется либо из обмоточного провода с прямоугольным сечением, либо из галет, намотанных алюминиевой фольгой. В соответствии с особенностями технологического цикла ЗАО «Трансформер» откорректирован ряд технологических коэффициентов.

Внесены изменения в методику расчета коэффициента добавочных потерь обмоток из фольги. Уточнение данного коэффициента осуществляется с помощью оригинальной методики, основанной на серии расчетов магнитного поля рассеяния обмотки с последующим расчетом ее электрической схемы замещения в соответствии с [5]. Такая методика позволяет учесть влияние эффекта вытеснения тока.

Библиографический список

1. Тихомиров, П. М. Расчет трансформаторов: Учебное пособие для вузов. – 5-е издание – М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. РД 16 317-86 Трансформаторы силовые. Расчет потерь и тока холостого хода.
3. РД 16 376-86 Теоретические основы расчета электродинамической стойкости обмоток при коротком замыкании.
4. РД 16 472-88 Трансформаторы силовые сухие общего назначения. Тепловой расчет.
5. Тихонов, А. И. Использование библиотеки моделирования магнитного поля при расчете реактора из алюминиевой ленты / А. И. Тихонов, А. В. Иванов. – «Вестник ИГЭУ», 2009, Вып. 3, с. 25–28.

Д. С. Корнилов, аспирант; Ю. Б. Казаков, д. т. н., профессор,
В. П. Шишкин, к. т. н., профессор

Расчет магнитного поля и оптимизация геометрии магнитопровода в торцевом магнитоэлектрическом генераторе

Разрабатываемый торцевой беспазовый генератор с возбуждением от постоянных магнитов может быть использован в автономных источниках питания малой мощности (от 500 Вт до 10 кВт) и приводиться во вращение энергией ветра или воды [1]. Несмотря на широкое распространение централизованного электроснабжения, потребность в автономных генераторах электроэнергии по-прежнему значительна. Они могут найти применение в геологоразведке, охотхозяйствах, дачных посёлках, отдалённых поселениях. Отличительными особенностями данной конструкции являются её простота, надёжность и малообслуживаемость. Отказ от пазов значительно упрощает и удешевляет процесс изготовления магнитопровода статора, решает проблему шума и виб-

раций при работе генератора, позволяет уменьшить момент страгивания (стартовый момент), тем самым улучшая работу при слабом и неустойчивом ветре. Ещё одно преимущество беспазовой конструкции – высокая ремонтпригодность и простота намотки сосредоточенных катушек обмотки статора.

Ввиду оригинальности конструкции генератора его математическое описание и методика проектирования в настоящее время несовершенны, к ней не всегда применимы имеющиеся разработки в области торцевых машин. В настоящее время рассчитано тепловое поле и поле скоростей воздуха в генераторе, следующий этап – расчёт распределения магнитного поля в активных и конструктивных элементах машины с последующей её оптимизацией. Цель оптимизации – уменьшение стоимости, массогабаритных показателей при улучшении энергетических показателей.

Магнитопровод статора навит из ленты электротехнической стали, возможности его оптимизации ограничены – можно изменять внешний и внутренний радиусы сердечника, ширину и толщину ленты, марку стали.

Магнитная система ротора представляет собой ферромагнитное кольцо с закрепленными на нём с торцевой стороны магнитами. Оптимизация магнитопровода ротора осуществляется в нескольких направлениях.

Первое направление – это расчёт и оценка значительности радиальной составляющей магнитного потока в массивном магнитопроводе ротора, изучение возможности замены его на шихтованный, аналогичный сердечнику статора.

Второе направление – возможность изменения сечения нешихтованного сердечника ротора на пути основного магнитного потока, потоков рассеяния и потоков реакции якоря. Цель исследования – сохранение (или даже уменьшение) массы спинки индуктора при улучшении распределения магнитного поля в машине. Наиболее нагруженным в магнитном отношении является сечение по оси между магнитами, где замыкаются рабочий магнитный поток и потоки рассеяния. В области под магнитом наблюдается малонасыщенная зона, где замыкается только поток реакции якоря. Этот магнитный поток следует уменьшать, так как он искажает картину поля возбуждения в зазоре, размагничивает постоянные магниты. Выполняя утолщение кольца магнитопровода по оси между магнитами с соответствующим уменьшением толщины по оси магнита (с внешней стороны магнитопровода), можно добиться улучшения картины магнитного поля в сердечнике индуктора и в зазоре, уменьшения его насыщения и ослабле-

ния потока реакции якоря. Если сердечник ротора является частью подшипникового щита и составляет с ним единое целое, то вместе с оптимизацией магнитопровода увеличивается внешняя поверхность генератора, а значит, улучшается теплоотдача в окружающую среду.

Известна конструкция статора магнитоэлектрической машины постоянного тока цилиндрического типа [2], где магниты крепятся к сердечнику статора в аксиальных треугольных пазах. В применении к исследуемой торцевой конструкции можно использовать данное решение, выполняя магниты не прямоугольными, а пятиугольными в тангенциальном сечении и фиксируя их в треугольных радиальных пазах на торцевой поверхности магнитопровода ротора. Это приведет к описанному выше ослаблению потоков реакции якоря, а также улучшит форму поля в зазоре, приблизив её к синусоидальной, и повысит надёжность и точность крепления магнитов на сердечнике.

Несмотря на приведенные преимущества, реализация данных решений связана с увеличением сложности и стоимости изготовления магнитопровода ротора и магнитов.

Следующее направление оптимизации – изучение влияния формы магнитов на распределение магнитного поля в машине. Рассматриваются магниты трех основных типов – секторные, трапецеидальные и призматические. Наиболее дорогой в изготовлении, но наиболее предпочтительной является форма сектора кольца. Заменяя закругленные части сектора на прямые, получаем трапецеидальные магниты, которые дешевле, но создают меньший магнитный поток в области внешнего и внутреннего радиуса сердечника. В обоих случаях зазор между соседними магнитами сохраняется одинаковым при изменении радиуса. Наиболее простой в изготовлении является призматическая форма магнита, при которой зазор между соседними магнитами становится неравномерным, клиновидным. Различия в создаваемом распределении магнитного поля уменьшаются при уменьшении средней ширины магнита (и соответствующем увеличении относительной длины магнита). При достижении определенного соотношения размеров секторные магниты могут быть заменены на трапецеидальные, а те, в свою очередь, на призматические, при этом картина магнитного поля искажается мало.

Возможен вариант увеличения числа пар полюсов за счёт уменьшения относительной ширины магнита при сохранении его длины, внешнего и внутреннего диаметров сердечников ротора и статора и сохранении объема магнитов в машине. При этом число

и расположение витков обмотки якоря остаётся прежним, изменятся лишь их организация по катушкам, то есть на статоре тоже увеличивается число полюсных делений. При этом отдельная катушка становится уже по ширине, но прежней по высоте. Данные мероприятия позволяют при неизменных номинальных скорости вращения, мощности и напряжении генератора значительно уменьшить массу железа магнитопроводов ротора и статора. Также наблюдается экономия меди в лобовых частях обмотки. Увеличение частоты генерируемого напряжения несколько увеличивает потери в стали, но одновременно приводит к снижению пульсаций выпрямленного напряжения, что позволяет отказаться от применения фильтров.

Перечисленные, некоторые другие решения и их сочетания проверяются на математических моделях генераторов различной мощности и частоты вращения. Результатом работы будут рекомендации и эмпирические формулы для выбора и расчёта той или иной геометрии магнитопровода.

Библиографический список

1. **Шишкин, В. П.** Автоматизированное проектирование торцевых магнитоэлектрических генераторов переменного тока: Учеб. пособие / ГОУ ВПО «ИГЭУ им. В.И. Ленина». Иваново, 2006. 68 с.
2. **Патент** на изобретение RU 2138110 С1, МКИ 6 Н 02 К 1/17, 23/04. Статор магнитоэлектрической машины постоянного тока / Казаков Ю.Б., Щелькалов Ю.Я. (Россия). – Заявка 97120858/09(022573). Приоритет от 16.12.97. Оpubл. 20.09.99. Бюл. N 26 1999. – 10 с. Полужит. решение от 24.03.99

В. В. Исламова, магистрантка; В. П. Шишкин, к. т. н., профессор

Расчет проводимостей рассеяния постоянного магнита в торцевом генераторе

В настоящее время синхронные генераторы с постоянными магнитами (СГПМ) находят применение в ветроэнергетических установках. Однако наряду с актуальностью возобновляемой энергетики, такие машины являются малоизученными, что значительно затрудняет их расчет и проектирование.

Данная работа посвящена расчету распределения магнитного поля СГПМ и на его основе определению проводимостей рассеяния постоянного магнита.

На начальном этапе работы построена объемная геометрическая модель магнитной системы в пределах двух полюсных делений СГПМ с помощью пакета SolidWorks (рис. 1). При построе-

нии были приняты следующие допущения: модель включает в себя только активные элементы; катушки, из-за ограничения пакета, с трапециевидального сечения упрощены до постоянного сечения.

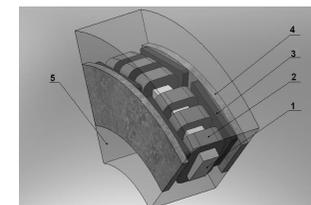


Рис. 1. Трехмерная модель СГПМ на два полюсных деления:
1 – сердечник якоря; 2 – катушка; 3 – магнит; 4 – спинка индуктора; 5 – воздух (выделенная область для задания граничных условий)

На основе этой модели рассчитано трехмерное магнитное поле машины с помощью пакета Maxwell (рис. 2).

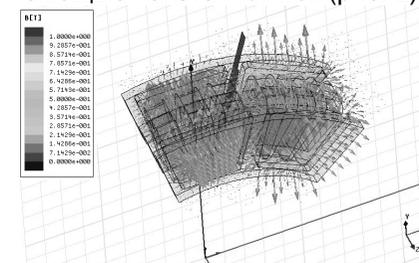


Рис. 2. Картина поля в ограниченной области воздуха

Полученное в результате расчета распределение магнитного поля в расчетной области позволило определить магнитные потоки машины – полный поток магнита Φ_m , рабочий поток в зазоре Φ_δ , потоки рассеяния: поток рассеяния между магнитами Φ_δ , торцевой со стороны внешнего диаметра $\Phi_{т.вш}$ (рис. 3) и торцевой со стороны внутреннего диаметра $\Phi_{т.вш}$.

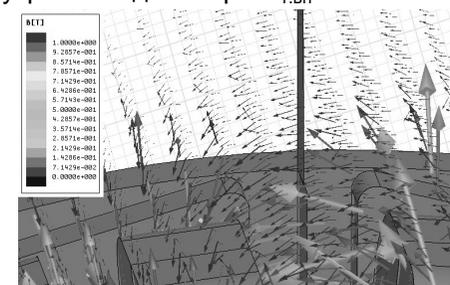


Рис. 3. Картина торцевого поля рассеяния $\Phi_{т.вш}$

Расхождение полученных величин с результатами аналитического расчета находится в допустимых пределах, что говорит о достаточной точности инженерной методики проектирования [1].

Библиографический список

1. Шишкин, В. П. Автоматизированное проектирование торцевых магнитоэлектрических генераторов переменного тока: учеб. пособие / В. П. Шишкин. Иваново: ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». 2006. 68 с.

Д. М. Тихомиров, студент; А. К. Громов, к. т. н., доцент

Исследование электромеханических процессов в синхронных генераторах с продольно-поперечным возбуждением

В последние годы, как в городах, так и в сельской местности существенно увеличивается потребление реактивной мощности. Потребителями реактивной мощности являются электроприемники промышленных предприятий, электрифицированный железнодорожный и городской транспорт, торговые спортивные и развлекательные центры и т. д. Доля реактивной мощности при загрузке линий электропередачи в настоящее время оценивается в диапазоне 20–80 % от активной мощности.

Это привело к ряду следующих негативных последствий, как в сфере надежности энергосистемы, так и в экономике:

- потребители стали работать с пониженным коэффициентом мощности и повышенным потреблением реактивной мощности из электрической сети системы энергоснабжения;
- возрастание потоков реактивной мощности в системах энергоснабжения потребителей электрической энергии (распределительных электрических сетях и системообразующих линиях электропередачи);
- необходимости поддержания (на уровне не ниже минимально допустимого) напряжения на шинах подстанций с присоединенной нагрузкой.

В целом неучастие потребителей в компенсации реактивной мощности собственными источниками и работа с пониженным коэффициентом мощности привели к нарушению баланса реактивной мощности в энергосистемах и снижению технико-экономической эффективности систем электроснабжения, проявившихся[1]:

- в возникновении дефицита реактивной мощности в узлах нагрузки и, как следствие, к снижению напряжения на шинах нагрузок и подстанций распределительных электросетей;
- в ограничении пропускной способности линий электропередачи и трансформаторных подстанций по активной мощности из-за необоснованной их загрузки реактивной мощностью;
- в существенном росте потерь активной мощности в электрических сетях;
- в увеличении потерь напряжения и снижения запаса статической устойчивости нагрузки по напряжению.

Регулирование реактивной мощности синхронного генератора классического исполнения обусловлено регулированием тока возбуждения, создающего МДС по продольной оси. При этом происходит изменение как активной, так и реактивной мощностей машины. Совершенно иная картина имеет место в машинах продольно-поперечного возбуждения. Изменяя соотношение токов в обмотках возбуждения, можно сделать так, что приращение ЭДС якоря будет направлено под произвольным и заданным углом к ЭДС. Так можно добиться такого положения, что приращение ЭДС якоря будет направлено всегда перпендикулярно вектору напряжения якоря. В этом случае будет изменяться или регулироваться только активная мощность машины. Если же приращение ЭДС будет направлено вдоль вектора напряжения якоря, то изменяется или регулируется только реактивная мощность машины. Следовательно, в машинах, содержащих две обмотки возбуждения, за счёт изменения пространственного положения вектора МДС возбуждения электрическим путем, т. е. посредством изменения соотношений токов возбуждения, можно добиться независимого регулирования активной и реактивной мощности. Благодаря этой возможности синхронная машина с продольно-поперечным возбуждением получает ряд важных преимуществ перед обычной синхронной машиной [2].

Работа с высокими уровнями напряжения, появившимися вследствие избытка реактивной мощности в системе, приводит к ускоренному износу и повышенной аварийности электрооборудования, работающего в этих условиях. Принимаются специальные меры, которые нередко приводят к ухудшению показателей устойчивости и экономичности работы энергосистем. В частности, для нормализации напряжения персонал электростанций, работающих на шины 220–500 кВ, вынужден переводить турбогенераторы в режимы потребления реактивной мощности, что позволяет несколько снизить уровни напряжения, но со временем приво-

дит к ускоренному износу этих турбогенераторов. В ряде случаев и к аварийным отключениям из-за разрушения торцевых зон активной стали статоров, поскольку серийные турбогенераторы фактически не рассчитаны на эти режимы. В результате происходит значительное число аварийных отключений и простоев с вынужденными восстановительными ремонтами на турбогенераторах единичной мощностью по 200–300 МВт. Ситуация усугубляется ещё и тем, что у более половины всего генераторного парка страны превышен установленный нормативами срок службы.

Все вышеизложенное обуславливает то, что традиционные синхронные турбо- и гидрогенераторы, соответствовавшие по своим характеристикам условиям работы, характерным в 60–70-е годы для отечественных энергосистем, не всегда удовлетворяют новым требованиям, определяемым перечисленными особенностями режимов энергосистем. Поэтому в нашей стране, а также за рубежом, более 30 лет проводятся исследования и разработки, давшие уже положительные результаты, по созданию и использованию, наряду с традиционными (синхронными) генераторами, машин с продольно-поперечным возбуждением. Они несколько дороже и имеют улучшенные технические и эксплуатационные характеристики.

В предстоящей работе планируется провести анализ режимов работы турбомашин с продольно-поперечным возбуждением с отдельным регулированием активной и реактивной мощностей. Основа анализа – математическая модель турбогенератора на базе обобщенной электрической машины.

В дальнейшем планируется рассмотреть возможности использования модели для анализа процессов в асинхронизированном синхронном генераторе.

Библиографический список

1. **Ерёмин, И. В.** Исследование характеристик неявнополюсного синхронного генератора с продольно-поперечным возбуждением / И. В. Еремин. Магистерская диссертация. Иваново, 2010.
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.: Высш. шк., 1990. – 304 с.: ил.

А. В. Уткин, магистрант; Ю. И. Страдомский, к. т. н., доцент

Асинхронизированные генераторы

Важную проблему, с которой связана эксплуатация асинхронизированных генераторов (АСГ), представляет работа электрических систем в часы снижения активной нагрузки – в ночное время и выходные дни. Возникающий при этом избыток реактивной мощности приводит к недопустимому повышению напряжения в электрических сетях. Известно, что напряжение синхронного генератора (СГ) по отношению к электрической системе находится в противофазе ($U_C = -U$), поэтому перевозбуждённый СГ представляет собой нагрузку ёмкостного характера, генерирующую реактивную мощность (РМ), а недо возбуждённый СГ – нагрузку индуктивного характера, потребляющую РМ.

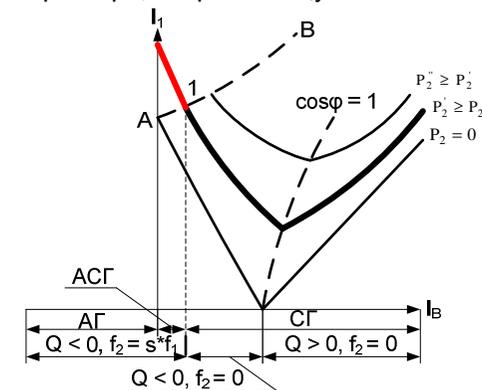


Рис. 1. U-образные характеристики СГ

Для того чтобы СГ мог потреблять избыток РМ из сети, его переводят в режим недо возбуждения. Из U-образных характеристик видно, что при уменьшении возбуждения СГ приближается к границе статической устойчивости. Зона недо возбуждения при P_2' ограничена т. 1 границы устойчивости АВ (рис. 1), левее которой работа синхронных машин в синхронном режиме невозможна.

Именно для решения этой проблемы служит АСГ (рис. 2), представляющий собой электромеханический комплекс, состоящий из собственно электрической машины, возбудителя – управляемого преобразователя частоты и автоматического регулятора возбуждения. Генератор имеет статор традиционного типа. Ротор генератора – с двумя симметричными обмотками возбуждения по продольной и поперечной осям. Поперечное сечение и схема

мент со стороны АСТГ вновь становятся равными, что позволяет АСТГ работать устойчиво даже в режимах глубокого потребления реактивной мощности.

Библиографический список

1. Иванов-Смоленский, А. В. Электрические машины в 2 томах. / А. В. Иванов-Смоленский. М.: Издательство МЭИ. 2004.
2. Шакарян, Ю. Г. Асинхронизированные синхронные машины. / Ю. Г. Шакарян. М.: Энергоатомиздат. 1984.

И. В. Матюшин, студент; Ю. И. Страдомский, к. т. н., доцент

Турбогенераторы для АЭС мощностью 1000 МВт и более

Перспективы развития атомной энергетики России определены Федеральной целевой программой «Развитие атомного энергопромышленного комплекса России на 2007–2010 годы и на перспективу до 2015 года» и другими документами. В настоящее время доля электроэнергии, генерируемая на АЭС в России, составляет 16 % и должна увеличиться до 30 %. Будет построено 26 новых энергоблоков. В разработках проекта Энергетической стратегии России на период до 2030 г. предусмотрено увеличение производства электроэнергии на атомных электростанциях в 4 раза [1]. В настоящее время генерация электроэнергии в основном осуществляется с помощью энергоблоков мощностью 1000 МВт при частоте вращения 3000 об/мин.

1. ТУРБОГЕНЕРАТОР ТВВ-1000-2 (с водородно-водяным охлаждением). Турбогенератор является составным звеном основной технологической цепи блока АЭС (реакторная установка – турбина – генератор – блочный трансформатор – система). Общий вид генератора с возбуждателем представлен на рис. 1.

Конструктивные особенности турбогенераторов серии ТВВ:

- охлаждение обмотки статора – непосредственное, водой, протекающей по полым проводникам;
- охлаждение обмотки ротора – непосредственное, водородное по схеме самовентиляции, с забором газа из зазора между статором и ротором;
- охлаждение активной стали статора – водородное;
- усовершенствованная конструкция коллекторов водяного охлаждения обмотки статора;

- изоляция обмотки статора – непрерывная, терморреактивная, класса нагревостойкости F;
- изоляция обмотки ротора – на основе стеклоткани и теплостойких лаков, класса нагревостойкости F;
- усовершенствованная конструкция торцевой зоны сердечника статора.

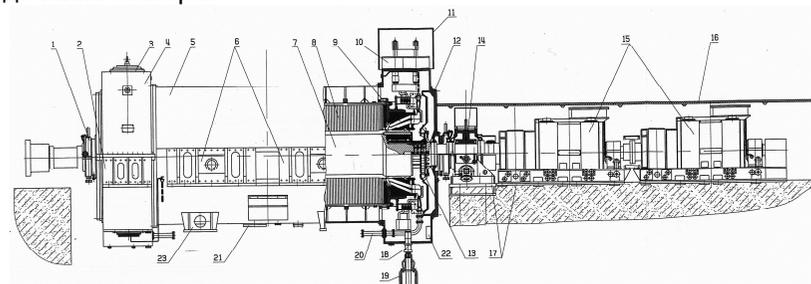


Рис. 1. Турбогенератор типа ТВВ-1000-2 (общий вид): 1 – масляное уплотнение вала; 2 – съемная рым-лапа концевой части корпуса статора; 3 – газоохладитель; 4 – корпус статора (концевая часть); 5 – корпус статора (центральная часть); 6 – съемная рым-лапа центральной части корпуса статора; 7 – ротор; 8 – сердечник статора; 9 – обмотка статора; 10 – выводы и трансформаторы нейтрали; 11 – кожух нейтральных выводов; 12 – наружный щит; 13 – щит вентилятора; 14 – подшипник; 15 – возбуждатель; 16 – шумозащитный кожух; 17 – фундаментные плиты; 18 – линейные выводы; 19 – гибкие переемы линейных выводов; 20 – водоподвод к обмотке статора; 21 – крышка паза в центральную часть корпуса статора; 22 – электронагреватели; 23 – постоянная опорная лапа

Потери, выделяющиеся в обмотках статора и ротора, в магнитопроводе статора, а также механические потери от трения ротора в газовой среде (вентиляционные потери), трения в подшипниках и уплотнениях вала отводятся внутри генератора водой-дистиллятом (из обмотки статора), водородом (из обмотки ротора, и сердечника статора), маслом (из подшипников и уплотнений вала). Во внешнюю среду все потери отводятся технической водой в теплообменниках и газоохладителях.

Дистиллят в обмотке статора циркулирует под напором насосов и охлаждается теплообменниками, расположенными вне генератора. Охлаждающий водород циркулирует в генераторе под действием вентиляторов, установленных на валу ротора, и охлаждается газоохладителями, встроенными в корпус статора. Циркуляция охлаждающей воды в газоохладителях и теплообменниках осуществляется насосами, расположенными вне генератора.

Возбуждение генератора осуществляется от бесщеточного возбуждателя, состоящего из трехфазного синхронного генератора

обращенного исполнения.

Преимущества турбогенераторов серии ТВВ:

- высокая экономичность;
- маневренность;
- надежность;
- улучшенное вибрационное состояние;
- повышенная теплостойкость;
- удобство при ремонте и эксплуатации в различных климатических условиях;
- возможна эксплуатация в режимах с потреблением реактивной мощности [2].

Дальнейшее увеличение мощности не может быть без сопровождения совершенствования системой охлаждения. В будущем планируется применение генераторов с полным водяным охлаждением типа ТЗВ.

2. ТУРБОГЕНЕРАТОР ТЗВ-1200-2 (с полным водяным охлаждением). ТЗВ-1200-2 – турбогенератор мощностью 1200 МВт с водяным охлаждением обмотки ротора, сердечника и обмотки статора. В 2011 г. ОАО «Силловые машины» изготовило и успешно провело испытания этого турбогенератора, предназначенного для первого энергоблока Нововоронежской АЭС-2. Быстроходные паровые турбины и турбогенераторы мощностью 1200 МВт для АЭС – это новые разработки «Силловых машин», ориентированные на атомные энергоблоки нового поколения, создаваемые в рамках проекта «АЭС-2006» [3].

Турбогенераторы серии ТЗВ по всем параметрам соответствуют требованиям международных стандартов, а по КПД, надежности, уровням нагревов и вибрации, габаритно-весовым показателям, простоте обслуживания и ремонтпригодности превосходят зарубежные генераторы. На рис. 2 представлен продольный разрез концевой части турбогенератора ТЗВ-1200-2 (с полным водяным охлаждением).

Водяное охлаждение является наиболее эффективным не только благодаря высокой теплоотводящей способности воды и меньшим затратам на ее циркуляцию. Важнейшим преимуществом применения полного водяного охлаждения и отказа от водорода является исключение возможности взрыва и возгорания внутри машины. Но до последнего времени не удавалось преодолеть трудности создания надежных систем водяного охлаждения ротора и активной стали статора.

Основным техническим достижением в практическом решении задачи создания надежного водоохлаждаемого ротора, прин-

ципально отличающимся от всего разработанного в этой области за рубежом, является самонапорная система обмотки возбуждения. Для преодоления гидравлического сопротивления каналов обмотки ротора используется центробежная сила воды, заливаемой свободной струей во вращающийся напорный коллектор (рис. 2, поз. 1) и сбрасываемой на большем диаметре в сливную камеру торцевого щита статора (рис. 2, поз. 8). Полые проводники демпферной обмотки охлаждаются так же как и обмотка возбуждения, являясь одновременно активным охладителем стали ротора, бандажных колец и воздуха в зазоре.

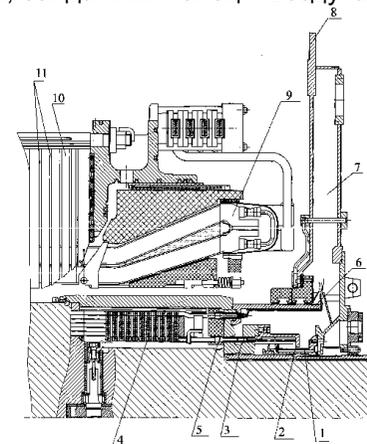


Рис. 2. Турбогенератор типа ТЗВ с полным водяным охлаждением (продольный разрез концевой части): 1 – неподвижный напорный коллектор; 2 – напорное кольцо; 3 – нижние выводы обмотки ротора; 4 – обмотка ротора; 5 – верхние выводы обмотки ротора; 6 – сливное кольцо; 7 – неподвижная камера слива; 8 – торцевой щит корпуса статора; 9 – лобовые части обмотки статора; 10 – сердечник; 11 – охладитель сердечника.

Важной особенностью конструкции турбогенератора типа ТЗВ является применение плоских силуминовых охладителей для охлаждения сердечника статора (рис. 2, поз. 11), которые устанавливаются в радиальных вентиляционных каналах сердечника. Они представляют собой сегменты с залитыми в них змеевиками из нержавеющей стальной трубки. Стяжные ребра, нажимные кольца, медные экраны торцевых зон, а также концевые части, концевые выводы и выводные шины в турбогенераторах типа ТЗВ являются водоохлаждаемыми элементами [4].

Библиографический список

1. Официальный сайт «Росэнергоатом». <http://www.rosenergoatom.ru>.

2. ОАО «Силловые машины». Турбогенератор синхронный трехфазный типа ТВВ-1000-2У3. Руководство по эксплуатации. 2010.
3. Официальный сайт ОАО «Силловые машины». <http://www.power-m.ru>.
4. Извеков, В. И. Проектирование турбогенераторов. / В. И. Извеков. – М.: Энергия. 2005.

И. А. Палилов, магистрант; В. Н. Караулов, к. т. н, доцент

Параметрическая модель для расчета электромеханических процессов в асинхронной машине с массивным ферромагнитным ротором

При математическом моделировании электромеханических процессов в асинхронной машине с массивным ротором необходимо учитывать нелинейность ферромагнетика, зубчатость сердечников, вихревые токи в роторе. Современные программы моделирования учитывают эти факторы в ходе расчётов мгновенных состояний электромагнитного поля: определяют потокосцепления обмоток, потери в стали и в обмотках, электромагнитный момент. Полевые расчёты выполняются совместно с решением уравнения движения ротора и уравнений равновесия напряжений в фазах. Таким образом, модели, основанные на расчётах мгновенных состояний электромагнитного поля, дают полное представление о процессах, происходящих в электромеханическом преобразователе. Главным недостатком таких моделей является большое время, требующееся для расчёта (часы, сутки). Данная проблема лишь частично снимается за счёт использования плоскопараллельной модели поля в активной зоне машины и цепных моделей – в торцевых частях машины.

Актуальной является задача разработки параметрической модели, предназначенной для расчёта электромеханических процессов в асинхронной машине с массивным ферромагнитным ротором. Такая модель разработана авторами на основе классической модели асинхронной машины в естественной системе координат. Зазор принимается гладким. Массивный ротор представляется в виде вращающейся приведённой трёхфазной обмотки. Обмотки рассматриваются как электрические цепи с сосредоточенными параметрами. Принимается, что каждая фаза обмоток статора и ротора создаёт лишь основную пространственную гармоническую магнитного поля в зазоре. Моделью асинхронной машины являются дифференциальные уравнения баланса напряжений фаз и уравнение движения ротора (1). Параметрами

модели являются активные сопротивления фаз, индуктивности рассеяния и главная индуктивность фаз.

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{1A} = R_1 i_{1A} + \frac{d\psi_{1A\Sigma}}{dt} \\ u_{1B} = R_1 i_{1B} + \frac{d\psi_{1B\Sigma}}{dt} \\ u_{1C} = R_1 i_{1C} + \frac{d\psi_{1C\Sigma}}{dt} \\ 0 = R_2 i_{2a} + \frac{d\psi_{2a\Sigma}}{dt} \\ 0 = R_2 i_{2b} + \frac{d\psi_{2b\Sigma}}{dt} \\ 0 = R_2 i_{2c} + \frac{d\psi_{2c\Sigma}}{dt} \\ \sum_{k=A,B,C} i_{1k\Sigma} \sum_{n=a,b,c} i_{2n\Sigma} \frac{dL_{kn}}{dt} + M_{ст} = J \frac{d\Omega}{dt} \end{array} \right. \quad (1)$$

Влияние насыщения и поверхностного эффекта на магнитное сопротивление массивного ротора учитывается с помощью универсальной зависимости, введенной Л. Р. Нейманом [1]. Параметры приведённой обмотки ротора определяются по алгоритму, представленному в [2]. Основные положения алгоритма представлены ниже на примере машины с одной парой полюсов. Массивный ротор разбивается на $2N$ элементарных участков (рис. 1); l_n – толщина участка, u_n – периметр поперечного сечения участка. Распределение намагничивающей силы вдоль окружности ротора принимается синусоидальным с амплитудой F_{m2} . Для N -го участка массивного ротора рассчитывается единичное комплексное магнитное сопротивление:

$$Z_{1N} = 8800 He_N^{0.417} \cdot \left(\frac{1.13}{\sqrt{1.13^2 + 1.85^2}} + j \frac{1.85}{\sqrt{1.13^2 + 1.85^2}} \right),$$

где $He_N = \frac{\Delta F_{2N}}{I_N}$ – действующее значение напряженности магнитного поля на поверхности участка; ΔF_{2N} – падение магнитного напряжения в участке; полное комплексное магнитное сопротивление участка при частоте перемагничивания f_1 :

$Z_{mN} = \frac{I_N}{u_N} \cdot \sqrt{f_1} \cdot Z_{1N}$; магнитный поток в участке:

$$\Phi(I_2')_N = \frac{\Delta F_2(I_2')_N}{Z_m(I_2')_N}$$

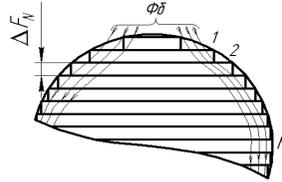


Рис. 1. Элементарные участки массивного ротора

Эквивалентное магнитное сопротивление массивного ротора: $Z_{m0} = \frac{2Fm_2(I_2')}{\Phi(I_2')_N}$. Электрическое сопротивление приведённой

обмотки ротора при частоте перемagnичивания f_1 :

$$Z_{20}'(I_2) = \frac{j}{Z_{m0}} \cdot \frac{4mf(w_1 \cdot k_{об})^2}{p}$$

и при частоте перемagnичивания f_1^*s : $Z_{20}'(I_2, s) = \frac{Z_{20}'(I_2)}{\sqrt{s}}$; активная и реактивная составляющие

эквивалентного электрического сопротивления массивного ротора:

$$r_2'(I_2, s) = \text{Re}\left(\frac{Z_{20}'(I_2)}{\sqrt{s}}\right); \quad x_2'(I_2, s) = \text{Im}\left(\frac{Z_{20}'(I_2)}{\sqrt{s}}\right)$$

В переходных режимах токи в фазах статора несимметричны. Изображающий вектор тока статора:

$$I = \frac{2}{m} \cdot |i_A + i_B \cdot a + i_C \cdot a^2|,$$

где m – число фаз; i_A, i_B, i_C – соответственно мгновенные токи А, В, С фаз статора; $a = e^{j2\pi/3}$ – оператор поворота. Полученный изображающий вектор тока эквивалентен по основной гармонической поля изображающему вектору тока при симметричном питании фаз статора.

Характеристика намагничивания магнитной цепи $\psi_m = f(I)$ рассчитывается при симметричном питании фаз статора. Амплитуда потокосцепления фазы статора: $\psi_m = \Phi_1 w_1 k_{об} = \frac{E_1}{4,44f_1}$. Дей-

ствующее значение тока в фазе обмотки статора:

$$I = \frac{\rho \cdot \pi \cdot \sum F}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot m \cdot w_1 \cdot k_{об}}$$

вдоль замкнутой линии магнитного потока (на два полюса):

$\sum F = 2 \cdot F_\delta + 2 \cdot F_{z1} + 2 \cdot F_a + F_2(I, s) \cdot |e^{j\pi/3}|$. При этом насыщение магнитной цепи статора учтено при расчёте падений магнитного напряжения в зубцах и ярме статора; насыщение массивного ротора и действие поверхностного эффекта учтено при расчете падения магнитного напряжения в массивном роторе: $F_2(I, s) \cdot e^{j\pi/3} = \Phi_1 \cdot Z_{m0}(I, s) \cdot e^{j\pi/3}$. Главная индуктивность фаз

$$L_m(i, s) = \frac{\Psi_m}{I} = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot m \cdot E_1 \cdot w_1 \cdot k_{об}}{\pi \cdot 4,44 \cdot f_1 \cdot \rho \cdot \sum F}$$

Влияние насыщения коронок зубцов статора на магнитные проводимости пазового и дифференциального рассеяния учитывается с помощью традиционной методики [3].

Ниже представлены результаты моделирования пуска асинхронного двигателя с массивным ротором (мощность 3 кВт, синхронная частота вращения 3000 об/мин) при номинальной нагрузке на валу и питании симметричным трехфазным напряжением. На рис. 2–4 представлены кривые токов, моментов и скоростей, рассчитанные с помощью полевой и параметрической моделей. Отличия в кривых объясняются допущениями, принятыми в параметрической модели.

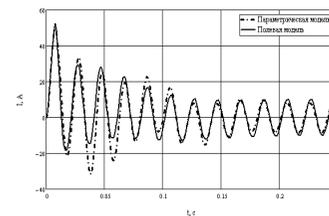


Рис. 2. Ток фазы статора

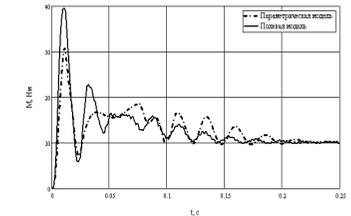


Рис. 3. Электромагнитный момент

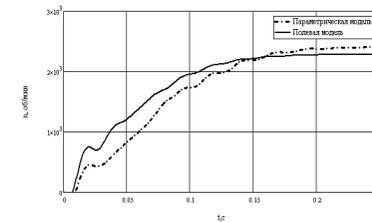


Рис. 4. Кривая разгона

Выводы. 1. Разработана параметрическая модель асинхронной машины с массивным ротором. Модель позволяет исследовать переходные и установившиеся режимы работы асинхронных двигателей с массивным ротором при симметричном, несимметричном и несинусоидальном питающем напряжении. 2. Показана достоверность результатов расчетов процессов в асинхронном двигателе с массивным ротором с помощью параметрической модели.

Библиографический список

1. **Нейман, Л. Р.** Поверхностный эффект в ферромагнитных телах / Л. Р. Нейман. Л.–М., 1949.
2. **Куцевалов, В. М.** Вопросы теории и расчета асинхронных машин с массивными роторами / Куцевалов В.М. – М.-Л.: Энергия, 1966. – 304 с.
3. **Проектирование** электрических машин: Учеб. для вузов / И. П. Копылов, Б. К. Клоков, В. П. Морозкин, Б. Ф. Токарев; под ред. И. П. Копылова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2005. – 767 с.: ил.

Н. К. Швецов, магистрант; Ю. Б. Казаков, д. т. н., профессор

Работа тягового асинхронного двигателя (170 кВт) от преобразователя частоты с широтно-импульсным модулированием напряжения

В современных электроприводах большое распространение получили асинхронные двигатели (АД) с питанием от преобразователей частоты с широтно-импульсной модуляцией напряжения (ПЧ с ШИМ). Сигнал на выходе ПЧ помимо основной гармоники содержит спектр высших гармоник. Гармоники, кратные основной частоте и несущей частоте ШИМ, могут иметь существенные амплитуды. Высшие гармоники вызывают в АД дополнительные потери в обмотках и стали, что приводит к ухудшению энергетических показателей двигателя [1]. Кроме того, дополнительные потери увеличивают тепловыделение в активных частях двигателя, что может быть опасно для его изоляции. Существуют различные способы ШИМ напряжения: ШИМ с постоянной высотой импульсов, с синусоидально изменяющейся высотой импульсов, с синусоидальной шириной импульсов, с импульсно-ступенчатой высотой импульсов. Параметрами ШИМ напряжения являются скважность (γ) и число импульсов на полупериоде (N). Напряжение на выходе ПЧ с ШИМ при различных способах и параметрах модуляции имеет разный гармонический состав, и соответственно вы-

зывает разные по величине дополнительные потери в АД. Таким образом, расчет увеличения потерь в АД при его питании от ПЧ при разных способах и параметрах ШИМ напряжения является актуальной задачей.

При расчете увеличения потерь в АД при питании от ПЧ с ШИМ часто применяют методику, основанную на усреднении мгновенных значений в пределах периода несущей частоты и замене серии импульсов одним прямоугольным импульсом с высотой U_{cp} . Однако такой подход не позволяет учитывать гармоники, кратные несущей частоте ШИМ, которые могут иметь существенную величину по сравнению с первой гармоникой. Более точный результат можно получить, раскладывая форму выходного напряжения в гармонический ряд, что позволяет отдельно учитывать действие каждой гармоники [1, 2]. Эта методика позволяет определить коэффициенты увеличения потерь по отношению к номинальным. Коэффициент увеличения электрических потерь:

$$K_{эл} = (P_{эл.ном} + \sum_{v=5}^{\infty} P_{эл.v}) / P_{эл.ном} = 1 + K_n^2 \sum_{v=5}^{\infty} \left[\frac{1}{v} \left(\frac{U_v}{U_1} \right)^2 \right],$$

где $P_{эл.ном}$, $P_{эл.v}$ – электрические потери от действия первой и v -той гармоник соответственно, K_n – кратность пускового тока, U_v , U_1 – амплитуды v -той и первой гармоник соответственно. Коэффициент увеличения потерь в стали:

$$K_{ст} = (P_{ст.ном} + \sum_{v=5}^{\infty} P_{ст.v}) / P_{ст.ном} = 1 + K_{высш.гарм.ст} \sum_{v=5}^{\infty} \left[\frac{1}{v^{0.7}} \left(\frac{U_v}{U_1} \right)^2 \right],$$

где $P_{ст.ном}$, $P_{ст.v}$ – потери в стали от действия первой и v -той гармоник соответственно, $K_{высш.гарм.ст} = 2 \div 3$ – коэффициент, учитывающий увеличение потерь в стали при перемагничивании по частичным циклам. Коэффициент суммарного увеличения потерь АД от действия высших гармоник напряжения и тока:

$$K_{сумм} = \frac{P_{эл.ном}}{P_{сумм.ном}} \cdot K_{эл} + \frac{P_{ст.ном}}{P_{сумм.ном}} \cdot K_{ст},$$

где $P_{сумм.ном}$ – сумма электрических потерь и потерь в стали от действия первой гармоники.

Методика, изложенная в [1, 2], предполагает следующие допущения:

1. Активные и индуктивные сопротивления упрощенной схемы замещения АД для высших гармоник ($v \geq 5$) пропорциональны номеру гармоники.

2. Асинхронные моменты, создаваемые высшими гармониками, направлены в разные стороны и в номинальном режиме уравновешиваются, поэтому потребляемая АД энергия высших временных гармонических выделяется в виде потерь в меди и стали.

3. Магнитные поля, создаваемые каждой гармоникой, рассматриваются вне зависимости друг от друга.

По представленной выше методике, в среде MathCad был произведен расчет коэффициентов увеличения потерь в АД со следующими номинальными данными: $P_{\text{ном}} = 170$ кВт, $U_{\text{ном}} = 530$ В, $f = 43$ Гц, $\eta_{\text{ном}} = 0,92$, $K_{\text{п}} = 7$, $P_{\text{эл.ном}} = 10704,64$ Вт, $P_{\text{ст.ном}} = 2027,74$ Вт, $P_{\text{мех}} = 1435,66$ Вт. Расчет проводился для четырех способов ШИМ напряжения (с постоянной шириной и высотой импульсов, с синусоидально изменяющейся высотой импульсов, с синусоидальной шириной импульсов, с импульсно-ступенчатой высотой импульсов) при параметрах ШИМ $\gamma = 0,542$ и $N = 36$. Результаты расчета сведены в табл. 1. Опорное напряжение ($U_{\text{оп}}$) подобрано таким образом, чтобы амплитуда первой гармоники напряжения на выходе ПЧ была равна амплитуде номинального синусоидального напряжения двигателя.

Таблица 1. Коэффициенты увеличения потерь в АД при параметрах ШИМ $N = 36$, $\gamma = 0,542$

Способ ШИМ	$U_{\text{оп}}$, В	$U_{\text{м}}$, В	η , о.е.	$K_{\text{эл}}$	$K_{\text{ст}}$	$K_{\text{сумм}}$
Синусоидальное напряжение	749,50	749,5	0,92	1	1	1
Постоянная ширина импульсов	881,50	749,52	0,853	2,324	1,17	2,141
Синусоидальная ширина импульсов	881,50	749,52	0,893	1,497	1,079	1,431
Синусоидальная высота импульсов	1386,60	749,49	0,871	1,949	1,145	1,821
Импульсно-ступенчатая высота импульсов	564,12	749,50	0,871	1,956	1,104	1,82

Из табл. 1 видно, что наибольшие потери в АД имеют место при его питании от ПЧ с постоянной шириной импульсов, а наименьшие при питании от ПЧ с синусоидальной шириной импульсов. Увеличение электрических потерь более существенно, чем увеличение потерь в стали. Причиной различия коэффициентов увеличения потерь является разный гармонический состав напряжения на выходе ПЧ при разных способах ШИМ напряжения. На рис. 1 приведен спектр гармоник для двух вышеназванных способов. Из рисунка видно, что при постоянной ширине им-

пульсов амплитуды 35-ой и 37-ой гармоник напряжения составляют приблизительно 60 % амплитуды первой гармоники.

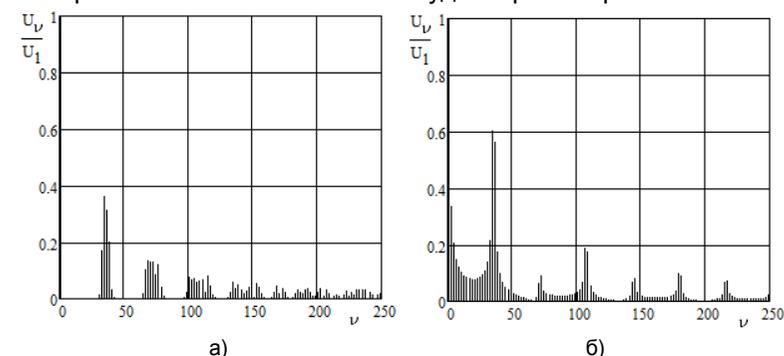


Рис. 1. Спектр гармоник напряжения на выходе ПЧ с ШИМ: а – с синусоидальной шириной импульсов; б – с постоянной шириной импульсов

Для повышения точности расчета коэффициентов увеличения потерь необходимо выявление более точных зависимостей параметров схемы замещения АД от частоты. Также необходимо учитывать изменение электромагнитного момента машины под действием высших временных гармоник, а так же изменение формы тока под действием активно-индуктивных параметров ПЧ. Полученные результаты могут быть использованы для определения увеличения потерь в данном двигателе при питании от ПЧ с ШИМ при параметрах $N = 36$, $\gamma = 0,542$. При других параметрах ШИМ коэффициенты увеличения потерь могут быть другими.

Библиографический список

1. Казаков, Ю. Б., Влияние параметров широтно-импульсного регулирования напряжения на добавочные потери в асинхронных двигателях / Ю. Б. Казаков, В. А. Андреев. // Электричество. – № 9, 2008. – С. 39–44.
2. Казаков, Ю. Б. Зависимость потерь в асинхронных двигателях от параметров широтно-импульсного регулирования напряжения / Ю. Б. Казаков, А. А. Шумин, В. А. Андреев. // Вестник ИГЭУ. – № 3, 2007. – С. 50–53.

П. А. Иголкин, студент; В. Н. Караулов, к. т. н, доцент

Влияние пазов на электромагнитный момент асинхронного двигателя с массивным ротором

Асинхронные двигатели с массивным ротором имеют большой пусковой момент при сравнительно низком значении пускового тока, имеют прочную конструкцию и могут использоваться при

больших скоростях вращения. Улучшение энергетических показателей таких машин может быть достигнуто за счёт использования пазов на роторе.

Для изучения влияния размеров прямоугольных пазов на электромагнитный момент авторы создали модель (рис. 1), состоящую из постоянных магнитов, ярма и массивного ротора. Аксиальная длина модели 50 мм. Ротор вращается с постоянной скоростью. Полевые расчёты модели выполнены при частоте перемагничивания ротора 50 Гц и 4 Гц. Получены значения электромагнитных моментов, действующих на гладкий ротор и на роторы с различными размерами прямоугольного паза. Число пазов ротора – 60.

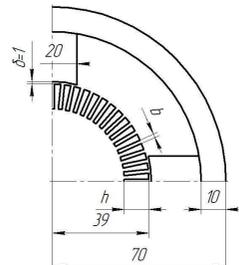


Рис. 1. Фрагмент модели

Математическое моделирование электромагнитных процессов в представленной модели выполнено с помощью современных программ, основанных на расчётах мгновенных состояний электромагнитного поля. Расчёты учитывают нелинейность характеристики намагничивания материала массивного ротора и его электрическую проводимость.

На рис. 2, 3 представлены зависимости электромагнитного момента от высоты и ширины паза при частоте перемагничивания ротора 50 Гц и 4 Гц. Пазы усиливают электромагнитный момент. Существуют оптимальные размеры паза, обеспечивающие пятикратное увеличение электромагнитного момента. При частоте перемагничивания ротора 50 Гц наиболее эффективны пазы с шириной 1,5 мм и глубиной 20 мм; при частоте перемагничивания 4 Гц – пазы с шириной 0,5 мм и глубиной 30 мм.

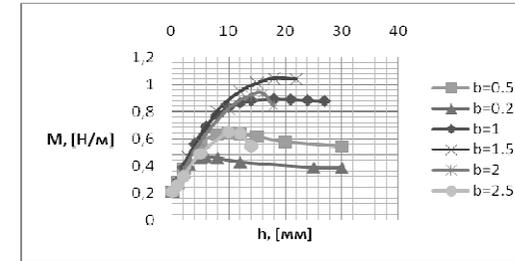


Рис. 2. Зависимости электромагнитного момента от высоты паза и ширины паза при частоте перемагничивания ротора 50 Гц

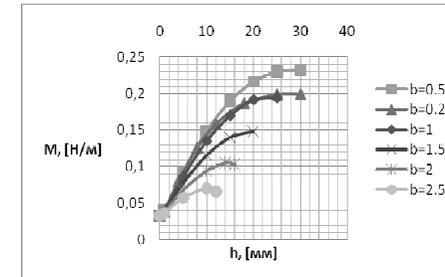


Рис. 3. Зависимости электромагнитного момента от высоты паза и ширины паза при частоте перемагничивания ротора 4 Гц

На рис. 4 представлены картины распределения магнитного потока и плотности вихревого тока в массивном роторе при частоте перемагничивания 50 Гц; ширина пазов ротора 0,5 мм, глубина – 20 мм. На рис. 5 представлены картины распределения магнитного потока и плотности вихревого тока в массивном роторе при частоте перемагничивания 4 Гц; ширина пазов ротора 0,5 мм, глубина – 30 мм.

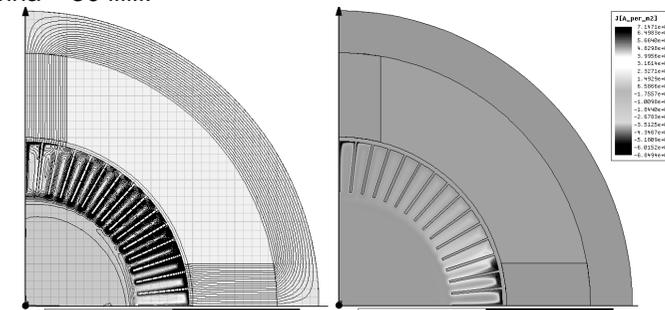


Рис. 4. Распределение магнитного потока и плотности вихревого тока в массивном роторе при ширине пазов ротора 0,5 мм, глубине – 20 мм; частота перемагничивания ротора 50 Гц

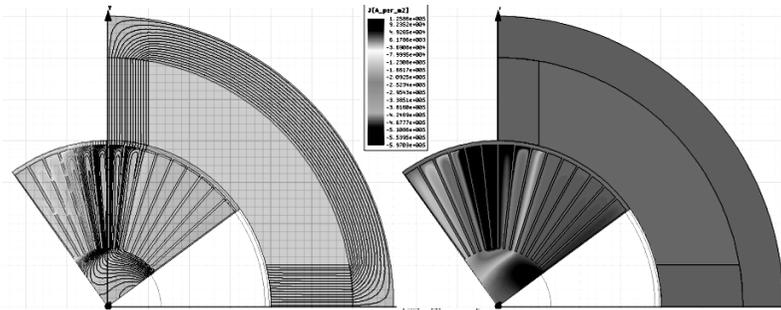


Рис. 5. Распределение магнитного потока и плотности вихревого тока в массивном роторе при ширине пазов ротора 0,5 мм, глубине – 30 мм; частота перемагничивания ротора 4 Гц

Выводы. Оптимальная ширина прямоугольных пазов позволяет в несколько раз увеличить электромагнитный момент асинхронного двигателя с массивным ротором. При пуске двигателя эффективны пазы с шириной 1,5 мм; при рабочей частоте вращения – с шириной 0,5 мм.

В. А. Филиппов, аспирант; Ю. Б. Казаков, д. т. н., профессор, Ю. И. Страдомский, к. т. н., доцент

Математическое моделирование процесса движения немагнитных частиц в рабочем зазоре гидростатического сепаратора на основе нанодисперсных магнитных жидкостей

Для расчета траектории частицы, при движении в рабочем зазоре МЖС, была принята следующая модель. На немагнитную частицу с плотностью ρ и объемом V в магнитной жидкости с плотностью $\rho_{ж}$ и намагниченностью M , действуют четыре силы (рис. 1): сила тяжести $\vec{F}_T = \rho \cdot \vec{g} \cdot V$, сила Архимеда $\vec{F}_A = -\rho_{ж} \cdot \vec{g} \cdot V$, выталкивающая сила со стороны МЖ

$$\vec{F}_M = -\mu_0 \cdot M \cdot \nabla H \cdot V, \quad (1)$$

где ∇H – градиент напряженности магнитного поля, и сила сопротивления \vec{F}_B , обусловленная вязкостью МЖ, определяемая формулой Стокса

$$\vec{F}_B = -3\pi \cdot \eta \cdot d \cdot \vec{v}, \quad (2)$$

где η – динамическая вязкость МЖ; \vec{v} – скорость движения частицы.

Уравнение движения частицы может быть получено на основании второго закона Ньютона

$$\vec{F}_T + \vec{F}_A + \vec{F}_M + \vec{F}_B = m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt}, \quad (3)$$

где $m = \rho V$ – масса частицы. Будем считать, что частицы сферические, имеют диаметр d . После подстановки всех величин в формулу Ньютона уравнение движения немагнитной частицы в рабочем зазоре МЖС будет иметь вид

$$\rho V \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} + 3\pi \cdot \eta \cdot d \cdot \vec{v} + [-\mu_0 M \cdot |\nabla H] \cdot V + (\rho - \rho_{ж}) \cdot \vec{g} V] = 0. \quad (4)$$

Примем следующие допущения:

- МЖ имеет линейную реологическую характеристику и постоянную динамическую вязкость ($\eta = \text{const}$);
- рабочий зазор МЖС спроектирован правильно, в результате чего третье слагаемое в левой части уравнения (4) постоянно (оно представляет собой результирующую силу, которая действует на частицу в статике).

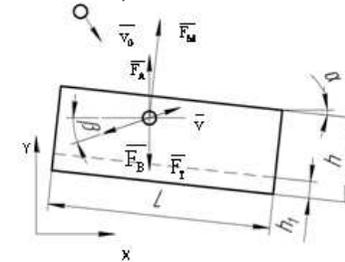


Рис. 1. Модель для расчета траектории движения частицы в зазоре гидростатического МЖС

Уравнение (4) запишем в виде:

$$a \frac{d\vec{v}}{dt} + b \cdot \vec{v} + c = 0, \quad (5)$$

где a, b, c – постоянные величины, не зависящие от величины скорости.

В проекциях на оси уравнение (4) имеет вид:

$$\rho g V(-\bar{e}_y) - \rho_{ж} g V(-\bar{e}_y) - \mu_0 M \left[|\nabla H| \sin \alpha(-\bar{e}_x) + |\nabla H| \cos \alpha(-\bar{e}_y) \right] V -$$

$$-3\pi\eta d(v_x \bar{e}_x + v_y \bar{e}_y) = \rho V \frac{d}{dt} (v_x \bar{e}_x + v_y \bar{e}_y)$$

$$\rho V \frac{dv_x}{dt} + 3\pi \cdot \eta \cdot d \cdot v_x - \mu_0 M |\nabla H| \sin \alpha V = 0 \quad (6)$$

$$\rho V \frac{dv_y}{dt} + 3\pi \cdot \eta \cdot d \cdot v_y + \left[-\mu_0 M |\nabla H| \cos \alpha + (\rho - \rho_{ж}) g \right] V = 0 \quad (7)$$

В результате интегрирования уравнений (6) и (7) получим выражения для скорости движения частицы по осям

$$v_x = \left(v_{0x} + \frac{c_x}{b} \right) \cdot e^{-\frac{b \cdot t}{a}} - \frac{c_x}{b} \quad (8)$$

$$v_y = \left(v_{0y} + \frac{c_y}{b} \right) \cdot e^{-\frac{b \cdot t}{a}} - \frac{c_y}{b} \quad (9)$$

где $a = \rho V$; $b = 3\pi \cdot \eta \cdot d \cdot k_b$;

$$c_y = k_c (-\mu_0 M \cdot |\nabla H| \cdot V \cos \alpha - \rho_{ж} \cdot g V); c_x = -k_c \cdot \mu_0 M \cdot |\nabla H| \cdot V \sin \alpha,$$

где k_b , k_c – коэффициент учитывающий степень погружения частицы в МЖ;

$$k_b = \frac{S_n}{S} = \frac{h_q}{d}, k_c = \frac{V_n}{V} = \frac{6(d \frac{h_q^2}{2} - \frac{h_q^3}{3})}{d^3} \quad (10)$$

где h_q – высота погруженной части частицы, d – её диаметр.

В компьютерной программе для расчета траектории движения частицы задаются следующие параметры:

- плотность частицы ρ ;
- плотность жидкости $\rho_{ж}$;
- угол наклона полюсов (поверхности магнитной жидкости)

α ;

- длина активной части полюсов L ;
- высота столба магнитной жидкости h ;
- высота расположения минимального рабочего зазора относительно нижней поверхности магнитной жидкости h_1 (граница смены направления магнитной силы F_M);
- намагниченность насыщения магнитной жидкости M ;

- величина модуля градиента напряженности в рабочем зазоре МЖС $|\nabla H|$;

- величина динамической вязкости МЖ η ;
- диаметр частицы d ;
- начальное положение частицы X_0, Y_0 ;
- проекции вектора начальной скорости v_{0x}, v_{0y} .

При расчете траектории по известным координатам на предыдущей итерации определяется, находится ли частица в магнитной жидкости. Если нет, то определяется изменение скорости при действии только силы тяжести. Если же частица находится в МЖ, то определяется степень ее погружения в МЖ, коэффициенты k_b и k_c по (10), и рассчитывается скорость по приведенным выше формулам (7–8). По известным скоростям определяется изменение координат частицы на рассматриваемом шаге изменения времени. Координаты записываются в массив и в итоге отображаются на графиках (рис. 2–7). На этих графиках сплошными линиями изображены границы МЖ, штрихпунктирной – граница изменения направления действия магнитной силы, пунктирной – траектория движения частицы.

В качестве примера были рассчитаны траектории движения частицы для наиболее характерных случаев. Параметры программы задавались в соответствии с экспериментальными исследованиями, величина градиента была выбрана соответствующей току возбуждения электромагнита $I = 2$ А (рис. 1.6).

На рис. 2, 3 изображены расчетные траектории движения алюминиевых частиц диаметрами 2 и 5,6 мм соответственно. Из графиков видно, что частица с большим диаметром обладает большей кинетической энергией при входе в МЖ, что приводит к большему погружению в МЖ и более позднему всплытию.

На рис. 4, 5 изображены расчетные траектории движения медных частиц диаметрами 0,8 и 4,9 мм соответственно. Так же как и в предыдущих графиках, видно, что частица с большим диаметром обладает большей кинетической энергией при входе в МЖ. Но в данном случае это приводит к «проскакиванию» зоны разделения, что на практике выливается в низкую степень разделения (загрязнение тяжелой фракции легкой и наоборот).

На рис. 6, 7 изображены расчетные траектории движения свинцовых частиц диаметром 4,5 мм при нулевой начальной скорости с поверхности МЖ и разных углах наклона – 10° и 20° соответственно. Из графиков видно, что, даже являясь «тяжелой», при

неправильном угле наклона полюсов и стечении других обстоятельств частица может попасть в легкую фракцию.

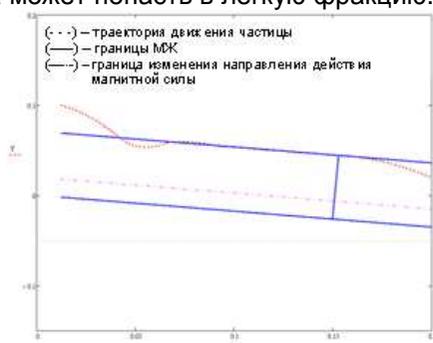


Рис. 2. Расчетное значение траектории движения алюминиевой частицы диаметром 2 мм при угле наклона полюсов 10°

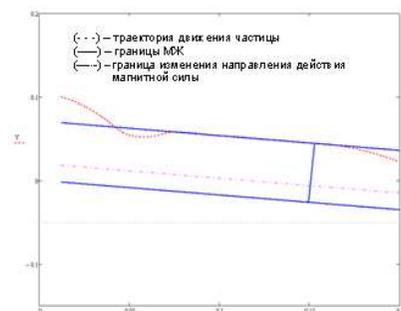


Рис. 3. Расчетное значение траектории движения алюминиевой частицы диаметром 5,6 мм при угле наклона полюсов 10°

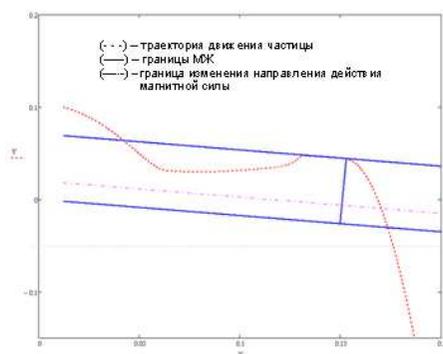


Рис. 4. Расчетное значение траектории движения медной частицы диаметром 0,8 мм при угле наклона полюсов 10°

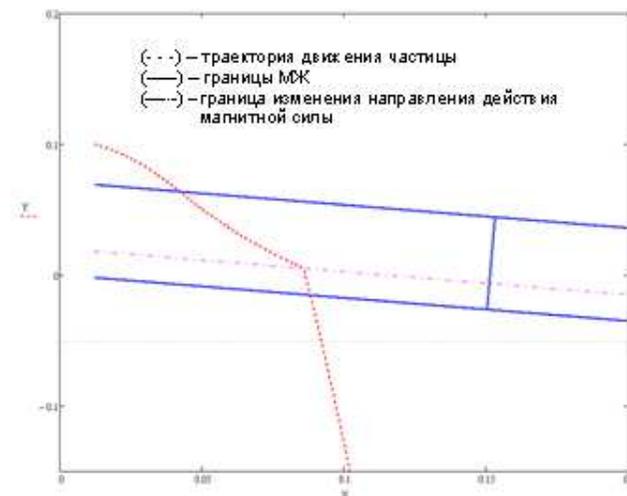


Рис. 5. Расчетное значение траектории движения медной частицы диаметром 4,9 мм при угле наклона полюсов 10°

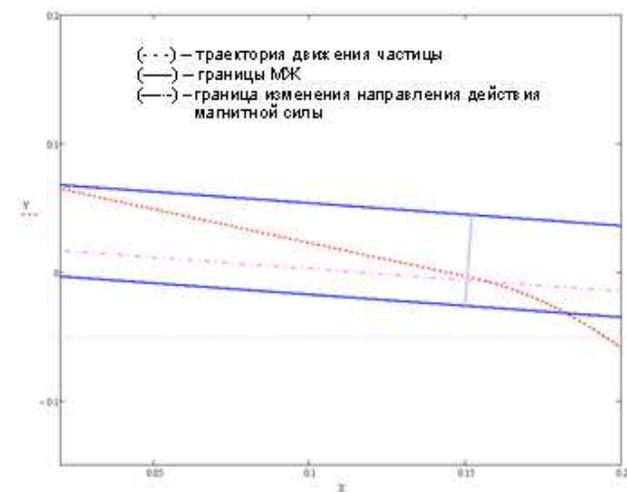


Рис. 6. Расчетное значение траектории движения свинцовой частицы диаметром 4,5 мм при угле наклона полюсов 10° и нулевой начальной скорости с поверхности МЖ

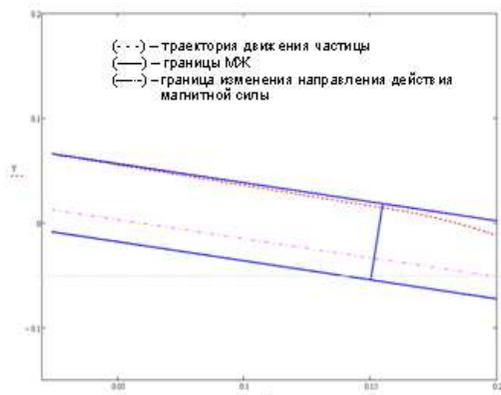


Рис. 7. Расчетное значение траектории движения свинцовой частицы диаметром 4,5 мм при угле наклона полюсов 20° и нулевой начальной скорости с поверхности МЖ

Качественный вид расчетных траекторий в полной мере совпадает с экспериментальными данными, что говорит о возможности использования программы при проектировании МЖС.

Библиографический список

1. Берковский, Б. М. Магнитные жидкости / Б. М. Берковский, В. Ф. Медведев, М. С. Краков – М.: Химия, 1989. – 240 с.
2. Страдомский, Ю. И. Анализ движения частиц в зазоре сепаратора на основе нанодисперсных магнитных жидкостей / Ю. И. Страдомский, Ю. Б. Казаков, В. А. Филиппов // II Всероссийская научная конференция «Физико-химические и прикладные проблемы магнитных дисперсных наносистем». Сборник научных трудов. – Ставрополь, 2009. – С.246 – 252.
3. Страдомский Ю. И. Расчет электромагнитных полей в электромеханических преобразователях энергии: Учеб. пособие / Ю. И. Страдомский, Ю. Б. Казаков / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». - Иваново, 2010. - 148 с.
4. Иванов-Смоленский, А. В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах / А. В. Иванов-Смоленский. – М.: Высш. шк., 1989. – 312 с.

СЕКЦИЯ 20. МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ И МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Д. В. Башилов, студент; А. А. Смирнов,

Модернизация системы управления продольно-резательного станка

В настоящее время целлюлозно-бумажная промышленность является одной из ведущих в России и непосредственно влияет на экономику страны. Это, прежде всего, связано с тем, что Россия, а в особенности её Азиатская часть обладают огромными лесными ресурсами.

Модернизация системы управления продольно-резательного станка является одним из основополагающих шагов в данной сфере, так как нет затрат на приобретение нового оборудования, а необходимо, в свою очередь, только его усовершенствование, что приводит к увеличению роста производительности, повышению надежности работы станка, удобству работы оператора, позволяет снизить издержки производства, а затраты сводятся к минимальным.

Решением является то, что основные функции автоматического управления всеми механизмами и приводами были возложены на контроллер. На контроллере должна быть реализована логика работы станка. ПЛК связан по шине с частотными преобразователями, обеспечивающими поддержание заданной скорости и момента управляемых приводов продольно-резательного станка. Контроллер получает сигналы с дискретных и аналоговых датчиков, через специализированные модули ввода, а также от частотных преобразователей по шине. После обработки их по заданной программе он выдает команды как на частотные преобразователи по шине, так и через платы дискретных выходов, на исполнительные устройства. Значения всех информационных сигналов от всех измерений, а также все команды управления контроллера передаются на АРМ оператора ПРС.

Устанавливаются бесконтактные датчики с обеих сторон полотна для измерения его толщины, а также производится заме-

на приводах несущих валов, раската и приводов ножей на двигатели переменного тока.

Предлагаемая система управления позволяет улучшить условия труда оператора, сократить количество брака и повысить качество регулирования технологических параметров в автоматическом режиме.

Д. В. Дьяков, студент; С. В. Софронов, к. т. н., доцент

Микропроцессорная система охранно-пожарной сигнализации с использованием GSM модуля

Реалии современной жизни заставляют человека внимательно относиться к вопросам личной безопасности и безопасности имущества. Как следствие, все более резко появляется необходимость защиты собственности от посягательств третьих лиц и возникновения пожара. Для обеспечения полной безопасности создается комплексная охранно-пожарная система сигнализации (КОПСС) [1]. В нее включены система контроля доступа, система видеонаблюдения, система обнаружения проникновения, система обнаружения пожара, система дымоудаления. Для координации и управления всеми системами и была разработана микропроцессорная система комплексной охранно-пожарной сигнализацией, а для более удобного оповещения владельца об изменении состояния датчиков в данную систему был добавлен GSM модуль [2].

Структура разрабатываемой схемы состоит из следующих компонентов: GSM модуль – для оповещения о произошедших изменениях и управления блоком выходов. Блок питания устройства от переменного напряжения 220 В. Блок входов/выходов, предназначенный для подключения внешних устройств: датчиков, сирен, клапанов и других исполнительных устройств. Блок энергонезависимой перепрограммируемой памяти для хранения SMS сообщений, серийных номеров электронных ключей, журнала работы устройства. Микроконтроллер, объединяющий все периферийные устройства и координирующий их работу. Данный микроконтроллер обрабатывает информацию с датчиков, в соответствии с которой управляет GSM модемом и работой блока выходов.

Данная система КОПС имеет адресно-аналоговый тип. В соответствии с этим при сработке любого датчика, произойдет проверка на «ложное срабатывание», после чего будет опреде-

лено точное местоположение угрозы проникновения или возникновения пожара, далее микроконтроллер подаст сигнал на блок выходов, вследствие чего будет задействованы соответствующие системы пожаротушения, дымоудаления или видеонаблюдения. Параллельно с работой с блоком выходов, микроконтроллер отправит пользователю SMS сообщение о сработке датчика, после чего пользователь, просмотрев данные о состоянии своего имущества через уже функционирующую систему IP видеонаблюдения, сможет либо дистанционно перезапустить систему, либо обратиться в соответствующие органы.

Библиографический список

1. **Адрианов В. И.** Охранные устройства для дома и офиса / В. И. Андрианов. – БВХ – Санкт Петербург, 2002. – 37 с.
2. **Кольтюгин И. И.** Краткое описание системы GSM: электронный учебник / И. И. Кольтюгин – Новосибирск, 2001. – 12 с.

А. И. Крюков, студент; Г. А. Булдукян, ст. преподаватель

Разработка электропривода подачи станка с ЧПУ

Подавляющее большинство отечественных производителей систем ЧПУ для управления подачами и шпинделями предлагают зарубежные электроприводы с аналоговым управлением. Очевидно, что аналогового управление слишком ущербно и бесперспективно для современного высокоскоростного металлообрабатывающего оборудования. На основании анализа современных электроприводов для высокоскоростной металлообработки выбирается структура электропривода с прямым ШИМ управлением (рис. 1).

Питание электропривода осуществляется от промышленной сети 220/380 В с частотой 50 Гц. Для питания логической части электропривода подается постоянное напряжение +24 В с внешнего источника. Трехфазное напряжение подается на вход звена постоянного тока. Трехфазный диодный мост, выполненный по мостовой схеме, преобразует переменное входное напряжение в постоянное выходное.

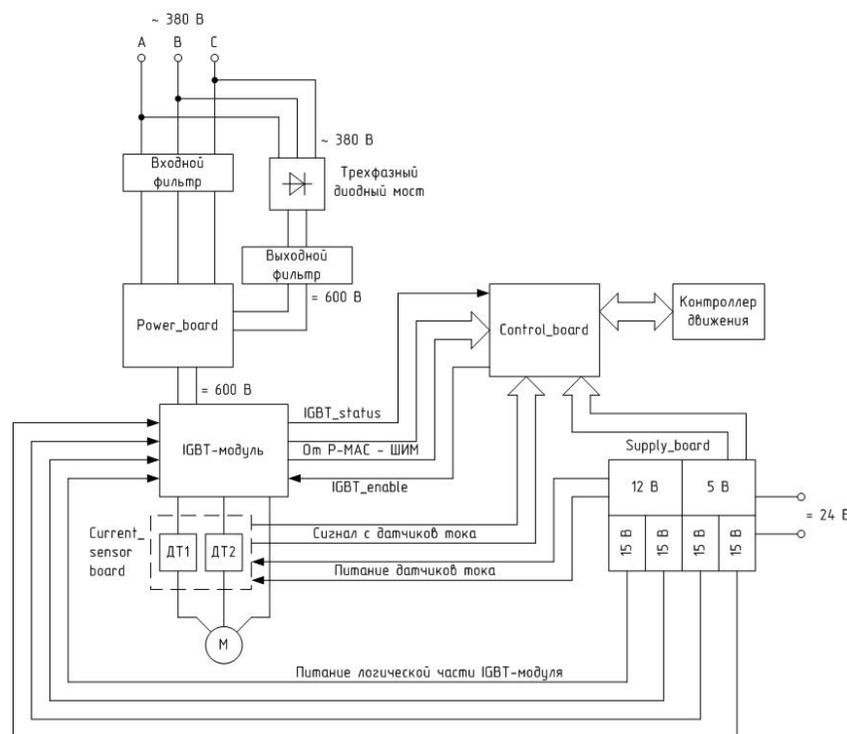


Рис. 1. Функциональная схема электропривода

Силовая часть преобразователя состоит главным образом из сетевого выпрямителя, звена постоянного тока и инвертора на выходе. Сетевой выпрямитель строится на трехфазной мостовой схеме.

Звено постоянного тока состоит из входного фильтра, элементов заряда выходного фильтра, выходного фильтра С типа. Постоянное напряжение 24 В подается на вход платы питания. На ней расположены пять независимых изолированных импульсных источника питания. На плате формируются напряжения для питания цифровых, аналоговых частей схемы, а так же для питания логической части IGBT-модуля.

На валу электродвигателя находится инкрементальный энкодер, который при вращении формирует импульсы, по которым контроллер движения определяет текущее положение координаты путем подсчета числа импульсов счётчиком.

Преобразователь уровня напряжения построен по обратнo-ходовой топологии. Основным элементом обратнo-ходового преобразователя является многообмоточный накопительный дроссель.

Плата управления является связующим звеном между узлами электропривода.

Индикация состояния СП осуществляется на светодиодных индикаторах, расположенных непосредственно на плате управления, и организуется путем подключения соответствующего светодиода через токоограничивающий резистор к источнику напряжения.

Н. Ю. Крючкова, студентка; В. Н. Егоров, к. т. н., доцент

Микропроцессорная система сбора информации для медицинского прибора

Современная косметология использует несколько методик инъекционного омоложения кожи, причём инъекции препаратов «Botox» получили наибольшее распространение по всему миру. Однако, некорректная инъекция препаратов «Botox» может привести к ряду осложнений, поэтому инъекции применяются в строго определенных точках, т. к. даже отклонение в миллиметр может вызвать негативные последствия.

Определить точку инъекции препарата «Botox» позволяют метод электростимуляции и снятие так называемой ЭМГ-электромиограммы. К соответствующим точкам, например на лице человека, через электроды подаются импульсы токовой стимуляции, а затем с помощью так называемых отводящих электродов снимается ЭМГ, исходя из которой, и определяется точка для возможной инъекции.

Таким образом, правильность и точность определения точки инъекции зависит от точности формирования и обработки в реальном времени нескольких слабых токовых сигналов и отображения результатов этой обработки каким либо способом. Поэтому, для сбора и обработки такой информации предложено применить средства микропроцессорной техники.

В режиме токовой стимуляции (одиночной или ритмической) электроды посредством блока коммутации подключаются к входу блока токового стимулятора. Амплитуда, частота, длительность импульсов тока задаются устройством управления. Информация

о текущих параметрах импульсов отображается на экране ЖКИ. Электромиографический сигнал от отводящих электродов посредством блока коммутации подаётся на вход блока усилителя, в котором производятся предварительное усиление и фильтрация сигнала. Затем сигнал поступает на пиковый детектор и усилитель мощности звуковой частоты (УМЗЧ). С пикового детектора напряжение, соответствующее максимальному уровню сигнала в текущий момент времени, поступает на аналого-цифровой преобразователь устройства управления, обрабатывается и отображается на экране ЖКИ в виде шкалы. Сигнал, поступающий на УМЗЧ, дополнительно усиливается и воспроизводится на внутренней динамике или внешних наушниках. По максимальному значению уровня ЭМГ и определяется локализация места инъекции.

Электронный блок объединяет в себе два устройства: усилитель электромиографического сигнала и токовый стимулятор. Причем усилитель и стимулятор не могут использоваться одновременно, поэтому для подключения отводящих электродов и электродов стимулятора применяются одни и те же разъемы. Усилитель и стимулятор гальванически развязаны между собой, и при использовании стимулятора заземляющий электрод может находиться на месте, подключенным и установленным на теле пациента.

Микропроцессорную систему сбора и обработки информации для медицинского прибора, определяющего точку возможной инъекции препарата, предложено реализовать на базе микроконтроллера MSP430F149, имеющего архитектуру с ультранизким потреблением, увеличивающую время работы при питании от батарей, высококачественную аналоговую периферию для выполнения точных измерений, 16-разрядное RISC CPU, допускающее новые приложения к фрагментам кода. Низкочастотная вспомогательная система тактирования обеспечивает работу микроконтроллера в режиме ультранизкого потребления мощности. Активизация основного высокоскоростного модуля тактирования позволяет выполнить быструю обработку сигналов.

Подобный медицинский прибор может использоваться в поликлиниках, лечебно-профилактических учреждениях, диагностических центрах и экспериментальных лабораториях научно-исследовательских институтов. Основным условием для применения прибора является наличие необходимой квалификации у медицинского персонала.

П. А. Новоселова, студент; В. В. Аполонский, инженер

Система управления приточной вентиляцией склада

Целью данной работы является проектирование системы управления приточной вентиляцией склада растворов деактивации для Ростовской АЭС. Данная система необходима не только для вентилирования складского помещения, но и для поддержания заданного диапазона температуры в нем. Система автоматизации приточной вентиляции (САПВ) предназначена для управления центральным кондиционером и состоит из шкафа приборов и автоматики управления (ШУ) и комплекта датчиков. В шкафу приборов и автоматики управления смонтированы все электроаппараты, необходимые для коммутации питания и защиты исполнительного оборудования вентиляционной установки, а также цифровой контроллер, обеспечивающий автоматическое управление установкой. САПВ управляется промышленным контроллером типа Pixel вмонтированным в ШУ.

В состав системы входят:

- настенный шкаф управления ШУ;
- воздушная заслонка притока с электроприводом;
- воздушный фильтр;
- нагреватель водяной с узлом терморегулирования;
- охладитель водяной с узлом терморегулирования;
- приточный вентилятор;

САПВ может работать в следующих режимах: а) останов (дежурный); б) работа; в) блокировка;

В каждом из указанных режимов система может также находиться в режиме ЗИМА или ЛЕТО. В зимнем режиме система осуществляет нагрев приточного воздуха водяным нагревателем. В летнем режиме система в зависимости от температуры воздуха вне помещения либо осуществляет подачу воздуха уличной температуры, либо осуществляет охлаждение приточного воздуха водяным охладителем.

Режим Останов. В данном режиме установка остановлена, жалюзи закрыты, питание на двигатель вентилятора не подается, однако осуществляется контроль обрыва ремня (если прессостат вентилятора должен находиться в разомкнутом состоянии, а находится в замкнутом, то будет сгенерирована авария). Осуществляется контроль угрозы замораживания.

Режим **Работа**. После перевода в режим Работа, если температура обратного теплоносителя превышает минимально допустимую, и нет сигнала угрозы замораживания от капиллярного термостата, система формирует сигнал на открытие воздушного клапана. Питание на двигатель вентилятора после появления сигнала «Открыто» с воздушного клапана.

Режим **Блокировка**. Данный режим включается при появлении следующих аварий: а) срабатывание пожарной сигнализации; б) обрыв любого датчика температуры; в) перегрузка двигателя вентилятора; г) обрыв ремня вентилятора;

Также этот режим включается при противоречии сигналов местного (с двери шкафа) и дистанционного (из системы диспетчеризации) управления.

В целом создание системы управления приточной вентиляцией данного объекта при помощи промышленного контроллера Pixel позволит полностью автоматизировать вентилирование склада, а значит значительно облегчить его эксплуатацию рабочим персоналом станции.

Библиографический список

1. **Программируемый** логический контроллер Pixel. Руководство по эксплуатации. – СПб, 2006.

Е. А. Околотин, студент; В. В. Ельниковский, инженер

Интерактивная информационная панель с беспроводным интерфейсом

В современном мире важной задачей является быстрое доведение различной информации до людей. Современные электронные технологии позволяют использовать для этих целей различные информационные панели на светодиодах. Главными их преимуществами являются: яркость и привлечение внимания к себе, быстрая смена выводимой информации, информативность в темное время суток и в мало освещенных помещениях. Одним из таких электронных устройств и является «интерактивная информационная панель с беспроводным интерфейсом».

Панель предназначена для отображения различного рода текстовой и символьной информации. Она может применяться в жилых, рабочих помещениях, общественном транспорте, на улице. Информационное поле панели состоит из отдельных блоков.

Габаритные размеры блока – 8х30 см, разрешение – 8х32 точки. Блоки легко соединяются между собой как по горизонтали, для увеличения длины строки, так и по вертикали, для увеличения числа строк или шрифта отображаемого текста. Возможно подключение до 10 блоков по горизонтали, и до 6 по вертикали.

Устройство работает автономно, т. е. отображение информации, хранящейся в энергонезависимой памяти панели, начинается сразу после включения питания. Память устройства позволяет хранить до 50 символов. Вывод большего объема текста не целесообразен, так как с увеличением количества слов ухудшается смысловое восприятие выводимой информации.

Дополнительно, панель оснащена датчиком температуры, влажности воздуха для вывода информации об окружающей среде, часами, работающими от автономного питания. Плавная регулировка яркости светодиодов осуществляется при помощи широтно-импульсной модуляции сигналов. Датчик освещенности позволяет осуществлять регулировку в автоматическом режиме.

Запись в память панели выводимой информации, а так же настройка способа ее отображения и визуальных эффектов (таких как: «бегущая строка», быстрая смена текста, плавное появление и затухание и т. д.), синхронизация даты и времени осуществляется с персонального компьютера при помощи специального программного обеспечения. Так же программа позволяет настраивать очередность смены информационных блоков, скорость движения текста, место расположения на информационном поле даты, времени, температуры и т. д.

Так как интерактивная панель может находиться в труднодоступном для человека месте или условиях, где, по каким-либо причинам, невозможно использование проводного интерфейса, для связи с ПК был выбран беспроводной интерфейс. Использование протокола Bluetooth позволяет управлять панелью с практически любого современного ПК или ноутбука. Это дает заметные преимущества для данного устройства перед уже существующими аналогами.

Питание панели осуществляется от сети переменного напряжения 220 В или автомобильного аккумулятора 12 В. Для экономии энергии предусмотрено отключение и включение панели в заданное время суток.

Устройство разработано на базе микроконтроллера AVR, знакогенератор реализован на ПЛИС. Такое разделение решаемых задач позволяет использовать относительно простой микро-

контроллер и ПЛИС, что снижает стоимость панели, а так же увеличивает скорость работы.

Интерактивная информационная панель может использоваться в школах, университетах, офисах, на различных видах производства, в общественном транспорте, на улице в качестве рекламных вывесок, а так же в других сферах жизни человека для достижения различных целей.

Библиографический список

1. Суров, С. Взаимодействие микроконтроллера AVR с периферией / С. Суров // Радио. – М. – 2009. – № 2. – С. 36-37. – : ил. – (Радиолюбителю-конструктору). – Библиогр.: с. 37.
2. Голубцов, М. С. Практические примеры применения микроконтроллеров AVR / М. С. Голубцов, А. В. Кириченко. – М., 2005. – (Библиотека инженера). – С. 171–275.

С. А. Самаринский, студент; А. И. Терехов, к. т. н., профессор

Система управления линией по нанесению ПВХ покрытия на перчатки

Актуальность разработки системы управления линией по нанесению ПВХ покрытия на перчатки достаточно высока и продиктована, в первую очередь, тем, что на целевом рынке достаточно велик спрос на высокопроизводительные автоматизированные ПВХ-линии. Автоматизация последних достигается именно за счет применения микропроцессорной системы управления.

Следует отметить, что система управления не пригодна к эксплуатации как самостоятельное изделие и используется только в составе производственной линии. Это определяет сферу применения разрабатываемого изделия: система управления устанавливается на новые ПВХ-линии и может быть применена при ремонте или модернизации существующих производственных линий.

В связи с этим разработана система управления линией по нанесению ПВХ покрытия на перчатки, пригодная для решения следующих задач.

1. Непосредственно управление автоматизированными этапами производства.
2. Взаимодействие с оператором в процессе работы.
3. Сохранение информации об объемах выпущенной продукции.
4. Предоставление возможности управлять линией полностью в ручном режиме во время настройки.

5. Обнаружение аварийных ситуаций и отключение линии с последующим выводом информации об аварии.

6. Защита от выхода технологических параметров за допустимые пределы.

7. Аварийное выключение производственной линии при нажатии кнопки «Стоп».

8. Примерный учет потребленной электроэнергии.

Таким образом, разработанное устройство играет существенную роль в автоматизации процесса нанесения ПВХ покрытия на перчатки и, тем самым, позволяет значительно сократить временные и финансовые затраты на данный этап производства перчаток.

Применение микроконтроллера позволяет реализовать более гибкую поддержку датчиков разного типа, дает возможность сделать управление линией интуитивно понятным и удобным для оператора и, кроме того, оставляет возможность изменения алгоритма управления в случае возникновения подобной необходимости.

М. А. Сибирцев, студент; А. В. Волков, к. т. н., доцент

ШИМ-преобразователь на основе IGBT-транзисторов в системе возбуждения тягового генератора

Система возбуждения тягового генератора (СВТГ) предназначена для управления режимами работы синхронного тягового генератора (СТГ) СТГВ-1550-8, входящего в состав КТЭО карьерного самосвала БелАЗ грузоподъемностью 220–240 т.

СВТГ должна обеспечивать следующие режимы работы:

- режим пуска СТГ;
- режим автоматического регулирования тока возбуждения при его внешнем задании;
- режим автоматического регулирования напряжения выпрямителя на выходе СТГ (напряжения шины ЗПТ) при его внешнем задании и изменении скорости СТГ в диапазоне 1000–1900 об/мин.

СВТГ выполняется по схеме неуправляемый выпрямитель – реверсивный мостовой конвертор на основе IGBT-транзисторов, управляемый контроллером с помощью ШИМ. Данная схема была выбрана исходя из основных преимуществ IGBT-транзисторов и

избавлена от недостатков ранее разработанных тиристорно-диодных схем, таких как сложность обеспечения работы генератора в режимах, близких к режиму холостого хода и недостаточная динамика управления преобразователем.

IGBT-транзисторы – биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT – InsulatedGateBipolarTransistor), обладают преимуществами легкого управления полевыми МОП-транзисторами и низкими потерями проводимости, характерными для биполярных транзисторов. Малая мощность и простая схема управления (в отличие от биполярных транзисторов и тиристоров), малое падение напряжения в открытом состоянии и чрезвычайно большая допустимая плотность обеспечивают возможность изготовления транзисторов в миниатюрных корпусах, что значительно снижает стоимость установок на их основе. Высокая надежность преобразователей на IGBT-транзисторах достигается благодаря упрощению схемы управления (в отличие от запираемых тиристоров GTO), широкой области безопасной работы транзисторов.

Скорость переключения IGBT-транзисторов (их используют на частотах порядка 100 кГц) ниже, чем у силовых MOSFET и значительно выше, чем у биполярных транзисторов и тиристоров. При закрывании транзистора, ток коллектора имеет «хвост» тока, который служит причиной основных тепловых потерь и требует введения так называемого «мертвого времени» в схемах управления мостовыми и полумостовыми инверторами.

Силовые МОП-транзисторы применяются преимущественно на низком и среднем номинальном напряжении (до 500 В), в то время как IGBT-модули имеют рабочее напряжение до 3,5 кВ при токе 1200 А и более, что позволяет использовать приборы этого типа в качестве высоковольтных ключей в преобразователях большой мощности.

Применительно к СВТГ, силовым ключам требуется коммутировать токи до 300 А, рабочее напряжение порядка 1–1,5 кВ. Необходимая частота коммутации ключей, обеспечивающая оптимальные динамические показатели – порядка 1–10 кГц. Исходя из вышесказанного, данным требованиям оптимально удовлетворяют IGBT-транзисторы в качестве силовых ключей реверсивного мостового ШИМ-конвертора.

Библиографический список

1. Журнал «Силовая электроника» №4, 2009.
2. Журнал «Силовая электроника» №2, 2008.

3. Журнал «Новости электроники» №9, 2011.
4. Розанов Ю. К. Основы силовой электроники / Ю. К. Розанов. 1992.
<http://electricalschool.info/2011/07/19/igbt-tranzistor.html>.
5. <http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/publ/igbt/transistor.html>.
6. <http://www.css-rzd.ru/zdm/11-2003/03171-4.html>.
7. <http://ru.wikipedia.org/wiki/IGBT>.

А. В. Кудрявцев, студент; В. В. Тютиков, д. т. н., профессор

Микропроцессорное управление шаговыми двигателями

Шаговый двигатель является неотъемлемой частью многих исполнительных устройств, используемых для позиционирования в пространстве и регулирования. Его основным достоинством является возможность позиционирования без устройств обратной связи. Шаговые двигатели широко используются в приводах Floppy-дисков, HDD, CD-ROM, в бытовых видеомагнитофонах, фотоаппаратах и сканерах. Существует множество конструкций шаговых двигателей и способов их управления. В данной статье рассматривается униполярный шаговый двигатель [1].

Схема сопряжения микроконтроллера и шагового двигателя состоит из нескольких элементов. Для защиты порта микроконтроллера от больших токов используется микросхема ULN2803, представляет собой набор мощных составных ключей с защитными диодами на выходе. Наличие защитных диодов позволяет подключать индуктивные нагрузки без дополнительной защиты от выбросов обратного напряжения [2]. В случае если ток, необходимый двигателю, превышает предельно допустимый ток ULN2803, то следует использовать дополнительный набор силовых ключей. Во-вторых, для защиты двигателя от перегрева была разработана схема на основе полевого транзистора, позволяющая регулировать ток двигателя и снизить энергопотребление.

Скорость вращения шагового двигателя определяется частотой импульсов. В каждый интервал времени подача импульса приведет к повороту вала двигателя на фиксированный угол [3]. В нашем случае, шаг угла поворота составляет $1,8^\circ$. При таком шаге требуется 200 шагов, чтобы вал двигателя совершил полный оборот. Скорость вращения двигателя может регулироваться за счет изменения периода генерации прерываний по переполнению таймера, угол вращения можно контролировать путем подсчета шагов. Для увеличения точности позиционирования реализована возможность использования полшагового режима.

Библиографический список

1. Кенио, Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления: [пер. с англ.] / Т. Кенио. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 200 с: ил.
2. Суоров, С. Взаимодействие микроконтроллера AVR с периферией / С. Суоров // Радио. – Б.м. – 2009. – N 2. – С. 36-37: ил. – (Радиолюбителю-конструктору). – Библиогр.: с. 37.
3. Голубцов, М. С. Практические примеры применения микроконтроллеров AVR / М. С. Голубцов, А. В. Кириченко. – М.: 2005. – (Библиотека инженера). – С. 171–275.

А. В. Кудрявцев, студент; А. В. Плясов

Периферийные модули ввода/вывода

Периферийные модули ввода/вывода служат для увеличения числа дискретных или аналоговых входов или выходов систем ЧПУ. В зависимости от предъявленных требований число входов/выходов одного модуля может варьироваться. Существуют модули дискретного ввода, дискретного вывода, комбинированные модули, а также аналоговые модули, содержащие восемь аналоговых входов и выходов [1].

Периферийные модули соединяются при помощи последовательного интерфейса I²C [2]. К одному управляющему модулю могут подключаться до трех периферийных модулей, которые подключаются последовательно. Модульное оборудование крепится на DIN-рейку шириной 35 мм. Для отображения текущего состояния регистров используется плата индикации, содержащая 16 светодиодов.

Основу модуля составляет микросхема PCA9555, которая представляет собой 16-битный расширитель ввода/вывода с питанием от 2,3 В до 5,5 В и I²C интерфейсом. Преимуществами данной ИМС являются: высокая нагрузочная способность, возможность индивидуальной конфигурации выводов, низкое энергопотребление.

Дискретные входы модулей имеют высокую перегрузочную способность – выдерживают подачу действующего напряжения 35 В любой полярности. Максимальное импульсное напряжение 300 В. Дискретные выходы контроллера имеют номинальный выходной ток в 2,5 А, но кратковременно выдерживают десятикратную перегрузку. Дискретные входы и выходы не имеют гальванической развязки друг от друга, поскольку подключены к общей шине. Однако все остальные цепи имеют гальваническую развязку от общей шины.

Библиографический список

1. Кузнецов, Ю. И. Оснастка для станков с ЧПУ: справочник / Ю. И. Кузнецов, А. Р. Маслов, А. Н. Байков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с: ил.
2. Семенов, Б. Ю. Шина I²C в радиотехнических конструкциях / Б. Ю. Семенов. – М.: СОЛОН-Р, 2002. – 190 с: ил.

А. В. Кудрявцев, студент; А. В. Плясов

Модуль осевого положения

Модуль осевого положения предназначен для работы в составе системы числового программного управления в качестве устройства, управляющего двумя координатными осями станка в режимах управления по скорости и по положению. Датчиком положения является фотоимпульсный датчик относительного положения с нулевой меткой (энкодер). Управление приводом осуществляется посредством аналогового задания по скорости. Модуль снабжен четырьмя выходными дискретными каналами и четырьмя входными дискретными каналами общего назначения [1].

Основу модуля составляет микроконтроллер STM32F103RBT6, который осуществляет связь по интерфейсу CAN с помощью приемопередатчика CAN [2]. В одной системе ЧПУ возможно использование до шестнадцати модулей осевого положения. Для изменения адреса на шине CAN на лицевой панели находится переключатель адреса (от 0 до 15). Микроконтроллер также обеспечивает выдачу аналогового сигнала для привода в режимах управления по скорости и управления по положению, в последнем случае обеспечивается замкнутое управление с ПИД-регулятором. В режиме управления по скорости имеется возможность задания как необходимой скорости, так и ускорения.

Питание модуля осуществляется от сети +24 В. Для осуществления развязки всех цепей, модуль содержит три DC/DC преобразователя. Гальваническая развязка также обеспечивается оптронами, установленными между различными узлами модуля [3].

Модуль конструктивно состоит из двух плат контроллера и платы индикации, которые расположены внутри пластмассового корпуса, предназначенного для монтажа на DIN-рейку шириной 35 мм.

Библиографический список

1. Кузнецов, Ю. И. Оснастка для станков с ЧПУ: справочник / Ю. И. Кузнецов, А. Р. Маслов, А. Н. Байков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с: ил.
2. Анучин, А. С. Обновление программного обеспечения встроенных систем управления преобразователей частоты и источников питания по CAN-сети / А. С. Анучин // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт: производственно-технический журнал. – М.: 2012. – № 3. – С. 27–29.
3. Хоровиц, Пауль. Искусство схемотехники / П. Хоровиц, У. Хилл; пер. с англ. Б. Н. Бронина [и др.]. – Изд. 6-е. – М.: Мир, 2001. – 704 с.: ил. – ISBN 5-03-003395-5.

Е. А. Шукин, студент; А. И. Терехов, к. т. н., профессор

Исследование элементов мажоритарности

Одним из приёмов повышения достоверности данных на выходе цифровых устройств является троирование аппаратуры. При этом устанавливаются три одинаковых цифровых блока, на каждый из которых заводятся все входные величины. Выходные сигналы всех трёх блоков поступают на специальный узел мажорирования (мажоритарный элемент, мажоритарный клапан, кворум-элемент), который формирует из них выходной сигнал по принципу голосования «два из трёх». Очевидно, что в случае отказа какого-либо одного из трёх блоков сигнал на выходе мажоритарного элемента всё равно останется верным. Если блок имеет несколько выходов, то мажорируется каждый из них. Построим на основе элемента мажоритарности 2 из 3 элемент мажоритарности 4 из 5.

Выход схемы « ≥ 2 » (рис. 1) должен совпадать со значениями входов, если они все одинаковы, и с двумя одинаковыми, если третий вход отличается от двух других. По такому уже достаточно формализованному заданию можно начать строить таблицу истинности искомой схемы, поочерёдно рассматривая каждую комбинацию аргументов. Значения выхода M схемы приведены в столбце M (табл. 1).

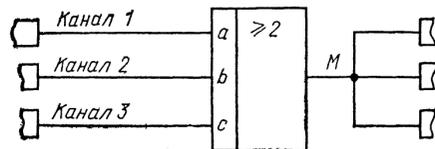


Рис. 1. Блок системы мажоритарного контроля

Таблица 1. Таблица истинности элемента мажоритарности 2 из 3

A	B	C	M
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

Запись СДНФ и её минимизация любым из известных методов (метод Квайна-Мак-Класки, карт Карно и др.) позволяют получить аналитическое выражение искомой функции. На основании таблицы истинности минимизируемой функции заполняем карту Карно, выделяем области (минимальное число максимально больших областей) и логически просуммируем импликанты, соответствующие выбранным областям (табл. 2).

Таблица 2. Карта Карно элемента мажоритарности 2 из 3

M	BC			
	00	01	11	10
A	0	0	0	1
	1	0	1	1

Получаем следующее выражение:

$$M = AB \vee BC \vee AC.$$

Преобразуем логическое выражение к базису «И-НЕ»:

$$M = \overline{\overline{M}} = \overline{\overline{(AB \vee BC \vee AC)}} = \overline{(\overline{AB})(\overline{BC})(\overline{AC})}.$$

Пользуясь полученным выражением, представим внутреннюю (логическую) структуру элемента мажоритарности 2 из 3 (рис. 2).

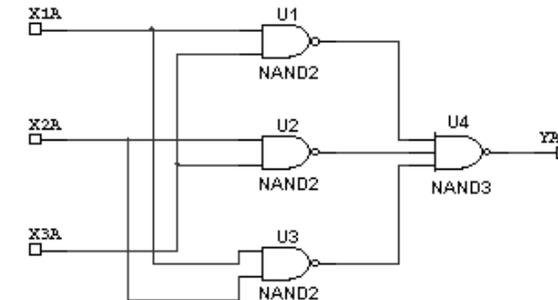


Рис. 2. Логическая схема элемента мажоритарности 2 из 3:
X1A=A; X2A=B; X3A=C; YA=M

Работа логического элемента мажоритарности 4 из 5 во многом похожа на работу рассмотренного выше элемента. Выход схемы «≥ 5» должен совпадать со значениями входов, если они все одинаковы, и с четырьмя одинаковыми, если пятый вход отличается от двух других. По такому уже значительно формализованному заданию можно начать строить таблицу истинности искомой схемы, поочередно рассматривая каждую комбинацию аргументов. Значения выхода *M* схемы приведены в столбце *M* (табл. 3).

Таблица 3. Таблица истинности элемента мажоритарности 4 из 5

A	B	C	D	E	M
0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0
0	0	0	1	0	0
0	0	0	1	1	0
0	0	1	0	0	0
0	0	1	0	1	0
0	0	1	1	0	0
0	0	1	1	1	0
0	1	0	0	0	0
0	1	0	0	1	0
0	1	0	1	0	0
0	1	0	1	1	0
0	1	1	0	0	0
0	1	1	0	1	0
0	1	1	1	0	0
0	1	1	1	1	1
1	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0
1	0	0	1	0	0
1	0	0	1	1	0
1	0	1	0	0	0
1	0	1	0	1	0
1	0	1	1	0	0
1	0	1	1	1	1
1	1	0	0	0	0
1	1	0	0	1	0
1	1	0	1	0	0
1	1	0	1	1	1
1	1	1	0	0	0
1	1	1	0	1	1
1	1	1	1	0	1
1	1	1	1	1	1

Запись СДНФ и её минимизация любым из известных методов позволяют получить аналитическое выражение искомой функции:

$$M = ACDE \vee ABDE \vee ABCE \vee ABCD \vee BCDE$$

Преобразуем полученное выражение, пользуясь законами алгебры логики:

$$\begin{aligned}
 M &= ACDE \vee ABDE \vee ABCE \vee ABCD \vee BCDE = (AB + BC + AC) \cdot DE + \\
 &+ ABC \cdot (E + D) = \overline{(AB + BC + AC)} \cdot DE + ABC \cdot (E + D) = \\
 &= \overline{(AB)} \cdot \overline{(BC)} \cdot \overline{(AC)} \cdot DE + ABC \cdot (E + D) = \overline{(AB \cdot BC \cdot AC)} \cdot DE + \\
 &+ ABC \cdot (E + D)
 \end{aligned}$$

Из формулы видно, что в неё входит и ранее выведенное аналитическое выражение для элемента мажоритарности 2 из 3, что значительно упростит построение элемента мажоритарности 4 из 5. Также следует учесть следующий довольно таки интересный аспект.

В радиолюбительской практике любой из клапанов микросхемы может найти применение в качестве двухвходового элемента И при подсоединении одного любого (например третьего) входа клапана к общему проводу, в качестве двухвходового элемента ИЛИ при подсоединении одного любого (например третьего) входа клапана к плюсу питания. Уже на основании вышесказанного можно достаточно просто, пользуясь только микросхемой К561ЛП13 построить логический элемент мажоритарности 4 из 5 (рис. 3).

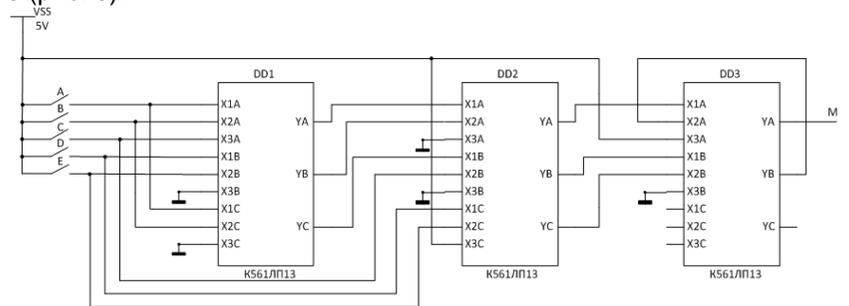


Рис. 3. Схема электрическая принципиальная элемента мажоритарности 4 из 5

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что для построения мажоритарного элемента 4 из 5 необходимо три микросхемы К561ЛП13. Один из мажоритарных клапанов третьей микросхемы при этом оказался незадействованным.

Библиографический список

1. Потёмкин, И. С. Функциональные узлы цифровой автоматики / И. С. Потемкин. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
2. Нефедов, А. В. Интегральные микросхемы и их зарубежные аналоги: Справочник / А. В. Нефедов. Т. 5 – М.: КУБК-а, 1997.

П. А. Шугаев, студент; В. Н. Егоров, к. т. н., доцент

Система управления питанием отклоняющего магнита ускорителя

Управление пучками заряженных частиц осуществляется при помощи электромагнитов, которые, в свою очередь, получают питание от специальных источников, формирующих силу и форму тока, длительность импульса тока, момент его подачи. Очевидно, что для качественного управления пучком заряженных частиц все эти факторы требуют большой точности и быстродействия.

Одним из важнейших элементов ускорителей заряженных частиц, например, на ускорителе У-70 (г. Протвино), является система отклонения их пучка при помощи семпту-магнита, который обеспечивает отклонение ускоренных протонов в канал перевода частиц. В настоящее время проводится модернизация системы электропитания семпту-магнита, реализованной сложными в эксплуатации и неточными устройствами на жесткой логике, которые уже не обеспечивают точности и быстродействия управления. Для обеспечения требуемых функций от системы управления питанием отклоняющего магнита ускорителя предлагается применить микропроцессорную систему управления, позволяющую повысить помехозащищенность, точность формирования импульса тока, быстродействие и функциональность системы управления.

Основное назначение системы питания семпту-магнита заключается в том, чтобы обеспечить требуемый закон изменения тока данного магнита в определенный момент времени. Система управления питанием отклоняющего магнита ускорителя заряженных частиц может быть построена на 8-разрядном микроконтроллере ATmega 128, который позволяет в реальном времени реализовать дополнительный канал формирования тока. Введение этого канала и управление током отклоняющего магнита по закону «плоской вершины» позволит обеспечить ровную «площадку инъекции» заряженных частиц, а значит, улучшит параметры пучка частиц. Использование в системе управления питанием

магнита последовательного интерфейса SPI даст возможность доработки программного обеспечения с учетом обеспечения новых требований к точности системы. Использование микроконтроллера со встроенным сторожевым таймером позволит избежать сбоев, связанных с системой питания отклоняющего магнита ускорителя.

Швецов С. В., студент; А. В. Волков, к. т. н., доцент

Энергосбережение на предприятии на примере НТЦ «Арго»

В 2009 году Федеральное Собрание РФ приняло закон №261-ФЗ «Об энергосбережении...», призванный стимулировать экономию энергоресурсов, которая выгодна как государству, так и остальным потребителям. Проблемы, которые требовалось решить в НТЦ: тарифы на электроэнергию растут каждый год на 11–15 %, что выливается в «круглую сумму»; в проходных помещениях свет горит всегда, причем персонал находится в них не более 1,5 ч. в день; люминесцентные лампы на фоне новинок техники стали неэффективны; неполное соответствие облика здания имиджу компании.

Полемика для эксперимента явились четыре светильника, один – в санузле, а другие три – в коридорах. В санузле был установлен датчик присутствия, а в коридорах – датчики движения для обнаружения людей. Элементы системы управления: контроллер на базе МУР1001.9 TLT, двухканальный симисторный ключ AD SWR, интерфейсный модуль AD-485/CAN, радиомодем МУР1001.9 RMA, модуль радиомодема AD RMA и Ethernet-адаптер МУР1001.9 EU 100. Все оборудование произведено самим НТЦ. Люминесцентные светильники ЛВО 4x18Вт были заменены светодиодными типа «Армстронг», потребляющими на 60% меньше энергии, служащими в 5 раз дольше, безопасными и быстро окупающимися.

Результаты работ: потребление электроэнергии данной осветительной системой сократилось в 15 раз; установлена связь с системой по каналам радио, RS485 и Ethernet; технологии в здании стали соответствовать имиджу предприятия; на внутреннем сайте компании теперь есть индикатор занятости санузла. Таким образом, применение энергоэффективных решений на

предприятия приносит большую эффективность использования энергетических ресурсов и значительную экономию средств.

А. Е. Гудилко, магистрант; Г. А. Булдукян, ст. преподаватель

Разработка силового преобразователя электропривода для станка с ЧПУ

В настоящее время существует тенденция построения станочных электроприводов в кассетном исполнении. Это позволяет устанавливать большое количество преобразователей в шкаф электрооборудования, при минимуме необходимого пространства. Была поставлена задача разработки кассетного силового преобразователя с прямым ШИМ-управлением для работы с отечественной цифровой системой ЧПУ INT-NC.

Разработанный силовой преобразователь состоит из четырех плат: платы управления, платы IGBT-модуля, платы питания и силовой платы.

Рассмотрим наиболее важный элемент – плату управления (рис. 1). Она является связующим звеном между контроллером движения и силовыми блоками, отвечает за логику работы преобразователя и выполняет следующие функции:

- гальваническая развязка контроллера движения с силовыми узлами электропривода
- получение данных от контроллера движения и формирование управляющих сигналов на другие узлы привода;
- преобразование аналогового сигнала с датчиков тока в цифровую форму с последующей передачей в контроллер движения;
- сбор информации об ошибках и сигналах готовности отдельных узлов привода с последующей передачей в контроллер движения;
- вывод режима работы привода на индикацию;
- опрос датчика температуры подложки IGBT-модуля с последующим выводом на индикацию.

Ядром платы управления является ПЛИС фирмы Actel семейства ProAsic3. Управляющая программа написана на языке VHDL.

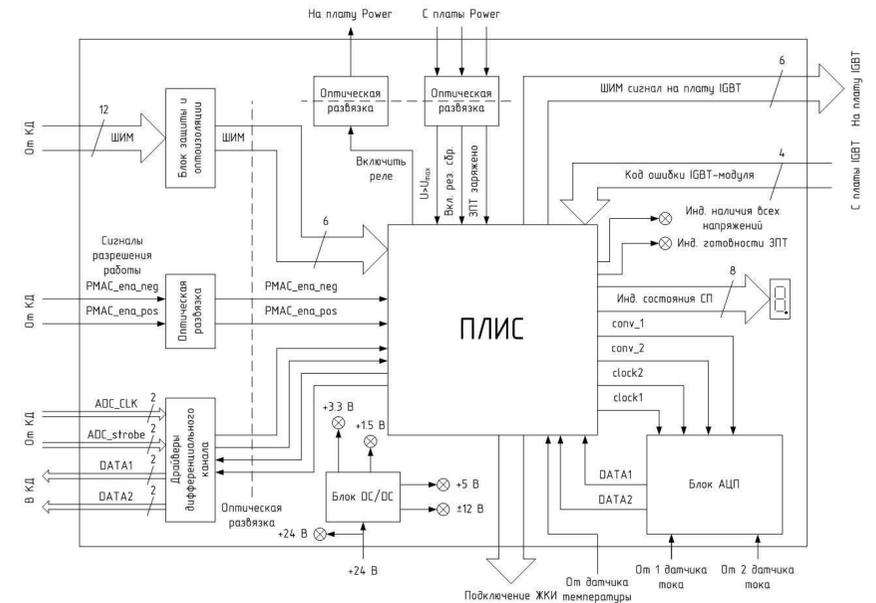


Рис. 1. Функциональная схема платы управления

Для управления IGBT-модулем реализован конечный автомат Мили. Наличие разрешения ШИМ зависит от состояния автомата и сигналов с функциональных узлов устройства. Проверяется готовность звена постоянного тока, превышение максимально допустимого напряжения в нем, готовность IGBT-модуля и температура подложки, а также наличие всех питающих напряжений в преобразователе. Состояние привода и коды ошибок отображаются на семисегментном индикаторе. Также предусмотрено подключение ЖКИ, на который выводится детальная информация о преобразователе.

За опрос АЦП и датчика температуры подложки IGBT-модуля отвечают независимые блоки, реализующие функции SPI-Master устройств. Данные после считывания подготавливаются для передачи и транслируются в контроллер движения.

В ходе проектирования разработаны все печатные платы преобразователя и собран опытный образец. Разработанное устройство успешно прошло испытания на проверочном стенде. На следующем этапе преобразователь тестируется в заводских условиях. В настоящий момент начато производство первой партии преобразователей, а также ведется разработка станочного комплекта из различных номиналов.

Г. А. Чапурин, студент; Б. П. Силуянов, к. т. н., профессор

Разработка бесконтактной системы взвешивания стеклянной капли

Рассмотрим возможность определения объема расплавленной стеклянной капли при производстве изделий из стекла. Кадры изображений каплей расплавленного стекла могут получаться как с помощью веб-камеры, так лазерным способом. Расплавленное стекло вытекает из сосуда, в котором поддерживается температура, обеспечивающая расплавленное состояние стекла. В верхней части установки расположен резак, который из непрерывной стеклянной струи формирует капли [1]. Система управления резаком должна обеспечить одинаковый вес каплей при различных возмущающих воздействиях.

Первоначальной задачей является удаление в изображении помехи и определение контура капли.

В качестве возможных способов локальной обработки изображения капли можно указать следующее:

- низкочастотная фильтрация для устранения шума;
- высокочастотная фильтрация для устранения медленных изменений сигнала, возникающих, например, при неравномерности освещения;
- дифференцирование для подчеркивания границ;
- интегрирование в целях получения среднего уровня яркости;
- маскирование для устранения постороннего фона.

Обработка изображения осуществляется с использованием функций MATLAB следующими методами [2]:

- методом «сепу»;
- медианным фильтром;
- ранговой фильтрацией;
- адаптивной фильтрацией Вина;
- обобщенным нелинейным фильтром;
- бинарным методом.

Анализируя результаты приведенных методов, необходимо сказать, что обработка изображения бинарным методом является более простым и точным способом определения контура капли и удаления помех.

Используя функцию $bw = \text{roicolor}(I, \text{low}, \text{high})$, полутоновое изображение можно преобразовать в бинарное. Эта функция

анализирует эффективность пикселя полутонового изображения с помощью уравнения $bw = (I \geq \text{low}) \& (I \leq \text{high})$ и возвращает в бинарное изображение логическую единицу, если интенсивность пикселя полутонового изображения попадает в заданную область, иначе – логический ноль.

В приведенной ниже программе используется функция $BW = \text{roicolor}(I, \text{urssel})$. Пиксель преобразованного изображения имеет значение 0 (черный цвет), если его величина меньше urssel , и 1 (белый цвет), если его величина больше urssel . Уровень селекции urssel 0 – 1,0.

```
a6=imread('KAP_massa6.png');
aa6=rgb2gray(a6);
aaa6=aa6(45:127,20:80);
imshow(aaa6)
figure
imhist(aaa6),grid
figure
int_kap=235;%Уровень селекции
urssel=int_kap/256;
bw=im2bw(aaa6,urssel);
imshow(bw)
bw1=bw(4:6,1:60)
bw2=bw1';
s2=sum(bw2)
s=sum(s2)
```

На рис. 1 показан результат преобразования полутонового изображения (рис. 1, а) в бинарное изображение (рис. 1, б).

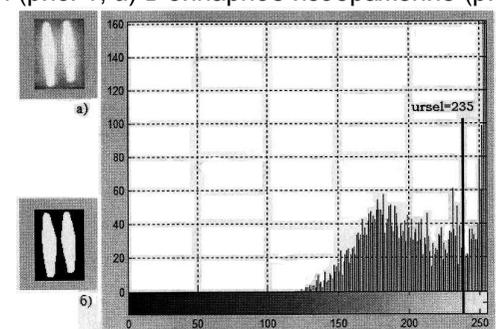


Рис. 1. Изображения и гистограмма капли: а – исходное изображение; б – бинарное изображение; в – гистограмма исходного изображения

По гистограмме исходного изображения (рис. 1, в) определяем уровень селекции (urssel).

Результат бинаризации 4, 5 и 6 строк изображения:

bw1 =

```
Columns 1 through 20      Строки изображения
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 > 4
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 0 0 0 0 > 5
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 0 0 > 6
Columns 21 through 40
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 > 4
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 > 5
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 > 6
Columns 41 through 60
1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 > 4
1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 > 5
1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 > 6
```

$s_2 = 5 \ 11 \ 13 >$ количество единичных пикселей в строках 4, 5 и 6.

$s = 29 >$ общее количество пикселей.

По общему количеству пикселей можно определить площадь капли в продольном сечении. Предполагая, что капля (рис. 2) в поперечном сечении (x) круглая, то для определения объема капли во время падения можно использовать следующее выражение:

$$V = \pi \cdot \int_a^b R^2 \cdot dy.$$

где $R = D/2$ – радиус капли.

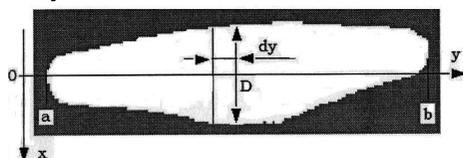


Рис. 2. Кадр изображения

На рис. 3 представлены кадры бинарного изображения с различным значением количества единичных пикселей (площади) капли.

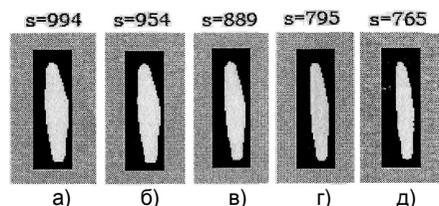


Рис. 3. Кадры изображения с различным значением единичных пикселей изображения (площади): а – $s = 994$; б – $s = 954$; в – $s = 889$; г – $s = 795$; д – $s = 765$

Библиографический список

1. Гуляня, Ю. А. Технология стеклотары и сортовой посуды / Ю. А. Гуляня. – М.: Легпромбыт-издат, 1986. – 264 с., ил.
2. Поршнев, С. В. MATLAB 7: основы работы и программирования / С. В. Поршнев. – М.: Биним-Пресс, 2006. – 320 с: ил. – ISBN 5-9518-0137-0.

Ф. С. Андриянинков, студент; Р. Ю. Наумов, инженер

Методика проверки и настройки силового преобразователя электропривода

В современном мире часто стали применяться силовые преобразователи для управления движением исполнительных механизмов рабочих машин. По окончании сборки силового преобразователя нужно провести его настройку и испытания.

Испытания силового преобразователя проводятся с целью проверки его исправности и соответствия требуемым техническим характеристикам, а также с целью установить отсутствие различных дефектов, возникающих при сборке.

На подготовительном этапе проведения наладки и испытания силового преобразователя необходимо ознакомиться и изучить принципиальные схемы и схемы соединений. При этом важно знать все основные функции силового преобразователя, принципы работы основных узлов и последовательность их включения и срабатывания.

Проверка, настройка и пуск силового преобразователя проводится в несколько этапов:

- проверка монтажа элементов на печатных платах в соответствии с принципиальной и монтажной схемами;
- осмотр плат на наличие всех компонентов;
- осмотр межплатных соединений, продергивание проводов и кабелей;
- проверка цифровых цепей.

При первой подаче напряжения в электрическую схему может сгореть предохранитель в цепи питания или сработать автомат из-за короткого замыкания на корпус. В этом случае необходимо найти место короткого замыкания при отключении схемы от сети. Это можно сделать повторным измерением сопротивления изоляции схемы относительно корпуса в разных точках схемы, с рассоединением частей схемы, если это необходимо.

После подачи напряжения в электрическую схему проверяется работа всех узлов при всех режимах работы, предусмотренных схемой;

- проверка индикации, цепи сброса, цепи разряда;
- настройка датчиков тока, проверка вентиляторов;
- проверка в составе испытательного стенда на длительность безотказной работы;

Проверка силового преобразователя проводится под нагрузкой. Проверку проводят при номинальном режиме работы, предусмотрен режим реверса двигателя.

Так же стоит обратить внимание на следующее при проверке и дальнейшей эксплуатации приводов: а) контроль за температурой силового преобразователя является очень существенным элементом его эксплуатации, так как наиболее частые повреждения силовых преобразователей вызываются их перегревом. Систематический перегрев силового преобразователя сокращает срок его службы и служит причиной аварийного выхода электродвигателя из строя. Если установлено, что силовой преобразователь перегревается выше допустимого предела, то с помощью вентиляции понижают температуру помещения, а если это невозможно – снижают нагрузку электродвигателя; б) на работу силового преобразователя существенно влияет величина напряжения питающей сети. Повышение напряжения сети приводит к увеличению намагничивающего тока силового преобразователя. Учитывая это обстоятельство, при эксплуатации силовых преобразователей контролируют величину напряжения питающей сети.

В процессе проверки силовых преобразователей могут возникать явления, при которых силовой преобразователь необходимо немедленно отключить от сети. В перечень случаев, требующих аварийного отключения силовых преобразователей, входят:

- появление дыма или огня из силового преобразователя;
- несчастный случай с человеком, требующий отключения силового преобразователя;
- вибрация, угрожающая целостности силового преобразователя.

По окончании настройки и испытания силового преобразователя устройство маркируется и ему присваивается серийный номер.

В. И. Левин, студент; В. В. Ельниковский, инженер

Использование двунаправленного буфера NXP P82B96 для передачи высокоскоростных дифференциальных сигналов на большие расстояния

В промышленных условиях часто необходимо размещать устройство ввода/вывода, а также различные датчики, измерители или устройства индикации, использующие семейства последовательных двунаправленных интерфейсов типа I²C на значительном расстоянии. Это обуславливается размерами промышленных объектов. При этом необходимо учитывать влияние электромагнитных возмущающих факторов, характерных для промышленных условий эксплуатации. Одним из примеров является использование стандартного устройства ввода типа клавиатуры совместно с системой ЧПУ. Расстояние между ними достигает 30–50 м, при этом стандартный интерфейс PS/2 (являющийся подвидом I²C) обеспечивает верную работу на расстоянии не более 5 м.

Стандартным решением для улучшения качества передачи сигналов на последовательном интерфейсе является использование дифференциального канала. Однако интерфейсы типа I²C используют принцип двунаправленной передачи данных, поэтому использование прямого преобразования линейного сигнала в дифференциальный невозможно. Необходимо использовать специализированное аппаратное решение.

Решением является использование совместно с набором интерфейсов буфера P82B96, который позволяет передавать дифференциальные сигналы на большие расстояния.

Основные свойства P82B96:

- скорость шины до 1 МГц;
- широкий диапазон питания шины до 15 В;
- соединенные шины размыкаются при отключении питания;
- низкий ток потребления;
- безопасная изоляция шины с помощью оптопары.

Основные применения:

- передача сигналов шины I²C на большие расстояния;
- гальваническая развязка секций шины I²C;
- согласование между логическими устройствами или шинами на разных напряжениях;
- согласование шин SMBus и I²C;

- предотвращение зависания шины с помощью изоляции устройств или модулей при внезапном отключении питания.

Данные интегральные схемы упрощают использование шины I²C (и ее производных) для передачи данных на большие расстояния или для оптоэлектрической изоляции. Они соединяют несколько шин или могут разделить одну шину на два однонаправленных потока данных.

Структурная схема модели используемой для реализации передачи сигналов на большие расстояния с помощью интерфейса PS/2 представлена на рис. 1.

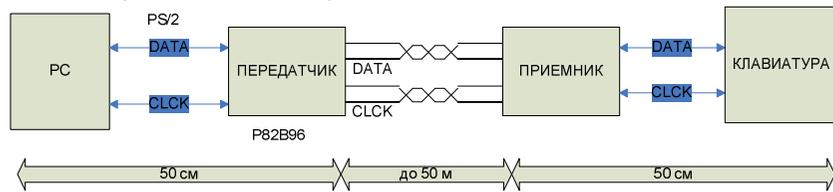


Рис. 1. Структурная схема модели передачи данных на большое расстояние

Максимальное расстояние между передатчиком и приемником достигает 50 м. Это обеспечивается за счет создания дифференциального канала. Формат устройства – два блока (приемник и передатчик), включающие в себя микросхемы P82B96 а также формирователи сигналов линий связи ds3486, mc3487.

Электрическая принципиальная схема для высокоскоростной передачи сигнала представлена на рис. 2.

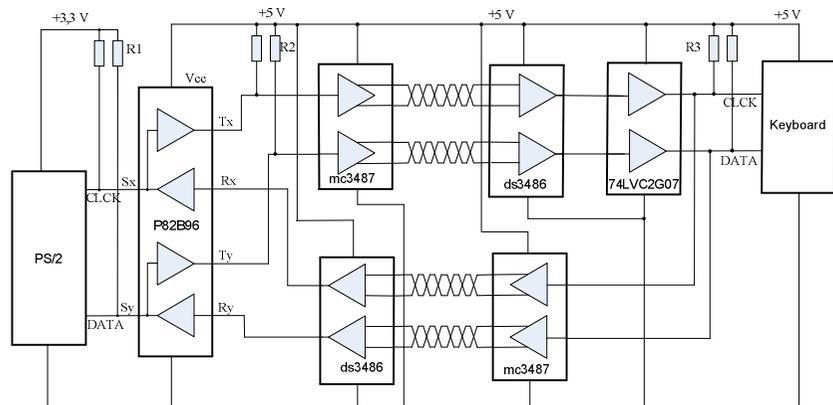


Рис. 2. Схема электрическая принципиальная. Передача высокоскоростных дифференциальных сигналов

Для улучшенного в обычном режиме подавления по сбалансированному кабелю, P82B96 предусматривает простой и недорогой интерфейс характерный для LSTTL дифференциальных шинных драйверов. Мультиплексирование множественных сигналов также возможно при использовании технологии LVDS сериалайзер/десериалайзер.

Одним из преимуществ является возможность использования опторазвязки, предохраняющая элементы схемы от перегорания.

Вывод. Было разработано и технически реализовано устройство, позволяющее решить проблему удаления управляющего устройства от объекта управления на большое расстояние в промышленных условиях, а также разработан и протестирован механизм удаленного размещения устройств, использующих последовательные интерфейсы типа I²C.

Библиографический список

4. www.nxp.com.
5. www.ti.com.
6. NXP Semiconductors, Product data sheet Rev. 08 – 10 November 2009.

Р. А. Крайнов, студент; А. М. Аббясов, ст. преподаватель

Пакет прикладных программ Actel Libero IDE

Actel Libero IDE – это мощный пакет для разработки программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), который включает в себя программы и пакеты разработанные как непосредственно Actel, так и другими широко известными фирмами, такими как Mentor Graphics, SynaptiCAD и Synplicity. Данная среда содержит полный набор инструментов для создания, отладки и верификации, синтеза и физической имплементации проектов, а так же генерации файлов прошивки под все семейства ПЛИС корпорации Actel, а менеджер проектов обеспечивает гибкое и эффективное управление файлами проекта и процессом разработки. Структурная схема интегрированной среды разработки Libero IDE представлена на рис. 1.

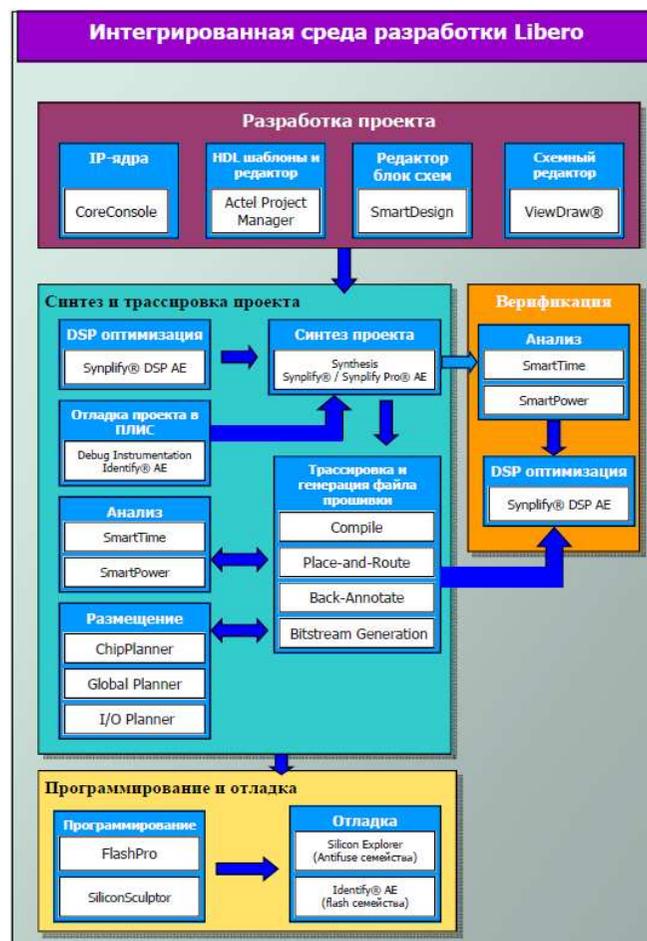


Рис. 1. Интегрированная среда разработки Libero IDE

Графический редактор SmartDesign позволяет быстро и легко создавать как простые, так и большие комплексные Системы на Кристалле (СНК) с использованием IP-ядер процессоров и автоматически создает файл описания проекта на языке HDL.

Размещение, трассировка проекта под конкретную микросхему и генерирование файла прошивки, т. е. имплементирование проекта в ПЛИС, производится в программе Actel Designer.

Пакет Actel Designer имеет три группы инструментов для анализа результатов, задания ограничений, размещения и трассировки. Первая группа называется MultiView Navigator, которая

служит для анализа и задания физических параметров. Вторая, Smart Time, – для анализа и задания временных параметров. Третья группа включает в себя инструмент Smart Power.

Для оптимизации по потреблению мощности предусмотрен специальный инструмент Smart Power. Основным принципом оптимизации является анализ сценария работы микросхемы во времени и анализ потребления энергии отдельными группами микросхемы (матрицей ПЛИС, интегрированной памятью, портами ввода/вывода) не только в активном, но и во всех режимах работы микросхемы (статическом спящем, сверхмалого потребления). После определения элементов влияющих на потребление энергии, производится настройка оптимизации, в том числе и за счет уменьшения быстродействия.

Программа синтезатора Synplify Pro AE обеспечивает эффективную оптимизацию характеристик и используемого объема проекта ПЛИС Actel.

Компания Actel выпускает многократно программируемые ПЛИС, выполненные по Flash-технологии, и однократно программируемые ПЛИС, изготовленные по технологии Antifuse.

Программирование Flash ПЛИС осуществляется с помощью FlashPro или непосредственно на плате с использованием специализированного адаптера JTAG.

Silicon Sculptor – это универсальный программатор, который позволяет запрограммировать ПЛИС Actel всех семейств. Программирование микросхем осуществляется непосредственно в программаторе до монтажа на плату, для чего в программатор SiliconSculptor устанавливается соответствующий адаптер, в зависимости от семейства ПЛИС и корпуса микросхемы.

Identify AE – это инструмент для внутрисхемной отладки RTL модели для ПЛИС семейств IGLOO, ProASIC3, Fusion и ProASICPLUS, позволяющий протестировать сигналы внутри запрограммированной ПЛИС.

Silicon Explorer – это инструмент для логического анализа и верификации проектов для однократно-программируемых ПЛИС Актел, выполненных по технологии antifuse, обеспечивающий внутрисхемную отладку проектов в реальном времени.

Вывод. Данный пакет предоставляет разработчикам полный набор средств, необходимых для создания, отладки и верификации проекта и программирования. Его возможности постоянно расширяются, в том числе и за счет интеграции с другими пакетами, такими как, например, математический пакет MatchCAD. Программы и инструменты постоянно совершенствуются, а биб-

лиотека регулярно дополняется новыми готовыми шаблонами и IP-модулями, что позволяет разработчикам быстро и эффективно создавать и отлаживать новые проекты. Это особенно актуально в современных условиях конкуренции на рынке электроники, так как дает возможность создавать все более сложные проекты, при этом значительно сокращая время и затраты на разработку новых продуктов.

Библиографический список

1. www.actel.ru.

Д. А. Макина, студентка; А. А. Смирнов, ст. преподаватель

Разработка микропроцессорной системы мониторинга состояния котла-утилизатора для Краснодарской ТЭЦ

На Краснодарской ТЭЦ закончено строительство энергоблока – теплофикационной парогазовой установки. Он предназначен для покрытия электрических и тепловых нагрузок г. Краснодара, замещения отработавших ресурс мощностей старой неблочной части ТЭЦ, повышения надёжности системы электропитания всего Юга России, включая олимпийские объекты Сочи-2014. В составе блока ПГУ установлен котел-утилизатор (КУ). Внезапный выход из строя КУ причинит большой ущерб, так как при этом убытки будут связаны не только с необходимостью восстановления его, но и прежде всего, с перерывом в производстве электроэнергии.

Данная работа посвящена разработке микропроцессорной системы мониторинга состояния котла-утилизатора для Краснодарской ТЭЦ.

Разрабатываемая система предназначена для сбора и обработки сигналов от датчиков, передачи сигналов тревоги на внешние устройства оповещения при выходе параметров за установленные пределы, архивации полученных результатов, а так же должна иметь возможность передавать полученную информацию в удаленный персональный компьютер по оптоволоконной линии. Система рассчитана на круглосуточный режим работы мониторинга КУ для Краснодарской ТЭЦ [1].

В состав входят:

- микроконтроллеры, получающие сигналы с датчиков и осуществляющие определение контролируемых параметров в пределах указанных зон, ведение архива данных, передачу данных для комплексной обработки;
- центральный микроконтроллер, осуществляющий синхронную работу периферийных контроллеров, анализ полученных данных в совокупности, при наличии линий связи осуществляющий передачу поступающей информации в удаленную ЭВМ;
- микроконтроллер тревоги, осуществляющий индикацию возникших тревожных событий;
- автономный источник питания для каждого микроконтроллера, обеспечивающий его работу при отсутствии сетевого питания в течении как минимум двух суток [2].

Технические характеристики разработанной системы позволяют использовать её в производстве для сбора информации и для обеспечения безопасного, надежного и экономичного ведения эксплуатационных режимов работы котла-утилизатора.

Библиографический список

1. Техническая документация по КУ.
2. Бурцев, А. П. Типовые аппаратные решения построения систем сбора данных / А. П. Бурцев. Мир компьютерной автоматизации, 2006, №5.

Е. В. Гришина, соискатель; Л. Г. Копылова, к. т. н., доцент

Компенсация гармонических колебаний момента нагрузки в электромеханических системах

Одной из основных тенденцией современного машиностроения является применение индивидуальных приводных устройств технологических машин и существенное упрощение кинематических передач между электродвигателем и рабочим органом (РО). При этом РО, имеющий значительные габаритные размеры, становится главным элементом механической части электромеханической системы (ЭМС). Его особенности, связанные обычно с погрешностями изготовления и монтажа, проявляются при вращении в виде гармонических пульсаций момента нагрузки

$$M_n = M_0 + M_1 \sin(\Omega t + \varphi_0),$$

где M_0 , M_1 , φ_0 , Ω – соответственно постоянная составляющая, амплитуда колебаний момента, начальный угол и частота вращения

РО. Это подтверждают результаты соответствующих исследований [1–4], выполненных для различных отраслей промышленности методом спектрального анализа флуктуаций тока силовой цепи (рис. 1) электроприводов конкретных технологических машин на различных уровнях рабочих скоростей.

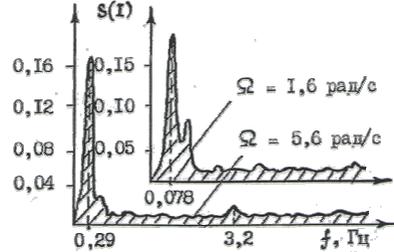


Рис. 1. Спектрограмма тока электродвигателя двухвального агрегата

Флуктуации момента нагрузки и, как следствие, скорости РО могут вызвать существенные изменения качественных показателей готовой продукции: точности изготовления деталей, геометрических размеров изделий (диаметра волокна или провода, толщины пленки и различных покрытий), весовых параметров материалов (плотности бумаги, ткани и др.), светопропускания оптических световодов и т. п.

Очевидно, что уменьшить влияние флуктуаций момента нагрузки можно путем повышения быстродействия (динамической точности) систем регулирования скорости. Применение системы подчиненного регулирования с каскадным регулятором (рис. 2, графики 1) позволяет снизить амплитуду пульсаций скорости, вызванных гармоническими колебаниями M_H . Однако дальнейшее уменьшение пульсаций путем повышения коэффициента петлевого усиления становится затруднительным, т. к. приводит к ухудшению качества переходного процесса по управляющему воздействию, повышению токовых форсировок и сокращению линейной зоны работы ЭМС (рис. 2, графики 2).

Дополнительные возможности управления дают регуляторы состояния полного порядка, с помощью которых можно получить переходные процессы требуемого качества (рис. 2, графики 3). Однако увеличение динамической точности системы, обеспечивающее снижение пульсаций скорости на всех рабочих частотах, сопровождается возрастанием форсировок тока и еще большим сокращением линейной зоны работы ЭМС ограниченной мощности.

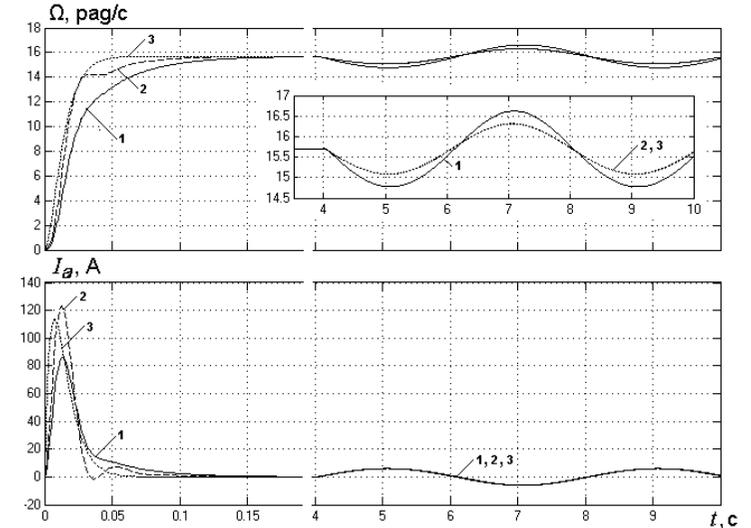


Рис. 2. Переходные процессы системы регулирования скорости

Наиболее рациональная (избирательная) компенсация гармонического воздействия определенной частоты в установившемся режиме работы ЭМС может быть обеспечена при использовании принципа внутренней модели [4–7], согласно которому полином, представляющий собой математическую модель возмущения

$$F(s) = s^2 + \Omega^2,$$

где s – комплексная переменная Лапласа, вводится множителем в знаменатель передаточной функции регулятора (рис. 3), а искажение передаточной функции ЭМС по управлению устраняется соответствующим внеконтурным формирователем. При этом выходной сигнал регулятора будет содержать гармоническую составляющую, которая благодаря действию обратной связи обеспечит противофазную компенсацию возмущения.

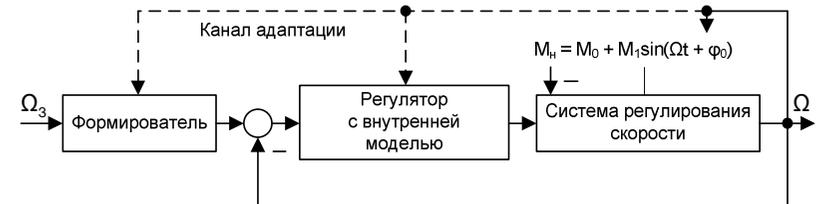


Рис. 3. Структурная схема системы управления

Использование данного принципа является целесообразным в режимах продолжительной работы ЭМС на заданном уровне рабочей скорости.

Применение изложенного принципа в системе с каскадным регулированием тока и скорости позволяет существенно улучшить отработку низкочастотного гармонического возмущения с меньшими форсировками ЭМС (рис. 4, графики 1). При этом улучшение динамики отработки управляющих воздействий может достигаться введением дополнительных производных в числитель передаточной функции регулятора с внутренней моделью возмущения по принципу полиномиального управления (рис. 4, графики 2).

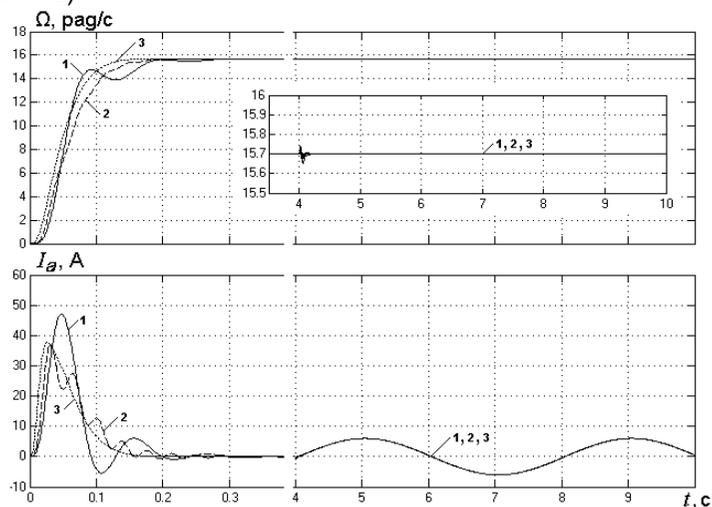


Рис. 4. Переходные процессы системы с внутренней моделью

Замена каскадного регулятора регулятором состояния при сохранении форсирующего полиномиального устройства управления с внутренней моделью возмущения в контуре главной обратной связи позволяет обеспечить наиболее высокое качество отработки сигнала задания скорости ЭМС и компенсации пульсаций нагрузки (рис. 4, графики 3). Такая система обладает также наименьшей чувствительностью к вариациям параметров объекта и гармонического возмущения.

Таким образом, органичное сочетание принципов внутренней модели, полиномиального «вход-выходного» управления и управления по состоянию ЭМС способствует достижению наиболее высокого технического результата.

Следует отметить, что зависимость частоты гармонического возмущения от угловой скорости РО определяет также необходимость использования принципа адаптации внутренней модели возмущения и формирователя к изменениям скоростного режима ЭМС в широком диапазоне (рис. 3).

Библиографический список

1. Шёнфельд, Р. Автоматизированные электроприводы / Р. Шёнфельд, Э. Хабигер; пер. с нем.; под ред. Ю.А. Борцова. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985.
2. Селезнева, В. В. Вибродиагностика станков по результатам обработки / В. В. Селезнева // Надежность и диагностирование технологического оборудования: Сб. статей / ИНМАШ АН СССР. – М.: Наука, 1987.
3. Тарарыкин, С. В. Принципы управляемой синхронизации машин в технологических агрегатах для производства ленточных и волоконных материалов: дис ... д-ра техн. наук: 05.02.13, 05.09.03. – Иваново, 1992.
4. Гудвин, Г. К. Проектирование систем управления / Г. К. Гудвин, С. Ф. Гребен, М. Э. Сальгадо. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004.
5. Кулебакин, В. С. Об основных задачах и методах повышения качества автоматического регулирования систем / В. С. Кулебакин // Тр. II Всес. совещ. по теории автоматического регулирования. Т. II – М.: Наука, 1965.
6. Гайдук, А. Р. Основы теории систем автоматического управления: учеб. пособие / А. Р. Гайдук. – М.: Учебно-методический и издательский центр УЧЕБНАЯ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК, 2005.
7. Андриевский, Б. Р. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB / Б. Р. Андриевский, А. Л. Фрадков. – СПб.: Наука, 1999.

В. В. Аполонский, аспирант, А. А. Анисимов, к. т. н., доцент;
С. В. Тарарыкин, д. т. н., профессор

Анализ и синтез робастных систем автоматического управления с комбинированными регуляторами состояния

В современных условиях проблема обеспечения робастных свойств, является одной из важнейших в теории и практике автоматического управления. Значительные резервы повышения параметрической грубости систем были выявлены в классическом модальном управлении, реализуемом в виде безынерционных или динамических регуляторов состояний (РС) [1].

Далее под робастной будем понимать систему с гурвицевым характеристическим полиномом (первое условие), в которой не происходит сокращение нулей и полюсов передаточной функции объекта с нулями и полюсами регулятора (второе условие), а сам регулятор не формирует положительных обратных связей по координатам состояния или выходной координате (третье условие).

Первое условие робастности в рамках модального управления обеспечивается заданием желаемого характеристического полинома, при котором достигается необходимое качество переходных процессов.

Второе условие робастности обеспечивается путем составления уравнения синтеза ПР в форме $A(s)C(s) + B(s)R(s) = D(s)$, при соответствующих степенях полиномов объекта $A(s)$, $B(s)$ и регулятора $R(s)$, $C(s)$, а также характеристического полинома $D(s)$.

Для обеспечения третьего условия робастности рекомендуется располагать динамическую характеристику системы в границах зоны параметрической грубости путем соответствующего назначения корней полинома $D(s)$.

Поставим задачу разработки и исследования способов компенсации негативного влияния положительных обратных связей (ОС), возникающих за пределами этой зоны, на параметрическую грубость систем с безынерционными РС.

Границы зоны параметрической грубости для систем с безынерционными и динамическими РС зависят от взаимного положения корней полиномов передаточной функции объекта, а также от различия степеней и видов распределения корней полиномов $B(s)$, $A(s)$ и $D(s)$.

Конфигурация зоны параметрической грубости системы с безынерционным РС, помимо перечисленных факторов, существенно зависит от структуры объекта управления. Наибольшее влияние нулей проявляется в структурах, соответствующих канонической форме управляемости (КФН). В этом случае тенденция к вырождению объекта приводит к тому, что зона параметрической грубости приобретает дискретный характер или отсутствует.

С целью расширения возможностей робастного управления предлагается ввести в структуру систем с безынерционными РС гибкие обратные связи по производным координат состояния. Такое решение позволяет сделать непрерывной зону параметрической грубости систем управления с РС для объектов, близких к КФН по своей структуре.

Таким образом, при неблагоприятной структуре объекта управления введение в состав безынерционного РС гибких ОС дает возможность улучшить робастные свойства системы.

Библиографический список

1. **Анисимов А. А.** Анализ параметрической чувствительности и структурная оптимизация систем модального управления с регуляторами состояния / А. А. Анисимов, Д. Г. Котов, С. В. Тарарыкин, В. В. Тютиков // Известия РАН. Теория и системы управления. 2011. № 3. – С. 58–72.

И. В. Вершинин, студент; В. В. Тютиков, д. т. н., профессор

Подчиненное регулирование координат электромеханических систем на базе метода АКАР

Повышение требований к качеству работы электромеханических систем (ЭС), а именно: устойчивости, надежности, расширение их функциональных возможностей, и сама логика научно-технического прогресса обуславливают актуальность и необходимость поиска путей совершенствования процессов управления ЭС. В этой связи предлагается взглянуть на проблему управления ЭС с точки зрения современной науки об управлении, т. е. с учетом нелинейности и многосвязности их математических моделей и использования современных методов синтеза нелинейных систем управления [1].

Для синтеза законов управления ЭС с учетом нелинейных моделей динамики, необходимо переходить на новые концептуальные основы. Такой концепцией является синергетическая теория управления, развитая в трудах профессора А. А. Колесникова [2]. Методы синергетической теории управления позволяют в аналитическом виде получить законы управления для нелинейных многомерных, многосвязных объектов.

Основным методом синергетической теории управления является метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР). Набор желаний проектировщика системы в синергетической теории управления принято выражать в виде соответствующей системы технологических инвариантов (скорости и тока). Инварианты, которые входят в структуру формируемого инвариантного многообразия, выступают как цель управления. Сама же система всегда асимптотически устойчива в целом относительно выбранного аттрактора, так же синергетические системы обладают свойством робастной устойчивости к параметрическим возмущениям. Отмеченное свойство робастности синергетических систем управления является определяющим фактором применения синергетического подхода к решению самых разнообразных задач.

Библиографический список

1. **Управление** и информационные технологии. Всероссийская научная конференция 2003 г. Санкт-Петербург. Сборник докладов в двух томах. Том 1. с. 220–225.
2. **Колесников А. А.** Синергетическая теория управления / А. А. Колесников. – М.: Энергоатомиздат, 1994.

А. Р. Тюрин, студент; С. В. Софронов, к. т. н., доцент

Обзор промышленных контроллеров

Промышленный контроллер – управляющее устройство, применяемое в промышленности и других отраслях, по условию применения и задачам близким к промышленным. Применяется для автоматизации технологических процессов, в быту – для управления климатом и др.

Широкий термин, охватывающий множество возможных реализаций:

- программируемые логические контроллеры (ПЛК) и близко примыкающие к ним программируемые интеллектуальные реле;
- встроенные электронные контроллеры;
- устройство управления на основе механических, гидравлических, пневматических, электрических и электронных схем, созданные до внедрения в системы автоматизации вычислительной техники.

Основные ПЛК: Siemens – SIMATIC S5 и S7; Segnetics – Pixel 2511 и SMH 2Gi; Omron; Mitsubishi – серия Melsec (FX, Q) и др.

Датчики и исполнительные устройства подключаются к ПЛК: централизованно или по методу распределённой периферии.

Коммуникации ПЛК могут осуществляться с помощью: RS-232, RS-485, ProfiBus, DeviceNet, ControlNet, CAN, AS-Interface, промышленного Ethernet.

Для программирования ПЛК используются стандартизированные языки МЭК (IEC) стандарта IEC61131-3.

Если рассматривать ПЛК на примере контроллера Siemens SIMATIC S7-400, то стоит отметить наличие модульной конструкция, возможность работы с естественным охлаждением, гибкие возможности расширения, мощные коммуникационные возможности и удобство обслуживания. Область применения охватывает почти весь спектр промышленности.

Система автоматизации S7-400 может комплектоваться следующими модулями:

- модули блоков питания (подключение к источникам питания ~120/230 В или = 24/48/60/120/230 В);
- модули центральных процессоров (для повышения производительности в одном базовом блоке может использоваться до 4 центральных процессоров);

- сигнальные модули для ввода и вывода дискретных и аналоговых сигналов;
- коммуникационные модули для подключения S7-400 к промышленным сетям PROFIBUS/Industrial Ethernet/PROFINET, а также организации последовательной передачи данных через PtP-интерфейс;
- функциональные модули (для решения специальных задач управления, к которым можно отнести скоростной счет, позиционирование, автоматическое регулирование и т. д.).

Очевидно, что современные контроллеры обладают широкими возможностями автоматизации технологических процессов. Наличие гибкой структуры и удобного интерфейса обуславливает их массовое применение в современной промышленности.

Библиографический список

1. http://ru.wikipedia.org/wiki/Программируемый_логический_контроллер.
2. http://ru.wikipedia.org/wiki/Simatic_S7-400.
3. http://promsis.spb.ru/catalog/ad_siemens/automatic_systems/siemens_simatic_s7_400/.
4. <http://www.ste.ru/siemens/contr.html>.
5. http://bookasutp.ru/Chapter6_1.aspx.

А. В. Герман, магистрант; Л. Г. Копылова, к. т. н., доцент

Управление электромеханической системой с упругими связями при активной компенсации возмущений

Особенности рабочего органа (РО) электромеханической системы (ЭМС), связанные с погрешностями его изготовления и монтажа, проявляются при вращении в виде гармонических пульсаций момента нагрузки [1, 2]. Это приводит к появлению колебаний скорости РО, что отрицательно сказывается на качественных показателях готовой продукции.

Очевидно, что уменьшить влияние пульсаций момента нагрузки можно путем повышения быстродействия систем регулирования скорости. Применение системы с каскадным регулятором позволяет снизить амплитуду колебаний скорости, вызванных гармоническими колебаниями момента нагрузки. Однако дальнейшее уменьшение пульсаций путем повышения коэффициента петлевого усиления становится затруднительным, т. к. приводит к ухудшению качества переходного процесса по управляемому воздействию, повышению бросков тока и сокращению линейной

зоны работы ЭМС. К тому же наличие в ЭМС упругих связей между валом электродвигателя и рабочим органом еще больше усложняет управление им с помощью принципов подчиненного регулирования.

Для ЭМС с упругими связями наиболее предпочтительными являются регуляторы состояния (РС), способные значительно расширить возможности проектируемых динамических систем в линейной зоне работы. С помощью РС можно снизить амплитуду колебаний скорости при сохранении требуемого качества переходных процессов по управляющему воздействию.

Однако наиболее рациональная компенсация гармонического воздействия определенной частоты в установившемся режиме работы ЭМС может быть обеспечена при использовании принципа внутренней модели [2, 3], согласно которому полином, представляющий собой математическую модель возмущения, вводится сомножителем в знаменатель передаточной функции регулятора. При этом выходной сигнал регулятора будет содержать гармоническую составляющую, которая благодаря действию обратной связи обеспечит противофазную компенсацию возмущения.

Применение регулятора с внутренней моделью возмущения совместно с РС позволяет полностью компенсировать низкочастотное гармоническое возмущение на расчетной частоте. Использование данного принципа является целесообразным в режимах продолжительной работы ЭМС на заданном уровне рабочей скорости.

Введение астатизма в РС позволяет скомпенсировать не только гармоническую, но и постоянную составляющую момента нагрузки. Однако зависимость частоты гармонического возмущения от угловой скорости РО определяет также необходимость адаптации регулятора с внутренней моделью возмущения к изменениям скоростного режима ЭМС. При этом текущее значение скорости РО вводится в регулятор с внутренней моделью возмущения как переменная, к которой «адаптируется» математическая модель возмущения. Кроме того модифицируется структура регулятора. Для удобства введения канала адаптации в регулятор, последний выполняется в канонической форме управляемости.

Таким образом, органичное сочетание принципов внутренней модели, полиномиального «вход-выходного» управления, управления по состоянию ЭМС, а также применение принципа адаптации способствует достижению наиболее высокого технического результата.

Библиографический список

1. Шёнфельд, Р. Автоматизированные электроприводы / Р. Шёнфельд, Э. Хабигер; пер. с нем.; под ред. Ю.А. Борцова. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985.
2. Гудвин, Г. К. Проектирование систем управления / Г. К. Гудвин, С. Ф. Греббе, М. Э. Сальгадо. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004.
3. Кулебакин, В. С. Об основных задачах и методах повышения качества автоматического регулирования систем / В. С. Кулебакин // Тр. II Всес. совещ. по теории автоматического регулирования. Т. II. – М.: Наука, 1965.

Л. С. Поздняков, аспирант; Л. Г. Копылова, к. т. н., доцент

Комплекс лабораторных стендов для освоения курса мехатроника

Мехатроника – это область науки и техники, основанная на синергетическом объединении узлов точной механики с электронными, электротехническими и компьютерными компонентами, обеспечивающая проектирование и производство качественно новых модулей, систем, машин и комплексов машин с интеллектуальным управлением их функциональными движениями.

Для освоения этой области науки необходимо устройство или ряд устройств и механизмов, которые содержали бы в себе различные элементы движения, перемещения, распознавания объектов на микропроцессорной платформе, которая бы позволяла оперативно менять программу и алгоритм движения, обеспечивала гибкость и информативность системы.

Этим параметрам отвечают следующие роботизированные комплексы: IE-ROBOPICA – набор на базе PIC16, IE-ROBO-51 – набор на базе MCS51, 6 DOF Robotic Arm – робот манипулятор.

Наборы на базе микроконтроллера позволяют демонстрировать одновременно несколько базовых алгоритмов управления механической платформой на основе показаний группы датчиков, запрограммированной траектории и скорости каждого исполнительного органа, а также по командам пользователя. Они имеют большой набор датчиков движения, дальнометры, средства отображения информации, беспроводные средства управления.

Робот манипулятор состоит из сервоприводов и обладает шестью степенями свободы. В совокупности с мобильным шасси из наборов (IE-ROBOPICA, IE-ROBO-51) система превращается в мощный лабораторный стенд с большими функциональными возможностями. Полученная система может программироваться как на языках низкого, так и высокого уровней (к примеру C++).

Для подробного изучения лабораторных комплексов разрабатываются лабораторные работы, включающие в себя:

- ознакомление с элементами программирования и управления системы;
- изучение элементов ввода и отображения информации;
- изучение принципов движения шасси;
- изучения работы датчиков движения и дальномеров;
- изучение дистанционного управления объектом;
- изучение принципов работы сервоприводов;
- изучение работы робота манипулятора;
- изучение системы комплексного движения и работы манипулятора.

Данный комплекс лабораторных стендов позволит получить навыки управления и программирования механотронными объектами.

Д. Ю. Ануфриев, С. А. Парамонов, студенты;
А. В. Волков, к. т. н., доцент

Исследование системы импульсно-фазового управления тиристорами на базе настольной рабочей станции NIEIVIS

Система импульсно-фазового управления (СИФУ) предназначена для создания последовательности подаваемых на тиристоры отпирающих импульсов, момент формирования которых смещен на определенный угол относительно моментов естественной коммутации тиристоров.

Целью данной работы является практическая реализация СИФУ на базе настольной рабочей станции NIElvis.

Схема цифровой системы управления тиристорами содержит: блок питания микросхем, блок синхронизации, высокочастотный генератор импульсов (ВГИ), фазосдвигающий узел, заторможенный генератор импульсов, формирователь импульса открытия тиристора.

В ходе работы проведено исследование работоспособности данной схемы в программном комплексе Multisim. Это позволило наглядно представить принцип работы отдельных блоков схемы, их взаимодействие, а также выявить возможные недостатки на стадии проектирования.

Практическая реализация данного проекта осуществлена на базе универсального лабораторного прибора NIElvis, который предоставляет широкие возможности для измерений и испытаний, необходимых в ходе занятий по электронике и схемотехнике, обеспечивает сохранение получаемых данных. Главным преимуществом данной станции является наличие виртуальных приборов, необходимых при работе в лаборатории.

Описанную систему можно применять для управления тиристорами, рассчитанными на номинальный ток до 800 А в одно- и многофазных выпрямителях и регуляторах мощности переменного тока при любом характере нагрузки. При необходимости мощность управляющих тиристорами импульсов можно корректировать в пределах допустимого теплового режима элементов формирователя импульсов.

Реализованная система может послужить наглядным пособием для студентов следующих лет обучения. Она позволяет освоить принципы работы с лабораторным стендом NIElvis, ознакомиться с современной элементной базой, а также осуществить наладку как отдельных блоков, так и всей системы в целом.

Библиографический список

1. Комплект виртуальных измерительных приборов NI Elvis. Руководство пользователя. – 2006.
2. <http://martok.narod.ru/ip/3faznreg.htm>.

А. С. Чёренькая, студентка; А. И. Терехов, к. т. н., профессор

Ионисторы и их применение

Современная электронная техника широко использует в качестве перезаряжаемых источников тока энергонакопительные электрические конденсаторы. Их использование имеет ряд преимуществ перед аккумуляторами (работа в широком диапазоне температур, работа без замены в течение всего эксплуатационного срока, большое количество циклов «зарядка-разрядка» и др.). Однако накапливаемая конденсаторами в процессе зарядки удельная энергия не превышает 1 кДж/кг, поэтому одной из актуальных проблем электронной техники современности является увеличение удельной энергии.

Решением проблемы стало производство нового типа конденсаторов – с двойным электрическим слоем, названных в России ионисторами.

Уникальное сочетание удельной энергии, удельной мощности и большого количества циклов в режиме «зарядка-разрядка» в конденсаторах с двойным электрическим слоем достаточно эффективно используется в разработках электромобилей, основной источник энергии в них – батарея топливных элементов – защищен от перегрузок модулем из последовательно соединенных конденсаторов с двойным электрическим слоем. Благодаря этому возможно решить следующие проблемы:

- проблема старта и ускорения в течение нескольких секунд до необходимой скорости движения;
- проблема рекуперации электроэнергии при торможении;
- проблема увеличения срока службы основного источника электроэнергии.

В настоящее время производятся попытки внедрения ионисторов также и в военную технику.

Библиографический список

1. Кузнецов, В. П. Пути и перспективы развития и применения конденсаторов с двойным электрическим слоем / В. П. Кузнецов и др. Радиодетали и компоненты, 1991, вып. 4(85).
2. Свидетельство № 103073 на товарный знак «Ионистор» от 05.03.91.
3. Рене, В. Т. Электрические конденсаторы. М.: Госэнергоиздат. 1959
4. Химические источники тока. Справочник. Под ред. Н. В. Коровина и А. М. Скундина: Издательство МЭИ. 2003.
5. Панкрашин, А. А. Ионисторы Panasonic / Компоненты и технологии, 2006, вып. 9.

СЕКЦИЯ 21. ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ И ТЕХНИЧЕСКОГО ДИЗАЙНА

А. М. Власов, студент; В. А. Полетаев, д. т. н., профессор

Исследование магнитных моментов магнитожидкостных уплотнений

Магнитные жидкости (МЖ) представляют искусственно синтезированные нанодисперсные системы, сочетающие в себе свойства магнитного материала и жидкости с возможностью управления реологическими, теплофизическими, оптическими и другими характеристиками магнитным полем. Сочетание относительно высоких магнитных и жидкостных свойств в одном материале не встречается в природе, что открывает широкие перспективы для создания новых устройств, в том числе триботехнических с МЖ в качестве рабочего тела. Уникальные свойства МЖ позволили разработать принципиально новые технические устройства и технологии [1]. МЖ послужили основой для создания нового класса уплотнений [2], отличительной особенностью которого является высокий уровень герметичности, превосходящий уровень всех известных типов уплотнений. Для таких уплотнений важным параметром является собственный момент трения, обусловленный вязкостным трением движущихся слоев МЖ.

Магнитожидкостные уплотнения (МЖУ) относят к бесконтактным щелевым уплотнениям, работающим по принципу гидравлического зазора, в котором магнитная жидкость удерживается магнитным полем в рабочих зазорах между сопрягаемыми деталями. МЖУ имеет ряд преимуществ по сравнению с применяемыми уплотнениями: обеспечивают практически полную герметичность, выдерживают достаточно высокий перепад давлений как в статическом, так и в динамическом режимах; просты по конструкции и изготовлению. Основной недостаток МЖУ – сложность обеспечения равномерности рабочего зазора из-за погрешностей изготовления и сборки деталей, а также люфта подшипникового узла. Эксцентриситет и биение вала приводят к появлению магнитной силы одностороннего притяжения вала, повышению собственных потерь на трение, а также снижению работоспособности МЖУ. На величину рабочего зазора влияют величины шероховатости и волнистости сопрягаемых поверхностей [3].

С целью исследования влияния размера рабочего зазора на изменение критического перепада давлений и потерь на трение была разработана установка (рис. 1), включающая стойку 1, подвижный вал 2, неподвижный вал 3, съемные полюсы 4 и 8, болты 5 и 13, диск 6, магниты 7, сменную втулку 8, гайку 10, хомут 11, корпус 12, индикатор 14, опору 15.

Наружная поверхность сменной втулки 8 обрабатывалась точением, шлифованием и алмазным выглаживанием с целью получения разной величины шероховатости поверхности, влияющей на величину рабочего зазора между втулкой и полюсами 4 и 8. Корпус 12 соединяется через хомут 11 с индикатором 14, позволяющим измерять величину момента трения.

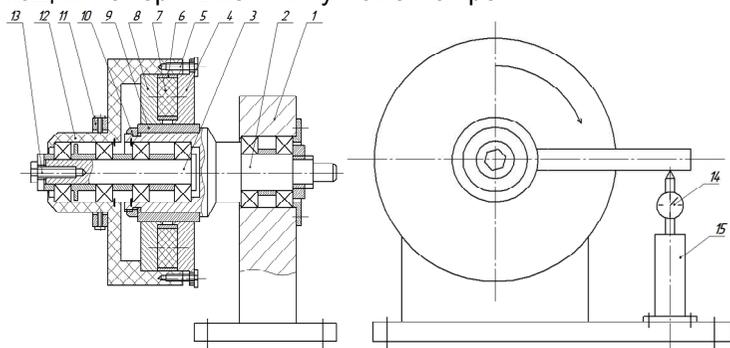


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – стойка; 2 – подвижный вал; 3 – неподвижный вал; 4 – съемный полюс; 5 – болт; 6 – диск; 7 – магнит; 8 – съемный полюс; 9 – сменная втулка; 10 – гайка; 11 – хомут; 12 – корпус; 13 – болт; 14 – индикатор; 15 – опора

На разработанной экспериментальной установке проведены исследования по определению магнитных моментов в рабочем зазоре герметизатора при разной скорости вращения втулок, имеющих разную величину шероховатости поверхности, и с магнитными жидкостями типов МКС-350-40, МКС-003-60, МКА-1-40, МКА-1-30.

Для определения момента сопротивления вращения вала, обусловленного трением с магнитной жидкостью (момента трения) используется формула

$$M_{\text{тр}} = \eta R \cdot S \cdot \omega / \delta \quad (1)$$

где η – динамическая вязкость жидкости, R – радиус вращающегося вала, соприкасающегося с магнитной жидкостью; ω – окружная скорость вала; δ – зазор между валом и полюсом, заполненный жидкостью.

На рис. 2 представлены графики зависимости моментов трения от частоты вращения и величины шероховатости поверхности втулок для разных типов МЖ.

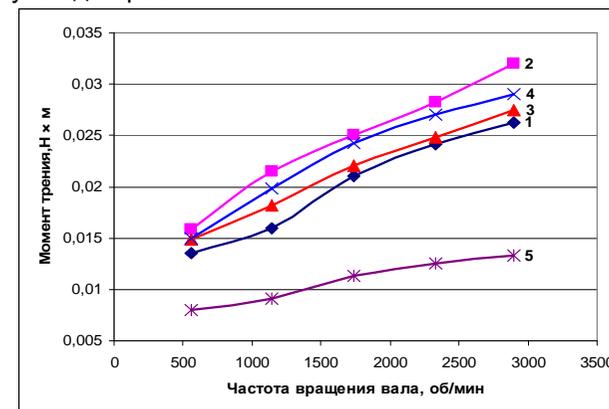


Рис. 2. Зависимость моментов трения от частоты вращения втулок при величине шероховатости поверхности $Ra = 7,446$ мкм для разных типов магнитной жидкости: 1 – МКС-350-40; 2 – МКС-003-60; 3 – МКА-1-40; 4 – МКА-1-30; 5 – без магнитной жидкости

Таким образом выполненные исследования показали влияние величины рабочего зазора магнитоидкостных уплотнений на моменты трения. Представлены результаты проведенных экспериментов.

Библиографический список

1. Rosensweig, R. E. Magnetic Fluids // Int. Sci. Tech., – 1966. – № 55. – P. 48–56.
2. Казаков, Ю. Б. Герметизаторы на основе нанодисперсных магнитных жидкостей и их моделирование / Ю. Б. Казаков, Н. А. Морозов, Ю. И. Страдомский, С. М. Перминов. Монография ИГЭУ, Иваново, 2010, 184 с.
3. Полетаев, В. А. Исследование магнитного поля рабочего зазора магнитоидкостного герметизатора классической конструкции / В. А. Полетаев, С. М. Перминов, Т. А. Пахолкова, А. С. Перминова // Вестник ИГЭУ, Вып. 5, 2011, с. 42–45.

Л. К. Чернов, аспирант; В. А. Полетаев, д. т. н., профессор

Исследование магнитной галтовки деталей из цветных металлов

Магнитная галтовка – вид суперфинишной обработки резанием. Режущим инструментом является ферритмагнитный галтовочный наполнитель, средством передачи усилия с вала двигателя-

ля на обрабатываемую поверхность является магнитное поле, индуцируемое постоянными магнитами. Обработка происходит в неподвижном рабочем объеме, в который загружены: наполнитель, представляющий из себя короткие обоюдоострые иглы, обрабатываемые детали и смазочно-охлаждающая жидкость.

На рис. 1 представлена конструкция разработанного устройства для магнитной галтовки. Установка работает следующим образом: двигатель передает движение на основной и вспомогательный вал посредством ременной передачи; вращение со вспомогательного вала на втулку №1 передается при помощи крестообразно ремня, из-за чего втулка №1 вращается в противоположную сторону основному валу. Основной вал и втулка №1 передают движение на подвижный диск и подвижный борт. Тем самым поле, индуцируемое основной и вспомогательной группой постоянных магнитов приходит в движение, воздействуя на находящийся в рабочем контейнере галтовочный магнитный наполнитель. Под воздействием поля наполнитель в контейнере начинает перемещаться по сложной траектории и ударяться о поверхность изделий, и, тем самым, обрабатывать их. При необходимости усиления воздействия наполнителя на изделия необходимо увеличить угол наклона рабочего объема.

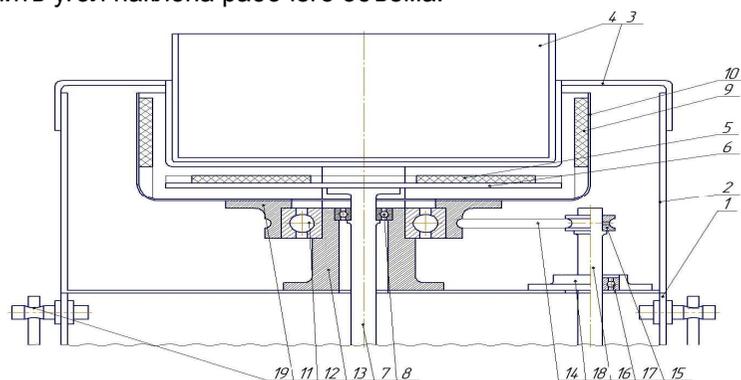


Рис. 1. Установка для магнитной галтовки:

- 1 – основной корпус; 2 – верхняя часть корпуса; 3 – рабочий объем;
- 4 – рабочий контейнер; 5 – основная группа постоянных магнитов;
- 6 – подвижный диск; 7 – основной вал; 8 – подшипник; 9 – постоянные магниты; 10 – подвижный борт; 11 – втулка №1; 12 – основной подшипник;
- 13 – втулка №2; 14 – ремень; 15 – блок; 16 – вспомогательный вал;
- 17 – подшипник; 18 – втулка №3; 19 – поворотный механизм

Под воздействием подвижного магнитного поля ферромагнитный галтовочный наполнитель в рабочем объеме перемеща-

ется и создает обрабатывающее усилие на поверхности обрабатываемой детали.

Магнитное поле для создания достаточного обрабатывающего усилия на поверхности изделий должно отвечать следующим требованиям: смена полюсов при переходе от одного магнита до другого, высокая напряженность поля в рабочей области, высокая неоднородность поля. При выполнении данных условий наполнитель, взаимодействуя с поверхностью, обрабатывает ее. При недостаточной силе или же неправильной конфигурации поля наполнитель будет беспорядочно перемещаться по рабочему объему, не создавая обрабатывающего усилия на поверхности изделий.

На рис. 2 показано полноценное рабочее поле, индуцируемое четырьмя постоянными магнитами

Магниты основной группы двухполюсные, кольцевые с коэрцитивной силой – 750 кА/м, магниты вспомогательной группы – прямоугольные с силой 320 кА/м.

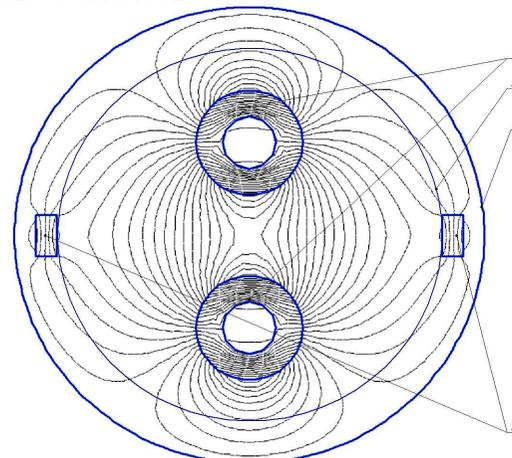


Рис. 2. Схема рабочего поля: 1 – магниты основной группы; 2 – магниты вспомогательной группы; 3 – граница рабочей области; 4 – условная линия нулевого потенциала

На рис. 3. приведены графики зависимости удельного съема материала от времени обработки при магнитно- абразивной галтовке латуни марки Л63 в СОТС, которая содержит бисалкил, полиоксизетилен фосфат калия, моноэтаноламиды синтетических жирных кислот, циклогексанон, бакцид и воду. Магнитное галтование – перспективный и еще недостаточно широко используемый, но перспективный метод финишной обработки.

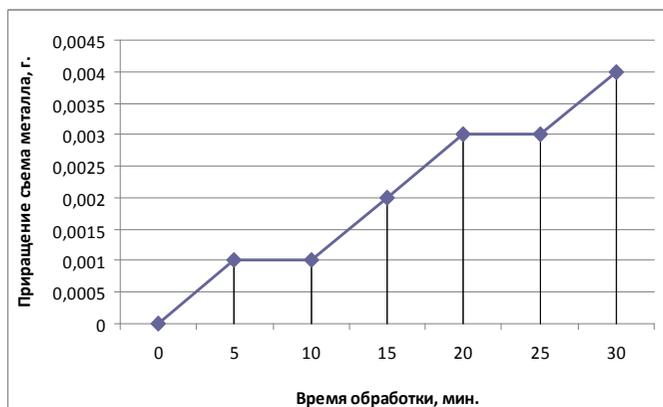


Рис. 3. Зависимость удельного съема материала от времени обработки при магнитно-абразивной галтовке латуни марки Л63

В статье предложено расположение постоянных магнитов относительно рабочего объема и относительно друг друга, повышающее эффективность использования рабочего объема и усиление воздействия потока галтовочного наполнителя на обрабатываемые изделия. Приведены результаты обработки магнитно-абразивной галтовкой латуни марки Л63 в СОТС.

Библиографический список

1. Патент №111795 на полезную модель. Устройство для магнитно-абразивной галтовки / Полетаев В. А., Чернов Л. К. Опубликовано в бюл. №24, 2010
2. Патент РФ №2261268. Смазочно-охлаждающая технологическая среда для обработки цветных металлов./Павлюкова Н. Л., Полетаев В. А., Марков В. В., Опубликовано в бюл. №27, 2005.

И. Е. Вачаев, студент; В. Н. Колосов, к. т. н., доцент

Разработка технологического процесса изготовления корпусной детали с помощью CAD/CAM-системы

В настоящее время основной тенденцией в достижении высокой конкурентоспособности западных и российских предприятий является переход от отдельных замкнутых САПР и их частичного объединения к полной интеграции технической и организационной сфер производства. Такая интеграция связывается с внедрением

модели компьютерно-интегрированного производства (КИП) или в западной версии CIM (Computer Integrated Manufacturing).

Основой КИП являются CAD-системы (автоматизированные системы геометрического моделирования и проектирования изделий), CAPP-системы (системы автоматизированного проектирования технологических процессов), CAM-системы (системы автоматизированной подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ) и собственно сами станки с ЧПУ.

Самостоятельное использование систем CAD, CAM дает экономический эффект. Но он может быть существенно увеличен их интеграцией посредством CAPP. Такая интегрированная система CAD/CAM на информационном уровне поддерживается единой базой данных. В ней хранится информация о структуре и геометрии изделия (как результат проектирования в системе CAD), о технологии изготовления (как результат работы системы CAPP) и управляющие программы для оборудования с ЧПУ (как результат работы системы CAM).

Выпускники направления 151900 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», призванные работать на современных машиностроительных предприятиях, должны в полной мере владеть информационными технологиями, применяемыми при подготовке производства, а также иметь практические навыки подготовки и отладки управляющих программ для станков с ЧПУ. Для этого в учебном процессе должны использоваться учебно-лабораторные комплексы, построенные на основе современных интегрированных систем автоматизированной подготовки производства и станков с ЧПУ.

На кафедре «Технология автоматизированного машиностроения» (ТАМ) ИГЭУ в лаборатории автоматизированного производства (А-165) создан учебно-лабораторный комплекс на базе интегрированной CAD/CAM системы и вертикально-фрезерного станка с ЧПУ модели 6P13Ф3, оснащенный современной системой ЧПУ «Интеграл». Кроме станка с ЧПУ учебно-лабораторный комплекс включает в себя локальную вычислительную сеть на пять рабочих мест, оснащенных системами автоматизированной подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ T-FLEX ЧПУ 3D и T-FLEX Tracer. На кафедре ТАМ в лаборатории автоматизированного проектирования (А-309) на компьютерах установлены также автоматизированные системы геометрического моделирования и проектирования изделий T-FLEX CAD 3D и системы автоматизированного проектирования технологических процессов

«ТехноПро». Все перечисленные системы автоматизированного проектирования взаимосвязаны между собой.

В рамках дипломного проекта автора данных тезисов с помощью автоматизированной системы геометрического моделирования и проектирования изделий разработана трехмерная твердотельная модель комплексной корпусной детали. В среде системы автоматизированного проектирования технологических процессов разработан технологический процесс ее изготовления. А с использованием системы автоматизированной подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ и системы их отладки разработаны управляющие программы по обработке комплексной корпусной детали.

Управляющая программа для вертикально-фрезерной с ЧПУ операции адаптирована под систему числового программного управления «Интеграл» станка 6Р13Ф3. Произведена обработка детали на этой операции.

Т. Г. Гулиев, студент; Т. Ю. Степанова, к. т. н., доцент

Комплексная оценка физико-химических свойств смазочного материала

Поиск оптимальных условий является одной из наиболее распространенных научно-технических задач. Они возникают в тот момент, когда установлена возможность проведения процесса и необходимо найти оптимальные условия его реализации.

Оптимизация процесса смазки цилиндрических редукторов проведена комплексным методом, который основан на использовании одного обобщенного показателя. Обобщенный показатель объединяет показатели качества смазочного материала, имеющие разную размерность, и поэтому их переводили в безразмерные. В качестве безразмерных показателей использовали ранговые показатели и балловые оценки. В случае применения дискретных оценок лучший вариант смазочного материала обозначали рангом $R = m$, а худший $R = 1$, где m – число сравниваемых вариантов смазочного материала. При одинаковых количественных характеристиках сравниваемые варианты смазки имеют одинаковый ранг.

Расчет обобщенного показателя проводили по формуле:

$$H_j = 1 / \sum_{i=1}^n \frac{j_i}{Q_{ji}}, \quad (1)$$

где Q_{ji} – безразмерная величина показателя качества; j_i – коэффициент весомости показателя качества; $j = 1/n$; n – число показателей качества.

Исследуемым объектом является смазочный материал, который характеризуется 4 основными показателями: процентное содержание присадки, кинематическая вязкость, кислотное число, водородный показатель. Все показатели одинаково значимы для удовлетворительной работы цилиндрического редуктора, поэтому коэффициенты весомости будут одинаковы и равны $j = 0,25$ при $n = 4$. Однако дискретные ранговые показатели имеют недостаток – показатели качества, имеющие близкие количественные характеристики, оцениваются отличающимися рангами. Использование непрерывных ранговых оценок позволяет избежать этого недостатка. Непрерывные ранговые оценки показателей качества смазочного материала, которые находятся в интервале между их максимальным и минимальным значением, рассчитывают для позитивных показателей по формуле

$$R_i = R_{\max} \frac{P_i - P_{\min}}{P_{\max} - P_{\min}}, \quad (2)$$

а для негативных показателей по формуле

$$R_i = R_{\max} \frac{P_{\max} - P_i}{P_{\max} - P_{\min}}, \quad (3)$$

где P_{\max} и P_{\min} – минимальная и максимальная величина показателей качества; R_{\max} – максимальный ранг; P_i – величина показателя качества для i -того варианта масла [1, 2].

В табл. 1 приведены показатели качества смазочного материала – масла И-50 с опытной присадкой, соответствующие требованиям ГОСТ на индустриальные масла [2].

Таблица 1. Показатели качества смазочного материала

№ п/п	Содержание присадки в масле И-50, %	Кинематическая вязкость, сСт при 40 °С	Кислотное число, мг КОН/г масла	Водородный показатель
1	0	92.0	0.0370	7.0
2	1	95.5	0.0375	7.2
3	2	97.2	0.0379	7.2
4	3	100.2	0.0384	7.4
5	4	104.0	0.0391	7.4
6	5	110.6	0.0421	7.5
Норматив ГОСТ 20799		90–110	0.0500	6.0–8.0

В табл. 2 приведены ранговые оценки подсчета комплексных показателей 6 вариантов смазочного материала.

Таблица 2. Ранговые оценки смазочного материала

№ СМ	Дискретные ранговые показатели				Н	Непрерывные ранговые оценки				Н'
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄		R ₁ '	R ₂ '	R ₃ '	R ₄ '	
1	1	1	6	1	1.26	1.0	1.00	1.00	1.0	1.00
2	2	2	5	2	2.35	1.2	1.16	1.00	2.4	1.46
3	3	3	5	2	2.92	2.4	1.73	1.05	2.4	1.92
4	4	4	5	4	4.21	3.6	2.74	1.70	4.8	3.19
5	5	5	4	4	4.44	4.8	4.00	2.47	4.8	3.75
6	6	6	3	6	4.81	6.0	6.00	6.00	6.0	5.99

Примечание. R₁ – содержание присадки, R₂ – кинематическая вязкость, R₃ – кислотное число, R₄ – водородный показатель.

По обобщенному комплексному показателю (Н'), найденному по формуле (1), можно сделать вывод, что вариант №6 индустриального масла с 5 % присадки является оптимальным. Вариант №5 с 4 % присадки имеет удовлетворительный показатель по сравнению с 1–4. Поэтому 5 и 6 варианты смазочного материала могут быть рекомендованы для смазки цилиндрических редукторов сушильных агрегатов по показателям качества индустриального масла И-50.

При разработке смазочного материала для механических передач комплексный показатель – среднее гармоническое – позволяет выбрать оптимальный вариант рецептуры смазочного материала.

Библиографический список

1. Заславский Ю. С. Трибология смазочных материалов / Ю. С. Заславский. М.: Химия, 1991.
2. Эминов Е. А. Смазка оборудования промышленных предприятий / Е. А. Эминов, А. А. Козарева. М.: Химия, 1987.

Т. В. Волкова, студент; М. Ю. Волкова, к. т. н., доцент

Исследование влияния негативных воздействий окружающей среды на бронзовые скульптуры

За пределами жилых помещений концентрация вредных веществ увеличивается и усугубляется зональными природно-климатическими условиями (перепады температур, осадки и т. д.). В связи с этими факторами, изделия из металла с течением времени претерпевают различные изменения. В силу различных обстоятельств ухудшаются свойства металла, утрачиваются отдельные элементы конструкций, меняется внешний облик изделий. В результате взаимодействия с внешней средой резко ухуд-

шается качество поверхности, которая в значительной степени определяет эстетическую ценность промышленного изделия

Предметом исследований стали скульптуры из бронзы на территории Ивановского областного художественного музея (рис. 1).



Рис. 1. Скульптуры на территории музея

Проблема была обозначена сотрудниками музея в связи с тем, что на поверхности скульптур после зимнего периода были замечены признаки «бронзовой болезни», а также следы ржавчины, что не свойственно бронзовым сплавам (рис. 2, 3).

Задачей исследований стало выяснение сущности явлений коррозии, разработка мер, препятствующих или замедляющих её протекание.

Известно, что любой коррозионный процесс является многостадийным. Таким образом, защита металлических изделий от коррозии определяется агрессивностью условий их эксплуатации.

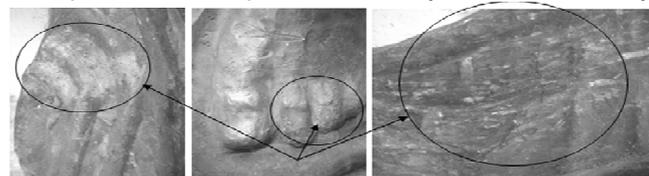


Рис. 2. Наличие «Бронзовой болезни» на скульптурах

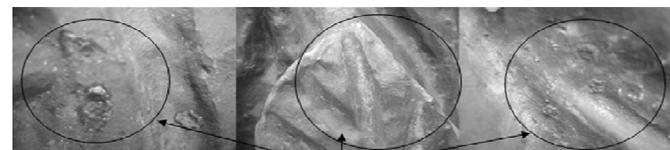


Рис. 3. Наличие ржавчины на скульптурах

Скорость коррозии металлов и металлических покрытий в атмосферных условиях определяется комплексным воздействием ряда факторов: наличием на поверхности фазовых и адсорбционных пленок влаги; загрязненностью воздуха коррозионно-агрессивными веществами; изменением температуры воздуха и металла; образованием продуктов коррозии и т. д. В результате исследований были определены причины разрушения бронзовых скульптур:

1. Коррозия металла, вызванная наличием в сплаве железа, как легирующего компонента.
2. Накопление солей внутри объекта и последующая «бронзовая болезнь».
3. Механические разрушения, вызванные ростом кристаллов железа.
4. Механические разрушения, вызванные замерзанием воды в продуктах коррозии.

Все сформировавшиеся атмосферные патины содержат оксиды и соли. Окись меди – черного цвета, закись – красно-коричневого. Зеленые, синие и голубые цвета и оттенки патине придают содержащиеся в бронзе, медные минералы. Практически все оксиды и соли меди, образующие патину, нерастворимы в воде, негигроскопичны.

Исследованиями подтверждено, что главной причиной можно считать атмосферную коррозию. Как фактор усугубляющий ситуацию можно определить местоположение объектов исследований – музей расположен рядом с одной из самых загазованных улиц города, в непосредственной близости с автодорогой.

А. С. Хахалин, студент; Н. В. Третьякова, к. т. н., доцент

Возможности электрохимической обработки при обработке деталей

Электрохимическая обработка (ЭХО) – способ обработки электропроводящих материалов, заключающийся в изменении формы, размеров и шероховатости поверхности заготовки вследствие анодного растворения ее материала в электролите под действием электрического тока.

При прохождении электрического тока через электролит на поверхности заготовки, включенной в электрическую цепь и являющейся анодом, происходят химические реакции, и поверхност-

ный слой металла превращается в химическое соединение. Продукты электролиза переходят в раствор или удаляются механическим способом. Количество снятого металла пропорционально силе тока и времени обработки.

Область эффективного применения ЭХО определяется технологическими особенностями процесса: производительность способа не зависит от твердости и прочности обрабатываемого материала и в несколько раз превосходит производительность обработки резанием заготовок из высокопрочных твердых сплавов, металлокерамики и сталей в закаленном состоянии; способ позволяет обрабатывать поверхности любой формы; в металле обработанной поверхности отсутствуют остаточные напряжения и наклеп.

При изготовлении деталей используют размерную и отделочную электрохимическую обработку.

Размерная электрохимическая обработка служит для придания заготовке нужной формы и размеров.

Обработка происходит при непрерывном и интенсивном обновлении электролита, прокачиваемого под давлением через межэлектродный промежуток, что позволяет вести формообразование поверхностей с малыми, межэлектродными промежутками. При этом анодное растворение металла на участках с минимальным значением межэлектродного промежутка будет протекать более интенсивно, чем на участках с большими значениями межэлектродного промежутка. В связи с этим на все участки заготовки назначают в зависимости от скорости растворения определенные припуски на обработку.

Электрохимическое объемное копирование Электрод-инструмент, рабочий профиль которого соответствует форме обработанной детали или ее части, перемещается с определенной скоростью к неподвижно установленной заготовке – аноду. По мере растворения металла заготовки и перемещения на соответствующее расстояние электрода-инструмента обрабатываемая поверхность приобретает форму поверхности электрода-инструмента. Существуют технологические схемы электрохимического объемного копирования несколькими одновременно перемещающимися электродами-инструментами. Объемным копированием получают лопатки турбин из жаропрочных и титановых сплавов, рабочие элементы ковочных штампов и пресс-форм из высокопрочных инструментальных сталей, глухие полости, отверстия сложной формы в деталях из труднообрабатываемых металлов и сплавов.

Электрохимическое калибрование характеризуется применением одного или двух неподвижных электродов. В этом случае по мере растворения металла заготовки увеличивается межэлектродный промежуток. Этот вид ЭХО, характеризующийся удалением с обрабатываемых поверхностей заготовок незначительных припусков, применяют для исправления геометрических размеров предварительно выполненных наружных и внутренних поверхностей заготовок. В результате электрохимического калибрования после механической обработки шнеков точность размеров и формы винтовых поверхностей возросла в 3–4 раза.

Электрохимическое прошивание – вид ЭХО, с помощью которого выполняются отверстия и полости постоянного сечения. Электрод-инструмент, поступательно перемещаясь, внедряется в заготовку со скоростью, равной скорости электрохимического растворения металла. Формообразование цилиндрических поверхностей может сопровождаться вращением электрода-инструмента или заготовки. При прошивании цилиндрических отверстий в твердых сплавах в качестве электрода-инструмента применяют токопроводящие алмазные пустотелые инструменты.

При **электрохимическом точении** фасонных поверхностей тел вращения рабочая подача электрода-инструмента осуществляется за счет его перемещения к оси вращения заготовки, при этом обеспечивается формообразование наружных, внутренних и торцовых поверхностей заготовок из труднообрабатываемых металлов, а также тонкостенных деталей. Электрохимическое точение с одновременным вращением заготовки и электрода-инструмента применяют, если необходимо получить обрабатываемый диаметр с погрешностью 0,005–0,02 мм.

Отделочные процессы ЭХО выполняются в необновляемом электролите, при относительно больших межэлектродных промежутках, исчисляемых десятками миллиметров. К этим процессам относятся электрохимическое травление, полирование.

Электрохимическое травление предназначено для удаления с обрабатываемой поверхности оксидных пленок, образующихся при предварительной термической или химической обработке заготовок. В зависимости от толщины оксидной пленки и ее химического состава применяют несколько способов электрохимического травления.

Для удаления тонких оксидных пленок используют анодное травление. Заготовка подключается к положительному полюсу источника питания. В результате электролиза оксидная пленка

высшей валентности (Fe_2O_3) переходит в пленку низшей валентности (FeO), которая, растворяясь в электролите, удаляется с поверхности детали. Для отслоения толстых оксидных пленок применяют катодное травление. В этом случае заготовку подключают к отрицательному полюсу источника питания. При электролизе в местах разрывов оксидной пленки выделяются пузырьки водорода, которые отрывают пленку от основного металла заготовки, очищая ее поверхность.

Электрохимическое полирование применяют для сглаживания микронеровностей на поверхностях деталей, образующихся, например, при механической обработке металлов резанием. Деталь присоединяют к положительному, а инструмент – к отрицательному полюсам источника питания. При подаче напряжения на электроды начинается процесс растворения металла детали, являющейся анодом, главным образом на выступах микронеровностей. В результате избирательного растворения микронеровности сглаживаются, поверхность детали приобретает характерный металлический блеск. После обработки чистота поверхности получается выше исходной на два-три класса.

В связи с появлением в высокотехнологичных отраслях промышленности новых групп высокопрочных и твердых материалов, усложнением формы деталей и ужесточением требований к качеству поверхностного слоя, возникла потребность в новых технологиях электрохимической обработки. Разработаны новые способы биполярной микросекундной ЭХО вибрирующим электродом-инструментом. Особенность этих способов состоит в том, что они осуществляются на сверхмалых межэлектродных зазорах с использованием групп импульсов тока высокой плотности. При их реализации становится достижимым обеспечение малых погрешностей обработки, создание на поверхностях деталей регулярных макро- и микрорельефов в микронном и субмикронном диапазоне, и получение оптически гладких поверхностей.

Т. В. Волкова, студентка; М. Ю. Волкова, к. т. н., доцент

Применение методов консервации при реставрации бронзовых скульптур

В процессе исследований выявлено, что после проведенных консервационных или реставрационных работ не исключена последующая коррозия бронзы.

Перед началом работ скульптуры тщательно промывались водой с неагрессивным пенно-моющим средством. Затем поверхность высушивалась и с предмета при помощи щетинной щетки, скальпеля и наждачной бумаги счищались рыхлые продукты коррозии. Для размягчения отложений использовалась дистиллированная вода и органические растворители (спирт, ацетон). Выявлено, что спирт лучше удаляет следы «бронзовой болезни», а ацетон – следы ржавчины.

При использовании щёточек из латуни и наждачной бумаги, поверхность приобретала блеск. При помощи штихеля, шабера, скальпеля, или просто деревянных заостренных палочек и мягких щёточек (кисточек) расчищались все детали оригинальной поверхности. При работе было отмечено, что при расчистке, не стоит торопиться зачищать всю поверхность скульптуры сразу. Поэтапное проведение исследований дает возможность проследить реакцию отдельных очищенных фрагментов на изменение окружающей среды.

Для предотвращения разрушения поврежденной поверхности ещё влажный объект, обрабатывался раствором спирта (этанол) с дистиллированной водой. По истечении некоторого времени концентрация спирта повышалась до полного вытеснения воды спиртом.

Выявлено, что хорошего результата можно добиться, увеличивая концентрацию спирта маленькими дозами. В процессе работы фрагменты объектов последовательно обрабатывались с помощью губки с целью более качественной обработки поднутрений скульптур различной сложности. В процессе обработки поверхность металла с остатками «бронзовой болезни» начинала пениться, а затем стала приобретать однородную структуру. После обработки и прекращения пенообразования фрагменты протирались сухой мягкой тряпкой. Размягченные остатки «бронзовой болезни» при этом удалялись. Скульптуры оставались обработанными составом на несколько дней.

После высыхания и проветривания обработка повторялась несколько раз до прекращения пенообразования. Сложность заключалась в том, что скульптуры невозможно демонтировать и поместить для проведения работ в помещение. Следовательно, присутствовала зависимость от природных условий. Как дополнительные шаги по направлению сохранения скульптур были приведены в порядок пьедесталы: удалён мусор, мох, трава и т.д. Покрашены антикоррозийной краской металлические элементы крепления скульптур и пьедесталов.

В рамках исследований было выявлено, что для долговременного закрепления применяют парафины, твёрдые воски (Космолойд 80). Смолы и лаки применяют в качестве раствора, воски и парафины – как растворы, так и в виде расплавленной массы. При этом отмечено, что акриловый лак ПБМА показывает себя плохо. Вместо него лучше использовать П (ЕМА/МА), паралоид Б 72.

Известно, что глубина проникновения растворов смол или лаков зависит от их концентрации. Чем больше концентрация, тем больше вязкость и тем самым меньше проникновение в поверхностный слой металлов.

Выявлено, что парафины, в последнее время, мало применяются в консервации. Вместо парафинов используют микрокристалльные тугоплавкие твёрдые воски, например: Космолойд 80. Воски, парафины и смолы практически невозможно полностью удалить из пор, что тоже можно считать недостатком. В рамках исследований было использовано два способа создания искусственной патины:

1) 50 гр. медного купороса и 5 гр. марганцовки на литр нагретые до 70-80° (можно взять меньше).

2) Серная мазь.

Пatina после применения раствора ложится ровная и красивая. Цвет патины от светло-коричневого до темно-коричневого оттенков. Кроме того цвет оказалось легко контролировать.

Обрабатывать фрагменты серной мазью возможно достаточно быстро, но использование серной мази оказалось напрямую связано с температурой воздуха. В жаркий день поверхность скульптур достаточно сильно нагревалась, что позволяло серной мази вступать с ней в химическую реакцию. Очищенные ранее до блеска фрагменты бронзовых скульптур темнели и не всегда сливались по окрасу с общим цветом изделий.

Выявлено, что ввиду особых условий нахождения объектов исследований и невозможности проведения консервативных работ в помещении с использованием электроприборов работа по их сохранению и поддержанию в хорошем состоянии носит длительный характер. При этом все процедуры требуется повторять с сезонной периодичностью. Кроме того, в зимнее время года рекомендовано не допускать длительное нахождение скульптур под снегом с целью предотвращения увеличения очагов коррозии.

В. Ф.Трусов, курсант; А. В. Топоров, В. В. Киселев, Е. А. Топорова

Повышение триботехнических показателей масел применением металлоплакирующих присадок

Техника выходит из строя в основном в результате износа подвижных деталей. Помимо затрат на их ремонт при износе, увеличивается расход топлива, смазочного материала и запасных частей. В автомобилях на преодоление трения расходуется более половины потребляемого ими топлива [1].

Одним из возможных путей снижения износа трущихся поверхностей является улучшения используемых в пожарной технике смазочных материалов, в частности эту проблему можно решить путем разработки металлосодержащих присадок для смазок.

Из множества металлосодержащих соединений, которые способствуют снижению износа, большинство присадок имеют один существенный недостаток. Металлические компоненты данных присадок находятся в масле в виде мелких частиц, которые не способны проходить через системы фильтров, что резко снижает их круг применения, другими словами такие присадки не являются универсальными, они, как правило, имеют узко направленную область применения [2].

Все вышеизложенное предопределило задачи исследований и цель данной работы, которая заключалась в разработке присадок к маслам на основе стеаратов мягких металлов (никеля, олова, меди и кобальта), для эксплуатации в двигателях пожарной техники.

Исследование триботехнических характеристик проводилось с помощью экспериментальной установки – триботехнический маятник [3]. При исследовании износостойкости образца в моторном масле с разработанной присадкой режимы трения были выбраны усредненными, применительно к режимам работы большинства узлов трения машин.

Определение линейного износа проводилось методом «искусственных баз» по заранее нанесенным отпечаткам на твердоме коническим твердосплавным индентором.

Для оценки и сравнения разработанной присадки были исследованы следующие триботехнические характеристики – зависимость коэффициента трения от нагрузки и зависимость интенсивности изнашивания от приложенной нагрузки при фиксированном пробеге. Эти характеристики определяют границы работо-

способности пары трения, стойкость материалов к изнашиванию при различных режимах трения, и как следствие ресурс и срок службы узлов трения [4].

На рис. 1, 2 представлены результаты проведенных испытаний разработанной присадки в моторном масле М20.

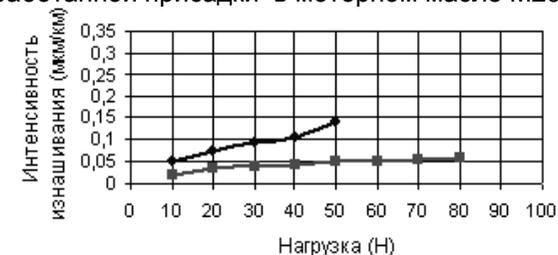


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от нагрузки: ● – моторное масло М-20; ■ – масло моторное М-20 с разработанной присадкой

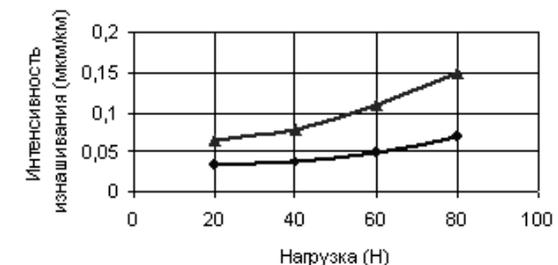


Рис. 2. Зависимость интенсивности изнашивания поверхности трения от нагрузки: ▲ – моторное масло М-20; ● – масло моторное М-20 с разработанной присадкой

Нагрузка при испытаниях повышалась ступенчато до резкого увеличения момента трения, путь трения при смазке маслом с присадками составлял 20 км. Смазочная композиция вводилась в зону трения капельным способом 8–10 капель в минуту. Испытания проводились при скоростях скольжения от 0,5 м/с до 2 м/с.

Анализ зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

- введение присадки в испытуемое масло позволяет в полтора раза увеличить нагрузочную способность и снизить коэффициент трения до двух раз.

- при введении в базовые масла разработанной присадки наблюдается снижение интенсивности износа до 2 раз.

Проведенные эксперименты дали возможность предполагать, что на стальных поверхностях трения образуется пленка мягких металлов. При помощи металлографического микроскопа

с увеличением 600 раз, производилось фотографирование поверхностей трения. Полученные фотографии позволили зафиксировать на поверхности стальных образцов наличие пленки мягких металлов.

Полученные показатели позволяют предполагать, что использование металлоплакирующих присадок позволит добиться положительных результатов, а именно продлить ресурс работы узлов автотранспортной техники МЧС до 2 раз, резко снизить аварийные разрушения узлов, сократить затраты на внеплановые ремонты пожарных автомобилей, экономить горюче-смазочные материалы.

Библиографический список

1. Киселев, В. В. Исследование свойств разработанных присадок на основе солей мягких металлов / В. В. Киселев, В. Г. Мельников // Эффект безызносности и триботехнологии. – 2004. – №1. – С. 16–20.
2. Киселев, В. В. Перспективы использования модернизированных смазочных материалов в пожарной и аварийно-спасательной технике / В. В. Киселев, А. В. Топоров, П. В. Пучков // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2011. – №3. – С. 23–29.
3. Киселев, В. В. Исследование триботехнических характеристик металлосодержащих присадок к маслам, используемым в электрических машинах / В. В. Киселев, В. А. Полетаев // Вестник ИГЭУ. – 2011. – Выпуск 2. – С. 65–67.
4. Киселев, В. В. Повышение надежности пожарной техники применением модернизированных смазочных материалов / В. В. Киселев, А. В. Топоров, П. В. Пучков // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2010. – №3. – С. 24–28.
5. Киселев, В. В. Повышение надежности пожарной техники применением модернизированных смазочных материалов / В. В. Киселев, А. В. Топоров // Пожаровзрывобезопасность. – 2010. – Т. 19. – №2. С. 50–53.

Т. В. Волкова, студентка; М. Ю. Волкова, к. т. н., доцент

Исследование основных принципов и закономерностей стиля классицизм

Известно, что классицизм – (от лат. classicus – образцовый), стиль и направление в литературе и искусстве 17–нач. 19 вв., обратившееся к античному наследию как к норме и идеальному образцу. Стиль классицизм сложился в 17 в. во Франции. В 18 в. классицизм был связан с Просвещением; основываясь на идеях философского рационализма, на представлениях о разумной закономерности мира, о прекрасной облагороженной природе, стремился к выражению большого общественно-социального содержания, возвышенных героических и нравственных идеалов, к строгой организованности логичных, ясных и гармоничных образов.

В основе классицизма лежат идеи рационализма. Художественное произведение, с точки зрения классицизма, должно строиться на основании строгих канонов, тем самым обнаруживая стройность и логичность самого мироздания. Эстетика классицизма придает огромное значение общественно-воспитательной функции искусства. Многие правила и каноны классицизм берет из античного искусства.

Главной чертой классицизма было обращение к формам античного зодчества как к эталону гармонии, простоты, строгости, логической ясности и монументальности. Архитектуре классицизма в целом присуща регулярность планировки и четкость объемной формы. Для классицизма свойственны симметрично-осевые композиции, сдержанность декоративного убранства, регулярная система планировки городов.

В «Истории эстетики» В. Татаркевич формулирует основные принципы искусства Классицизма, ссылаясь на теоретика Итальянского Возрождения Л. Б. Альберти (1404–1472), который, в свою очередь, как он сам утверждал, выдвинул их на основе изучения античного искусства:

1. Красота является объективным качеством, свойственным реальным предметам, а не их переживанию человеком.
2. Красота заключается в порядке, правильном размещении частей и установлении пропорций.
3. Красота воспринимается глазами, но оценивается разумом.
4. Красота является законом в природе, но целью в искусстве. Поэтому искусство способно превосходить ее.
5. Искусство должно обладать рациональной дисциплиной, поскольку оно пользуется наукой.
6. План или рисунок являются наиболее существенными для зрительного искусства.
7. Искусство способно обращаться к важным темам и приспособлять свои формы к соответствующему содержанию.
8. С точки зрения порядка, меры, рациональности и красоты ее творения совершеннее природы и потому могут служить образцами для всех последующих поколений.

В 1956 г. Г. фон Грюнебаум определил четыре составные части «классицизма как направления в культуре»:

1. Прошлая фаза развития культуры признается полной реализацией человеческих возможностей.
2. Эта реализация усваивается как законное наследие или достояние.

3. Допускается, что облик настоящего может быть изменен по образцу прошлого (или чуждого) идеала.

4. Чаяния, характерные для прошлой или же чуждой культуры, принимаются как образцовые и обязательные для настоящего.

Произведения русского классицизма составляют не только важнейшую главу истории русской и европейской архитектуры, но и наше живое художественное наследие. Движение, начавшееся в русской архитектуре примерно с 60-х годов XVIII века, очень быстро проявило тяготение к большому стилю, стремившемуся охватить все отрасли строительной деятельности и утвердить себя как единую систему архитектурных законов.

Нет никакого сомнения в том, что важнейшим фактором развития всей русской архитектуры в эту эпоху явилось строительство Петербурга, новой столицы, русского города нового типа, заложенного в пору великого исторического перелома. Именно на стройке Петербурга созрела и окрепла новая школа русской архитектуры.

Если основой петербургской архитектуры были синтезирующие городские ансамбли, то в Москве классицизм проявил себя, прежде всего в «малом мире», в мире отдельного жилого дома, особняка, городской усадьбы. Здесь основной темой архитектурных исканий был барский дом и участок земли, с ним связанный. В то время как в Петербурге складывается новый организм города и этому процессу в конечном итоге подчинено развитие всех архитектурных форм, в Москве первичной остается тема отдельного дома.

Век классицизма был недолог – всего несколько десятилетий. Тем не менее, он оставил прекрасные образцы художественного творчества.

А. А. Масляева, студентка; В. А. Полетаев, д. т. н., профессор

Использование САПР в технологических процессах изготовления деталей

Благодаря развитию компьютерных технологий современное машиностроение очень сильно изменилось, это касается не только самого оборудования, но и работы технологов. Большое количество прикладных программ значительно сокращает работу по подготовке производства. Как правило, системы автоматизируют

ванного проектирования (САПР) имеют многомодульную структуру. В составе развитых САПР имеются следующие подсистемы.

1. Геометрическое (графическое) ядро. Геометрическое ядро реализует основные операции и процедуры геометрического моделирования.

2. Подсистема двумерной (2D) графики, используемая, прежде всего, для получения чертежной документации.

3. Подсистема 3D твердотельного (объемного) моделирования. Именно в ней реализуются процедуры конструктивной геометрии с использованием базовых элементов формы.

4. Подсистема 3D поверхностного моделирования, используемая для проектирования деталей со сложными поверхностями (лопатки турбин, корпуса самолетов, автомобилей, кораблей и т. п.) и иногда называемая подсистемой промышленного дизайна.

5. Специализированные модули, ориентированные на проектирование изделий определенного типа, например, штампов, деталей из листовых материалов, литых изделий и т. п.

6. Подсистема САМ для проектирования технологических процессов, синтеза программ для оборудования с ЧПУ, моделирования механической обработки и т. п.

7. База данных, включая архивные и справочные подсистемы.

8. Подсистема инженерного анализа, включающая программы типа Ansys и Adams для моделирования изделий на микро- и макроуровнях.

9. Подсистема импорта и экспорта (обмена) данных с поддержкой ряда используемых графических форматов.

10. Подсистема PDM управления данными и проектированием.

В данной работе рассматриваются подсистемы 2D и 3D моделирования и САМ системы, предназначенные для создания программ для станков с ЧПУ различного назначения. Для синтеза трехмерных изображений в САПР преимущественно используют средства таких известных систем, как CATIA, Unigraphics, Inventor, Solidworks и др. Однако кроме них, существуют и применяются графические библиотеки и пакеты компьютерной графики и геометрического моделирования, непосредственно не связанные с проектированием в технике.

К числу графических библиотек, получивших наибольшее распространение, относится библиотека графических процедур OpenGL. В распоряжении ИГЭУ имеются программы компании «ТехноПро» такие как T-Flex CAD 2D, T-Flex CAD 3D SE, T-Flex

ЧПУ, T-Flex/ТехноПро. Подсистема трехмерного твердотельного моделирования T-Flex CAD 3D в САПР T-Flex CAD построена на базе ядра Parasolid. Реализована двухнаправленная ассоциативность, т. е. изменение параметров чертежа автоматически вызывает изменение параметров модели и наоборот.

При проектировании сборок изменение размеров или положения одной детали ведет к корректировке положения других. Модель 3D может быть получена непосредственно по имеющемуся чертежу, или с помощью булевых операций, или путем выталкивания, протягивания, вращения профиля, лофтинга и т. п.

Предусмотрен расчет массо-инерционных параметров. С другой стороны, можно по видам и разрезам трехмерной модели получить чертеж, для чего используется подсистема T-Flex CAD 3D SE. Для параметрического проектирования и оформления конструкторско-технологической документации служит подсистема T-Flex CAD 2D, для управления проектами и документооборотом – подсистема T-Flex DOCs.

В подсистеме технологического проектирования T-Flex/ТехноПро выполняются синтез технологических процессов, расчет технологических размеров, выбор режущего и вспомогательного инструмента, формирование технологической документации, в том числе операционных и маршрутных технологических карт, ведомостей оснастки и материалов, карт контроля.

Подготовка программ для станков с ЧПУ осуществляется в подсистеме T-Flex ЧПУ. Кроме названных основных подсистем в состав T-Flex CAD включен ряд программ для инженерных расчетов деталей, проектирования штампов и пресс-форм.

Основные функции САМ-систем: разработка технологических процессов, синтез управляющих программ для технологического оборудования с ЧПУ, моделирование процессов обработки, в том числе построение траекторий относительного движения инструмента и заготовки в процессе обработки, генерация постпроцессоров для конкретных типов оборудования с ЧПУ, расчет норм времени обработки. Исходными данными для составления программ для станков с ЧПУ являются результаты конструкторского проектирования, поступающие из CAD. Но возможно программирование и при наличии в качестве исходных данных лишь чертежа детали и параметров технологического процесса.

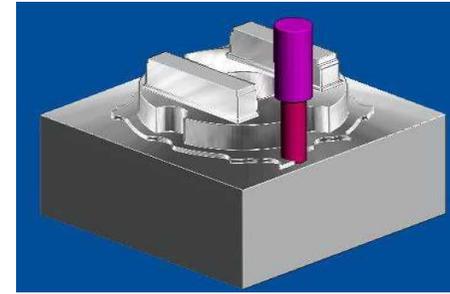


Рис. 1. Использование визуализатора для проверки расчета траектории обработки, проверки зарезов и столкновений

При программировании определяют и кодируют геометрию заготовки, траектории движения подвижных органов станка и параметры обработки. Для этих целей используют специализированные языки, примером которых может служить язык АРТ (Automatically Programmed Tools), относящийся к языкам высокого уровня. В языке АРТ имеются следующие группы команд: идентифицирующие – для указания названия обрабатываемой детали и типа используемого постпроцессора; геометрические – для указания геометрических особенностей детали; управляющие перемещениями режущего инструмента; управляющие режимами обработки (определяющие скорость подачи, скорость вращения шпинделя, включение охлаждения и т. п.); дополнительные (например, выбор инструмента).

А. В. Захарова, студентка; Н. Л. Павлюкова к. т. н., доцент

Требования к качеству изготовления ювелирных изделий

Ювелирное изделие – изделие (кольцо, серьга, браслет, колье, брошь и др.), надевающееся на одежду или непосредственно на тело человека и служащее главным образом (или исключительно) для украшения. Часто для его изготовления используются дорогостоящие материалы (золото, серебро, сплавы из других благородных металлов, драгоценные камни и др.), поэтому ювелирное изделие может обозначать социальный статус человека. Ювелирные изделия из дешёвых материалов называются бижутерией.

Ювелирные изделия – особый потребительский товар. Изделия должны соответствовать требованиям Отраслевого стандарта ОСТ 117-3-002-95 «Изделия ювелирные из драгоценных металлов. Общие технические условия» (реставрационные изделия – в части требований к составным частям и элементам, подлежащим реставрации), а именно:

- изделия серийного производства должны соответствовать техническому описанию;
- изделия единичного производства должны соответствовать рисунку и (или) авторскому образцу;
- в изделиях могут быть незначительные варьирования элементов композиции, росписи или другой художественной отделки при условии сохранения сложности рисунка и высокого качества исполнения;
- материалы, применяемые для изготовления изделий, должны удовлетворять требованиям действующих стандартов и технических условий;
- изделия должны быть заклеены территориальной государственной инспекцией пробирного надзора Российской государственной пробирной палаты;
- в изделиях из драгоценных металлов могут применяться детали из недрагоценных металлов только в том случае, если детали (часть деталей) не могут быть изготовлены из драгоценных металлов по техническим причинам. Разрешается также использование неметаллических частей (вставок, эмали, черни);
- недрагоценные металлы, применяемые для изготовления изделий, находящиеся в непосредственном контакте с кожей и с пищевыми продуктами, должны быть из числа прошедших экспертизу в органах Государственного комитета санитарно-эпидемиологического надзора Российской Федерации;
- парные изделия (серьги, запонки) в случае, если иные требования не предусмотрены техническим описанием, рисунком и (или) авторским образцом, должны быть подобраны по размерам, форме, виду огранки, цвету вставок, а также характеру рисунка вставок;
- поверхности изделий могут быть равномерно шлифованными, полированными – доведенными до блеска, равномерно матовыми и фактурными – неполированными или частично полированными;
- на поверхностях изделий (кроме поверхностей с эмалевыми покрытиями) не должно быть трещин, раковин и заусенцев,

следов инструмента, волнистости, следов клея, пятен и потертостей (кроме натиров на пробирном камне, не являющихся браковочным признаком);

- на не лицевой поверхности допускаются незначительные пористость, волнистость и следы инструмента, не ухудшающие внешний вид изделия;
- эмалевые покрытия изделий должны быть гладкими, блестящими, без сколов, трещин, пропусков, просветов, пятен и видимых под прозрачной эмалью дефектов металла. Кроме того, на эмалевых покрытиях изделий (кроме предметов сервировки стола и украшения интерьера) не должно быть царапин, пузырей (включений), пор, наплывов на канты и перегородки;
- в изделиях с чернью рисунок должен быть заполнен без пропусков и просветов;
- на черневых покрытиях предметов сервировки стола и украшения интерьера не должно быть более пяти рассредоточенных пор;
- сварные и паяные швы в изделиях должны быть плотными, ровными и не иметь прожогов. Со стороны лицевой поверхности изделия швы должны быть близкими по цвету к сплаву, из которого изготовлено изделие;
- штампованный, чеканный, филигранный, резной и гравированный рисунки на поверхности изделий должны иметь четкое изображение;
- в реставрационных изделиях по согласованию с заказчиком допускаются дефекты, не поддающиеся исправлению;
- режущие кромки в изделиях (кроме клинков ножей, игл булавок) не допускаются;
- вставки, предназначенные для применения в изделиях, должны соответствовать требованиям действующих стандартов и технических условий;
- культивированный жемчуг в изделиях не должен иметь механических повреждений поверхности жемчужного слоя, исключая отверстия для закрепки (нанизывания) жемчуга;
- культивированный жемчуг в изделиях с двумя и более жемчужинами должен быть подобран по цвету, размерам и форме в соответствии с техническим описанием, рисунком и (или) авторским образцом;
- вставки должны быть закреплены в оправе неподвижно, если иное не предусмотрено художественным решением, при этом возможность выпадения вставок должна быть исключена;

- при крапановой и корнеровой закрежке крапаны и корнеры должны быть заправлены, а концы их плотно прижаты к поверхности вставок. Крапаны должны быть расположены по периметру вставок симметрично, без перекосов, не перекрывая верхние грани короны и обеспечивая ее максимальный обзор, если иное не предусмотрено техническим описанием, рисунком и (или) авторским образцом;

- при глухой закрежке касты должны обжимать вставки по рундисту плотно, без зазора. При этом, в случае отделки гризантом, рисунок гризанта должен быть четким и без разрывов;

- допускается крепить вставки из жемчуга, кораллов, янтаря, раковин, поделочного цветного камня, а также других непрозрачных материалов на клей в сочетании с глухой закрежкой или на клей и штифты;

- серьги, а также броши, разъемные браслеты и шейные украшения должны быть снабжены замками;

- замки в изделиях должны исключать самопроизвольное их открывание и быть удобными в использовании. Резьба винтового замка должна быть без пропусков и срывов;

- замки браслетов и брошей должны иметь предохранители;

- конструкция деталей крепления серег и брошей должна обеспечивать правильное положение изделий при эксплуатации в соответствии с их назначением и художественным решением;

- булавки в изделиях должны быть упругими, с заостренными концами и не должны выступать за пределы изделия, если иное не предусмотрено техническим описанием, рисунком и (или) авторским образцом;

- шарнирные соединения в изделиях должны обеспечивать подвижность деталей без их перекосов и люфтов;

- цепочки должны обладать гибкостью, не должны иметь деформированных звеньев, звеньев с расслоением металла, а также перевернутых звеньев, изменяющих рисунок цепочки;

- в цепочках, изготовленных из проволоки диаметром менее 0,35 мм, не должно быть более двух спаев между звеньев.

Кроме требований к качеству изготовления при проектировании и создании художественного изделия необходимо обращать внимание на показатели эстетических и эргономических свойств. Например: оригинальность, стилевое соответствие, соответствие моде, композиция изделия, создание максимального удобства при использовании.

Соблюдать требования к качеству ювелирных изделий очень важно, так как несоблюдение их может привести к браку, могут быть нарушены эстетические и эргономические свойства изделия.

Е. В. Дунский, студент; М. Ю. Волкова, к. т. н., доцент

Исследование художественнойковки как древнего способа обработки металла

Художественнаяковка является одним из самых древних способов обработки металла. С ее помощью можно изготавливать предметы, как из цветного, так и из черного металла. Наиболее древней являетсяковка цветного металла. Начиная с эпохи железного века, с 7 века до н. э., кузнечное дело успешно развивалось в древнейших государствах Причерноморья Северного Кавказа и на территории Южного Урала. Известна была кузнечная обработка металла и славянским племенам, населявшим различные регионы нашей страны в 8–9 веках до н. э. Славяне широко применяли художественнуюковку железа для изготовления орудия труда и оружия. В Древнерусском государстве, возникшем в 9 веке н.э. на основе союза славянских племен, мастерство обработки металла ковкой неуклонно развивалось и достигло высокого уровня. Кузнецы Киевской Руси хорошо владели всеми приемами производства и обработки железа. Их мастерство находилось тогда на передовом рубеже развития мировой металлургии вообще. Мастера кузнечного дела изготавливали самые различные орудия труда, оружия, украшения и многие другие кованые изделия. Их труд применялся и при строительстве монастырей, храмов и крепостных стен. Кузнецы выковывали прочные и красивые оконные решетки, мощные петли и накладки для ворот, устанавливали на вершинах куполов кованые кресты.

В начале 17 века в России большую популярность получили такие кованые элементы, как ограды, которые стали окружать уже многочисленные в ту пору дворцово-парковые ансамбли. Наиболее прославились кованые ограды в стиле русского барокко, господствовавшим в архитектуре второй половины 17 века.

Начало 18 века было ознаменовано возникновением нового стиля – классицизма. Соответственно и кованые ограды сразу приобрели новый вид. Они стали более строгими и прямолинейными, что позволяло при их изготовлении уже широко использо-

вать прокат. Кузнецы делали самые разные и нужные предметы домашнего обихода. Но в связи с быстрым развитием тяжелой промышленности в России шло вытеснение ею ручнойковки. Вместе с ручнойковкой постепенно пропадали и неповторимый ее декоративно-художественный элемент, который невозможно передать никакой машиной, ибо это высокое творчество.

В кузнечном ремесле до нынешнего дня, как и в стародавние времена, применяются в основном молот и наковальня, и используются чистые природные стихии – огонь и вода. В качестве сырья употребляется железо в форме прутьев и стержней различного профиля, причем в разные эпохи прутья и стержни имели определенное сечение. Например, в романскую эпоху в кованных изделиях употребляли круглые прутья. В период расцвета готики – четырехгранные прутки, в период Ренессанса – снова круглые, а барочный стиль уже допускал разнообразное сечение. Начиная с романского времени, железо стало повсеместно рассматриваться как функциональный элемент любой конструкции, обеспечивающий ей большую прочность и долговечность. Однако многочисленные сохранившиеся памятники старинного кузнечного ремесла убедительно свидетельствуют о том, что старые мастера наряду с чисто утилитарными целями старались достичь и декоративного эффекта. Стремление придать железу декоративный и внешне привлекательный вид можно наблюдать на протяжении всей истории развития кузнечного дела.

Наиболее интересными с художественной точки зрения кузнечными изделиями, сохранившимися до наших дней, являются металлические дверные обивки средневековых европейских соборов, например западного портала собора Парижской Богоматери (18 в.). Для этих ранних произведений характерно единство функции и декора, которое получалось благодаря умело обработанным прутьям. В качестве украшения широко применяли стилизованные растительные узоры, волюты и фигурные изображения мифологического и символического значения. Заклепки-крепежи с головками в виде розеток или цветков соединяли железные полосы и помимо основной функции играли важную декоративную роль.

В 19 веке, несмотря на бурное развитие научно-технического прогресса и успехи индустриализации кузнечное ремесло и его производное – художественный металл не утратили своих позиций и значения.

В 20 веке на смену декоративному кованому металлу пришли сварные изделия и конструкции, что связано с развитием

прокатного и штамповочного производств, художественнаяковка стала упрощаться.

В наше время ручная художественнаяковка возродилась, народные умельцы бережно хранят и приумножают ее славные традиции. Правильным хорошим тоном становится использование в строительстве кованных элементов и кованных изделий. Трудно представить сегодня возведение объекта претендующего на статус элитного без применения технологииковки.

П. В. Жалнов, курсант; А. В. Топоров,
В. В. Киселев, Е. А. Топорова

Применение магнитоэластомерного материала в комбинированных магнитожидкостных уплотнениях

При герметизации вращающихся валов машин и механизмов встает задача создания надежных и простых уплотнений. Долговечность работы уплотнения оказывает значительное влияние на работоспособность узлов и агрегатов пожарной техники. Так, например, по статистическим данным 90 % [1] случаев аварийных разрушений подшипниковых узлов вызвано неудовлетворительной работой уплотнений. Даже незначительное нарушение герметичности подшипниковых узлов в условиях эксплуатации машин снижает надежность их работы, повышает расход смазочных материалов и потребность в запасных частях, а так же необходимость выполнения внеплановых ремонтных работ и дополнительные трудовые ресурсы.

В пожарных насосах возникает проблема уплотнения перекачиваемой среды. Выход из строя уплотнения перекачиваемой среды помимо снижения рабочих характеристик насоса может повлечь за собой выход из строя всего агрегата.

Таким образом, повышение эксплуатационных параметров уплотнительных устройств, их безотказность и долговечность – один из путей повышения надежности и долговечности пожарной техники.

В пожарной технике применяется целый ряд традиционных уплотнительных устройств. Однако, они не всегда обеспечивают необходимые рабочие характеристики.

Элементы трения торцовых уплотнений чаще всего изготавливаются из силицированного графита – материала стойкого к

истиранию, но не лишенного недостатков, основным из которых является плохая обрабатываемость и хрупкость [1]. Применяемая для изготовления манжетных уплотнений резина не способна работать при высоких контактных нагрузках в отсутствие смазочного материала [1]. Решить проблему смазки рабочих поверхностей уплотнения, изготовленных из эластомерных материалов возможно применением в качестве смазки магнитной жидкости [2, 5]. Для удержания магнитной жидкости в области трения необходимо использовать специальную магнитную систему и источник магнитного поля.

Традиционно в магнитожидкостных уплотнительных устройствах в качестве источника магнитного поля используются постоянные магниты [3].

Однако применение магнитной системы и постоянных магнитов значительно увеличивают габариты конструкции, усложняют и удорожают ее.

Поэтому, актуальным является поиск замены традиционно применяемой магнитной системе и постоянному магниту в качестве средства удержания МЖ в области трения уплотнительного устройства.

Решением данной задачи может стать использование в качестве материала для изготовления рабочего элемента трения магнитоэластомера (рис. 1). Магнитоэластомер представляет собой резину с магнитным наполнителем. Материал легко складывается или сгибается, не теряя магнитных свойств, его легко разрезать.

Применение магнитоэластомера в качестве материала для изготовления рабочего элемента уплотнения позволяет избавиться от громоздкой магнитной системы и значительно упростит технологию изготовления уплотнения. Однако, процесс трения магнитоэластомера как в присутствии традиционных смазочных веществ, так и магнитных жидкостей изучен недостаточно. Поэтому эта задача является актуальной.

При работе контактных уплотнений трение происходит между рабочим элементом изготовленным из эластомерного материала и металлическим контртелом. Таким образом, наибольший интерес и практическую ценность при разработке уплотнения наибольший интерес представляет процесс трения в паре магнитоэластомер – металл.

Для обоснования выбора магнитоэластомерного материала в качестве рабочего элемента уплотнения так же необходимо изучить и проанализировать влияние различных смазочных на

процесс трения. В качестве смазочных материалов при проведении эксперимента целесообразно использовать:

1. Индустриальное масло, применяемое для смазки подобных уплотнений;
2. Магнитную жидкость.

Для оценки эффективности различных смазок необходимо так же изучить процесс трения магнитоэластомера в сухую.

На процесс трения эластомеров значительное влияние оказывают скорость скольжения и контактные усилия в зоне трения [4].

Скорость скольжения и контактное усилие при проведении эксперимента целесообразно выбирать в соответствии с параметрами работы подобных уплотнений [1].

Таким образом, полученные в ходе эксперимента данные в дальнейшем позволят сделать вывод о целесообразности использования магнитоэластомера в качестве рабочего элемента уплотнения и сделать выводы о параметрах его работы.



Рис. 1. Свободная поверхность магнитной жидкости, нанесенной на магнитоэластомерный элемент трения

На рис. 2 представлены зависимости коэффициента трения магнитоэластомерного материала по стали от контактного усилия для скорости скольжения 0,697433 для различных смазок.

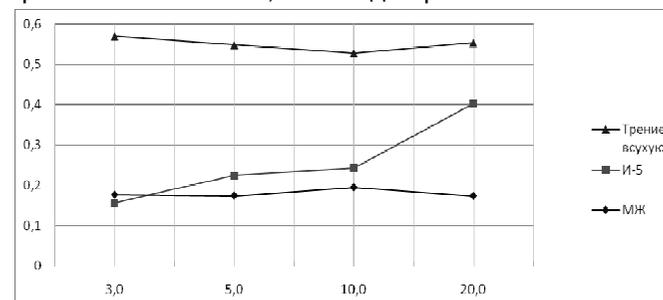


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения магнитоэластомерного материала по стали от нагрузки для различных смазочных материалов

При трении без смазочного материала с увеличением контактного усилия происходит некоторое снижение коэффициента трения. Это обусловлено особенностями трения эластомерного материала по твердым поверхностям. С увеличением контактного усилия значительного увеличения площади касания с выступами микронеровностей поверхности твердого контртела не происходит. Соответственно не происходит и увеличения релаксационной составляющей силы сопротивления. Адгезионная составляющая с достижением определенного значения с дальнейшим увеличением контактного усилия меняется незначительно [4]. В случае трения в присутствии масла И-5 при минимальной скорости скольжения происходит значительное снижение коэффициента трения, по сравнению с трением в сухую. Коэффициент трения уменьшается на 0,38. С ростом контактного усилия коэффициент трения увеличивается, от 0,18 до 0,4. Увеличение коэффициента трения связано с выдавливанием смазочного материала из зоны трения и изменению режимов трения.

В присутствии магнитной жидкости, при минимальных значениях контактного усилия коэффициент трения несколько выше, чем при трении в присутствии масла И-5. С увеличением контактного усилия значительного роста коэффициента трения не происходит. В отличие от масла И-5, магнитная жидкость надежно удерживается в области трения магнитными силами и обеспечивает смазку трущихся поверхностей.

Поэтому, магнитоэластомерный материал может быть использован для изготовления рабочих элементов контактных уплотнений, при условии использования в качестве смазки магнитной жидкости.

Таким образом, можно ожидать, что использование подобных уплотнений в пожарной технике, а в частности в пожарных насосах позволит увеличить общий срок службы на 20 % [2]. Благодаря увеличению промежутков времени между планово-предупредительным ремонтом и регламентными работами, сокращению числа отказов вследствие выхода из строя уплотнений возможно добиться сокращения затрат на 20–30 % [5] эксплуатацию пожарных насосов.

Библиографический список

1. Уплотнения и уплотнительная техника: Справочник / А. А. Кондаков, А. И. Голубев, В. Б. Овандер [и др.]; Под общ. ред. А. И. Голубева, Л. А. Кондакова. – М.: Машиностроение, 1986. 464 с., ил.
2. Топоров, А. В. Разработка комбинированных магнитоэластомерных уплотнений и исследование их трибологических характеристик / А. В. Топоров. Специальность: 05.02.04 –

трение и износ в машинах. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, Иваново. 2000.

3. Магнитные жидкости в машиностроении / Д. В. Орлов, Ю. О. Михалёв, Н. К. Мышкин [и др.]; Под общ. ред. Д. В. Орлова, В. В. Подгоркова. – М.: Машиностроение, 1993. – 272 с.
4. Топоров, А. В. Комбинированное торцовое магнитоэластомерное уплотнение / А. В. Топоров, Е. А. Топорова, П. В. Пучков. Патент на полезную модель RU 88407 U1 от 10.11.2009.
5. Гольдаде, В. А. Магнитоуправляемые материалы для подвижных уплотнений. Трение и износ / В. А. Гольдаде, А. С. Неверов, Л. С. Пинчук. – М., 1981. – 712 с.

М. А. Володовская, студентка; М. Ю. Волкова, к. т. н., доцент

Исследование вопросов изготовления древних серебряных изделий

Серебро является одним из самых древних металлов. Древнейшие серебряные изделия, датированные V тысячелетием до н.э., найдены на территории Ирана и Анатолии. Позднее серебро широко использовалось для чеканки монет. Мягкий, исключительно ковкий металл употреблялся для изготовления художественных изделий. Обладая прекрасными литейными качествами, серебро легко заполняло тончайшие формы при отливке, а способность его воспринимать мельчайшие штрихи гравировки и чеканки обеспечили ему широкое применение для изготовления высокохудожественных произведений. Увлечение художественным серебром достигло апогея у римлян в императорское время. В напряженное для государства время предметы из драгоценных металлов переплавлялись на монеты. Качество поделочного серебра выгодно было поддерживать на уровне монетного, поэтому на предметах ставили клеймо, которое удостоверяло пробу, т.е. количество драгоценного металла в сплаве. Клеймение было введено в разных странах в разное время. В Византии клеймение велось с IX века. Из Византии клеймение распространяется по всей Европе; в XIII в. во Франции и Германии, в 1300 г. – в Англии. Самое раннее московское клеймо относится к середине XVII в. До 1927 г. в нашей стране применялась золотниковая проба, выражавшая содержание благородного металла в золотниках, приходившихся на 1 фунт сплава (в фунте содержится 96 золотников). С 1927 г. установлена метрическая система проб, в которой содержание благородного металла соответствует количеству граммов в одном килограмме сплава. В 1951–1953 гг. Московский монетный двор ставил на реставрированных старых ювелирных вещах букву «Р» в круглом щитке.

Необыкновенно разнообразны способы декоративного украшения серебряных предметов. Технические приемы, приме-

нявшиеся для декоративной отделки в различных странах, в основных чертах были сходными. В разные времена отдавали предпочтение тому или иному способу отделки. Благодаря своей мягкости серебро легко воспринимало гравировку. Гравировке часто сопутствовала чернь. Чеканка считалась одним из самых эффективных приемов обработки серебра. Чеканке часто сопутствует канфаренный (зернистый) матовый фон, который получается обработкой поверхности специальным чеканом с острым концом. Для серебра характерно сочетание матовых и полированных поверхностей и многообразие фактур. Иногда серебряные изделия частично или полностью золотились. Можно выделить группу предметов, изготовленных особой техникой – сканью. Скань часто сопутствовала зерню.

Старинные серебряные предметы, несмотря на то, что они периодически чистились, всегда покрыты темным слоем сернистого серебра, который быстро образуется на серебряном предмете. Иногда этот слой имеет черную блестящую поверхность. В таком случае серебро становится похожим на вороненую сталь; в других случаях поверхность обезображена темными пятнами или полностью вся покрыта тусклым коричневатым слоем. Цвет сернистой пленки зависит от толщины, длительности образования, состава металла и от техники обработки. При наличии общих закономерностей образования сернистой пленки, существует ряд предметов с характерным цветом поверхности. Известно образование сине-черного блестящего слоя, связанного, видимо, с большой нагортованностью металла. На некоторых предметах русской работы образуются бархатистые коричневые пленки, иногда не перерастающие в блестящие черные.

В некоторых случаях цвет потемневшего серебра предпочитают сохранять, несмотря на то, что авторский вид предмета был, несомненно, другим. Сложность отличия авторского замысла от случайного потемнения в результате внешнего воздействия усугубляется недостаточностью знаний стилистических особенностей прикладного искусства отдельных исторических периодов и сложностью анализа тонких химических пленок на серебре. Очевидно, что темные пятна на серебре нельзя оставлять, ссылаясь на то, что предмет старинный. Признаком древности могут быть скорее стиль и технические, приемы, чем потемнение, которое может образоваться за короткое время при загрязненности воздуха или неправильном хранении.

Время накладывает свой отпечаток на предмет. От длительного употребления сглаживается гравированный орнамент,

под темным слоем сернистого серебра скрывается многообразие авторской фактуры. В задачи реставратора входит не только тщательное и правильное проведение технической стороны реставрации, но и обоснованное восстановление авторского вида предмета. Изложенные рассуждения невозможно применить к археологическому серебру, авторская поверхность которого практически всегда покрыта толстой коркой рогового серебра, а сам металл претерпел существенные изменения кристаллического строения. Раскрытая очисткой поверхность археологического серебряного предмета потемнеет естественным образом в обозримое время при соприкосновении с загрязненным воздухом.

Т. А. Носкова, студент; Н. В. Третьякова, к. т. н., доцент

Анализ возможностей электронно-лучевых методов обработки

В настоящее время сформировались электронно-лучевая технология обработки материалов. В этой новой области электронные пучки используются для осуществления технологических процессов. Применение электронно-лучевой технологии возможно в различных целях, от получения субмикроскопических структур в микроэлектронике до выплавки крупных слитков в металлургии.

Электронно-лучевая обработка основана на превращении кинетической энергии направленного пучка электронов в тепловую. Обработка осуществляется в вакууме при наличии специального оборудования: технологической камеры с вакуумной системой и электронной пушки с высоковольтным источником питания. Формирование, фокусировка и управление электронным лучом осуществляется в электронной пушке. Электроны ускоряются до скорости $20 \cdot 10^4$ м/с. Сфокусированный пучок электронов проходит в рабочую камеру и бомбардирует обрабатываемую поверхность. При бомбардировке кинетическая энергия электронов преобразуется в тепловую энергию обрабатываемого вещества. Преобразование происходит при неупругих столкновениях быстрых электронов с электронами атомов вещества и последующем взаимодействии возбужденных атомов с атомной решеткой, вызывающем увеличение температуры вещества. Установка работает в импульсном режиме, что обеспечивает локальный нагрев заготовки. В зоне обработки температура достигает 6000°C , а на

расстоянии 1 мкм от пятна фокусировки не превышает 300 °С. Продолжительность импульсов и интервалы между ними подбирают так, чтобы за один цикл успел нагреться и испариться металл, находящийся под непосредственным воздействием луча. Формируемые в результате обработки поверхности определяются траекторией взаимного перемещения луча и детали. Внутри камеры находится механизм, который придает заготовке вращательное и поступательное движения, а установленная в электронной пушке электромагнитная система развертки позволяет сканировать электронный пучок по заданному контуру.

Вакуум необходим для защиты обрабатываемого металла от действия кислорода и азота воздуха, ускорения дегазации металла при плавлении, удаления некоторых вредных примесей и др.

Электронный луч применяют для разменной обработки твердых труднообрабатываемых материалов, таких как алмаз, вольфрам, титан, кварц, рубин, керамика, кристаллы кремния, германия.

Испарительное осаждение – процесс вакуумного нанесения покрытий в виде тонких пленок, при котором между испарителем и подложкой создается направленный поток пара.

Использование электронных пучков в процессах, связанных с испарением материалов, обусловлено особенностями распределения потоков энергии при нагреве этого материала. При электронно-лучевом испарении испаряемая поверхность непосредственно нагревается бомбардирующими ее электронами; управление электронным пучком во времени и пространстве позволяет управлять потоком энергии в испаряемое вещество и воздействовать на скорость испарения и распределение плотности потоков пара.

Установка для электронно-лучевого испарения состоит из технологической камеры с системой откачки, тигля с испаряемым материалом, электронной пушки, заслонки для пара и подложки с приспособлениями для её крепления, а иногда – нагрева.

Нанесение покрытий из сплавов требует обеспечения одинакового соотношения компонентов сплава, как по всей поверхности подложки, так и по толщине слоя. Слои из сплавов напыляют двумя методами: многотигельного или однотогельного испарения. При многотигельном испарении компоненты испаряются порознь, каждый из своего тигля, а конденсируются на подложке совместно. При однотогельном испарении поток пара создается и конденсируется, имея тот состав, который требуется для покрытия.

Испарение соединений сопровождается частичной или полной их диссоциацией, и получить из таких соединений простым испарением тонкие пленки заданного состава невозможно. Однако для ряда соединений, таких, как хлориды, сульфиды, селениды, а также полимеров, благодаря малой степени диссоциации или вследствие рекомбинации компонентов при конденсации, возможность теоретического напыления существует.

Электронно-лучевая плавка является удобным способом получения слитков тугоплавких и химически высокоактивных металлов. Используются такие особенности электронно-лучевой плавки как высокая удельная поверхностная мощность в рабочем пятне пучка и наличие вакуума, препятствующего поглощению газов в ходе плавки. Областью применения электронно-лучевого перепада является производство особо чистых сталей и выплавка слитков и фасонных отливок из химически активных и тугоплавких металлов.

Электронно-лучевая плавка может сочетаться с литьем. Для этого необходимым элементом является литейный тигель, в котором материал расплавляют и поддерживают жидким в достаточном количестве. Электронно-лучевая плавка занимает прочные позиции в производстве слитков из ниобия и тантала. В металлургии титана и других высокоактивных и тугоплавких металлов, а также кремния, повышается значение электронно-лучевой плавки как способа переработки возвратных отходов производства.

Электронно-лучевая сварка позволяет получать сварные соединения с отношением глубины шва к его ширине намного выше единицы, что невозможно добиться другими способами сварки плавлением.

При электронно-лучевой сварке кинетическая энергия электронного пучка используется для расплавления жестко ограниченных участков примыкающих друг к другу деталей. Застывая, расплав соединяет детали. При сварке электронным лучом теплота выделяется непосредственно в самом металле, который испаряясь, оттесняет расплав в сторону, противоположную направлению сварки. В материале образуется паровая полость – канал проплавления. Этот эффект называют эффектом глубокого «кинжального» проплавления.

Высокая концентрация теплоты в пятне нагрева позволяет испарять такие материалы, как сапфир, рубин, алмаз. Незначительная ширина шва и нагретой зоны основного металла способствует снижению деформаций сварного соединения. Возможно

изготавливать детали из тугоплавких химически активных металлов и их сплавов (вольфрамовых, циркониевых, молибденовых), а также из алюминиевых и титановых сплавов и высоколегированных сталей. Металлы и сплавы можно сваривать в однородных и разнородных сочетаниях, со значительной разностью толщин, температур плавления и других теплофизических свойств. Минимальная толщина свариваемых заготовок составляет 0,02 мм, максимальная – до 100 мм.

Электронно-лучевую сварку можно использовать для соединения малогабаритных изделий, применяемых в электронике, и крупногабаритных изделий с размерами несколько метров, для сварки в труднодоступных местах, узких щелях, а также для сварки в космосе.

Основными недостатками электронно-лучевой сварки являются: использование камер, ограничивающих размеры соединяемых деталей и наличие рентгеновского излучения.

Освоение электронно-лучевых технологий значительно повышает эффективность современного производства.

А. В. Михайлова, студент; М. Ю. Волкова, к. т. н., доцент

Исследование коррозии изделий из серебра и сплавов на основе серебра

Разрушения, вызванные коррозией металла, в технике напрямую связаны с потерей функциональности той или иной части устройства или всей системы. Помимо этого, во многих случаях коррозия приводит к ухудшению эстетических качеств объекта. Если говорить об изделиях из старинного серебра, то разрушения, вызванные коррозией, приводят главным образом к потере информации, поскольку важным носителем информации у находки является ее оригинальная поверхность. Для того чтобы выбрать метод расчистки и уменьшить риск потери этой оригинальной поверхности, а также приостановить дальнейшую коррозию находки, необходимо знать и понимать те процессы, которые происходят в металле. Находясь в неблагоприятных условиях, этот металл всегда стремится принять свою первичную форму: серебро корродирует.

Природные серебряные руды часто содержат серу (аргентит, прустит, аргентярозит); это свидетельствует, что серебро легко вступает с ней в реакцию. Так, на воздухе серебро образует

очень тонкую невидимую пленку оксида. Но в связи с тем, что в воздухе, кроме кислорода и азота, почти всегда содержатся соединения серы (влияние индустрии, извержений вулканов и т. д.), светлая поверхность предмета преобразуется в темные (от светло-серого до черного) соединения.

В комнатных условиях сульфидная патина образуется достаточно медленно и в какой-то степени пассивизирует поверхность металла. Но при высокой влажности этот процесс может развиваться очень быстро и приводить к образованию рыхлой патины, содержащей сульфида. Предмет, начищенный до блеска и не покрытый защитным слоем, может со временем потемнеть, соприкасаясь с различными материалами или находясь с ними рядом. Кроме соединений серы, на сохранность объекта сильно влияет хлор. Он содержится в воздухе, в водопроводной воде, в некоторых полимерных альбомах для монет, а также в человеческом поте. Практически всегда предметы состоят не из чистого серебра, а из его сплава. Коррозия в этом случае протекает по-другому. Компоненты сплава оказывают большое влияние на сохранность предмета. Иногда они продлевают жизнь предмета, а в некоторых случаях могут значительно ее сократить. В сплаве разрушается, как правило, более «слабый» металл. Например, если в сплаве присутствует медь, то она реагирует первой.

Серебро со временем становится хрупким вследствие интеркристаллической коррозии. При этом поверхность корродированного предмета из серебра состоит как бы из маленьких крупинок. Это кристаллы сплава, образовавшиеся при остывании расплавленной массы. Так как температура плавления у различных компонентов разная, то и кристаллизация компонентов в сплаве происходит на разных стадиях охлаждения. Это можно представить так: при понижении температуры на поверхности каждой крупинки сначала застывает и концентрируется медь, а серебро застывает позже и концентрируется внутри самой крупинки. Границы крупинок обогащены менее благородными металлами и примесями. Интеркристаллическая коррозия протекает именно по границам этих крупинок, в результате чего теряется связь между ними. Такая коррозия может заходить очень глубоко, и на первый взгляд она не видна. Крупинки металла связаны друг с другом тонкой невидимой пленкой, состоящей из продуктов коррозии. Опуская такой предмет в какой-либо чистящий раствор, мы значительно нарушаем эту связь кристаллов. В особенности пагубно на межкристаллической связи сказывается раствор аммиака или сода с аммиаком.

Контактная коррозия возникает, если два различных металла соприкасаются друг с другом. Этот процесс хорошо заметен на бронзовых находках, имеющих серебрение. Разрушение серебра в этом случае происходит механически и вызвано увеличенным объемом продуктов коррозии меди по сравнению с первоначальным металлом. Часто эти продукты покрывают всю поверхность серебрения и находятся как под ним, так и над ним. К расчистке таких предметов нужно подходить очень осторожно. Погружать такую находку в чистящий раствор не рекомендуется, а ее механическая расчистка без предварительного закрепления связана с риском потери серебрения.

Еще один частый вид разрушений – так называемая транскристаллическая коррозия. Наблюдается она, как правило, у кованых и штампованных объектов (монет, колец, фибул и т. п.), а также у литых предметов, если отливка происходила неравномерно. Коррозия протекает сначала по самым «слабым» местам структуры металла. Так, при штамповке монеты, если материал недостаточно пластичен, в кристаллической решетке металла происходит сдвиг. В том месте, где он произошел, структура металла нарушается. Именно здесь и будет быстрее всего развиваться транскристаллическая коррозия.

В таких случаях можно наблюдать отслаивание металла. При расчистке подобных очагов нельзя сильно нажимать на них шабером или тереть их кисточками и щетками. Перед расчисткой такие места желательно закрепить.

М. Н. Коськина, студентка; Е. В. Киселева, ассистент

Новые инструментальные решения

В наше время появилось множество новых видов режущих инструментов. Большое внимание уделяется разработке и внедрению новых видов твердых сплавов с износостойкими покрытиями, геометрическим параметрам инструмента, а также вопросам качества, надежности и долговечности режущего инструмента.

Специалисты постоянно ведут в испытательных лабораториях исследования новых инструментов, проводят сравнительный анализ с инструментами-аналогами предыдущих поколений. Это позволяет эффективно развивать инструментальное производство и обоснованно определять тенденции дальнейшего его развития.

Так, например, компания HANITA создает конструкции режущих инструментов общего и специального назначения, занявших общепризнанные позиции и применяемые в известнейших производствах мира. Номенклатура выпускаемых ими концевых фрез включает более 2000 типоразмеров инструмента диаметром от 0,3 мм до 50 мм [1]. Такое разнообразие фрез позволяет потребителю выбрать инструмент, обеспечивающий наиболее эффективную обработку изделия. Значительное внимание уделяет разработке и внедрению новых технологий. В настоящее время существует ряд инновационных решений, объединяющих по функциональному назначению инструменты, специально спроектированные для решения различных сложных технологических задач. Характерной особенностью разработанных концевых фрез является наличие торцевой поперечной режущей кромки, что позволяет осуществлять осевое врезание, существенно расширяющее технологические возможности инструмента (рис.1, а) [2].

Современное многоцелевое оборудование в условиях автоматизированного производства работает с высокими скоростями резания (от 80 до 300 м/мин), при частоте вращения от 1500 до 10000 об/мин. Для таких режимов работы используют специальные режущие инструменты.

Одна из таких групп инструментов – фрезы для высокоскоростной обработки. Традиционно под высокоскоростной обработкой подразумевается фрезерование на больших скоростях резания при небольшом снимаемом припуске. Однако важна, в первую очередь, не обработка на высоких скоростях, а обработка с максимальной производительностью. Это явилось причиной создания инструментов, обеспечивающих обработку с максимальной эффективностью, которая подразумевает работу не только на высоких скоростях, но и высоких подачах при оптимальном размере снимаемого припуска, т. е. – металлоемкую, высокопроизводительную обработку различных материалов и, в первую очередь, закаленных (рис.1, б) [2].

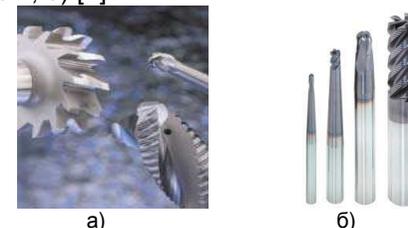


Рис. 1. Современные металлорежущие инструменты: а – концевые фрезы с торцевой поперечной режущей кромкой, б – фрезы для высокоскоростной обработки

Областями применения такого инструмента являются аэрокосмическая и автомобильная отрасли, а также предприятия, где производится обработка штампов и пресс-форм, из которых исключают операции электроэрозионной обработки.

Еще одним из примеров инновационных разработок является гамма монолитных твердосплавных концевых фрез нового поколения для высокоскоростной черновой/чистовой обработок одним и тем же инструментом нержавеющей стали, жаропрочных и титановых сплавов (фрезы VariMill) и обработки закаленных сталей твердостью до 68 HRC (фрезы Vision 21). В инструментах применены новые запатентованные конструктивные решения: нетрадиционная геометрия, параболическая форма сердцевин, неравномерное расположение зубьев, высокий угол подъема винтовой поверхности зубьев и др. (рис. 2) [3].



Рис. 2. Фрезы с новым конструктивным решением

Широко используются современные резьбонарезные резцы и резьбовые фрезы, изготовленные со сменными многогранными пластинами. Применение таких пластин существенно повышает эффективность процесса резьбообработки благодаря многократному использованию корпусов, многократному использованию пластин, хорошему стружколоманию фасонной передней поверхностью пластин, высокой прочности лезвия из-за отсутствия внутренних напряжений, возникающих при пайке пластин у напайных резцов, высокой надежности и долговечности инструмента, вследствие высокой твердости опорной поверхности под режущей пластиной, конструктивно не применимой в напайных резцах [3].

Резьбонарезные фрезы обеспечивают возможность обработки полного профиля резьбы за один проход, сокращение машинного времени, благодаря высоким скоростям резания и подачам, сокращение вспомогательного времени, связанного с периодом удаления благоприятной (легкоудаляемой) короткой стружки.

Таким образом, широкая номенклатура современных инструментов позволяет с учетом конкретных условий производства

осуществить рациональный выбор конструктивных и геометрических параметров требуемого образца инструмента, обеспечив наивысшую результативность его применения.

Библиографический список:

1. <http://www.intehnika.ru>.
2. <http://www.s-t-group.com/catalog/new.php>.
3. <http://www.zao-nir.com/catalog>.

Е. С. Волков, студент; Н. Л. Павлюкова к. т. н., доцент

Скульптура

Скульптура (от лат. *skulpro* – вырезаю, высекаю) – ваяние, пластика, вид изобразительного искусства, произведения которого имеют объемную трехмерную форму и выполняются их твердых или пластичных материалов.

Скульптура проявляет определенную близость к архитектуре: она также имеет дело с пространством и объемом, подчиняется законам тектоники и материальна по своей природе. Но в отличие от архитектуры она не функциональна, а изобразительна. Главными специфическими чертами скульптуры являются телесность, материальность, лаконизм и универсальность.

Скульптура – это искусство преобразования пространства посредством объема.

Различают следующие виды скульптуры:

- 1) мелкая пластика (древние глиптики – резьба на полудрагоценных минералах; резьба по кости; фигурки из разных материалов, амулеты и талисманы; медали и т. д.);
- 2) скульптура малых форм (статуэтки до полуметра жанровой тематики, предназначенные для интерьеров и рассчитанные на камерность восприятия);
- 3) станковая скульптура (статуя, предназначенная для кругового обозрения, близкая к натуре реальных размеров человеческого тела, автономна и не требующая связи с конкретным интерьером);
- 4) монументально-декоративная скульптура (рельефы, фризы на стенах, статуи на фронтонах, атланты и кариатиды, произведения, предназначенные для парков и скверов, декорации фонтанов и т. д.);
- 5) монументальная (надгробия, монументы, памятники).

Наиболее часто встречаются скульптуры, выполненные в следующих жанрах: портретный жанр, анималистический жанр, исторический жанр.

Выразительность скульптуры достигается с помощью особой архитектоники форм, построения основных планов, объемов масс, ритмических отношений, составляющих единое целое. Содержание художественного образа в скульптуре воплощается в материальных объемах и формах, которые занимают трехмерное пространство.

Главное средство выражения в скульптуре – ее объем. Она смотрится со всех сторон: возможен круговой обзор или восприятие с нескольких точек зрения.

Средства изобразительности и выразительности скульптуры – свет и тень. Плоскости и поверхности изваянной фигуры, отражая свет и бросая тени, создают пространственную игру форм, эстетически воздействующую на зрителей. Бронзовая скульптура допускает резкое разделение света и тени, проницаемый же для световых лучей мрамор позволяет передать тонкую светотеневую игру. Эта особенность мрамора использовалась древними художниками: так, нежный розоватый, чуть-чуть просвечивающий мрамор статуи Венеры Милосской поразительно искусно передает нежность и упругость тела женщины. Классическая скульптура – мраморная скульптура. Именно этот великолепный материал – роскошный внешне и удобный в обработке – использовали художники античности и Возрождения. В начале XX века скульпторы стали высекать свои творения преимущественно из гранита. Современная городская и парковая скульптура чаще всего высечена из гранита или же отлита из металла – в основном бронзы или других стойких к коррозии сплавов. Для русско-советских парков традиционны деревянные скульптуры. Простейший способ получения отливок скульптур – это художественное литье скульптур по моделям в земляные формы. Модель скульптуры может быть изготовлена практически из любого материала – пластилина, гипса (наиболее приемлемые и удобные материалы), из дерева, пластмассы, металла, воска, парафина. Моделью может служить и сама скульптура; если нужно сделать такую же (восстановить ее первоначальный вид). Почти вся скульптура нового времени (за исключением фарфора и майолики) делается однотонной, ровно окрашенной (тонированный гипс, патинированная бронза), или имеет естественный цвет материала, из которого она выполнена (мрамор, дерево, гранит). Встречается и раскрашенная скульптура.

Скульптура как вид искусства имеет большую художественную и историческую ценность. Пластическая выразительность скульптуры передает красоту движения и тела и способна оказывать сильное эмоциональное влияние на человека.

А. Ю. Худокормова, студентка; Н. Л. Павлюкова, к. т. н., доцент

Ковка в городах ивановской области

Ковка – это высокотемпературная обработка различных металлов, нагретых до ковочной температуры. Для каждого металла существует ковочная температура, зависящая от физических и химических свойств.

Таблица 1. Температура начала и концаковки различных видов стали

Марка стали	Температура началаковки, °С	Температура концаковки (максимальная–минимальная), °С	Температура пережога, °С
Ст0, Ст1, Ст2, Ст3	1300	800–700	1470
Ст20, Ст25	1280	830–720	1400
Ст15Х, Ст20Х, Ст15ХА	1250	850–760	1300
Ст10Г2, Ст30Г2	1220	870–750	1300
У7, У8, У7А, У8А	1125	850–750	1220
У9, У10, У11, У12, У13	1100	850–750	1180
Р9, Р18	1200	920–900	1180

Ковка всегда была популярна для украшения интерьера и экстерьера. В интерьере популярны кованые люстры, рамы для зеркал, стулья столики, подсвечники. В экстерьере ковка широко используется для украшения балконов, веранд, беседок, козырьков, оконных решеток, ограждений, ворот.

В ходе нашей работы были проанализированы кованые изделия, которые находятся на улицах городов Ивановской области, таких как Шуя, Фурманов, Приволжск, Кинешма. Чаще всего кованые изделия в выше перечисленных городах представлены в виде кованых беседок и балконов как, например, в Кинешме, в виде козырьков и кованых оград, как в Приволжске. В виде кованых лавочек и элементов украшений зданий, как в Фурманове. Наиболее часто ковка встречается на улицах города Шуя. В Шую кованые изделия наиболее интересны и разнообразны. На улицах города можно увидеть кованые ворота, вывески, арки, фонари и ограды. Иногда на улицах городов встречаются кованые ограждения церквей, козырьки, балконы и решетки старинных зданий конца 19 века и начала 20 века.

Большинство кованных изделий, которые сейчас можно увидеть на улицах городов Ивановской области являются современными и все чаще выполнены не с помощью ручнойковки, а машиннойковкой.

А. А. Косоурова студентка; Е. В. Киселева, ассистент

Современные металлорежущие инструменты

Общеизвестно, что технологии в наше время стремительно совершенствуются, и уже стало реальностью применение даже нанотехнологий в производстве таких технических средств, какими являются металлорежущие инструменты. Но это не означает, что конечный пункт программы изучения возможностей дальнейшего развития инструментальной отрасли уже достигнут. Работа продолжается, и не так далеко то время, когда резать сталь можно будет так же легко, как фольгу.

Все металлорежущие инструменты подразделяются на две большие группы: ручной инструмент и станочный инструмент. К ручным инструментам относятся, в том числе и те, которые мы привыкли применять для домашних нужд, например, ножовка по металлу, ножницы по металлу, кусачки. Станочные металлорежущие инструменты – это резцы, фрезы различной конструкции и назначения, плашки, метчики для нарезания резьбы и многие другие тому подобные инструменты и приспособления [1].

Чтобы повысить эксплуатационные качества инструментальных сталей, применяемых для изготовления металлорежущего инструмента, на его режущие кромки наносят специальное напыление из материалов, имеющих повышенную твердость, например, алмаз. Кроме того, для напыления используют такие металлы, как вольфрам, молибден и другие, не уступающие им по износостойкости.

Сегодня для изготовления металлорежущего инструмента в большинстве случаев применяются специальные инструментальные стали с добавлением в определенных пропорциях легирующих элементов. Эти стали обладают повышенной прочностью и износостойкостью, что необходимо для любого металлорежущего инструмента. Вследствие этого материал инструмента должен быть таким, чтобы: инструмент не разрушался под действием возникающих нагрузок; в процессе работы инструмент не имел значительных остаточных деформаций; в процессе эксплуатации поверхность инструмента не изменялась как можно дольше и бы-

ла износо- и коррозионностойкой. Поэтому основные требования к материалам для режущего инструмента следующие: высокая конструкционная прочность; твердость, достаточная для обеспечения процесса (не менее 60HRC); теплостойкость; износостойкость; технологичность (необходимая для изготовления инструментов сложной формы); экономичность (минимальное содержание дефицитных и дорогостоящих легирующих добавок).

Так как повышение износостойкости ограничивается химическим составом или термической обработкой, предпринимаются попытки повысить стойкость инструмента изменением поверхностного слоя. Сегодня хорошо показали себя твердое хромирование, азотирование и цементирование. Применяется также нанесение на поверхность инструмента карбида и нитрида титана. При этом износостойкость режущих инструментов возрастает в 4 раза. Эксперименты по влиянию легирующих элементов на износостойкость показали, что наиболее сильно влияет на ее увеличение ванадий [2].

Применяемые в современном производстве минералокерамические твердые материалы используются для полустойкой и чистой обработки стали и цветных сплавов. Они состоят в основном из окиси алюминия с небольшим количеством окиси магния, так называемая смешанная черная керамика (ВЗ, ВОК-60, ВОК-63). Недостаток этих материалов – повышенная хрупкость. Для повышения их прочности применяют плакирование – покрытие защитными пленками. На основе плакирования созданы металллокерамические композиции – кермесы (керамика с металлической связкой), которая обеспечивает более высокую производительность при чистовой обработке. Более высокая прочность наблюдается у безоксидной керамики (силинит $P(Si_3N_4)$).

Широкое применение находят инструменты из искусственных алмазов. Они используются при тонком точении (без последующего шлифования), широко применяются для обработки закаленных сталей, цветных сплавов. Для режущей части инструментов используют поликристаллы на основе синтетических алмазов типа баллас (марка АСБ) и карбонада (АСПК), а также кубического нитрида бора типа 01 (эльбор), 02 (бельбор), 05 (генсанит), поликристаллических алмазов типа СВ и СВС. Успешно применяют новый синтетический материал – кубический нитрид титана (КНТ-16).

Алмаз как инструментальный материал получил в последние годы широкое применение в машиностроении.

В настоящее время выпускается большое количество разнообразного инструмента с использованием алмазов: шлифовальные круги, инструменты для правки шлифовальных кругов из электрокорунда и карбида кремния, пасты и порошки для доводочных и притирочных операций. Значительные по размерам кристаллы алмазов применяются для изготовления алмазных резцов, фрез, сверл и других режущих инструментов. Область применения алмазного инструмента с каждым годом все более расширяется.

Наряду с совершенствованием способов получения синтетических алмазов ведутся исследования по разработке других искусственных сверхтвердых материалов для изготовления режущих инструментов. Одним из таких материалов является кубический нитрид бора (КНБ) – эльбор или боразон, который имеет кристаллическую решетку, аналогичную решетке алмаза, и состоит из двух элементов – бора и азота. Синтезируется боразон в виде кристаллов размером до 600 мкм. Он не имеет природного двойника. Боразон имеет твердость, близкую к твердости алмаза, такую же прочность и большую теплостойкость и не теряет режущих свойств при нагреве до 1500–1600 °С. Он рекомендуется для изготовления абразивных инструментов, предназначенных для шлифования труднообрабатываемых сталей, особенно быстрорежущих сталей нормальной и повышенной производительности.

В заключение целесообразно отметить, что каждый материал для режущего инструмента имеет свои достоинства и недостатки, которые необходимо учитывать при выборе режущего инструмента.

Библиографический список

1. Прокопович, А. Е. Закономерности технического прогресса в технологии механической обработки / А. Е. Прокопович. – М.: Машиностроение, 1991. – 47 с.
2. <http://www.zao-nir.com/catalog>.

Н. В. Иванова, студентка; А. М. Шурыгин, к. т. н., доцент

Применение метода пространства состояний для моделирования приводных устройств технологического оборудования

В настоящее время в качестве основного средства автоматизации машиностроительных производств широко применяются электроприводы с двигателями постоянного и переменного тока.

Многие современные электроприводы являются достаточно сложными объектами, представляющими собой совокупности устройств непрерывного и дискретного действия.

Использование в составе электроприводов элементов с различными принципами действия обуславливает многообразие подходов к моделированию. Разработаны и успешно применяются на практике универсальные системы моделирования, ориентированные на исследование характеристик широкого класса динамических объектов, такие как Mathcad, Matlab и др. Однако большинство таких программных комплексов основано на использовании методов численного интегрирования, применение которых для исследования рассматриваемых электроприводов не позволяет получить высокое быстродействие программной модели при обеспечении достаточной точности расчета. Поэтому моделирование электроприводов предлагается выполнять на основе применения численно-аналитического метода пространства состояний, позволяющего рассчитать значения переменных в дискретные моменты времени, соответствующие моментам переключения отдельных блоков электропривода. Данный метод исключает промежуточные вычисления без потери точности расчета.

Устройства непрерывного действия описываются системой нелинейных дифференциальных уравнений, которая при соответствующей линеаризации может быть представлена матричным уравнением состояния. При известных значениях компонентов вектора состояния $[x]$ в начальный момент времени $t = t_{нач}$ матричное уравнение состояния позволяет получить выражение для расчета компонентов вектора $[x]$ в произвольный момент времени $t = t_{нач} + \tau$. Состояние устройств дискретного действия определяется в момент времени $t = t_{нач}$ и принимается неизменным в течение приращения времени τ . Значения компонентов вектора состояния $[x]$, полученные в момент времени $t = t_{нач} + \tau$, и значение времени t принимаются начальными для расчета на следующем интервале. Затем процесс вычислений повторяется.

А. С. Онучин студент; И. И. Ведерникова, к. т. н., доцент

Получение износостойких покрытий на деталях из алюминиевых сплавов

Многие детали машин должны быть легкими, но обладать большой удельной прочностью. Поэтому часто применяются де-

тали, изготовленные из алюминиевых сплавов – дюралюминов. Применительно к алюминиевым сплавам возможна реализация следующих методов повышения износостойкости:

- химическое полирование;
- электрохимическое полирование;
- поверхностное анодирование;
- микродуговое оксидирование;
- эматалирование;
- газопламенное напыление;
- никелирование;
- глубокое анодирование;
- комбинированный метод упрочнения (оксидирование и лазерное модифицирование).

Из широко известных методов наилучшими прочностными свойствами обладают изделия с покрытиями газопламенного напыления и микродугового оксидирования. Процесс напыления довольно трудно контролируемый и качество получаемых покрытий в значительной мере зависит от квалификации металлизатора. Шероховатость поверхности и точность взаимного расположения поверхностей после напыления превышает пределы заданных допусков, поэтому детали нуждаются в последующей механической обработке. Высокая твердость напыленного слоя создает дополнительные трудности для обработки.

Профессиональные гальваники по получению защитных покрытий на алюминиевых деталях используют процесс анодирования, т.е. принудительно создают на поверхности оксидную пленку. Если это не делать, то алюминиевые детали без защитного покрытия сами начнут окисляться и получатся рыхлые белые пятна (это и есть естественные оксиды алюминия), которые начнут увеличиваться и, в конечном счете, разрушат деталь. А вот процесс анодирования также является окислительным, но полученные пленки «алюминиевой ржавчины» настолько плотные, что почти не пропускают кислород для дальнейшего распространения процесса окисления. Чтобы исключить слово «почти» прибегают к дополнительным операциям, например, наносят слой краски или лака, или пропитывают окисную пленку специальными составами. И все это для «закрытия» дороги кислороду к детали: чем меньше пористость анодного покрытия с дополнительной защитой, тем дольше прослужит деталь.

Метод микродугового оксидирования берет свое начало от традиционного анодирования, он соответственно относится к

электрохимическому процессу окисления поверхностного слоя в сочетании с электроразрядными явлениями на границе анод - электролит. Микродуговое оксидирование позволяет получать многофункциональные керамикоподобные покрытия с уникальным комплексом свойств, в том числе износостойкие, коррозионно-стойкие, теплостойкие, электроизоляционные и декоративные покрытия, характеризующиеся высокими эксплуатационными показателями. Суть метода заключается в формировании на поверхности детали в условиях воздействия микродуговых разрядов высокопрочного износостойкого покрытия, состоящего преимущественно из $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (корунда) и других оксидов алюминия.

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 микродугового оксидирования являются его экологичность, а также отсутствие необходимости тщательной предварительной подготовки поверхности в начале технологической цепочки и применения холодильного оборудования для получения относительно толстых покрытий.

Пористость покрытий варьируется в интервале 5–50 %, размеры от 0,01 до 10 мкм. Строение пор при толщине покрытия более 5–10 микрон сложное, разветвленное с множеством ответвлений и замкнутых пространств. Покрытия, не содержащие пор получить невозможно, что обусловлено природой процесса.

Широко известно, что анодные пленки хорошо противостоят механическому и эрозионному износу, имеют прочную связь с основным металлом, обладают высокой коррозионной стойкостью и электроизоляционными свойствами. Анодированием можно получать на алюминии слои с различными заранее заданными свойствами. Можно получать твердые и мягкие защитные слои, безпористые, пористые, эластичные, хрупкие. Различные свойства получают при варьировании составом электролита и режимами электролиза.

Поверхность анодной пленки пористая, что снижает её износостойкость. При воздействии лазером происходит передача теплоты в глубину металла. В результате алюминий, выплавляясь, поднимается вверх по капиллярам и заливает их, что приво-

дит к получению беспористой, прочной и износостойкой поверхности детали.

Структура основного материала не имеет определенного текстурного характера. Включения всех структурных компонентов распределены равномерно. Основная матрица сплава – светло-серое поле с включениями отдельных пятен темного поля. Светло-серое поле представляет собой α -фазу твердого раствора меди и магния в алюминии – основной фазы закаленного состояния. Повышенная травимость серых участков фазы обусловлена началом выделения сегрегаций меди и магния, получивших название зон Гинье-Престона. Светлые участки являются слабо легированной α -фазой, вследствие чего она травится хуже, чем серая. Темная фаза – эвтектика, представляющая собой фазовую смесь α -фазы твердого раствора и интерметаллидных фаз – S (Al_2CuMg) и θ ($CuAl_2$).

При воздействии лазерного излучения интенсивностью ниже 30 кВт/см^2 видимых изменений на поверхности не наблюдается. Внешние изменения начинаются при q свыше 30 кВт/см^2 , поверхность становится матовой и плохо рассеивает свет. На некоторых участках поверхности темный цвет покрытия изменяется на белый, плотность и толщина покрытия уменьшаются. Это свидетельствует о начале термодеструкции покрытия. При q свыше 100 кВт/см^2 на поверхности образуется зона оплавления. Она имеет форму эллипсоидного кратера размерами $3 \times 5 \text{ мм}$ с углублением по середине и натеками расплавленного металла по краям. Явно видны закалочные трещины.

Структура в зоне оплавления является типичной для сплавов, закаленных из расплавленного состояния при лазерной обработке. Она представляет собой мелкие ячейки светлого поля, очерченные темным полем размером несколько микрометров. Степень травимости различных макроучастков расплава различна, что свидетельствует о химической неоднородности легированного слоя. Форма макроучастков указывает на конвективный характер перемешивания расплава. Фазовый состав зоны лазерного воздействия – ячейки светлого поля – α -фаза, на границах ячеек – квазиэвтектика.

Наличие зоны с повышенными механическими свойствами покрытия показало, что при обработке поверхности лазерным излучением требуемой интенсивности можно достичь упрочнения оксидного покрытия. Оптимальным режимом упрочняющей ла-

зерной обработки является $10 \div 15 \text{ кВт/см}^2$. При этом максимальное увеличение микротвердости достигает 700 HV .

Причинами повышения микротвердости при лазерной обработке являются, по всей видимости, изменения во внутреннем строении оксидного слоя за счет высокоскоростной закалки поверхности.

Н. В. Шашков, студент; Е. В. Березина, д. т. н., профессор

Возможность моделирования физических и технологических процессов в пакете COMSOL MULTIPHYSICS

Применение компьютеров в научных исследованиях является необходимым условием изучения сложных систем. Традиционная методология взаимосвязи теории и эксперимента должна быть дополнена принципами компьютерного моделирования. Эта новая эффективная процедура дает возможность целостного изучения поведения наиболее сложных систем как естественных, так и создаваемых для проверки теоретических гипотез.

Моделирование как познавательный приём неотделимо от развития знания. Практически во всех науках о природе, живой и неживой, об обществе, построение и использование моделей является мощным орудием познания. Реальные объекты и процессы бывают столь многогранны и сложны, что лучшим способом их изучения часто является построение модели, отображающей какую-то грань реальности и потому многократно более простой, чем эта реальность, и исследование вначале этой модели.

Одной из программ нацеленных на моделирование физических процессов – пакет COMSOL Multiphysics, преемник FEMLAB, который являлся пакетом расширения (Toolbox) MATLAB. Из-за этого версии FEMLAB до 3.0 вообще не могли работать без среды MATLAB. Начиная с версии 3.0, COMSOL Multiphysics стал независимым программным пакетом, управляющимся непосредственно от операционной системы, что существенно ускорило процесс выполнения вычислительных алгоритмов. Расчет не требует глубокого знания математической физики и метода конечных элементов. Это возможно благодаря встроенным физическим режимам, где коэффициенты PDE задаются в виде понятных физических свойств и условий, таких как: теплопроводность, теплоемкость, коэффициент теплоотдачи, объемная мощность и т. п. в

зависимости от выбранного физического раздела. Преобразование этих параметров в коэффициенты математических уравнений происходит автоматически.

Взаимодействие с программой возможно стандартным способом – через графический интерфейс пользователя (GUI), либо программированием с помощью скриптов на языке COMSOL Script или языке MATLAB.

В COMSOL Multiphysics реализована клиент-серверная архитектура. Клиент и сервер графического интерфейса пользователя COMSOL Multiphysics полностью написаны на языке JAVA. При работе клиента процедуры COMSOL Multiphysics вызываются с сервера через TCP/IP подключение. При работе в режиме MATLAB-программирования действует этот же клиент-серверный механизм.

COMSOL Multiphysics – мощная среда, позволяющая решать множество различных инженерных и научных задач, основанных на дифференциальных уравнениях в частных производных. Данный пакет позволяет моделировать «мультифизические» модели, то есть основанные не только на одном уравнении в частных производных, описывающем само явление, но и для расчета связанных с ним физических явлений. Расчет не требует глубокого знания математической физики и метода конечных элементов.

С помощью COMSOL Multiphysics можно решать такие прикладные задачи как:

- моделирование движения жидкости, описываемого уравнением Навье-Стокса;
- описывать электрические и магнитные свойства смазочного материала;
- совершать расчет потока тепла;
- наглядно рассмотреть диффузию в жидкостях и газах;
- позволяет моделировать тепловое излучение потока несжимаемой жидкости;
- моделирование процесса граничного трения.

М. Н. Корсаков, аспирант; Е. В. Березина, д. т. н., профессор,
В. А. Годлевский, д. т. н., профессор, В. А. Сандлер, преподаватель
Д. С. Фомичев, преподаватель

Поляризационный трибометр для исследования оптических и трибологических характеристик смазочных материалов

Поляризационная микроскопия является наиболее распространенным методом исследования фазового состояния соединений, в том числе мезоморфных структур. Она позволяет наблюдать эффекты объемного структурирования и в растворах. Это дает возможность использовать данную методику и для оценки фазового состояния исследуемых смазочных материалах (СМ). Наличие двулучепреломляющих текстур в объеме СМ позволяет предполагать повышенную склонность к самоорганизации граничного смазочного слоя на поверхности.

Для исследований использовался созданный нами прибор, предназначенный для исследования трибологических и оптических характеристик мезогенных смазочных материалов при помощи поляризационного эффекта (рис. 1).

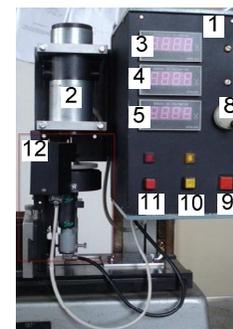


Рис. 1. Общий вид трибометра поляризационного:

- 1 – центральная лицевая панель; 2 – двигатель; 3 – семисегментовый индикатор фототока; 4 – семисегментовый индикатор момента трения; 5 – семисегментовый индикатор скорости вращения вала двигателя; 6 – ручка корректировки нуля для фототока; 7 – ручка корректировки нуля для момента трения; 8 – ручка выставления скорости вращения вала двигателя; 9 – общее включение выключение электропитания установки; 10 – включение выключение двигателя; 11 – включение выключение лазера; 12 – оптическая система

Принцип его действия основан на взаимном вращательном перемещении плоскопараллельных оптических окон с заданным

зазором, в котором находятся испытываемые образцы. Оптические окна имитируют пару трения. В процессе испытания регистрируется момент трения, фототок, появляющийся в анизотропной среде и скорость вращения оптических окон. Имеется возможность бесступенчатого регулирования угловой скорости одного из тел трения и регулирования величины зазора в широких пределах с помощью микрометрического винта.

В основе работы механической части прибора заложен закон сохранения полного момента системы

$$M_n = M_o + M_{тр} + Y \frac{d\omega}{dt}, \quad M_n \sim I, \quad (1)$$

где M_n – полный момент системы, M_o – внутренний момент двигателя; $M_{тр}$ – момент трения; $Y \frac{d\omega}{dt}$ – момент инерции; I – фототок.

Оптическая система прибора (рис. 2) регистрирует наличие анизотропной среды в исследуемом образце, который размещен между оптическими окнами 12.1 и 12.2. Луч лазера, проходя через диафрагму, образец и анализатор, попадает на фотоприемник, который регистрирует фототок в анизотропной среде и отображает его на семисегментном индикаторе 3.

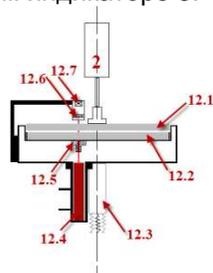


Рис. 2. Основные составляющие оптической системы трибометра: 12.1 – оптическое окно, прикрепленное к валу двигателя; 12.2 – оптическое окно, жестко закрепленное в кожухе; 12.3 – микровинт; 12.4 – лазер KLM-A 635-2-5; 12.5 – диафрагма; 12.6 – поляризатор-анализатор; 12.7 – фотоприемник

Принцип работы прибора заключается в следующем. Подаваемое напряжение на двигатель 2 вращает вал с закрепленным на нем оптическим окном 12.1 с постоянной скоростью вращения в диапазоне от 20 до 100 об/мин. Скорость регулируется рукояткой 8 на лицевой панели 1 прибора. Таким образом, параметр $Y \frac{d\omega}{dt} = \text{const}$ в уравнении (1), т. к. ω – угловая скорость постоянна. При помещении образца между двумя оптическими окнами

появляется момент трения, пропорциональный напряжению, необходимому для поддержания постоянной скорости вращения вала и регистрируемый на панели приборов в относительных единицах.

Результатом регистрации оптических свойств является наличие фототока в фотоприемнике, который отображается на семисегментном индикаторе 3 лицевой панели прибора.

Данное явление возникает в результате наличия анизотропной среды в образце.

Для исследования использовалось вещество Синтаמיד-5 при различных концентрациях в дистиллированной воды (рис. 3, 4). Синтаמיד-5 представляет собой неионогенный ПАВ – смесь полиоксиэтилированных эфиров моноэтаноламидов синтетических жирных кислот фракции C10-C16. Получены зависимости момента трения и светопропускания от скорости вращения при различных концентрациях исследуемого вещества.

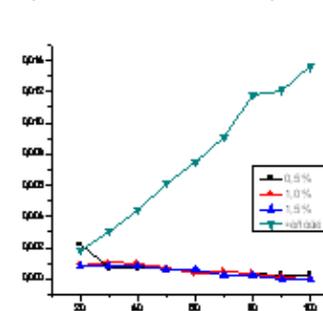


Рис. 3. Зависимость момента силы трения от скорости вращения при исследовании Синтаמיד-5

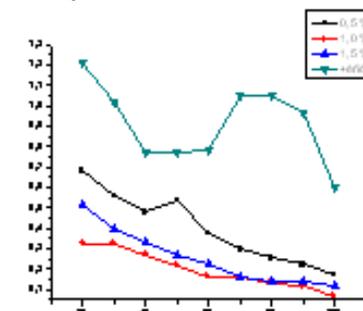


Рис. 4. Изменения светопропускания от скорости вращения при исследовании Синтаמיד-5

Выводы. При исследовании чистого образца Синтаמיד-5 было выявлено, что при скорости вращения пар трения в диапазоне от 70 до 90 об/мин в образце формируется анизотропная среда, этому свидетельствовало увеличение фото тока регистрируемого прибором. Так же в данном диапазоне скорости вращения пар трения наблюдается увеличения момента силы трения в образце, что видно на графике.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 11-08-01102-а.

СЕКЦИЯ 22. ДИНАМИКА, ПРОЧНОСТЬ, ВИБРОДИАГНОСТИКА

С. А. Белухина, студентка, И. А. Белов, ст. преподаватель,
Н. А. Сабанеев, ст. преподаватель;
Л. Б. Маслов, д. ф.-м. н., доцент

Конечно-элементное решение контактных задач теории упругости

Исследование проблем контактного взаимодействия в механике сплошных сред представляет важную задачу науки и техники, от решения которой во многом зависят успехи в машиностроении, строительстве, электронике, неразрушающем контроле изделий и материалов и в других областях человеческой деятельности. Контактные задачи являются центральными в механике деформируемого твердого тела, так как контакт – это основной метод приложения нагрузок к деформируемому телу, кроме того, концентрация напряжений в зоне контакта часто инициирует разрушение материала. Контактные задачи, с которыми приходится сталкиваться в настоящее время, не всегда поддаются аналитическому решению. Очень часто истинная контактная зона не известна. В зависимости от нагрузок, свойств материала, граничных условий и других факторов, поверхности могут входить в контакт друг с другом, а также внезапно из него выходить. В дополнение к этому во многих задачах нужно учитывать трение. Описать все эти факторы в уравнениях при аналитическом расчете практически невозможно. Поэтому все большее развитие получают численные методы.

Значительными возможностями моделирования и решения контактных задач обладает программный комплекс ANSYS (ANSYS Inc.), основанный на методе конечных элементов. Численное решение задачи с учетом контактного взаимодействия рассматривалось на примере грузоподъемных вилок (рис. 1), используемых в виде навесного оборудования дорожно-строительной техники. Габаритные размеры конструкции: 2205x1624x2240 мм.

В процессе решения выполнялись три базовые стадии: создание геометрической модели объекта, пригодной для метода конечных элементов; твердотельное построение качественной конечно-элементной сетки; выбор типа инженерного анализа, за-

дание необходимых характеристик материала, граничных условий и численный анализ задачи.

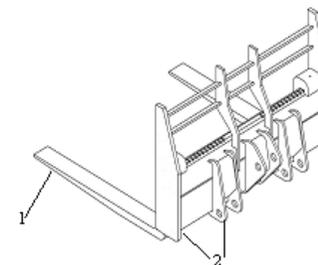


Рис.1. Чертеж модели грузоподъемных вилок: 1 – вилка; 2 – проушины

Геометрическая модель была создана в программе трехмерного моделирования КОМПАС-3D (ЗАО АСКОН), а затем импортирована в вычислительный комплекс ANSYS (ANSYS Inc.). В качестве конечных элементов использовались 8-узловой шестисторонний (гексаэдр) и 10-узловой четырехсторонний (тетраэдр) элементы, имеющие три степени свободы в каждом узле (перемещения в направлении осей X, Y и Z).

Конечно-элементная модель (рис. 2) геометрически разделялась на 2 симметричные части, а на границе раздела задавалось условие симметрии. Это позволило уменьшить количество конечных элементов до 21901 и узлов модели до 30108, а, следовательно, оптимизировать процесс расчета.

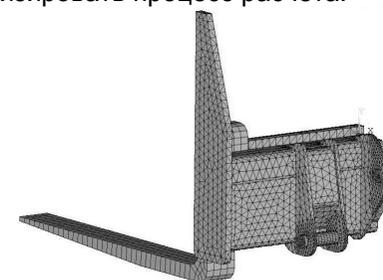


Рис. 2. Конечно-элементная модель исследуемой конструкции

Условия контакта задавались на внутренней стороне вилок и на отверстиях в проушинах. Для этого выделялись взаимодействующие поверхности – контактные пары. В каждой паре выделялись два элемента: собственно контактные (contact) и целевые (target). Они отличаются друг от друга своей ролью в алгоритме решения контактной задачи. Контактные элементы не могут про-

никать сквозь целевые, тогда как целевые могут проникать через контактные. Программный комплекс ANSYS (ANSYS Inc.) позволяет моделировать три вида контакта: «узел-узел», «узел-поверхность» и «поверхность-поверхность». Причем каждый тип модели использует особый набор контактных элементов.

В модели грузоподъемных вилок использовался вид контакта «поверхность-поверхность», где поверхности роликов в проушинах и балок были целевыми, а поверхности отверстий в проушинах и задней стороны вилок – контактными. Для достоверности расчета учитывался коэффициент трения в зоне контакта $f = 0,1$.

Нагрузка в 100 кН (по 50 кН на каждую сторону) равномерно распределялась на подъемную часть вилок, а на боковые поверхности роликов в проушинах накладывалось условие жесткой заделки.

Задача решалась в предположении линейного поведения материала. Параметры принимались следующими: модуль Юнга $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$, предел текучести материала $\sigma_T = 300$ МПа.

В результате расчета получены поля распределения перемещений и напряжений (рис. 3, 4). Максимальное перемещение возникает на конце вилок и составляет 38 мм. Максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу сосредоточены вокруг отверстий в проушинах и составляют 289 МПа. Наибольшие напряжения на вилке локализуются в области перехода от горизонтально к вертикальному участку и не превышают 193 МПа.

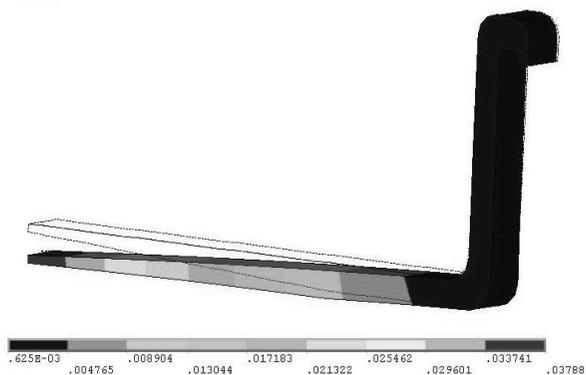


Рис. 3. Наибольшие перемещения точек конструкции (м)

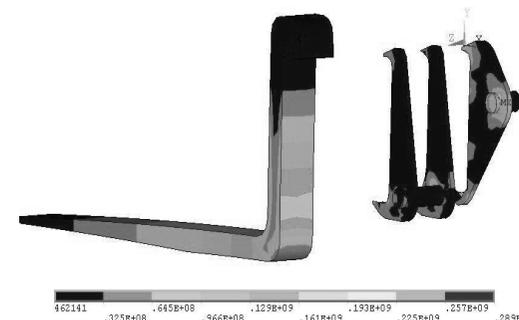


Рис. 4. Распределение эквивалентных напряжений в области контакта (Па)

Полученные результаты численного моделирования имеют хорошее совпадение с экспериментальными данными. Получить высокую точность решения аналитическим путем практически невозможно. Это говорит о целесообразности применения предложенного конечно-элементного алгоритма расчета для прочностной оценки различных видов конструкций.

Библиографический список

1. Александров, В. М. Введение в механику контактных взаимодействий / В. М. Александров, М. И. Чебаков. – Ростов-на-Дону: Изд-во ООО «ЦВВР», 2007. – 114 с.
2. Аргатов, И. И. Основы теории упругого дискретного контакта: Учебное пособие / И. И. Аргатов, Н. Н. Дмитриев. – СПб.: Политехника, 2003. – 233 с.: ил.
3. Чигарев, А. В. ANSYS для инженеров: Справ. пособие / А. В. Чигарев, А. С. Кравчук, А. Ф. Смалюк. – М.: Машиностроение-1, 2004. 512 с.
4. Басов, К. А. ANSYS: справочник пользователя / К. А. Басов. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с.
5. Каплун, А. Б. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Олферьева. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.

В. А. Шейкина, студентка; М. А. Ноздрин, к. т. н., доцент

Математическое моделирование контактного взаимодействия авиационной шины и жесткого покрытия

Современная авиационная шина представляет собой сложную высокотехнологическую структуру, предназначенную для работы с огромными нагрузками и скоростями при минимально возможных размерах и весе (рис. 1). Несмотря на это шины являются одним из наиболее недооцененным и наименее понимаемым элементом самолета. В реальности это многоэлементный компонент, состоящий из трех основных материалов: металл, резина и

корд. По весу в авиашине имеется приблизительно 50 % резины, 45 % корда и 5 % металла.

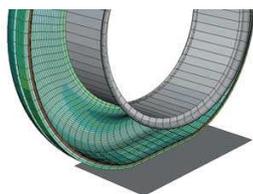


Рис. 1. Модель авиационной шины

В основе расчётов, приводимых в данной работе, лежит механика контактного взаимодействия, которая является одним из ведущих направлений в механике деформируемого твердого тела. Несмотря на то, что получены решения большого количества контактных задач, как

аналитическими методами, так и численными, построение и исследование моделей контактного взаимодействия остается актуальным и сегодня в связи с разработкой новых материалов и технологий, предъявлением новых требований к условиям и срокам эксплуатации узлов трения. Научный интерес к этой проблеме обусловлен многообразием процессов и явлений, протекающих при контактом взаимодействии и трении поверхностей.

При постановке классических контактных задач преимущественно используется модель однородного изотропного тела, рассматривается взаимодействие гладких поверхностей. С развитием математического аппарата, возросшей мощностью вычислительной техники появилась возможность при постановке контактных задач учитывать шероховатость поверхностей, вязкоупругие свойства контактирующих тел и эффекты адгезии.

Повышенный интерес, как с точки зрения фундаментальной науки, так и прикладного значения, представляет изучение контактного взаимодействия неоднородных тел. В этой работе уделяется внимание неоднородностям следующих видов: механическим, геометрическим и триботехническим.

Впервые задачи о контактом взаимодействии неоднородных тел были поставлены в середине прошлого века при расчетах фундаментов и оснований в строительстве, дорожных покрытий, плит на многослойных основаниях. Затем, с появлением покрытий с непрерывно изменяющимися механическими свойствами (многослойных, функционально-градиентных) проблема математического моделирования такого рода материалов снова обострилась. Решению контактных задач при наличии покрытий, а также опре-

делению напряженно-деформированного состояния слоистых тел посвящено большое количество исследований.

Как упоминалось выше, в классической постановке контактной задачи предполагается идеальная гладкость поверхностей. В действительности поверхности твердых тел шероховаты и представляют собой систему выступов и впадин. Шероховатость вносит изменения в характер контактного взаимодействия, что подтверждено экспериментальными исследованиями Н. Б. Демкина, К. Кендала и Д. Табора и других авторов [1].

К геометрическим неоднородностям относится естественная или специально полученная микрогеометрия поверхности. Естественная микрогеометрия обычно называется шероховатостью поверхности, а специально полученная - микрорельефом. При контактом взаимодействии геометрически неоднородных поверхностей имеет место дискретность контакта. Она вносит неоднородность в распределение контактных и внутренних напряжений, приводит к цикличности нагружения при скользящем контакте и другим явлениям. Для объяснения разрушения поверхностных слоев материала и управления этим процессом необходимо развивать модели контактного взаимодействия шероховатых тел и тел с регулярным микрорельефом.

Многие явления, имеющие место при фрикционном взаимодействии тел, не могут быть объяснены с помощью модели идеально упругого тела. Как показывают результаты теоретических исследований, учет вязкоупругих свойств материала ведет к асимметрии в распределении контактных давлений, изменению размеров и смещению площадки контакта, к зависимости этих характеристик от скорости перемещения тел. Не менее важным аспектом изучения контакта вязкоупругих тел является возможность оценки потерь энергии при трении и коэффициента трения.

Обычно выделяют два механизма, вносящих вклад в диссипацию энергии при трении: адгезионный и деформационный. Деформационная составляющая силы трения связана с потерями энергии при деформировании поверхностных слоев материала.

Для шероховатых тел большой интерес представляет изучение влияния дискретности контакта на величину силы трения при их скольжении по вязкоупругому материалу. Трехмерная постановка задачи обладает рядом преимуществ, в частности, возможностью отследить изменение формы площадки контакта и оценить сближение тел при различных скоростях скольжения и нагрузках.

Таким образом, построено значительное количество моделей контактного взаимодействия упругих тел с шероховатыми поверхностями. Однако для материалов, обладающих вязкоупругими свойствами, влияние параметров микрогеометрии на контактные характеристики изучено недостаточно. Исследование контактного взаимодействия авиационной шины с дорожным покрытием даст возможность, в частности, оценить влияние параметров микрогеометрии поверхности на потери энергии при трении.

Актуальность темы, рассматриваемой в данной работе, связана со значительным распространением исследуемого явления в авиации и заключается в необходимости разработки рекомендаций по совершенствованию расчётов в рассматриваемой области. Целью работы является анализ контактных характеристик и их изменения при решении контактной задачи с учетом геометрических и механических параметров неоднородности взаимодействующих тел.

Задачи исследования:

- провести анализ влияния остаточных напряжений на напряжено-деформированное состояние при контактном взаимодействии;

- провести анализ взаимного влияния пятен контакта на контактные характеристики и деформационную составляющую коэффициента трения при скольжении вязкоупругого полупространства по геометрически неоднородной поверхности с микро-рельефом.

В основу расчётов положена математическая модель для исследования эффекта взаимного влияния неровностей при контакте вязкоупругого тела и шероховатого основания [2]. Дискретность контакта возникает из-за неполного восстановления поверхности в свободных зонах между неровностями вследствие реологических свойств материала. Предложенный подход базируется на решении пространственной периодической контактной задачи с описанием свойств авиационной шины в виде одномерной модели стандартного вязкоупругого тела (обобщенная модель Кельвина).

Проведенный анализ эффекта взаимного влияния для различного уровня нагрузок и скоростей скольжения показал, что контактные характеристики и деформационная составляющая коэффициента трения существенно зависят от расстояния между неровностями. Деформационная составляющая коэффициента трения уменьшается с увеличением плотности контакта. Установлено, что при высоком значении скорости скольжения и малом

расстоянии между неровностями пятна контакта имеют форму эллипса. Значение относительного внедрения с ростом плотности контакта увеличивается.

Результаты настоящего исследования могут применяться для оценки коэффициента трения резин при скольжении вдоль поверхности с регулярной шероховатостью и наличии граничной смазки. Они также могут быть применены для моделирования износа дорожного покрытия при контакте с авиационными шинами. В процессе износа микро- и макрорельеф дорожного полотна меняется, что приводит к изменению коэффициента сцепления. Поддержание оптимального коэффициента сцепления в течение длительного времени и прогнозирование его снижения обеспечивает необходимую безопасность движения авиатранспорта.

Библиографический список

1. Демкин, Н. Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н. Б. Темкин, Рыжов Э. В.. М.: Машиностроение. 1981. 244 с.
2. Ноздрин, М. А. Расчет деформационной составляющей силы трения при скольжении тела по вязкоупругому основанию / М. А. Ноздрин, Ю. Ю. Маховская, Б. В. Шептунов // Вестник ИГЭУ. – 2009. – №3. – С. 48–50.

Е. В. Сапунова, студентка; А. Б. Колобов, к. т. н., доцент

Разработка алгоритмов диагностирования дефектов роторных машин

Работа посвящена усовершенствованию системы вибромониторинга, разработанной в ГОУВПО ИГЭУ и реализующей технологию «off-line», для оценки технического состояния промышленных роторных машин. Требуется разработать диагностический алгоритм определения распространенных дефектов, возникающих при эксплуатации, роторных машин по параметрам вибрации. Поставленная задача требует расширения и дополнения диагностической функции программной системы «TechCard+», а также апробации всех используемых моделей, закладываемых в алгоритмы диагностики.

Вибромониторинг технического состояния – это информационно-аналитический процесс для выработки управленческих решений, направленных на предотвращение неблагоприятного изменения технического состояния объекта, основанный на анализе изменения вибрационных параметров объекта.

Вибромониторинг реализует следующие функции:

– наблюдение за состоянием, измерение и анализ вибрационных параметров объекта;

– аналитические оценки текущего технического состояния объекта, в том числе с постановкой диагноза дефекта и прогнозирование его изменения;

– подготовка вариантов управленческих решений.

Реализация вибромониторинга производится системой вибромониторинга, под которой понимается:

1) технические средства измерения вибрационных параметров;

2) программные средства ведения базы данных, аналитической текущей оценки и прогнозирования технического состояния;

3) людские ресурсы, необходимые для реализации технологии измерения, ввода данных и анализа информации.

Программные средства включают в себя как сервисные программы, например, драйверы связи с коллектором-сборщиком, загрузчики маршрута, так и программы первичной обработки информации, ведения и организации баз данных, программы вычисления информативных диагностических признаков и процедур распознавания состояний, программы вычисления характеристик и анализа вибросигналов.

Наиболее распространенным и доступным методом диагностики дефектов является прямой спектральный анализ вибросигнала в выделенной полосе частот, определяемой рабочими параметрами роторной машины. В работе приведены и классифицированы отличительные признаки спектров вибрации для распространенных эксплуатационных дефектов:

- различные виды дисбаланса роторов;
- различные варианты расцентровки составных роторов;
- дефекты жестких и полужестких муфт сопряжения валов;
- дефекты фундаментов и опорных рам;
- развитые дефекты подшипников качения.

Сформирована база опорных спектров («маски») перечисленных дефектов и бездефектного состояния («эталон») для отдельных конструктивных исполнений распространенных как в общей, так и коммунальной энергетике роторных объектов: центробежные вентиляторы, насосы и компрессоры.

Разработан алгоритм поиска дефектов на основе распределения уровней вибрации по точкам измерения, поскольку отдельные виды дефектов распознаются по характерным признакам распределения. Формирование «маски» распределения вибрации по точкам измерения производится программно на основе накоп-

ленной статистической базы данных по каждому типу оборудования. При этом «маска» формируется, а в дальнейшем корректируется, по последнему измерению. «Маска» корректируется путем усреднения. Параллельно выявляются информативные контрольные точки путем подсчета дисперсии в каждой точке контроля в трех направлениях измерения (вертикальное, горизонтальное и осевое)

$$D_{ig} = \frac{\sum_{q=1}^M (v_{igz} - \dot{v}_{gz})^2}{M-1},$$

где \dot{v}_{gz} – среднее значение СКЗ виброскорости; v_{igz} – СКЗ виброскорости, для определенного вида оборудования, где $q = 1, \dots, M$ и верифицированного технического состояния $z = 1, \dots, T$; D_{ig} – дисперсия в каждой точке контроля для верифицированного технического состояния.

Средняя дисперсия

$$D_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n D_{ig}}{n}.$$

Условие выбора информативной контрольной точки – дисперсия в точке контроля D_{ig} , должна быть меньше или равна половине величины средней дисперсии D_{cp}

$$D_{ig} \leq \frac{D_{cp}}{2}.$$

Разработаны алгоритмы диагностики по сформированным «маскам», основанные на правилах распознавания по минимальным метрическим расстояниям. Метрический метод основан на количественном расчете меры близости между значениями вибрации диагностируемого объекта и значениями вибрации «маски» определенного вида технического состояния.

Использованы два способа оценки меры близости по расстояниям:

- до «маски» характеризующей определенное техническое состояние;
- до отдельных векторов вибрационного состояния, составляющих область технического состояния.

В качестве мер расстояния использованы:

- эвклидово расстояние

$$L(V_{j_{m+1}}^t, V_z) = \sqrt{\sum_1^n (V_{j_{m+1}}^t, V_z)^2};$$

– квадрат расстояния

$$L(V_{j_{m+1}}^t, V_z) = \sum_1^n (V_{j_{m+1}}^t, V_z);$$

– расстояние Хемминга

$$L(V_{j_{m+1}}^t, V_z) = \sum_1^n |V_{j_{m+1}}^t, V_z|.$$

Решающей функцией (правилом постановки диагноза) является: объект относится к тому из видов технического состояния, для которого мера расстояния является минимальной: если $L_{\min}(V_{j_{m+1}}^t, V_z) = \min\{L(V_{j_{m+1}}^t, V_z)\}$, то объект $V_{j_{m+1}}^t$ принадлежит Sq – верифицированное техническое состояние.

Разработан интерфейс режима «Диагностика» для существующей программной платформы «TechCard+». Для диагностики по спектру вибросигнала использован формат измерительной информации, получаемый с помощью ВАТБ «ТИТАН», разработки Проблемной НИЛ вибродиагностики ГОУ ВПО ИГЭУ.

Интерфейс режима «Диагностика» для программы «TechCard+» включает:

– интерфейс «формирование маски состояния», служащий для выбора оборудования, для которого необходимо сформировать маску состояния, по результатам измерений СКЗ вибро скорости и верифицированного технического состояния;

– интерфейсы «диагностика по эталону состояния», служащий для расчета мер расстояний между представленным к диагностированию распределением вибрации по точкам контроля и «масками» распределений при различных видах состояний и дефектов;

– интерфейс «диагностика по текущему спектру», служащий для ввода формализованного формата оборотно-порядкового спектра представляемого ВАТБ «ТИТАН» и расчета вероятности состояния.

Результаты расчетов вероятностей состояния выводятся в информационных окнах программы, например:

– вероятность диагнозов при диагностике по расстоянию до эталона распределений вибрации в контрольных точках;

– вероятность диагнозов по результатам диагностики по расстоянию до эталона и диагностики по текущему спектру.

Выполнена модельная апробация алгоритма, а также разработан интерфейс программы «TechCard+» в режиме «Диагностика».

Для повышения достоверности диагнозов предложен вариант уточнения окончательного диагноза на основе использования метода статистических решений, в частности, классификатора Байеса.

Разработана классификационная матрица Байеса для приведенных выше видов диагностируемых дефектов, а также для агрегированных технических состояний – кластеров, объединенных некоторыми общими признаками проявления в спектрах или распределениях вибрации по контрольным точкам. Создание кластеров является начальным этапом, т. к. наполнение информацией классификационной матрицы затруднено в виду отсутствия представительной статистической информации.

Разработана методика наполнения базы данных и расчета составляющих квалификационной матрицы.

Б. В. Шептунов, аспирант; М. А. Ноздрин, к. т. н., доцент

Контактная задача для системы неровностей и полупространства

Влияние деформационной составляющей силы трения является существенным при трении влажных шероховатых поверхностей [1, 2]

Целью настоящей работы является построение общего решения задачи о скольжении периодической системы неровностей по вязкоупругому полупространству. Для описания вязкоупругих свойств материала используется модель со спектром времен релаксации, которая позволяет более адекватно описать деформационные свойства материала в широком диапазоне скоростей и нагрузок, в отличие от моделей с одним временем релаксации. График зависимости податливости от времени релаксации, использованный при решении задачи, представлен на рис. 1. Для расчетов применялся соответствующий дискретный спектр времен релаксаций и податливостей из 66 членов.

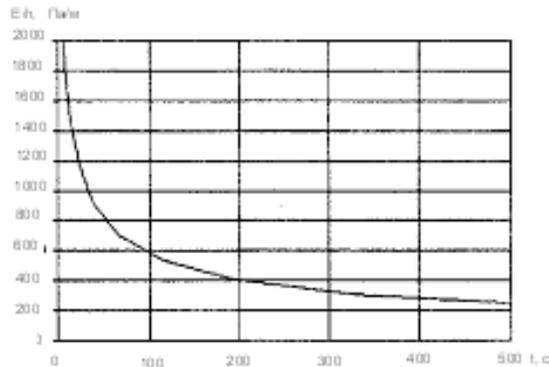


Рис. 1. Спектр времен релаксации материала

Рассмотрен общий случай постановки задачи, при которой, в зависимости от нагрузки и скорости, контакт может быть как полным, так и дискретным.

Геометрия неровностей задается дискретным набором точек, что позволяет варьировать формой выступов, моделирующих контактную поверхность. Для решения задачи применен метод конечного элемента. Квадрат поверхности вязкоупругого основания, геометрически эквивалентный одному периоду, разбит на квадраты, в каждом из которых давление предполагается постоянным [1]. При определении матрицы коэффициентов учтены определяющие соотношения для вязкоупругого основания и условие периодичности системы неровностей.

Контур пятна контакта определяется итерационным методом, при этом ранг матрицы коэффициентов для текущего шага итерации равен числу квадратов, полностью находящихся внутри пятна контакта. За условие сходимости принимается отсутствие областей с отрицательным контактным давлением.

Проведен расчет контактных давлений и исследовано влияние скорости скольжения, нормальной нагрузки и параметров шероховатости поверхности на величину деформационной составляющей коэффициента трения.

Библиографический список

1. Александров, В. М. Пространственная задача о движении гладкого штампа по вязкоупругому полупространству / В. М. Александров, И. Г. Горячева, Е. В. Горская // Доклады Академии наук. – 2010. – Т. 430. – №4. – С. 490–493.
2. Ноздрин, М. А. Расчет деформационной составляющей силы трения при скольжении тела по вязкоупругому основанию / М. А. Ноздрин, Ю. Ю. Маховская, Б. В. Шептунов // Вестник ИГЭУ. – 2009. – №3. – С. 48–50.

А. А. Лебедева, аспирантка; И. А. Белов, соискатель;
Л. Б. Маслов, д. ф.-м. н., доцент

Вибрационные характеристики биомеханических систем в естественных условиях

Работа посвящена разработке электромехатронной системы и изучению динамических характеристик костных структур, образующих биомеханическую систему голени человека в естественных условиях функционирования. Основное внимание уделяется анализу собственных частот затухающих колебаний и форм колебаний большеберцовой кости. Новизна работы заключается в том, что предлагаемый метод позволяет с достаточной точностью оценить вибрационные характеристики твердых тканей опорно-двигательного аппарата человека в естественных условиях *in vivo*, без нарушения целостности системы.

В качестве силового воздействия на объект исследования рассматривается кратковременное ударное воздействие, приводящее к возникновению свободных затухающих колебаний большеберцовой кости. При этом голень испытуемого добровольца свободно опирается в зонах голеностопного и коленного суставов (рис. 1).



Рис. 1. Схема проведения эксперимента по исследованию динамических характеристик большеберцовой кости в естественных условиях

Было создано оригинальное электромехатронное устройство для регистрации отклика системы на ударное воздействие. В структуру разработанной и изготовленной экспериментальной установки входят следующие элементы.

1. Три виброприемника в виде низкочастотных акселерометров на основе МЭМС-микросхемы ADXL322JCP (Analog Device, Inc.), характеристики которой представлены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики микросхемы ADXL322JCP (Analog Device, Inc.)

Диапазон ускорения	Чувствительность	Шум	Частотный диапазон
g^*	мВ/ g^*	мкг/ $\sqrt{Гц}$	Гц
± 5	174	220	0–2500

* $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Датчики устанавливаются на расстоянии от колена ноги человека, примерно равном одной второй, одной четвертой и трем четвертым длины кости. В работе используются три датчика, с помощью которых были построены формы колебаний.

2. Специально спроектированный блок согласования, который необходим для питания акселерометра и коммутации измерительного канала;

3. Цифровой многоканальный самописец «S-Recorder-L» (ADC Lab, Co.). Самописец построен на базе аналого-цифрового преобразователя и включает контроллеры управления и программируемые усилители;

4. Программный продукт, входящий в комплект самописца, обеспечивающий регистрацию, просмотр, хранение и экспорт данных для дальнейшей математической обработки, в ходе которой могут быть получены спектры, АЧХ и ФЧХ вибрационных сигналов.

Были проведены натурные исследования затухающих колебаний большеберцовой кости голени человека (рис. 2). Экспериментальные исследования проводились в лаборатории биомеханики кафедры теоретической и прикладной механики ИГЭУ на группе из шести добровольцев в возрасте 20–21 года. Возмущение колебаний создавалось легким ударом резинового молоточка по кости в направлении перпендикулярном её продольной оси. Для каждого участника эксперимента было получено от 20 до 30 реализаций отклика кости на ударное воздействие.

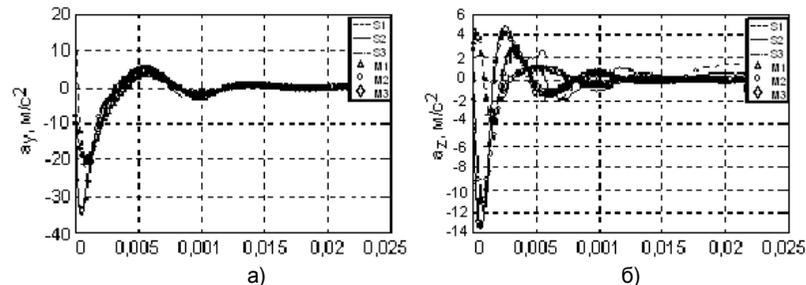


Рис. 2. Пример затухающего временного сигнала с трех датчиков в нормальном (а) и тангенциальном (б) направлениях к прощупываемой части поверхности большеберцовой кости (S1–S3) и результаты аппроксимации сигнала тремя затухающими гармониками (M1–M3)

Согласно виду общего решения задачи о свободных изгибных колебаниях стержня представим функцию, аппроксимирующую измеряемый временной сигнал (ускорение точек объекта), в

виде отрезка ряда по затухающим синусоидам в проекциях на две оси:

$$\ddot{u}_x(z, t) = \sum_{n=1}^m X_n(z) e^{-\varepsilon_n t} \sin(\omega_n t + \Theta_n(z)),$$

$$\ddot{u}_y(z, t) = \sum_{n=1}^m Y_n(z) e^{-\varepsilon_n t} \sin(\omega_n t + \Theta_n(z)),$$

где m – количество гармоник, используемых для аппроксимации экспериментальных данных; X_n , Y_n – функции, соответствующие формам колебаний тела.

Построена целевая функция, описывающая отклонение экспериментальных значений ускорений точек объекта, фиксируемых акселерометрами, от приближенных решений в виде:

$$I = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_s} \sum_{k=1}^{n_t} \left[\left(a_{x_i k}^{ik} - \ddot{u}_x(z_i, t_k) \right)^2 + \left(a_{y_i k}^{ik} - \ddot{u}_y(z_i, t_k) \right)^2 \right],$$

где n_s – количество установленных на объект датчиков, положение которых задано продольной координатой z_i ; n_t – число моментов времени t_k , в которые происходит регистрация сигнала с объекта; $a_{x_i k}^{ik}$, $a_{y_i k}^{ik}$ – компоненты измеряемого сигнала вдоль взаимно перпендикулярных осей x и y , представляющие собой числовые массивы экспериментальных данных.

На основе данного подхода разработан алгоритм и программная реализация в среде Mathcad (Parametric Techn. Co.) минимизации функционала методом наименьших квадратов. Программное обеспечение позволяет определить собственные частоты, параметры диссипации, начальные фазы и формы колебаний упругих тел, для которых модель стержня является удовлетворительным приближением.

Разработанный метод с применением трех датчиков ($n_s = 3$) и трех гармоник ($m = 3$) в аппроксимирующих функциях был протестирован на примере стальной балке длиной один метр прямоугольного сечения размером 6,5×39 мм, шарнирно закрепленной на неподвижной опоре. Экспериментально были обнаружены три первые изгибные формы колебаний балки в плоскости наименьшей жесткости, соответствующие частотам 15,93; 64,20; 142,36 Гц. Результаты измерений и расчетов близки к аналитическим данным 15,84; 63,37; 142,59 Гц при $E = 2,0 \cdot 10^{11}$ Па,

$\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$. Погрешность измерений и обработки результатов составила $0,16 \div 1,3 \%$. Наибольшая ошибка имела место при идентификации второй формы колебаний, что объясняется расположением второго датчика посередине балки, т. е. в узле второй формы колебаний. Тем самым, полезная составляющая сигнала вдоль вертикальной оси в этом случае была незначительна на фоне шумов, что затрудняло его математическую обработку. Значения коэффициента демпфирования составили $0,2 \div 0,8 \%$, что согласуется с известными литературными данными для стали.

Результаты частотного анализа откликов большеберцовой кости на ударное воздействие сведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты исследования вибрационных характеристик большеберцовой кости

Найденные величины	Добр.1	Добр.2	Добр.3	Добр.4	Добр.5	Добр.6	Среднее значение
f1, Гц	149,54	138,40	122,40	136,85	121,69	148,37	136,76
f2, Гц	230,62	224,46	212,11	233,81	237,69	212,75	231,13
f3, Гц	364,35	344,69	279,20	344,03	326,27	353,41	331,10
$\psi 1, \text{рад}$	2,19	5,04	1,09	-2,75	-0,82	1,52	1,05
$\psi 2, \text{рад}$	-2,61	-7,89	-4,17	-3,97	-1,73	-1,58	-3,66
$\psi 3, \text{рад}$	-1,48	-5,13	-1,37	-2,74	-2,24	2,27	-1,78
$\varepsilon 1, \text{с}^{-1}$	363,24	1023,45	558,16	384,21	255,57	378,95	493,93
$\varepsilon 2, \text{с}^{-1}$	1142,65	238,39	281,22	778,40	357,94	323,94	520,43
$\varepsilon 3, \text{с}^{-1}$	1183,42	1089,77	486,08	980,00	614,74	569,90	820,65
$\zeta 1, -$	0,38	0,76	0,55	0,50	0,55	0,39	0,52
$\zeta 2, -$	0,36	0,17	0,22	0,54	0,32	0,24	0,31
$\zeta 3, -$	0,40	0,45	0,25	0,49	0,40	0,26	0,38
$\delta 1, -$	3,28	7,47	4,92	3,52	4,80	2,69	4,45
$\delta 2, -$	3,95	1,08	1,46	4,15	2,66	1,54	2,47
$\delta 3, -$	2,81	3,17	1,69	3,68	2,84	1,69	2,65

После нахождения всех вибрационных характеристик построены формы колебаний большеберцовых костей голени человека.

В результате проведенных исследований найдены одна изгибная форма колебаний в плоскости наименьшей жесткости, которая соответствует частоте 231,13 Гц, а также найдена форма колебаний, соответствующая движению тела почти как твердого на упругих основаниях на частоте 136,76 Гц. Кроме того, на частоте 331,1 Гц найдена форма колебаний, которую очень сложно диагностировать, поскольку влияет очень большая диссипация системы, а также могут сказываться некоторые недостатки эксперимента. Возможно, данная форма колебаний соответствует первой

изгибной форме колебаний, но в другой плоскости, либо это проявляются высшие изгибные формы колебаний в главной плоскости.

Проведенный сравнительный анализ с известными литературными данными подтверждает достоверность полученных результатов.

Библиографический список

1. Cunnigham, J. L. Vibration analysis / In The Physical Measurement of Bone. Ed. Langton C.M., Njeh C.F. – Bristol: Institute of Physics Publishing. – 2003. – P. 511–547.
2. Collier, R.J., Donarski, R. J. Non-invasive method of measuring resonant frequency of a human tibia in-vivo // J. Biomed. Eng. – № 9. – 1987. – P. 321–328.

И. А. Белов, ст. преподаватель

Оценка динамического состояния конструкций по измерениям вибрации

Конструктивные элементы технологических трубопроводов ТЭС и АЭС, летательных аппаратов и других машин часто работают в условиях сложного широкополосного нагружения. Ввиду тяжелых последствий аварий на подобных объектах необходим постоянный мониторинг и оценка их усталостной прочности при реальных эксплуатационных нагрузках.

Экспериментальное исследование динамического напряжённо-деформированного состояния (НДС) конструкций в реальных условиях эксплуатации сопряжено с рядом трудностей. Например, при исследовании НДС конструкций в условиях нормальной температуры и неограниченного доступа возможно непосредственное измерение деформаций или напряжений методами тензометрии, акустоупругости, магнитострикции и т. п. [1]. При высоких температурах (например, 540 °С для трубопроводов острого пара ТЭС и АЭС), затруднённом доступе (аэрокосмические конструкции) или большой протяжённости (магистральные трубопроводы) это невозможно. В существующих экспериментальных методах исследования, построенных на анализе спектров вибрации в большом количестве точек, используются асинхронные измерения. Получая данные о колебаниях множества точек объекта и фазовых сдвигах относительно контрольной точки, исследователь фактически получает функцию распределения динамических перемещений конструкции и, следовательно, может рассчитать возникающие в ней напряжения на основе соотноше-

ний теории упругости. Если же вибрация является нестационарной или в сигналах присутствуют биения с большим периодом, асинхронные измерения вибрации в различных точках труднодоступного или протяжённого объекта приведут к ошибкам. Поэтому при нестационарной вибрации требуется другой подход.

Оценка напряжённо-деформированного состояния конструкций с использованием чистого моделирования требует не только адекватно описывающей объект исследования математической модели, но и точного определения динамических эксплуатационных нагрузок, информация о которых, как правило, недостаточна. Например, в условиях взаимодействия упругих тел с газами или жидкостями источник возмущения распределён по поверхности контакта двух сред причём, как правило, неравномерно. Задача идентификации динамических нагрузок, воздействующих при этом на конструкцию, сама по себе представляет определённые сложности [2]. Кроме того, прямые методы моделирования нестационарных процессов в сложных системах очень требовательны к вычислительным ресурсам.

В связи с необходимостью хотя бы приближённой идентификации поля динамических напряжений и выявления опасных точек конструкции (в которых затем можно провести дополнительные исследования, например, исследование образцов металла) была разработана и апробирована методика расчётно-экспериментальной оценки динамических напряжений на основе математического моделирования и измерения вибрации в ограниченном числе доступных точек объекта.

Предложенная методика идентификации поля динамических напряжений может найти применение для оценки прочности и ресурса вновь проектируемого оборудования, предназначенного для работы в условиях сложного динамического нагружения. В то же время полученные в данной работе результаты могут применяться и в другом направлении, а именно для оценки многоциклового усталостной прочности и прогнозирования остаточного ресурса стареющего оборудования и оборудования выработавшего свой проектный ресурс, т. е. для оценки, так называемой живучести. В условиях низкого уровня финансирования капитального строительства и ремонта эта задача стала особо актуальной в таких отраслях российской промышленности как, например, тепловая и атомная энергетика [3].

В рамках разработанной методики предполагается, что распределённый источник возмущения с неизвестными параметрами действует на механическую систему и приводит к её вибра-

ции в широком диапазоне частот. Исходными данными для построения оценки динамических напряжений выступают, во-первых, спектры виброперемещений, полученные в ходе натурных измерений в нескольких точках конструкции; во-вторых, частотные характеристики (ЧХ) виброперемещений, рассчитанные по математической модели для тех же точек конструкции, при действии тестовой гармонической нагрузки; и, в-третьих, ЧХ механических напряжений, полученные в ходе решения той же гармонической задачи. Оценка проводится по алгоритму, приведённому на блок-схеме (рис. 1).

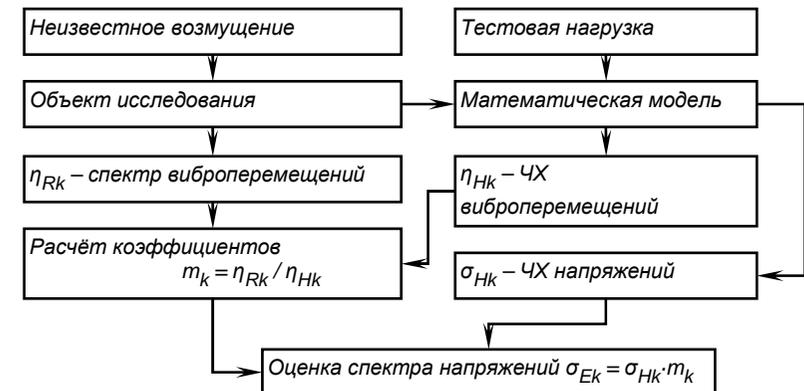


Рис. 1. Блок-схема методики оценки динамических напряжений

Для исследуемого объекта создают математическую модель, как правило, в программном комплексе на основе метода конечных элементов. Параметры модели необходимо идентифицировать, например, по тесту на свободные затухающие колебания; при этом экспериментально определяют собственные частоты и формы колебаний, а также параметры диссипации в элементах конструкции. Для оценки напряжённо-деформированного состояния проводят синхронное измерение виброускорений в нескольких доступных точках трубопровода. При выборе точек измерения нельзя допускать установку всех датчиков в узлы какой-либо одной формы колебаний. В результате измерений и преобразований необходимо получить дискретные спектры виброперемещений с требуемым разрешением по частоте.

Поскольку величина и функция распределения действующих на конструкцию динамических нагрузок неизвестны, для расчёта динамических напряжений используют тестовую нагрузку. Она выбирается из условия неортогональности всем формам ко-

лебаний, которые представляют интерес для данного исследования; при этом она должна быть физически обоснована. Используя математическую модель, для точек конструкции, в которых измерялась вибрация, проводят расчёт отклика на тестовую гармоническую нагрузку и строят дискретную частотную характеристику виброперемещений с шагом по частоте, соответствующим разрешению спектра вибрационных сигналов, полученных в эксперименте. Далее на основе сравнения экспериментальных спектров вибрации и ЧХ виброперемещений конструкции под действием тестовой гармонической нагрузки, вычисляют коэффициенты масштабирования, и оценку реального динамического НДС.

Предложенная методика была апробирована в лаборатории на модели пространственно-изогнутого трубопровода, состоящего из 5 прямолинейных участков и консольно-защемлённого с одного конца (рис. 2). На модели было установлено 3 двухкомпонентных акселерометра, предназначенных для измерения ускорений в плоскости, перпендикулярной оси трубопровода. В контрольном сечении наклеена группа тензодатчиков для динамического тензометрирования и оценки сходимости результатов. Источником возмущения служит электромагнит, подключенный через усилители к генератору низкочастотного шума. Для синхронной регистрации экспериментальных данных (11 измерительных каналов: 6 вибрационных и 5 тензометрических) используется цифровой многоканальный самописец.

Проведены лабораторные испытания при возбуждении колебаний случайным сигналом с равномерным спектром в диапазоне от 0–1000 Гц. По результатам эксперимента и конечноэлементного моделирования в программном комплексе ANSYS получена оценка спектров динамических напряжений модели трубопровода (рис. 3).

Рассчитанные на основе вибрационных измерений по предложенной методике спектры динамических напряжений хорошо согласуются с экспериментальными данными. Следует отметить, что точность результатов получаемых по разработанной методике зависит от величины диссипации энергии в системе и снижается с увеличением демпфирующих сил. Однако при уровнях диссипации характерных для конструкционных сталей и изделий из них погрешность оценки не превышает 10 %, что можно считать вполне удовлетворительным результатом.

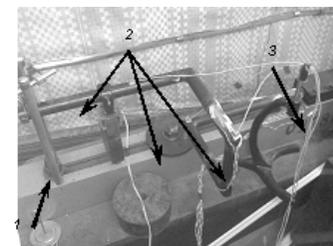


Рис. 2. Лабораторная установка: 1 – электромагнит (источник возмущения); 2 – двухкомпонентные MEMS акселерометры; 3 – группа тензодатчиков

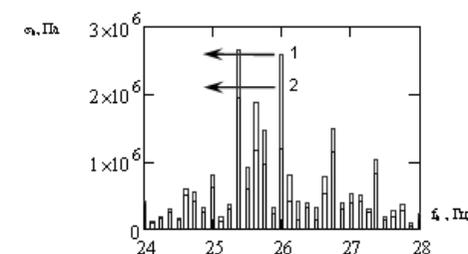


Рис. 3. Фрагмент спектра напряжений: 1 – оценка; 2 – эксперимент

Разработанная методика обладает рядом преимуществ. Во-первых, для получения оценки динамических напряжений не обязательно обладать полной информацией об источнике возмущения. Во-вторых, при моделировании не требуется решать явную динамическую задачу, как минимум на порядок более ресурсоёмкую, чем задача гармонического анализа. Полученное однажды решение задачи гармонического анализа (ЧХ виброперемещений и напряжений) может быть многократно использовано для анализа напряжений при различных амплитудах и частотных составляющих вибрации. В-третьих, по сравнению с чисто экспериментальными методами требуется гораздо меньший объём измерений, а предложенная методика может использоваться даже в случаях нестационарной или случайной вибрации.

Библиографический список

1. **Экспериментальная** механика: в 2 кн. / Под ред. А. Кобаяси; пер. с англ., под ред. Б. Н. Ушакова. – М.: Мир, 1990.
2. **Динамика** конструкций гидроаэроупругих систем / К. В. Фролов, и др. – М.: Наука, 2002.
3. **Живучесть паропроводов стареющих тепловых электростанций** / Под ред. Ю.Л. Израилева и Ф.А. Хромченко. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2002.
4. **Вибрации** в технике: справочник: в 6 т. / редсовет: В. Н. Челомей [и др.]. Т. 3: Колебания машин, конструкций и их элементов / [Э.Л. Айрапетов и др.]; под ред. Ф.М. Диментберга, К.С. Колесникова. – М.
5. <http://opac.mpei.ru/notices/index/IdNotice:61598/index.php?url=/auteurs/view//source:default>

А. П. Алешина, студентка; В. А. Огурцов, д. т. н., профессор

Описание кинетики классификации сыпучих строительных материалов на вибрационных грохотах

Существующие методики расчета основных показателей процесса грохочения сыпучих строительных материалов: производительности грохота и эффективности классификации, основаны на эмпирической информации, полученной в результате эксплуатации промышленных грохотов, не учитывают многих особенностей процесса грохочения и физико-механических свойств сыпучих материалов. Эти методики используют опыт эксплуатации промышленных грохотов прошлого века.

Классифицирующее оборудование совершенствуется в сторону интенсификации вибровоздействия просеивающих поверхностей грохотов на сыпучий материал. Усложняется траектория колебаний сит, применяется многочастотное виброударное воздействие просеивающих поверхностей на сыпучий материал, используются различные приспособления и механизмы для интенсификации процесса грохочения и др. Эмпирические методики не могут учесть эти особенности. Поэтому создание универсальной методики определения основных показателей процесса удобной для инженерных расчетов и не требующей сбора трудоемкой эмпирической информации является актуальной задачей.

В работе применяется вероятностный метод для описания кинетики процесса грохочения, который обусловлен наличием множества случайных факторов, относящихся как к сыпучему материалу, так и технологии процесса. В основу модели положено уравнение макродиффузии, описывающее миграцию частиц i -ой фракции в виброожиженном слое. В качестве начального условия рассмотрено равномерное распределение этих частиц по слою сыпучего материала. Одно граничное условие рассматривает отсутствие потока частиц через верхнюю границу слоя, другое соответствует модели «поглощающего экрана», то есть частицы i -ой фракции, попадающие на сито, сразу проникают через его отверстия сита.

Уравнение кинетики грохочения сыпучих материалов приведено к удобному для инженерных расчетов виду.

А. П. Алешина, студентка; В. А. Огурцов, д. т. н., профессор

Повышение качества классификации сыпучих материалов на виброгрохотах

Несмотря на то, что процессы фракционирования сыпучих материалов на грохотах различного принципа действия и конструкций играют важную роль во многих технологиях строительной и смежных отраслях промышленности, научные основы их проектирования и моделирования разработаны еще далеко недостаточно. Многообразие конструкций грохотов породило и многообразие подходов к их моделированию и расчету, которые чаще всего сводятся к регрессионному обобщению натурных или стендовых экспериментальных данных, получение которых трудоемко и требует значительного времени. Эти подходы к настоящему времени практически себя исчерпали и не оставляют возможности научно обоснованного поиска путей дальнейшей интенсификации грохочения и разработки оборудования для его реализации. Сыпучий материал является средой с очень специфическими свойствами, где доминирует случайность. Доминирование случайности в свойствах и поведении сыпучих материалов определило применение вероятностных моделей для описания происходящих в них процессов.

Одним из наиболее эффективных математических аппаратов для описания эволюции систем со случайными свойствами является теория цепей Маркова. Этот подход наиболее соответствует природе процесса движения частиц в виброожиженном слое, их выходу, в зависимости от крупности, через просеивающую поверхность грохота. Процесс грохочения включает в себя движение сыпучего материала по ситам (вибротранспортирование), движение частиц, размер которых меньше размера отверстий сита, через виброожиженный слой к просеивающей поверхности и проникновение мелких частиц через отверстия сита. Поэтому цель данной работы – создание математической модели кинетики грохочения, которая учитывала бы многообразие факторов, относящихся как к сыпучему материалу, так и к технологическим параметрам, которыми можно управлять процессом виброгрохочения.

А. А. Огурцов, аспирант, П. А. Медведева, аспирантка,
А. П. Алешина, студентка; В. А. Огурцов, д. т. н., профессор

Моделирование движения частиц над вибрирующей поверхностью сита грохота

Создание модели процесса транспортирования сыпучего материала по просеивающей поверхности вибрационного грохота основано на фундаментальных трудах отечественных и зарубежных исследователей И. И. Блехмана, Г. Ю. Джанелидзе, Р. Ф. Нагаева и многих других, внесших большой вклад в развитие теории вибрационного транспортирования. Подавляющее большинство авторов сходятся во мнении, что движение сыпучей среды по вибрирующей плоскости можно моделировать как движение одиночной частицы. Исследуя закономерности движения материальной точки, авторы рассматривают прямолинейные, круговые и эллиптические траектории колебаний вибрирующей поверхности в плоскости, параллельной плоскости наибольшего ската. Эти траектории являются типовыми для практики грохочения и входят в область наших исследований. Нами предлагается модель движения частиц над поверхностью грохота, когда сито совершает циркуляционное движение в плоскости наибольшего ската, представляющее собой сумму двух компланарных колебаний с разными амплитудами и разными частотами. Типовые варианты колебаний грохота являются частными случаями этой модели.

В работе рассматривается процесс проникновения проходных частиц через отверстия сита, который является определяющим для протекания процесса грохочения в целом. На процесс грохочения оказывает большое влияние вероятность просеивания зерен через отверстия сита. Эта вероятность зависит от процесса транспортирования материала по просеивающей поверхности, гранулометрического состава сыпучей среды, динамических параметров колебаний грохота, конструкции просеивающей поверхности, формы отверстий сита. Одной из характеристик сита является его живое сечение, то есть сумма площадей отверстий, или коэффициент живого сечения – отношение площади отверстий в свету к общей площади полотна просеивающей поверхности. Величину живого сечения определяют толщина перемычек и форма отверстий, которые могут быть квадратными, круглыми, прямоугольными, щелевидными, эллиптическими

М. А. Орлова, аспирантка, Н. С. Жбанов, аспирант;
А. А. Галиева, ст. преподаватель

Стратегия структурно-параметрической оптимизации процесса виброклассификации сыпучих материалов

Предлагаемая методика расчета процессов грохочения позволяет оптимизировать технологические режимы вибрационных грохотов, работающих на различных стадиях технологических линий переработки сыпучих материалов. Выбор оптимального режима грохочения может применяться и на стадии проектирования классифицирующего оборудования.

Критерии оптимизации могут быть разными. Приведем некоторые из них:

- критерии качества процесса. Предлагаемая методика расчета процесса грохочения позволяет определить максимальную производительность грохота при заданном качестве отсева или максимальную эффективность классификации и минимальную засоренность продуктов грохочения при заданной производительности грохота;
- экономические критерии процесса. Таковыми могут быть минимальная стоимость оборудования, монтажа и пусконаладочных работ и эксплуатационные расходы (например, электроэнергия). В этом случае методика позволяет сравнивать варианты показателей работы грохотов различных типов. Тогда определяющим, при выборе варианта, будет экономический критерий;
- критерии прочности, надежности и долговечности грохотов, их узлов и деталей. Например, максимальный срок службы просеивающих поверхностей. Метод позволяет сравнивать варианты грохочения на просеивающих поверхностях, изготовленных из металлических, полимерных, полиуретановых и других материалов, различных конструкций и типов с отверстиями разной формы;
- ограниченность пространства монтажа грохота. Можно сравнить варианты работы грохотов различных конструкций, габариты которых имеют существенные отличия.

Оптимизации процесса грохочения может быть и многокритериальной. Выбор критериев оптимизации зависит от конкретных условий эксплуатации промышленных грохотов и возможностей предприятия, производящего модернизацию производственного

процесса. Критерии оптимизации определяют как технологические, конструктивные и другие параметры процесса, подлежащие оптимизации, так и диапазон их изменения.

М. А. Орлова, аспирантка, Н. С. Жбанов, аспирант;
А. А. Галиева, ст. преподаватель;

Моделирование периодического грохочения с помощью одномерных цепей Маркова

Доминирование случайности в поведении ансамбля частиц в слое, подверженном виброожижению, свойственным процессам виброгрохочения, вибросортировки, виброперемешивания, а также в процессах технологии псевдоожижения (взвешенный или кипящий слой), требует применения вероятностных моделей. Одним из наиболее эффективно описывающих эволюцию дисперсных систем со случайными свойствами является теория цепей Маркова.

При грохочении частиц достаточно крупного размера (с низкой удельной поверхностью) слой материала на грохоте может составлять одну или несколько частиц среднего размера. Все частицы находятся в непосредственной близости от разделяющего сита, и эффективность прохождения сквозь него проходových частиц зависит только от соотношения их размера и размера отверстий сита. При разделении более мелких частиц (с высокой удельной поверхностью) распределение материала тонким слоем по просеивающей поверхности уже неприемлемо из-за большой требуемой поверхности грохота, и материал приходится подавать на грохот относительно толстым слоем. При этом проходовой частице, например, «трудногрохотимой» фракции, требуется некоторое время, чтобы достичь просеивающей поверхности, и это время может стать определяющим в формировании кинетики извлечения проходových частиц. Кроме того, чтобы движение частиц к просеивающей поверхности состоялось, необходимо обеспечить их подвижность в слое, то есть привести материал в состояние псевдоожижения, для чего используют вибровоздействие на материал со стороны просеивающей поверхности – виброгрохочение. Таким образом, физическим содержанием этого процесса является случайная миграция частиц в слое виброожиженного материала с возможностью выхода проходových частиц через границу слоя, примыкающую к

просеивающей поверхности. Полный выход всех проходových частиц через эту границу и определяет кинетику грохочения.

В. А. Шейкина, студентка; В. И. Шапин, к. т. н., профессор;
Ю. А. Кашфразиев, к. т. н.

Исследование деформация и напряжений в сварной конструкции

Целью работы является проведение эксперимента на растяжение сварной конструкции (рис. 1), и реализация теоретического расчёта, выполненного в программном пакете Patran. Требуется оценить сходимость полученных решений.



Рис. 1. Сварное соединение

В качестве расчетной схемы рассматривается сложная геометрическая конструкция. Она состоит из трёх стержней с одинаковыми физическими параметрами, связанных посредством сварного соединения. Применение сварного соединения было обусловлено сложностью конструкции, с целью повышения её прочности.

В первую очередь, был проведен эксперимент: сварное соединение закрепили в зажимах разрывной машины и провели растяжение испытательной установки вдоль своей оси. Деформации фиксировались с помощью тензодатчиков, наклеенных вдоль поверхности стержней [1].

Анализ результатов показал, что: максимальные деформации от растягивающей силы возникают в центральной стержне конструкции. А боковые стержни, несмотря на симметричность конструкции, один растягивается, другой сжимается. Таким образом, мы получили внецентренное растяжение (сжатие) – нагруже-

ние, при котором стержень растягивается силами, параллельными его оси и не проходящими через центр тяжести сечения стержня. Чтобы подтвердить корректность эксперимента был проведен теоретический расчёт, выполненный в программном пакете «Patran». Для достижения адекватного решения, при моделировании были взяты реальные параметры испытываемой конструкции. В ходе расчёта была снята картина распределения максимальных напряжений по Мизесу (рис. 2). Из рисунка видно, что в симметричной конструкции нагрузка на боковые стержни распределяется равномерно. Что не соответствует полученным ранее экспериментальным данным. Также с помощью программного комплекса Patran был проведен анализ возникающих в конструкции деформаций. На рис. 3 представлена общая картина деформаций, возникающих в сварной конструкции после приложения силы P .

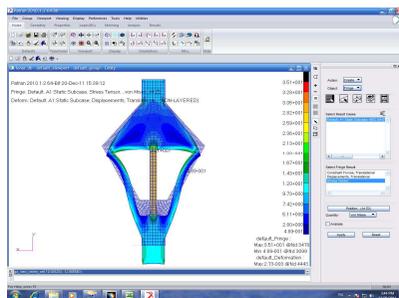


Рис. 2. Макс напряжения по Мизесу, возникающий в сварной конструкции

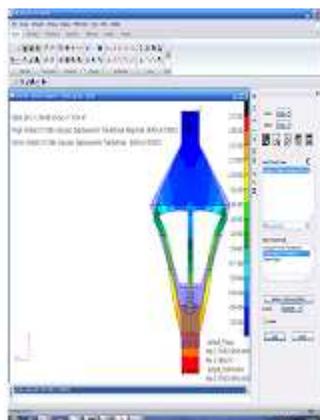


Рис. 3. Картина деформаций, возникающих в сварной конструкции после приложения силы

При проведении эксперимента, и осуществлении аналитического расчёта было зафиксировано расхождение результатов. Изготовив экспериментальный образец и проводя испытания, мы полагали, что конструкция симметрична. Проведя аналитический расчёт с помощью численных методов – метода конечных элементов, мы убедились в том, что эксперимент был осуществлен с погрешностями.

Объяснить полученное расхождение результатов можно с трёх точек зрения:

- неточностью отстройки измерительной аппаратуры, и возникающими в связи с этим, погрешностями;
- в ходе эксперимента, было зафиксировано сжатие одного из боковых стержней конструкции, однако аналитически мы убедились, что в симметричной конструкции такого явления быть не может. Это можно объяснить остаточными напряжениями в стальных стержнях после сборки конструкции, и как следствие, изменению конечных результатов;
- последним возможным объяснением расхождения результатов можно предположить «некорректное» изготовление сварной конструкции. Для правильного исполнения образца необходимо сначала «приварить» боковые стержни, и только затем, центральный. Если же, последовательно варить боковой – центральный – боковой, происходит смещение центральной оси последнего стержня, и фактическая «подгонка», в результате, в показаниях датчика мы видим номинальное сжатие [2].

Библиографический список

1. **Руководство** к лабораторным работам по сопротивлению материалов, Ч1, Ч2 Учебно-методическое пособие, Филатов Ю. Е., Иваново, «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина», 2007.
2. **Феодосьев, В. И.** Сопротивление материалов / В. И. Феодосьев. – М.: Наука, 1979.

В. Ф. Огай, студент; М. А. Ноздрин, к. т. н., доцент

Расчет элемента механизации крыла самолета

На современных самолетах с целью получения высоких летно-тактических характеристик, в частности для достижения больших скоростей полета, значительно уменьшены и площадь крыла и его удлинение. А это отрицательно сказывается на аэродинамическом качестве самолета и, особенно на взлетно-посадочных характеристиках [1].

С целью улучшения взлетно-посадочных характеристик и обеспечения безопасности на взлете и особенно посадке необходимо посадочную скорость по возможности уменьшить. Для этого нужно, чтобы коэффициент подъемной силы C_y была возможно больше. Однако профили крыла, имеющие большое $C_{y_{\max}}$, обладают, как правило, большими значениями лобового сопротивления $C_{x_{\min}}$, так как у них большие относительные толщина и кривизна. А увеличение $C_{x_{\min}}$ препятствует увеличению максимальной скорости полета. Изготовить профиль крыла, удовлетворяющий одновременно двум требованиям: получению больших максимальных скоростей и малых посадочных - практически невозможно. Поэтому при проектировании профилей крыла самолета стремятся в первую очередь обеспечить максимальную скорость, а для уменьшения посадочной скорости применяют на крыльях специальные устройства, называемые механизацией крыла (рис. 1).

Применяя механизированное крыло, значительно увеличивают величину $C_{y_{\max}}$, что дает возможность уменьшить посадочную скорость и длину пробега самолета после посадки, уменьшить скорость самолета в момент отрыва и сократить длину разбега при взлете. Применение механизации улучшает устойчивость и управляемость самолета на больших углах атаки. Кроме того, уменьшение скорости при отрыве на взлете и при посадке увеличивает безопасность их выполнения и сокращает расходы на строительство взлетно-посадочных полос [2].

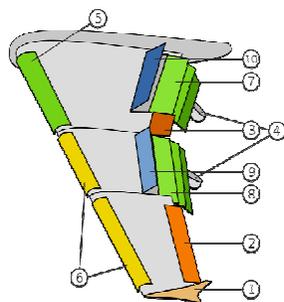


Рис. 1. Виды механизации крыла: 1 – законцовка; 2 – элерон; 3 – высокоскоростной элерон; 4 – обтекатели приводов закрылков; 5 – предкрылок Крюгера; 6 – предкрылки; 7 – закрылок; 8 – закрылок; 9 – интерцептор; 10 – спойлер

Итак, механизация крыла служит для улучшения взлетно-посадочных характеристик самолета путем увеличения максимального значения коэффициента подъемной силы крыла $C_{y_{\max}}$.

Суть механизации крыла состоит в том, что с помощью специальных приспособлений увеличивается кривизна профиля (в некоторых случаях и площадь крыла), вследствие чего изменяется картина обтекания. В результате получается увеличение максимального значения коэффициента подъемной силы. Эти приспособления, как правило, выполняются управляемыми в полете: при полете на малых углах атаки (при больших скоростях полета) они не используются, а применяются лишь на взлете, на посадке, когда увеличение угла атаки не обеспечивает получения нужной величины подъемной силы.

Рассмотрим более подробно функционирование интерцептора (рис. 2).

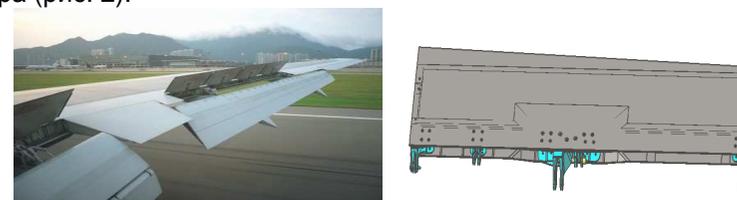


Рис. 2. Интерцептор

Интерцепторы – отклоняемые или выпускаемые в поток поверхности на верхней части крыла, которые увеличивают аэродинамическое сопротивление и уменьшают подъемную силу. Поэтому интерцепторы также называют органами непосредственного управления подъемной силой.

В работе проводится исследование прочности элементов интерцептора.

Библиографический список

1. Шульженко, М. Н. Конструкция самолетов / М. Н. Шульженко. – М.: Машиностроение, 1971.
2. Сутугин, Л. И. Механизированные крылья / Л. И. Сутугин. – М.: 1940.
3. <http://www.aerochayka.ru/disc/teorija/aerodinamica/AD0210.HTM>.

Н. С. Хромов, магистрант; В. А. Шахнин, д. т. н., профессор,
В. А. Осипов, к. т. н., зав. сект. энерг. исслед.

Повышение достоверности вибродиагностики высоковольтного оборудования в условиях нечеткой исходной информации

Переход к обслуживанию высоковольтного оборудования по фактическому состоянию требует применения надёжных и эф-

фективных методов и средств вибродиагностики. Анализ современных средств вибродиагностики ведущих производителей, таких как НПП «ВиКонт», МНПО «Спектр», «Глобалтест», «Главдиагностика», Bentley Nevada (США), EPRO (Германия), Брюль & Кьер (Дания) показывает, что основным недостатком имеющегося оборудования является сравнительно низкая достоверность результатов вибродиагностики в условиях нечёткой исходной информации. В большой степени это обусловлено отсутствием в настоящее время диагностических моделей, адекватно отражающих зависимость вибрационных параметров не только от технического состояния высоковольтного оборудования, но и от условий его эксплуатации, таких как режимы работы и сезонные особенности, а также от возмущающих факторов, имеющих случайный характер с неизвестными законами распределения. В частном случае выделение полезного сигнала на фоне помех является отражением существующих проблем в области построения диагностических моделей. Применение для этих целей методов фильтрации (частотной селекции), стробирования (временной селекции), синхронного (когерентного) накопления, демодуляции (амплитудной и фазовой) и др. не позволяет эффективно и в полной мере решать данную задачу вибродиагностики.

Целью представленной работы является разработка методов и средств повышения достоверности вибродиагностики высоковольтного оборудования путём построения вибродиагностической модели на основе эффективного использования априорной информации о сигнале и помехах и применения методов теории нечёткого управления.

Для достижения этой цели решены следующие задачи:

- проанализированы современные методы и средства вибродиагностики высоковольтного оборудования;
- проведены исследования и анализ сигналов вибродиагностики в условиях нечёткой исходной информации;
- исследованы особенности построения нечёткой системы вибродиагностики;
- разработаны алгоритмы и программные средства обработки вибросигналов;
- предложен алгоритм построения функции принадлежности нечётких вибросигналов, позволяющий за счет выбора наиболее информативных признаков повысить надежность и быстродействие системы вибродиагностики высоковольтного оборудования.

Разработанные математические модели и алгоритмы обработки сигналов вибродиагностики высоковольтного оборудования позволяют повысить достоверность, эффективность и расширяют функциональные возможности разрабатываемых новых средств вибродиагностики.

Библиографический список

1. РД 34.45-51.300-97 «Объем и нормы испытаний электрооборудования».
2. ПБ 03-440-02 «Правила аттестации персонала в области неразрушающего контроля».
3. Беляев, В. П. Особенности расчета нечеткой системы вибродиагностики / В. П. Беляев, В. Е. Шатерников. – М.: «Контроль. Диагностика», № 8, 2010.

Н. А. Сабанеев, ст. преподаватель;
И. А. Белов, ст. преподаватель;
Л. Б. Маслов, д. ф.-м. н., доцент

Исследование вибрационных свойств мягких тканей голени человека

Вибрационные свойства механических конструкций являются важными параметрами, характеризующими их функциональное состояние и работоспособность. Взаимосвязь между резонансными частотами и механическими характеристиками мягких тканей позволяет использовать вибрацию как метод неинвазивного контроля состояния костного регенерата в зоне перелома, определения заживления повреждения и для диагностики прочности закрепления протеза тазобедренного сустава. Физической основой метода диагностики является понятие биомеханического резонанса, который определяется путем подачи на исследуемый биомеханический объект гармонически изменяющейся силы заданного диапазона частот. При совпадении сканирующей частоты с собственной частотой колебаний биообъекта на амплитудно-частотной характеристике будет наблюдаться экстремум. Повреждение ткани вызывает изменение частоты собственной колебательной структуры и амплитуды резонансных колебаний.

На рис. 1 приведена блок-схема экспериментального вибрационного стенда для вибродиагностики состояния мышечно-сухожильного комплекса голени, – трехглавой мышцы голени в совокупности с ахилловым сухожилием. Нижняя конечность пациента (1) фиксируется на платформе (4). Персональный компьютер генерирует синусоидальный сигнал заданного интервала частот. Через усилитель мощности сигнал подается на электромагнитный

вибровозбудитель (2), далее через шток (3) вибрация передается на площадку (4), установленную на шарнирных опорах (5). Поперечные колебания трехглавой мышцы голени в совокупности с ахилловым сухожилием регистрируются датчиками акселерометрами (6), расположенными: на площадке (для оценки амплитуды возмущающей силы), на ахилловом сухожилии и мышце (для оценки отклика объекта на возмущающую силу). Регистрация результатов измерений производится через блок согласования цифровым многоканальным самописцем на карту памяти или непосредственно на ПК, где осуществляется их математическая обработка и анализ.

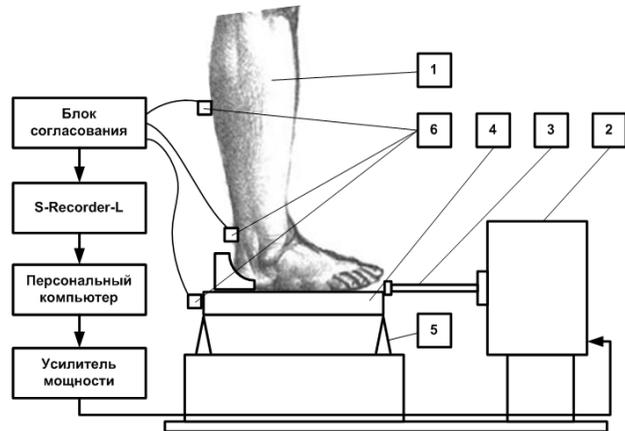


Рис. 1. Блок-схема вибродиагностического стенда: 1 – объект исследования; 2 – вибровозбудитель; 3 – шток вибровозбудителя; 4 – площадка для фиксации стопы; 5 – шарнирные опоры; 6 – виброприемники

Исследование резонансных свойств мягких тканей голени на примере ахиллова сухожилия совместно с камбаловидной и икроножной мышцами были проведены на выборке здоровых добровольцев, не имеющих медицинских противопоказаний к проведению вибродиагностического воздействия – мужчин 30 лет сходных анатомических характеристик в период с 16.05.2011 по 30.05.2011. Вибродиагностическое возбуждение может существенно влиять на кровоток в мягких тканях и приводить к изменению вязкоупругих характеристик тканей. Поэтому общее время проведения эксперимента необходимо было свести к минимально возможному, чтобы уменьшить влияние механического воздействия на характеристики кровотока в мышцах голени. Частота возмущающих колебаний автоматически изменялась в диапазоне от 3 Гц до 60 Гц с шагом 1 Гц и временем задержки 2 с. Регистрация вынуж-

денных колебаний в установившемся режиме производилась тремя датчиками с ахиллова сухожилия, икроножной мышцы и с площадки для фиксации стопы. Направления измерения были выбраны перпендикулярно продольной оси голени человека.

Вибродиагностический сигнал (рис. 2), полученный на вибродиагностическом стенде по исследованию свойств мягких тканей голени человека, представляет собой отклик объекта исследования на вынужденные синусоидальные колебания. Сигнал имеет волновую форму – по вертикальной оси показаны значения отсчетов, а по горизонтальной оси – время.

Математическая обработка и анализ исследуемых вибродиагностических сигналов в частотной области проводится с помощью дискретного преобразования Фурье (ДПФ). ДПФ имеет большую точность вычисления спектров, чем быстрое преобразование Фурье (БПФ). Спектральные характеристики, полученные с помощью алгоритма ДПФ, являются более точными, спектр получается «неразмазанным», как при БПФ. И соответственно значения пиков больше и точнее.

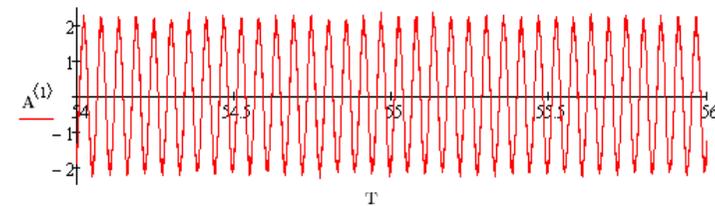


Рис. 2. Временной вибродиагностический сигнал

ДПФ очень требовательно к вычислительным ресурсам измерительной аппаратуры. На сегодняшний день для целей оперативного контроля вибродиагностического состояния применяются алгоритмы на основе БПФ. Одним из алгоритмов является применение весовых функций – «окон» (рис. 3). Перед выполнением преобразования Фурье интервал наблюдения обрабатывается специальной оконной функцией (значения отсчетов в анализируемом окне умножаются на значения оконной функции).

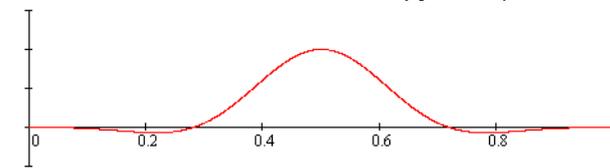


Рис. 3. Окно с плоской вершиной (Flat top window)

Выбор оконной функции влияет на точность полученного спектра. Увеличение интервала наблюдения увеличивает точность и время вычислений. Временной интервал сигнала разделяется на подинтервалы и преобразование выполняется последовательно для каждого подинтервала в отдельности. Тем самым осуществляется переход к частотно-временному (частотно-координатному) представлению сигналов, при этом в пределах каждого подинтервала сигнал «считается» стационарным. Результатом оконного преобразования является семейство спектров, которым отображается изменение спектра сигнала по интервалам сдвига окна преобразования. Это позволяет выделять на координатной оси и анализировать особенности нестационарных сигналов.

На рис. 4, 5 представлены примеры амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик мышечно-сухожильного комплекса голени в области низких частот. Обе резонансные кривые соответствуют колебаниям тканей голени правой ноги двух разных испытуемых.

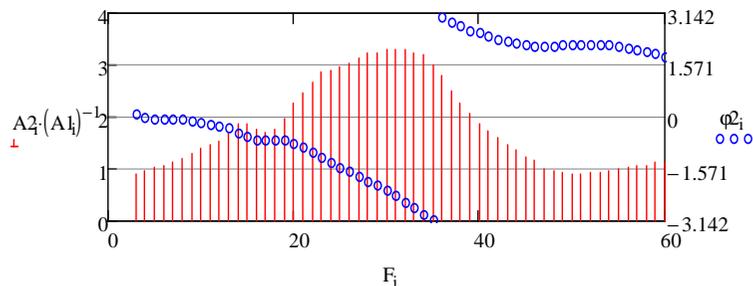


Рис. 4. Экспериментальная АЧХ и ФЧХ (испытуемый 1)

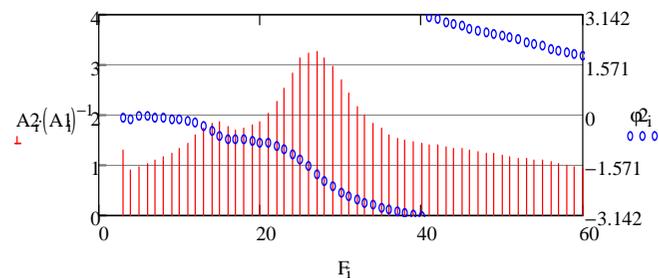


Рис. 5. Экспериментальная АЧХ и ФЧХ (испытуемый 2)

На графиках видно, что в исследуемом частотном диапазоне резонансные частоты колебаний мягких тканей не сильно различаются по амплитуде, но имеют характерные отличия: пик резонансной кривой испытуемого 1 приходится на 27 Гц, а испытуемого 2—31 Гц; добротность АЧХ испытуемого 1 меньше добротности АЧХ испытуемого 2. Резонансные пики на амплитудно-частотных характеристиках достаточно гладкие, что свидетельствует о значительной диссипации энергии в мягких тканях.

Таким образом, представляется возможным на основе вибрационных испытаний проводить идентификацию физиологического состояния конечностей опорно-двигательного аппарата по динамическим характеристикам мышечно-сухожильного комплекса и проводить его подконтрольную резонансно-вибрационную реабилитацию с наблюдением и доводкой биомеханической системы в процессе лечения по параметрам жесткость и диссипация.

К. В. Ботова, студентка; Ю. Е. Филатов, к. т. н., доцент

Метод магнитной памяти металла как новое направление в технической диагностике

Традиционные методы и средства диагностики (УЗД, МПД, рентген) направлены на поиск уже развитых дефектов и по своему назначению не могут предотвратить внезапные усталостные повреждения оборудования — основные причины аварий и источники травматизма обслуживающего персонала.

Известно, что основными источниками возникновения повреждений в работающих конструкциях являются зоны концентрации напряжений (КН), в которых процессы коррозии, усталости и ползучести развиваются наиболее интенсивно. Следовательно, определение зон КН является одной из важнейших задач диагностики оборудования и конструкций.

Процессами, предшествующими эксплуатационному повреждению, являются изменения свойств металла (коррозия, усталость, ползучесть) в зонах концентрации напряжений. Соответственно, изменяется намагниченность металла, отражающая фактическое напряженно-деформированное состояние трубопроводов, оборудования и конструкций.

Основные практические преимущества нового метода диагностики, по сравнению с традиционными методами неразрушающего контроля (НК), следующие:

- применение метода не требует специальных намагничивающих устройств, так как используется явление намагничивания узлов оборудования и конструкций в процессе их работы;
- места концентрации напряжений от рабочих нагрузок, заранее не известные, определяются в процессе их контроля;
- зачистки металла и другой какой-либо подготовки контролируемой поверхности не требуется;
- для выполнения контроля по предлагаемому методу используются приборы, имеющие малые габариты, автономное питание и регистрирующие устройства;
- специальные сканирующие устройства позволяют контролировать трубопроводы, сосуды, оборудование в режиме экспресс - контроля со скоростью 100 м/час и более.

Предлагаемый метод диагностики, основанный на использовании магнитной памяти металла, позволяет выполнить интегральную оценку состояния узла с учётом качества металла, фактических условий эксплуатации и его конструктивных особенностей.

Контроль напряженно-деформированного состояния оборудования и конструкций. Современная диагностика состояния конструкционных материалов уже не ограничивается задачами дефектоскопии, но все более широко используется при решении задач определения механических характеристик материалов.

В связи с этим обстоятельством на первый план выходят методы технической диагностики, сочетающие механику разрушений, металловедения и неразрушающего контроля. К таким методам относятся, в первую очередь, методы контроля напряженно-деформированного состояния (НДС).

Традиционные методы и средства НК напряжений, которые основаны на активном взаимодействии сигнала прибора с металлом конструкции, получают косвенную информацию о напряженном состоянии объекта контроля, т.е. имеют недостаточную информативность физических полей, используемых при контроле. Действительно, вводимое в исследуемый материал поле, взаимодействуя с собственными полями материала, меняет его свойства и характеристики НДС объекта контроля. При этом характер, величина и время жизни изменений определяются динамическим соотношением энергий взаимодействующих полей. На практике,

при проведении диагностики, такие изменения просто не учитываются.

Необходимо помнить, что любое искусственно вводимое от прибора физическое поле в объект контроля, находящийся в напряженно-деформированном состоянии (даже после снятия рабочих нагрузок), обязательно будет взаимодействовать с собственными физическими полями материала (например, электромагнитными), сформировавшимися на уровне кристаллической решетки. Не учитывать фактическое энергетическое состояние объекта контроля (о чем свидетельствует «магнитная память металла») – грубейшая ошибка для всех методов контроля НДС! Особенно это относится к ЗКН, которые сосредоточены, как правило, на глубине и в объеме, и на поверхность изделия выходят в виде линий скольжения (места образования трещин!) шириной в несколько микрон (и даже нескольких долей микрона!). Кроме того, выполнение контроля осуществляется, как правило, на остановленном в ремонт оборудовании, после снятия рабочих нагрузок в условиях остаточного НДС.

Диагностика лопаток паровых турбин. Контроль проводится на выпуклой поверхности лопатки со стороны входа и выхода пара. Сканирование датчиком прибора типа ИКН проводится от корневого сечения лопатки к периферийному, или наоборот. Все операции по контролю лопаток рекомендуется проводить поэтапно для лопаток внутри отдельной ступени.

В процессе контроля на экране прибора типа ИКН отображаются графики распределения поля рассеяния H_p по длине лопатки. Результаты контроля записываются в энергозависимую память прибора для дальнейшей обработки на компьютере.

По результатам контроля определяются лопатки, работающие в наиболее напряженных условиях. Такими лопатками являются те, у которых линии концентрации напряжений и деформации (линии КН) расположены поперечно перу лопатки, и имеющие максимальный градиент поля H_p : $K_{ин} = dH_p/dx$.

Диагностика бандажных связей лопаточных аппаратов паровых турбин. Надежность лопаток, набранных в пакеты с бандажной лентой, в значительной мере зависит от напряженно-деформированного состояния ленты.

Повреждения лопаток могут происходить из-за защемлений в цельно-фрезерованных бандажах, применяемых на дисках с большим диаметром. Демпферные связи в виде проволоки или трубок, используемые широко на лопатках последних ступеней, должны быть достаточно податливыми, чтобы плотно прилегать к

лопатке под действием центробежной силы и, вместе с тем, достаточно жесткими, чтобы иметь необходимую прочность. Обеспечить такие оптимальные условия невозможно без эффективного метода контроля напряженно-деформированного состояния самой демпферной проволоки. Использование метода магнитной памяти металла позволяет решить эту задачу на практике.

На основании 20-летнего опыта применения метода МПМ на практике можно сделать заключение об уникальных его возможностях по выявлению локальных ЗКН, определяющих фактическое НДС, надежность и ресурс оборудования.

О. А. Филина, аспирантка, ст. преподаватель;
Ю. А. Ярославцев к. т. н., доцент

Бездемонтажное диагностирование трансформаторного масла

В настоящее время наиболее интересными и перспективными разработками являются находки в области контроля и диагностики состояния машин и механизмов в различных отраслях промышленности.

Безаварийная работа любого оборудования всегда являлась и является актуальной задачей. Однако, отсутствие технических средств диагностирования износа узлов трения непосредственно на работающих механизмах (без их остановки и разборки) приводит к преждевременному выходу из строя большого количества разнообразного оборудования. С учетом резкого роста цен их капитальный ремонт в некоторых случаях становится нерентабелен. Для своевременного обнаружения и предотвращения аварийного износа узлов трения, экономии горючесмазочных материалов, запасных частей, затрат на капитальный ремонт рекомендуются к внедрению встроенные (бортовые) средства диагностирования. Одним из методов решения этой задачи является использование информации, которую несут продукты износа и механические примеси в смазочном масле, по которым можно определить одну из важных характеристик долговечности - износостойкость пар трения.

Преодоление сил трения в узлах машин и механизмов поглощает 30–40 % всей вырабатываемой в мире энергии, а потери средств в промышленности развитых стран вследствие трения и сопутствующего ему износа достигают 4–5 % национального до-

хода. Износ является причиной выхода из строя более 80 % деталей машин и механизмов. Увеличение ресурса машин и механизмов во многом зависит от разработки и успешного применения методов оценки износа пар трения машин. В настоящее время все большее распространение приобретают методы оценки изнашивания деталей машин в процессе эксплуатации без их остановки и разборки. В ходе моей работы планируется создать технические средства диагностирования, которые предназначены для определения износа узлов трения и деталей различного оборудования в процессе эксплуатации без их остановки и разборки путем анализа продуктов износа в системе смазки.

ОЖИДАЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ инновационного продвижения моего комплекса заключается в использовании средств трибодиагностики для оценки работоспособности деталей, изготовленных из черных (ферромагнитных) и цветных металлов и сплавов (парамагнитных) по анализу смазочного масла позволяет:

- максимально использовать ресурс работы, проводя ремонты не по регламенту, а по фактическому состоянию оборудования;
- предупреждать аварийные ситуации;
- оценить эффективность замены импортных запасных частей отечественными аналогами;
- в любой момент времени иметь информацию о техническом состоянии узлов трения без остановки механизма и разборки узлов трения;
- оценивать смазочную способность масел и своевременно назначать сроки замены масла в системе смазки;
- повысить качество и культуру обслуживания.

Трансформаторным (изоляционным) маслом заполняются баки силовых трансформаторов и реакторов, масляных выключателей, измерительные трансформаторы и вводы.

Отбор проб и испытания масла. В процессе эксплуатации масло загрязняется механическими примесями, увлажняется, в нем накапливаются продукты окисления. При этом масло теряет свои электроизоляционные свойства, в результате чего снижается сопротивление изоляции оборудования. Масло окисляется под влиянием кислорода воздуха. Активность кислорода усиливается в присутствии влаги, попадающей в масло извне. Окислению способствует высокая температура, солнечный свет, присутствие металлов (особенно меди и ее сплавов), являющихся катализаторами окисления. Чем больше продуктов старения в масле, тем хуже его свойства. Поэтому большое значение приобретает си-

стематическое наблюдение за состоянием масла в трансформаторах и аппаратах. Наблюдение ведется путем отбора проб и проведения лабораторных испытаний. При обнаружении изменения показателей по сравнению с установленными нормами принимаются меры по восстановлению утерянных маслом свойств. Это достигается очисткой, осушкой и регенерацией масла. Отбор проб производится в сухую погоду в промытые и хорошо просушенные стеклянные банки вместимостью 0,5 и 1 л.

Различают три вида испытаний изоляционных масел: испытание на электрическую прочность, сокращенный анализ, полный анализ.

Для эксплуатационного масла, находящегося в работе (залитого в оборудование), проводятся сокращенный анализ и испытание его электрической прочности. Масло должно удовлетворять следующим показателям качества: кислотное число – не более 0,25 мг КОН/г; содержание водорастворимых кислот и щелочей – не более 0,014 мг КОН/г для трансформаторов мощностью более 630 кВ-А и для герметичных маслонаполненных вводов, для негерметичных вводов напряжением до 500 кВ–0,03 мг КОН/г; отсутствие механических примесей; падение температуры вспышки по сравнению с предыдущим анализом не более 5 °С; взвешенный уголь в масле выключателей – не более одного балла; электрическая прочность масла (пробивное напряжение) для трансформаторов, аппаратов и вводов.

Масло из трансформаторов с пленочной защитой при эксплуатации проверяется также на влагосодержание и газосодержание, а из трансформаторов с азотной защитой только на влагосодержание.

Масло, не удовлетворяющее нормам на электрическую прочность в связи с его увлажнением или загрязнением механическими примесями, подвергается центрифугированию.

Центрифугированием масло очищается не от всех загрязнений. Легкие волокна, частицы взвешенного угля, смолистые вещества остаются в масле вследствие небольшой разницы плотностей масла и примесей. Более глубокая очистка достигается при применении фильтр-пресса.

Для предотвращения поломок и остановки производства следует внедрять бесконтактный и бездемонтажный анализ масла. Производится забор масла, делается его полный анализ и по результатам его составляется отчет, в котором будет выдано, когда может отказать тот или иной узел.

СЕКЦИЯ 23. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ

М. Е. Солопанов, студент; В. Е. Мизонов, д. т. н., профессор

Некоторые задачи ячеечного моделирования процессов переноса

Целью работы является исследование чувствительности ячеечных моделей процессов в потоках жидких и дисперсных сред к параметрам сетки ячеек и переходным вероятностям. Сначала рассмотрен одномерный поток, представленный цепью из m ячеек без продольной диффузии (рис. 1).



Рис. 1. Реальный процесс, его ячеечное представление и кривые отклика

Если реальный моделируемый поток имеет структуру идеального вытеснения со скоростью V , то кривая отклика на импульсное введение в начало потока единичной порции трассера имеет импульсный же характер (показана на рис. 1, справа). Ячеечная модель оперирует конвективной переходной вероятностью $v = V\Delta t/\Delta x = V\Delta t m/L$, которая входит в матрицу переходных вероятностей

$$P = \begin{bmatrix} 1-v & 0 & 0 & \dots \\ v & 1-v & 0 & \dots \\ 0 & v & 1-v & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}, \quad (1)$$

преобразующей вектор состояния трассера по рекуррентному матричному равенству

$$S^{k+1} = PS^k, \quad (2)$$

где k – номер временного перехода продолжительностью Δt .

Сама кривая отклика рассчитывается по соотношению

$$q_k = S_m^k v, \quad (3)$$

где S_m^k – текущее содержание трассера в последней ячейке цепи перед поглощающей ячейкой.

При любом $v < 1$ модельный поток будет носить диффузионный характер (с односторонней диффузией без обратных переходов), даст размазанную кривую отклика (см. рис. 1), что не соответствует реальной кривой. Для оценки влияния на их различие зафиксируем $v = v_0$ и будем изменять число ячеек m . Очевидно, что при этом должно соблюдаться условие $\Delta t m = \text{const}$ или $\Delta t = v_0 L / (V m)$, то есть каждый раз необходимо переходить к другой продолжительности временного перехода и текущему времени $t_k = \Delta t(k - 1)$. На рис. 2 показано влияние числа ячеек на вид кривой отклика. С ростом m распределение обостряется, и по нему можно выбрать число ячеек, с приемлемой точностью моделирующее реальный поток.

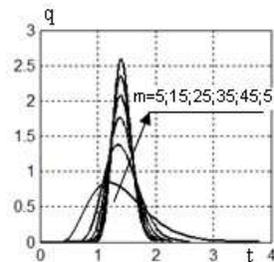


Рис. 2. Влияние числа ячеек на кривую отклика: $L = 1$ м; $V = 0,7$ м/с; $v = 0,35$

В одномерном потоке к идеальной кривой отклика легко перейти, положив $v = 1$: тогда при любом числе ячеек на единичный импульс будет единичный импульсный отклик. Это становится невозможным, если моделируется двухмерный поток, неоднородный в поперечном направлении. Простейшая схема такого потока показана на рис. 3.

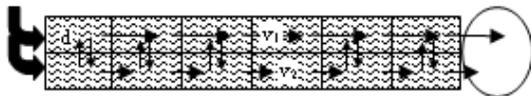


Рис. 3. Ячеечное представление двухмерного потока

Если реальный поток по-прежнему является потоком идеального вытеснения, но с разными скоростями, то кривая отклика должна содержать два импульса. При ячейчном представлении, даже если положить $v_1 = 1$, то меньшая скорость v_2 будет меньше единицы, а при наличии поперечного перемешивания (поперечной диффузии с вероятностью d) меньше единицы должны быть обе скорости, так как иначе вычислительная схема потеряет устойчивость.

Эволюция содержания трассера в двухмерной модели также описывается равенством (2), где вектор и матрица имеют вдвое больший размер, а ячейки нумеруются последовательно по столбцам. На рис. 4 показано, как влияет коэффициент поперечной диффузии на кривую отклика.

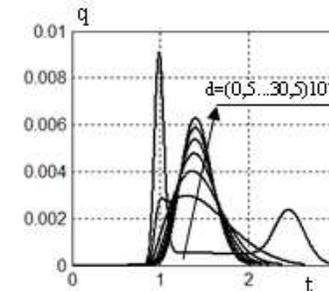


Рис. 4. Влияние поперечной диффузии на кривую отклика: $m = 180$; $V = [1; 0.4]$ м/с; $v = [0.5; 0.2]$

Рост коэффициента диффузии сначала приводит к все большему размыванию бимодальной кривой, которая затем переходит в мономодальное распределение, а затем трансформирующееся в кривую Гаусса. Аналогичное влияние оказывает увеличение длины канала при фиксированном коэффициенте диффузии. Результаты выполненного численного эксперимента соответствуют так называемой диффузии Тэйлора, который теоретически показал, что при наличии поперечной диффузии в ламинарном потоке большой длины кривая отклика асимптотически переходит в гауссову кривую. Выполненные расчеты являются предпосылкой построения математических моделей и оптимизации перемешивания сыпучих материалов в смесителях различного принципа действия, а также других процессов химической технологии, связанных с потоками гетерогенных сред.

К. А. Шелатонова, аспирантка, М. Е. Солопанов, студент;
В. Е. Мизонов, д. т. н., профессор

Двухмерная ячейчная модель периодического смешивания сегрегирующих сыпучих материалов

Рассматривается процесс периодического лопастного перемешивания сыпучих компонентов, имеющих склонность к сегрегации. Схема процесса показана на рис. 1, слева. В цилиндриче-

ской емкости на приводном валу в нижней ее части размещены перемешивающие лопасти, длина которых составляет половину радиуса емкости. В емкость загружен базовый компонент, занимающий ее большую часть, а над ней – компонент, имеющий тенденцию к сегрегации вниз, причем считается, что доля этого компонента невелика. При вращении лопастей частицы компонентов участвуют в трех видах движения, показанных на рис. 1, справа.

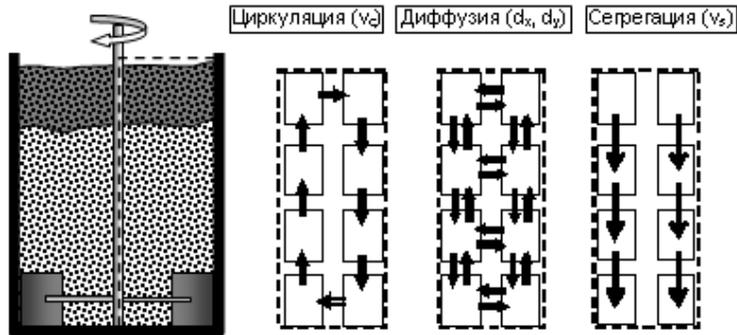


Рис. 1. Схема зоны лопастного перемешивания и ее разложение на ячейные модели составляющих процесса

Во-первых, это циркуляционное движение, вызываемое вытеснением материала лопастями от периферии к центру, во-вторых, – диффузионное движение, обусловленное случайной миграцией частиц, и, в-третьих, – сегрегационное движение, направленное вниз для ключевого компонента.

Текущее состояние ключевого сегрегирующего компонента характеризуется вектором-столбцом состояния

$$S = [S_1 \dots S_n \ S_{n+1} \dots S_{2n}]^T, \quad (1)$$

где ячейки цепи пронумерованы последовательно по столбцам, а индекс T означает транспонирование.

Эволюция содержания трассера описывается рекуррентным матричным равенством

$$S^{k+1} = PS^k, \quad (2)$$

где k – номер временного перехода продолжительностью Δt , а P – матрица переходных вероятностей (математический образ смесителя), которая строится по следующему правилу. 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 рис. 1, справа, где для наглядности показаны различные компоненты миграции частиц.

Это циркуляционные переходы, вызванные осредненным движением материала благодаря действию вращающихся лопастей и характеризующиеся вероятностью v_c , диффузионные (чисто случайные) переходы, характеризующиеся вероятностями d_x и d_y , и переходы, вызванные сегрегацией, которые характеризуются вероятностями v_s . Все переходные вероятности связаны с соответствующими размерными величинами (скоростью циркуляции, коэффициентами макродиффузии и скоростью сегрегации) и параметрами модели Δx , Δy (размеры ячеек) и Δt (продолжительность временного перехода). Последние должны быть такими, чтобы выполнялось условие

$$1 - 2d_x - 2d_y - v_c - v_s \geq 0, \quad (3)$$

что часто приводит к необходимости выбирать малые Δt , а следовательно, иметь большое число переходов до завершения процесса, то есть повышенные затраты машинного времени. В работе был опробован подход, связанный с разделением временного перехода на составляющие, связанные с каждым видом пространственного перехода (рис. 1) отдельно. Для этого для каждого вида переходов были сформированы свои матрицы P_c , P_d и P_s , в которых ограничение (3) должно выполняться по отдельности, что позволяет иметь большие значения переходных вероятностей и сократить расчетное время. При этом полная матрица для одного перехода P представляется как

$$P = P_c P_d P_s. \quad (4)$$

Очевидно, что в силу некоммутативности произведения матриц, P будет зависеть от порядка сомножителей, который заранее не определен. Однако выполненные численные эксперименты показали, что для условий рассматриваемой задачи изменение порядка сомножителей в (4) дает погрешность, заведомо меньшую, что погрешность определения исходных физических параметров модели, что позволяет выбирать этот порядок произвольно.

Объектом моделирования является эволюция распределения по ячейкам содержания первоначально загруженного в верхнюю часть ключевого компонента, склонного к сегрегации вниз. Мерой неравномерности его распределения может служить среднеквадратичное отклонение

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{u=1}^{2n} (S_u^k - \frac{1}{2n})^2}{2m}}. \quad (7)$$

На рис. 2 показан пример, демонстрирующий работоспособность модели, а также существование оптимальной скорости циркуляции смеси, то есть скорости вращения лопастей и степени захвата ими материала за один проход. Из графиков видно, что при увеличении скорости циркуляции минимум σ (наилучшее качество смеси, после достижения которого следует остановить процесс) достигается быстрее, но самое малое минимальное значение имеет место при $v_c = 0,1$, то есть существует оптимальная скорость циркуляции, обеспечивающая наилучшее качество смеси.

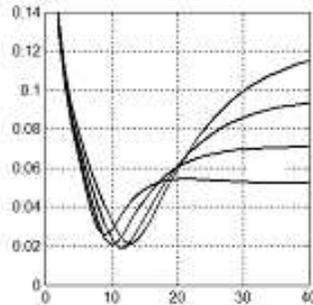


Рис. 2. Кинетика формирования качества смеси при различных скоростях циркуляции ($v_s = 0,2$; $d = 0,3$)

Разработанная модель позволяет решать различные оптимизационные задачи смешивания, в частности, исследовать распределенную во времени подачу сегрегирующего компонента, что, однако выходит за рамки настоящей работы.

И. А. Балагуров, студент; В. Е. Мизонов, д. т. н., профессор

Влияние поперечных перегородок на равномерность диффузионного осаждения частиц

Целью работы является построение простой, но информативной математической модели эволюции распределения содержания частиц при их конвективной диффузии в плоской области с перегородками. Инструментом моделирования выбрана теория цепей Маркова для двумерной цепи ячеек, схематично показанной на рис. 1, слева. Текущее распределение содержания частиц по ячейкам описывается матрицей S_m размером $n \times m$, где n – число строк, m – число столбцов в ней. Для выполнения расчетов эта

матрица должна быть преобразована в вектор столбец S размером $(n \times m) \times 1$, где ячейки пронумерованы последовательно по столбцам, а столбцы матрицы S_m расположены последовательно друг под другом.

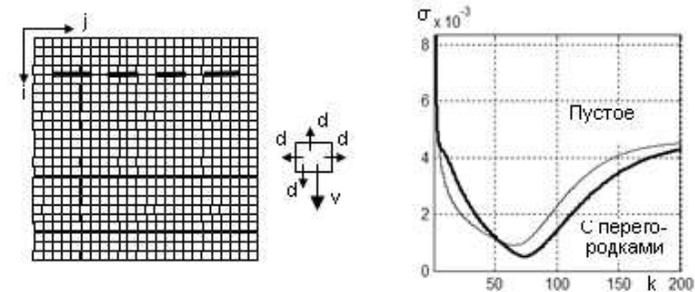


Рис. 1. Структура домена и переходных вероятностей (слева) и эволюция неравномерности распределения трассера (справа)

Эволюция состояния процесса описывается рекуррентным матричным равенством

$$S^{k+1} = P S^k, \quad (1)$$

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 $(n \times m) \times (n \times m)$ и строится по следующему правилу. 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 рис. 1. Из ячейки возможны изотропные симметричные переходы с вероятностями d , относящиеся к чистой изотропной диффузии, и несимметричные (конвективные) переходы с вероятностью v , относящиеся в вынужденной диффузии (сегрегации) частиц. Элементы матрицы P для прямоугольного домена без перегородок рассчитываются по нижеследующим соотношениям.

Вероятности переходов вверх – чистая диффузия с параметром d

$$P(n(j-1) + i - 1, n(j-1) + i) = d, \quad j = 1:m, \quad i = 2:n; \quad (2)$$

Вероятности переходов вниз – диффузия с параметром d плюс конвекция с параметром v

$$P(n(j-1) + i + 1, n(j-1) + i) = v(i,j) + d, \quad j = 1:m, \quad i = 1:n-1; \quad (3)$$

Вероятности переходов влево – чистая диффузия с параметром d

$$P(n(j-2) + i, n(j-1) + i) = d, \quad j = 2:m, \quad i = 1:n. \quad (4)$$

Вероятности переходов вправо – чистая диффузия с параметром d

$$P(n(j) + i, n(j - 1) + i) = d, \quad j = 1:m - 1, \quad i = 1:n; \quad (5)$$

Вероятности остаться (главная диагональ матрицы)

$$P(u, u) = 1 - \text{sum}(P(:, u)), \quad u = 1:nm. \quad (6)$$

Учет наличия перегородок может быть выполнен двумя способами. Во-первых, можно разместить перегородки между ячейками и запретить в матрице P переходы между ячейками, разделенные перегородками. Во-вторых, если сетка ячеек достаточно густа и можно «пожертвовать» ячейками на размещение перегородок именно в них, то можно запретить переходы в эти ячейки. Второй путь алгоритмически более прост. Для его реализации создается матрица размещения перегородок, в которой отмечаются ячейки, занятые перегородками. Затем она преобразуется в вектор размещения перегородок, и строки в матрице P , совпадающие с номерами ячеек с перегородками, обнуляются перед выполнением операции (6).

Эволюция содержания трассера по ячейкам легко визуализируется и ее можно наблюдать на мониторе. Одной из задач моделирования было исследование влияния формы и размещения перегородок на изменение во времени неоднородности распределения содержания трассера по ячейкам с целью поиска его минимума. Такая задача возникает при смешивании склонных к сегрегации сыпучих материалов. Неоднородность распределения может быть охарактеризована среднеквадратическим отклонением распределения содержания

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{u=1}^{nm} S_u^k - \frac{1}{nm}}{nm}}. \quad (7)$$

На рис. 1, справа показано изменение во времени величины σ для домена без перегородок (тонкая линия) и с перегородками, размещенными так, как это показано на схеме сечения справа. Видно, что при наличии перегородок может быть достигнута меньшая неоднородность, то есть более высокое качество смеси. Разработанная модель открывает возможности поиска оптимальных форм и размещений перегородок, включая их меняющееся со временем расположение.

Е. Н. Репина, аспирантка; В. П. Жуков, д. т. н., профессор

Оптимальное распределение нагрузки с учетом потокораспределения циркуляционной воды между турбоагрегатами ТЭЦ

Разработка адекватных математических моделей систем и подсистем ТЭЦ, построение на их основе алгоритмов оптимизации загрузки оборудования, обеспечивающих минимальный расход энергетических ресурсов, являются актуальными задачами, стоящими перед энергетикой. Потенциал энергосбережения за счет распределения нагрузок наглядно продемонстрирован на рис. 1, где приведены две зависимости расхода топлива от времени суток, полученные при оптимальном и наихудшем варианте распределения нагрузки между турбоагрегатами ТЭЦ.

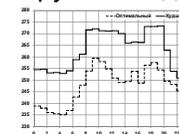


Рис. 1. Пример зависимости удельного расхода топлива на ТЭЦ от времени суток при оптимальном и наихудшем варианте распределения нагрузки между турбоагрегатами

При решении задачи распределения нагрузок в качестве математических моделей энергетических агрегатов используются их энергетические характеристики, которые позволяют оценивать соотношения входных и выходных энергетических потоков как для элементов системы так и для выбранной их совокупности. В качестве целевой функции оптимизации выбирается минимальный расход тепловой энергии на группу турбоагрегатов, обеспечивающий заданные суммарные тепловую и электрическую нагрузки. В качестве параметров оптимизации выбираются нагрузки отдельных агрегатов. В традиционной постановке задача оптимизации загрузки оборудования может быть представлена следующим образом: оптимально с точки зрения расхода энергии распределить заданные тепловую (Q_t) и электрическую (N) нагрузки между турбоагрегатами

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i = \sum_{i=1}^n N_i q_{ti}(Q_{ti}, N_i) \Rightarrow \min_{Q_{ti}, N_i}, N = \sum_{i=1}^n N_i; Q_t = \sum_{i=1}^n Q_{ti}, \quad (1)$$

где Q – суммарный расход тепловой энергии на выработку электроэнергии, N – электрическая мощность турбогенератора; q_t – удельный расход тепловой энергии брутто на выработку электроэнергии турбоагрегатом, определяемый на основе их энергетических характеристик; Q_t – тепловая нагрузка регулируемого теплофикационного отбора пара; n – количество турбоагрегатов, участвующих в распределении нагрузки; индекс i – номер агрегата.

Одним из факторов, существенно влияющих на тепловую эффективность турбины, является величина давления пара (или вакуума) в конденсаторе турбины. По экспертным оценкам изменение давления пара в конденсаторе на 1 кПа приводит к изменению примерно на 1 % электрической мощности турбины. Давление пара в конденсаторе зависит от температуры и расхода циркуляционной (охлаждающей) воды, подаваемой в конденсатор. Если температура охлаждающей воды связана с климатическими и погодными условиями, влиять на которые мы не можем, то расход охлаждающей воды можно регулировать за счет использования циркуляционных насосов с регулируемым углом установки рабочих лопаток, частотного управления скоростью вращения ротора насоса, регулировочной арматуры при параллельном включении насосов и конденсаторов. Увеличение расхода циркуляционной воды приводит к уменьшению давления пара в конденсаторе с одновременным увеличением выработки электроэнергии и увеличением расхода электрической энергии на прокачку воды. Для энергетической турбины существует понятие экономического вакуума, которому соответствует максимальное значение полезного отпуска электрической мощности от турбины. Экономический вакуум обеспечивается оптимальным расходом охлаждающей воды через конденсатор. Следует отметить, что величина экономического вакуума зависит от нагрузки турбины.

Задача оптимального распределения нагрузки (1) и задача определения оптимального вакуума традиционно рассматриваются отдельно. В предлагаемом исследовании сделана попытка при оптимальном распределении нагрузки учесть фактор потокораспределения охлаждающей воды между турбинами.

На рис. 2 представлена схема ТЭЦ с параллельно включенными турбинами по острому пару и конденсаторами по циркуляционной воде. Для случая распределения теплофикационной и электрической нагрузки между n турбинами с учетом потокорас-

пределения циркуляционной воды между конденсаторами оптимизационная задача (1) может быть сформулирована следующим образом

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i = \sum_{i=1}^n N_i q_{ti}(Q_{ti}, N_i, W_i) \Rightarrow \min_{Q_{ti}, N_i, W_i},$$

$$N = \sum_{i=1}^n N_i, Q_t = \sum_{i=1}^n Q_{ti}, W = \sum_{i=1}^n W_i, \quad (2)$$

где W – суммарный расход циркуляционной воды.

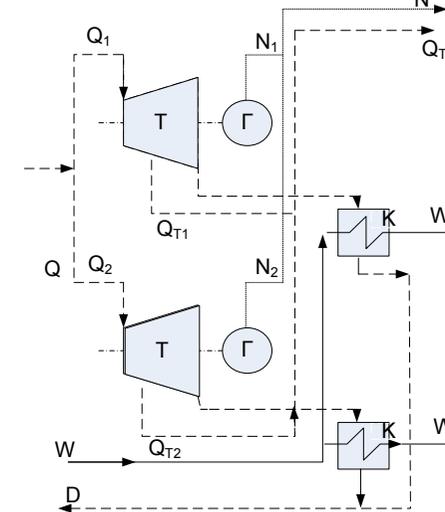


Рис. 2. Схема отпуска электрической и тепловой энергии с ТЭЦ: Т – турбина, Г – генератор, П – подогреватель; К – конденсатор

Сплошной линией на рис. 2 показаны энергопотоки с охлаждающей водой, штриховой – с паром и конденсатом пара, пунктирной – с электрическим током.

Решение поставленной задачи позволяет получить дополнительный эффект при оптимизации распределения нагрузки за счет учета фактора потокораспределения охлаждающей воды между конденсаторами турбин.

П. В. Жуков, аспирант; С. А. Добротин, студент;
В. Е. Мизонов, д. т. н., профессор

Исследование влияния граничных условий на результаты моделирования теплового состояния вращающихся роликов

Ролики машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) представляют собой толстостенные цилиндры, вращающиеся вокруг горизонтальной оси. В процессе эксплуатации они подвергаются циклическим термическим и механическим нагрузкам, которые приводят к образованию трещин и в дальнейшем к разрушению роликов. В связи с этим исследование факторов, влияющих на тепловое состояние роликов, с целью обеспечения надежной и безаварийной работы является актуальной задачей.

Основные тепловые потоки, влияющие на тепловое состояние ролика, представлены на рис. 1.

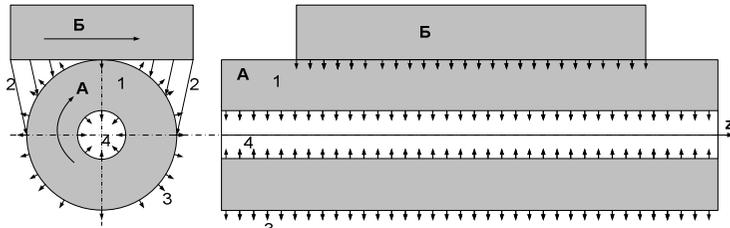


Рис. 1. Исследуемая схема тепловых потоков к ролику (A) за счет: 1 – контактного теплообмена со слябом (Б); 2 – радиационного теплообмена со слябом; 3 – конвективного теплообмена с окружающим воздухом; 4 – конвективного теплообмена с охлаждающей жидкостью

В верхней точке вращающийся ролик соприкасается с раскаленным металлом, что обуславливает подвод тепловой энергии за счет контактного теплообмена. Кроме этого раскаленный сляб передает ролику часть тепловой энергии за счет излучения. Отвод тепловой энергии от наружной поверхности осуществляется через воздух в окружающую среду и от внутренней поверхности ролика – через охлаждающую воду. Для исследования влияния перечисленных тепловых потоков на тепловое состояние ролика проведены специальные расчетные исследования.

В основу моделирования положено уравнение теплопроводности, записанное в цилиндрических координатах

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right], \quad (1)$$

где T – температура; r, φ, z – цилиндрические координаты (ось z совпадает с осью ролика); t – время процесса; a – коэффициент температуропроводности.

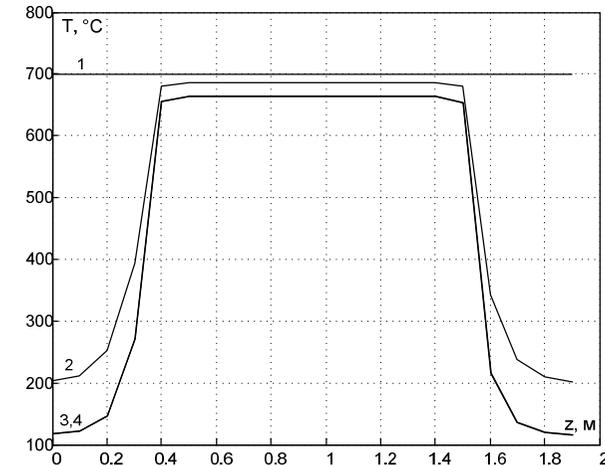


Рис. 2. Расчетные зависимости распределения температуры наружного слоя ролика вдоль осевой координаты при учете различных условий теплообмена: 1 – контактный нагрев теплоизолированного ролика, 2 – контактный нагрев при охлаждении жидкостью, 3 – контактный нагрев при охлаждении жидкостью и воздухом, 4 – контактный и радиационный нагрев при охлаждении жидкостью и воздухом

При построении модели теплопроводности условия теплообмена на границах ролика учитываются формированием соответствующих граничных условий. Контактный теплообмен в верхней точке на основании экспериментальных данных [1] учитывается заданием температуры ролика в точке его контакта со слябом, то есть граничных условий первого рода (700°C). Охлаждаемая водой внутренняя поверхность цилиндра согласно экспериментальным данным [1] имеет практически фиксированную температуру, что также учитывается в модели граничными условиями первого рода (200°C). При вращении ролика через его наружную поверхность часть энергии передается в окружающую среду воздуха, что учитывается в модели соответствующим тепловым потоком или граничными условиями второго рода. Температура окружающего воздуха считается постоянной и равной 50°C . Ради-

ационный нагрев верхней части ролика, обращенной к раскаленному металлу сляба, учитывается посредством закона Стефана-Больцмана и граничных условий второго рода. Решение уравнения (1) с учетом сформулированных граничных условий получено из разработанного подхода [2]. Результаты расчетов представлены на рис. 2 в виде зависимости средней температуры поверхности ролика от координаты z для различных условий на границе теплообмена.

Анализ результатов численных экспериментов позволяет сделать следующие выводы. На распределение температур в ролике основное влияние оказывают потоки тепловой энергии при контактом теплообмене со слябом, при конвективном теплообмене на внешней и на внутренней поверхности ролика. Теплообмен излучением от сляба существенного влияния на температурное поле ролика не оказывает.

Библиографический список

1. Целиков, А. А. Экспериментальное исследование температурных полей в роликах машины непрерывного литья / А. А. Целиков // Труды ВНИИМЕТМАШа. – 1979.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, №2012611546 от 10 февраля 2012 года. Авторы: Жуков В. П., Беляков А. Н., Жуков П. В.

Д. М. Смоляков, аспирант; А. И. Яманин, д. т. н., профессор

К вопросу о расчете динамики двигателей с продолженным расширением

Современные тенденции развития двигателестроения диктуют необходимость создания энергоэффективных, экономичных и экологичных двигателей. В последние годы разработчики всё более пристальное внимание стали обращать на сложные конструктивные схемы механизмов, позволяющих достичь требуемых параметров, в отличие от традиционных ДВС с кривошипно-шатунным механизмом. Одним из таковых является двигатель с продолженным расширением рабочего тела. Называются такие его преимущества как увеличение мощности, улучшение экономических и экологических характеристик и пр. Использование подобного цикла позволит увеличить термический КПД цикла, а соответственно и индикаторный КПД двигателя с искровым зажиганием на 10–20 % [2].

Динамические характеристики подобных двигателей могут стать одним из факторов, способных препятствовать внедрению в

серийно-массовое производство. Проведённый анализ показал, что такие важные аспекты как уравновешенность, прочность, виброактивность двигателей с продолженным расширением практически не изучались. Также на данный момент не существует алгоритма расчёта уравновешенности подобных двигателей.

Анализ уравновешенности традиционного ДВС заключается в определении свободных сил инерции и их моментов [4]. При определении сил и их моментов, возникающих в двигателе, применяются аналитические, графические или графоаналитические методы. При аналитическом исследовании определяют сумму проекций на оси координат сил инерций поступательно-движущихся масс всех цилиндров и сумму моментов этих сил относительно тех же осей. Ряд вопросов уравновешенности может быть разрешён графическими методами Кельша и Тейлора [1].

По методу Кельша сила инерции ПДМ рассматривается как проекция на ось цилиндра вектора, равного по величине амплитуде силы инерции соответствующего порядка. Этот вектор вращается с угловой скоростью коленчатого вала, в 2, 4 и т. п. раза быстрее сообразно с порядком силы инерции. Проекция этого вектора на направление, перпендикулярное оси цилиндра, исключается из рассмотрения.

Метод Тейлора (в отличие от метода Кельша) заключается в том, что сила инерции представляется в виде проекции двух векторов, по величине равных половине амплитуды силы инерции, вращающихся с одинаковой угловой скоростью в разные стороны. Скорость вращения для сил инерции 1-го порядка равна скорости вращения вала; для сил инерции 2-го порядка скорость вращения вдвое быстрее и т. д.

Описанные выше методики расчёта неуравновешенности двигателя являются индивидуальными и подходят лишь для конкретного типа двигателя. Расчёт уравновешенности двигателя с продолженным расширением, имеющим сложную кинематическую схему, будет весьма затруднительным с использованием существующих методов. Достоверность такого расчёта будет невысока. Предлагается метод определения сил инерции и моментов сил инерции с применением современных CAD/CAM технологий [3]. С его помощью можно исследовать любые механизмы, в том числе с усложненным или отличным от кривошипно-шатунного механизма. Реализация метода осуществляется в виде универсальной программы, в среде которой можно выполнять построение графиков и годографов неуравновешенных сил инерции и моментов сил инерции.

Библиографический список

1. **Авиационные** двигатели: Конструкция и расчёт деталей / А. Е. Заикин [и др.]; под ред. А. Е. Заикина. – М.: Гос. изд-во оборон. пром., 1941. – 619 с.
2. **Дьяченко, В. Г.** Термодинамические циклы двигателей внутреннего сгорания с продолженным расширением / В. Г. Дьяченко // Двигатели внутреннего сгорания // – 2004. – № 1. – с. 27–29.
3. **Яманин, А. И.** Компьютерно-информационные технологии в двигателестроении / А. И. Яманин, Ю. В. Голубев, А. В. Жаров, С. М. Шилов, А. А. Павлов. – М.: Машиностроение, 2005. – 497 с.
4. **Яманин, А. И.** Динамика поршневых двигателей / А. И. Яманин, А. В. Жаров. – М.: Машиностроение, 2003. – 468 с.

МАТЕРИАЛЫ Региональной научно-технической конференции аспирантов и студентов «ЭНЕРГИЯ-2012»

Составитель – ответственный за научную работу студентов
ЭМФ ИГЭУ Аполонский В.В.

Лицензия ИД № 05285 от 4 июля 2001 г.
Подписано в печать 18.05.2012. Формат 60x84 ¹/₁₆. Печать
офсетная.
Усл. печ. л. . Тираж 120 экз. Заказ .

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический
университет им. В.И. Ленина»
153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34.
Отпечатано в РИО ИГЭУ