

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
БЕЛОРУССКАЯ ИНЖЕНЕРНАЯ АКАДЕМИЯ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ГОМЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ П.О. СУХОГО»
АООТ «ОКБ Сухого»

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МАШИНОВЕДЕНИЯ

**Тезисы докладов
международной научно-технической конференции
(научные чтения, посвященные Павлу Осиповичу Сухогу)**

Гомель 2002

УДК 621.01
М38

М38 Современные проблемы машиноведения: Тезисы докладов международной научно-технической конференции (4-6 июля 2002 г., г. Гомель). – Гомель: Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», 2002. – 142 с.

В сборнике содержатся тезисы докладов международной научно-технической конференции. Представлены новейшие результаты научных исследований в области динамики, прочности и надежности машин; моделирования процессов, автоматизации конструирования и проектирования машин; аэро- и гидродинамики, пневмо- и гидросистем машин и аппаратов; приборов и систем автоматического управления.

Тезисы докладов предназначены для широкого круга научных и инженерно-технических работников промышленных предприятий и научно-исследовательских учреждений, а также аспирантов и студентов технических вузов.

Под общей редакцией к.т.н., доцента С.Б. Сарело

Редакционная коллегия:

Верещагин М.Н., д.т.н., профессор
Вериго Б.А., к.т.н., доцент
Кенько В.М., к.т.н., доцент
Луковников В.И., д.т.н., профессор
Михайлов М.И., к.т.н., доцент
Россол А.И. – технический редактор
Тариков Г.П., д.т.н., доцент
Шабловский О.Н., д.ф.-м.н., профессор

Подготовка и проведение конференции осуществлены на базе Учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого»

ISBN 985-420-045-0

© Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», 2002

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

- Абдарашистов Р.Г., Мартынов А.В.* Посадка беспилотного летательного аппарата на неподготовленную ВПП 9
- Сидорский С.С.* Повышение долговечности, служебных свойств машиностроительных и электротехнических изделий методами вакуумно-плазменной обработки 9
- Кривошеев И.А.* Автоматизация системного проектирования летательных аппаратов и их элементов 10

СЕКЦИЯ А. ДИНАМИКА, ПРОЧНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

- Шишов В.П., Ткач П.Н., Ревякина О.А.* Оптимизация проектирования передач с арочными и корсетными зубьями 12
- Телегин В.В.* К вопросу о выборе расчётной модели при динамическом синтезе кулачковых механизмов 13
- Рябов В.Г., Божкова Л.В., Норицина Г.И.* Контактная задача взаимодействия цилиндра, имеющего внутреннее упругое трехслойное покрытие, с жестким валом 14
- Фомичев Ю.И., Карташов Н.С., Бутин В.М., Ермаков А.И.* Расчетно-экспериментальное исследование прочности крупногабаритной установки высокого давления 15
- Гурьева Л.А., Гурьев И.Г.* Расчет элементов оболочечной конструкции заданной надежности 16
- Гурьева Л.А.* Оптимальное распределение надежности между элементами оболочечной конструкции 17
- Наркевич А.Л., Ставров В.П.* Гнутые стержневые элементы конструкций из однонаправленно армированных термопластов 18
- Ставров В.П., Ставров В.В., Столяров А.И., Ткачев В.М.* Статистические характеристики поврежденности хрупкого покрытия при воздействии водно-капельной струи 19
- Наурызбаев Р.К., Исаков К.А.* Динамика гибкого механизма двойного параллелограмма 20
- Павелко В.П., Тимощенко Ю.М.* Проблемы многоочаговых усталостных повреждений в тонкостенных элементах авиационных конструкций 21
- Павелко И.В., Ярославцев С.В.* Оценка влияния трещины в сечении вала на критические обороты ротора ГТД 22
- Пекари А.И., Шпорт В.И., Марьин Б.Н., Кузьмин В.Ф.* Новая конструкция стенда для расстыковки и стыковки частей планера самолета при его ремонте 23
- Клейнхоф М.А., Павелко В.П., Павелко И.В.* Теоретический анализ разрушения тонкого слоя волокнистого композита при растяжении 24
- Царук Ф.Ф., Бельский С.Е., Соболев В.Р., Блохин А.В.* К физической модели влияния частоты механических колебаний на циклическую прочность материалов 25
- Бельский С.Е., Царук Ф.Ф., Блохин А.В.* Пороговые напряжения – важная характеристика циклической прочности конструкционных материалов 26

<i>Леоненко О.В.</i> Влияние типа толкача на нагруженность металлоконструкции скрепера МоАЗ-6014	27
<i>Астахов Э.И., Кудин В.В.</i> Уменьшение динамических воздействий на лазерные технологические комплексы резки металлов	28
<i>Михайлов М.И., Стасенко Д.Л., Садченко С.П., Рыбаков А.В.</i> Исследование магнитно-абразивной обработки листового материала дискретным волокном	29
<i>Михайлов М.И., Шабакаева З.Я., Левин И.А.</i> Исследование фрикционных характеристик композиционного материала, используемого для покрытия СМП	30
<i>Жуков А.В., Клоков Д.В., Бычек А.Н., Симанович В.А.</i> Процесс взаимодействия колесных машин с лесными почвогрунтами	31
<i>Белоцерковский М.А., Кукареко В.А., Сухоцкий П.Г.</i> Структура и свойства покрытий, полученных активированным распылением проволок	32
<i>Белоцерковский М.А., Сухоцкий П.Г., Федаравичус А.В.</i> Создание вибродемпфирующих элементов на основе металлополимерных газопламенных покрытий	33
<i>Кенько В.М., Степанкин И.Н.</i> К вопросу оценки модуля упругости неметаллических включений в сталях карбидного класса	34
<i>Ковтун В.А., Шувалов В.Б., Плескачевский Ю.М.</i> Особенности формирования металлополимерных покрытий при высокоскоростном термическом активировании электрическим током высокой плотности	35
<i>Шувалов В.Б., Ковтун В.А.</i> Некоторые аспекты спекания металлокерамического материала на основе порошковой системы железо-никель-медь	36
<i>Струкачёв А.Ю.</i> Упругие свойства полярных полиморфных материалов при динамических воздействиях	37
<i>Селивончик Н.В., Бобарикин Ю.Л.</i> Анализ условия достижения адгезии между слоями при плакировании прокаткой	38
<i>Люцко В.А.</i> Исследование динамики износа режущих элементов кормоуборочной техники, упрочненных магнитно-электрическим способом	40
<i>Мельников Д.В.</i> Влияние эрозии на формирование упрочненного слоя при магнитно-электрическом упрочнении	41
<i>Шабакаева З.Я.</i> Исследование физико-механических свойств композиционных материалов на основе эпоксиполиэфирных смол	42
<i>Серафимович В.В., Шелестова В.А., Горбацевич Г.Н.</i> Применение антифрикционных композиционных материалов группы Флувис в компрессоростроении	43
<i>Коршунов А.И.</i> Исследование триботехнических характеристик модифицированных плазменных покрытий	44
<i>Гавриленко С.Л., Хиженок В.Ф.</i> Определение характеристик вязкопластического течения в задачах технологической механики и биомеханики	45
<i>Бобарикин Ю.Л., Швецов А.Н., Шишков С.В.</i> Способы получения полосового композиционного антифрикционного материала с наполнителем на основе политетрафторэтилена	46
<i>Сергиенко В.П., Левин И.А., Купреев А.В.</i> Безасбестовые фрикционные материалы, предназначенные для работы в среде масла	47
<i>Мизгайлов В.Н.</i> Покрытие, уменьшающее обратное радиолокационное отражение	48
<i>Рыженко М.М., Друзик Н.В.</i> Влияние наполнителей на процессы отверждения и свойства покрытий из эпоксидных композиций	49

- Петрашенко П.Д.* Пути улучшения формуемости тонкостенных сложнопрофильных изделий из реактопластов для машиностроения 50
- Борцов А.А., Квасов Г.В., Редько П.Г., Константинов С.В., Тарасов А.З., Беляев А.В., Кузнецов В.Е.* Некоторые вопросы разработки рулевых приводов для высокоавтоматизированных систем управления перспективных маневренных самолетов 51
- Авдеев Д.М., Бойко А.А., Кенько В.М.* Влияние пористости на напряженно-деформированное состояние алмазно-абразивного материала при обработке оптического стекла 51

**СЕКЦИЯ Б. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, АВТОМАТИЗАЦИЯ
КОНСТРУИРОВАНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАШИН**

- Шилько С.В., Бабин А.П., Старжинский В.Е., Зернин М.В.* Моделирование контактного взаимодействия в сопряжениях микроэлектромеханических систем 53
- Береснев В.В.* Моделирование рабочих процессов в дробилках ударного действия с шарнирно сочлененными рабочими элементами на основе единичного акта соударения 54
- Попов В.Б.* Автоматизация загрузки самоходного кормоуборочного комбайна КСК-100 55
- Цырлин М.И., Родченко Д.А., Буй П.М.* Применение численных методов для моделирования перемещения фронта плавления при нагреве движущейся с потоком плазмы полимерной частицы 56
- Тариков Г.П., Комраков В.В.* К вопросу об определении геометрии зубьев и распределения контактных давлений при износе 57
- Тариков Г.П., Ковалева Н.В.* К решению контактных задач термоупругости 58
- Цырлин М.И.* Моделирование и исследование влияния режимов плазменного напыления на эксплуатационные свойства полимерных покрытий 59
- Жолобов А.А., Будкевич А.М.* К вопросу моделирования колебаний инструмента при точении 60
- Настасенко В.А.* Новые червячные инструменты для обработки осеблочных зубчатых колес и их САПР 61
- Кроль Д.Г., Концевой И.А.* Квазистационарная стабилизация поверхностного нагрева металлов 62
- Колесник Ю.Н.* Моделирование энергоэффективного состава насосных агрегатов для перекачки нефти по трубопроводам 64
- Семчен В.И., Партнов С.Б., Команденко В.А.* Моделирование и исследование процесса уплотнения поличастотным вибратором 65
- Партнов С.Б., Команденко В.А., Семчен В.И.* Прибор для оперативного контроля степени уплотнения дорожных покрытий в процессе укатки 66
- Семин А.Г., Тимофеев А.М., Локтионов А.В.* Исследование механизма с прерывистым движением выходного звена 67
- Голушко П.Е., Чаус В.П., Малофей А.Н.* Обоснование геометрической формы ножей измельчающего барабана кормоуборочного комбайна 68
- Завистовский С.Э.* Моделирование процесса электростатического осаждения дисперсных абразивных слоев 69
- Попов В.Б.* Параметрическая оптимизация механизма подъема секции косилки-плющилки ротационной КПП-6.0 70

<i>Семенова Т.В., Шилько С.В.</i> Применение биомеханических аналогий к оптимизации композитных материалов	71
<i>Буздалкин К.Н.</i> Расчетные модели и методы оценки энергоэффективности технологических процессов и новой техники	72
<i>Павлюченко В.Г., Свирский Д.Н.</i> Управление инженерными данными в CALS	73
<i>Кудин В.П., Верига Б.А.</i> Радиолокационное сечение рассеяния летательных аппаратов	74
<i>Кудин В.П.</i> Анализ проволочных излучателей в составе бесконечной плоской ФАР	75
<i>Голубев А.Н., Матвеев К.С., Гусаков А.В.</i> Оптимизация конструктивных параметров шнековых экструдеров для переработки отходов	76
<i>Дубинский Н.А.</i> Исследование свойств композиций на основе железа	77
<i>Дубинский Н.А.</i> Установки для электрохимического осаждения композиционных материалов	78
<i>Хихлуха Т.Н., Бодрунов Н.Н., Петроковец Е.М., Киряков В.Н.</i> Программное обеспечение механических испытаний адаптивных материалов и биотканей	79
<i>Леневский Г.С., Ситников В.Н., Потапович Д.С.</i> Структурное моделирование упругих пространственно-распределённых объектов в среде SIMULINK пакета MATLAB	80
<i>Бескровный А.В.</i> Математическая модель редукторного и безредукторного асинхронного электропривода стенда испытания пружин	81
<i>Виноградов Э.М., Вериго А.Б.</i> Моделирование нестационарных потоков в трубопроводе	82
<i>Виноградов Э.М., Орышко Р.Н., Бордовский А.М., Вериго А.Б.</i> Модуль регистрации ускорений для диагностики магистральных нефтепроводов	83
<i>Рогачев А.В., Буй М.В., Сидорский С.С.</i> Моделирование процессов межфазного взаимодействия металл-полимер в условиях протекания контактных химических реакций	85
<i>Черноус Д.А., Семенова Т.В.</i> Мезомеханические модели деформирования пористых материалов	86
<i>Шевченко О.А., Джорджишвили А.Г.</i> Моделирование пробоин в пластинах из композиционного материала	87

СЕКЦИЯ В. АЭРОДИНАМИКА; ПНЕВМО- И ГИДРОСИСТЕМЫ МАШИН И АППАРАТОВ

<i>Журавлев О.А., Шапошников Ю.Н., Щеглов Ю.Д., Комаров С.Ю., Плясунов А.С.</i> Лазерный диагностический стенд для исследования пульсационно-вибрационных процессов гидрогазовых систем	89
<i>Жилевич М.И., Заблоцкий Е.М., Заблоцкий М.М.</i> Анализ влияния растворимости газа на жесткость пневмогидравлической подвески карьерных самосвалов	90
<i>Автушко В.П., Бартош П.Р., Гиль С.В.</i> Преобразование двухзвенных пневмоцепей в однозвенные при исследовании их динамики	91
<i>Гиль С.В.</i> Линейная математическая модель следящих пневматических аппаратов с силовой обратной связью	92
<i>Автушко В.П., Жилевич М.И.</i> Моделирование и расчет динамики электропневмомодулятора в циклическом режиме работы	93

<i>Михневич А.В., Андреевец Ю.А.</i> О величине зазора в распределительном узле аксиально-поршневых гидромашин	94
<i>Михневич А.В., Андреевец Ю.А.</i> Анализ динамики распределительных узлов аксиально-поршневых гидромашин при высоких давлениях	95
<i>Станюк Е.И., Веренич И.А.</i> Метод расчета потерь мощности на трение в подшипниках скольжения шестеренного насоса	96
<i>Овсянник А.В., Вальченко Н.А., Дробышевский Д.А., Новиков М.Н., Коришунев Е.А.</i> Кипение ацетона на горизонтальных трубах с продольным оребрением в кольцевом канале	98
<i>Андреианов Д.Н.</i> Способы активного регулирования объемных гидроприводов с целью повышения их технико-эксплуатационных показателей	98
<i>Подымако М.Э.</i> Влияние давления воздуха в шинах на нагруженность подмоторной рамы скрепера МоАЗ – 6014	99
<i>Ярмоленко М.А.</i> Триботехнические свойства и особенности морфологии поверхностно модифицированных резин	101
<i>Фомичев Ю.И., Томило Э.А.</i> Напряженно-деформированное состояние и износ пневматических шин	102

СЕКЦИЯ Г. ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

<i>Банов М.Д., Пионтек Ю.Е., Турко В.Н.</i> Квантовый подход к измерению и анализу сигналов акустической эмиссии (АЭ)	103
<i>Абрашкин В.П., Ефремов А.Ю., Пехтерев А.А., Ситников В.Н.</i> Концепция разработки распределенной микропроцессорной системы управления энергетическими режимами большегрузных автомобилей	104
<i>Абрашкин В.П., Рынкевич С.А., Якубов Е.Н.</i> Проблемы создания мехатронных систем управления с распределенным интеллектом	105
<i>Тарасик В.П., Рынкевич С.А.</i> Интеллектуальная система управления энергетическими режимами автомобиля с гидромеханической трансмиссией	106
<i>Матвийчук К.С.</i> Исследование технической устойчивости движений нестационарных систем автоматического управления с переменной структурой	107
<i>Луковников В.И., Рудченко Ю.А.</i> Анализ уравнения автоколебательного движения асинхронного электродвигателя методом компенсации	108
<i>Верига Б.А., Вяхирев Н.И.</i> Линейно независимый базис в системах передачи информации	109
<i>Парфенович О.Н.</i> Асинхронный с короткозамкнутым ротором регулируемый электродвигатель с измененными полюс-фазами в торцевой части силового ротора	110
<i>Савельев В.А.</i> Влияние способов торможения на характеристики нагрузочного электропривода	112
<i>Соленков В.В., Брель В.В.</i> Электромеханические переходные процессы в асинхронных двигателях с тормозными устройствами	113
<i>Комяков Д.Н.</i> Многорежимный тиристорный асинхронный электропривод рольгангов	114
<i>Савельев В.А.</i> Особенности динамики нагрузочного стенда	115
<i>Захаренко С.И., Тадарев В.В., Захаренко В.С., Савельев В.А.</i> Использование электрических машин постоянного и переменного тока в нагрузочной части испытательных стендов с рекуперацией энергии	116

<i>Курганов В.В., Крышнев Ю.В.</i> Анализ экспериментальных данных опытов свободного выбега мощных синхронных двигателей	117
<i>Логвин В.В., Рожков А.И.</i> Сравнительный анализ систем векторного управления асинхронным электродвигателем при питании от инвертора тока и инвертора напряжения	118
<i>Луковников В.И., Хабибуллин Д.А., Логвин В.В.</i> Вибродиагностирование технического состояния роторного оборудования взрывобезопасных химических производств и процессов	119
<i>Кухаренко С.Н., Рожков А.И.</i> Особенности потенциального и токового управления разомкнутыми электроприводами	120
<i>Позуляев М.Н.</i> Особенности проектирования электромеханических преобразователей для высокочастотных автономных электрогидравлических вибраторов	121
<i>Вепнер Л.В., Козлов А.В.</i> Стенд испытания пружин на основе линейных электродвигателей	122
<i>Карпов В.А., Лядвин Е.А., Захаренко Л.А., Шуликов В.И., Самсонов С.Н.</i> Универсальный измеритель температуры	123
<i>Никеенков А.И., Щуплов В.В.</i> Измерение параметров сейсмоприемников	124
<i>Леонов С.И.</i> Влияние степени фильтрации на точность компенсационного корнеизвлекающего устройства	125
<i>Щуплов В.В., Никеенков А.И.</i> Двумерные дискретные функции Уолша в задаче синтеза пространственной характеристики направленности группы сейсмоприемников	126
<i>Карпов В.А., Мурашко С.А.</i> Измерительный преобразователь для теплового датчика расхода	127
<i>Абаринов Е.Г., Изотов П.П.</i> Результаты исследования температурной погрешности дифманометров с дифференциально-трансформаторным датчиком	128
<i>Ростокин А.В.</i> Импульсное зондирование при исследовании импедансных свойств биосегментов	129
<i>Абаринов Е.Г., Кондратьев А.А.</i> К вопросам определения импеданса датчика электромагнитного расходомера	130
<i>Финаев В.Е.</i> Исследование влияния ферромагнитных и электропроводящих примесей на показания электромагнитных расходомеров	131
<i>Муринов И.В.</i> Повышение быстродействия сглаживающих фильтров измерительных преобразователей	132
<i>Зелинский Д.Н., Мизгайлов В.Н.</i> Исследование радиолографических антенн	133
<i>Бохан А.Н., Кротенок В.В.</i> Ограничение внутренних перенапряжений распределительной сети	134
<i>Кухаренко С.Н., Шереметьев Д.В.</i> Сравнительный анализ ключевых элементов силовой электроники	136
<i>Зализный Д.И., Лось Д.М.</i> Устройство для тепловой защиты силовых масляных трансформаторов	137
<i>Козусев Ю.А.</i> Интегрирующий четырехтактный АЦП	138
<i>Куценко Г.Ф., Парфёнов А.А.</i> Исследование моделей ВЛ 6-10 кВ: возможность резервирования с учетом отклонения напряжения	139
<i>Куценко Г.Ф., Парфёнов А.А.</i> Исследование моделей ВЛ 6-10 кВ: расчет токов короткого замыкания	140
<i>Завистовский В.Э.</i> Надежность материала восстановленной детали	141

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

ПОСАДКА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА НЕПОДГОТОВЛЕННУЮ ВПП

Р.Г. Абдарашитов, А.В. Мартынов

АООТ «ОКБ Сухого», г. Москва, Россия

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БПЛА) являются весьма перспективным направлением в авиации. С их помощью уже сейчас решается широкий круг задач, связанных с наблюдением за земной поверхностью. В будущем он может существенно расшириться. Сейчас, например, рассматривается возможность использования БПЛА для мониторинга состояния озонового слоя, применения в качестве ретрансляторов телевизионных сигналов или сигналов мобильной связи в труднодоступной местности.

Жесткие требования, предъявляемые к взлетному весу БПЛА и простоте конструкции взлетно-посадочных устройств, заставляют проектировщиков искать пути снижения посадочных нагрузок. С другой стороны, к большинству БПЛА предъявляется требование обеспечения возможности выполнения посадки на неподготовленную площадку ограниченных размеров.

Из известных в настоящее время способов выполнения посадки наименьшие нагрузки на летательный аппарат в момент касания обеспечивает выравнивание по экспоненциальной траектории. Существенным недостатком этого способа посадки является очень большой разброс точки касания по дальности ВПП.

В докладе рассматриваются проблемы обеспечения возможности выполнения посадки на неподготовленную площадку ограниченных размеров. Авторами принята попытка найти компромисс между посадочными нагрузками на ЛА и точностью приземления.

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ, СЛУЖЕБНЫХ СВОЙСТВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДАМИ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ

С.С. Сидорский

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Совершенствование технологии получения базовых машиностроительных материалов, создание новых экологически чистых процессов, дающих экономию энергии, сырья, всегда являлось одной из актуальных задач машиностроения, современного материаловедения. В последние годы значительно возрос интерес к разработке новых методов обработки машиностроительных материалов, приводящей к изменению структуры и состава поверхностных слоев.

В докладе рассмотрены основные закономерности проведения вакуумно-плазменных методов обработки полимерных материалов, металлов, характеризующихся высокими технико-экономическими показателями и эффективностью. В числе таких методов: вакуумная металлизация, плазмохимическая поверхностная обработка, обработка в электрических разрядах, нанесение различных органических покрытий.

В частности, сформулированы основные направления совершенствования технологии вакуумной металлизации стеклопластиков, предложена методика и произведен расчет теплового режима металлизации стеклопластиков, полиимидных пленок и других материалов. Для них определены максимальные скорости роста металлического покрытия, при которых не происходит тепловое разрушение подложек, при различных технологических схемах процесса, что особенно важно при конструировании высокопроизводительных установок металлизации рулонных материалов. Разработаны технологические рекомендации по активационной обработке полимеров перед металлизацией. Для получения металлизированных пластиков с высоким качеством и производительностью предложена модульная линия металлизации, в которой используется комбинированный метод нанесения покрытия: на начальных стадиях – магнетронный или ионно-плазменный, на поздних – термический.

Установлена эффективность применения вакуумно-плазменной обработки для поверхностного модифицирования резинотехнических изделий (РТИ). Показано, что если модификация проводится путем обработки эпиламинированных резин в плазме тлеющего разряда с последующим нанесением покрытия политетрафторэтилена, то эффект снижения трения сохраняется и при динамическом контакте без смазки.

Изучена эффективность применения тонких полимерных слоев для повышения износостойкости поверхностей трения. Показано, что при оптимальных режимах нанесения по температурному критерию и содержанию капельной фазы наиболее высокие триботехнические характеристики имеют пары трения с многослойными покрытиями $TiN + Cu + ПТФЭ$. Триботехнические испытания данных покрытий показали, что на протяжении всего процесса трения наблюдается практически постоянное значение $f_{mp} \sim 0,14 - 0,18$ и имеет место минимальное изнашивание контртела в среде дизельного топлива.

Перспективным технологическим приемом является осаждение углеродных алмазоподобных покрытий (АПП) на поверхность полимерных и неорганических материалов. Сформулированы основные направления совершенствования технологии осаждения АПП. Определены механические свойства легированных титаном АПП и многослойных систем на их основе. Показана перспективность применения их в узлах трения и при изготовлении абразивного инструмента.

АВТОМАТИЗАЦИЯ СИСТЕМНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И ИХ ЭЛЕМЕНТОВ

И.А. Кривошеев

*Уфимский государственный авиационный технический
университет, Россия*

Предлагаемая новая методология автоматизации системной разработки летательных аппаратов (а также других транспортных средств и технических систем) опирается на произведенный (по методике SADT с формализацией в форматах IDEF) структурный анализ процесса создания самолетов и двигателей. Выделены и сгруппированы по уровням структурные элементы (СЭ), используемые при моделировании двигателя на разных этапах жизненного цикла (в соответствии с CALS-технологией). Проанализированы проектно-доводочные задачи, в них выделена общая часть (взаимно вложенные обобщенные проектные процедуры). Для них предложены унифицированные алгоритмы, которые реализуются универсальными управляющими программами – Решателем и СППР (системой поддержки принятия

решений – по структурным признакам летательного аппарата и его элементов). Выделена логическая последовательность (взаимная вложенность) принимаемых проектных решений, сформирован универсальный алгоритм СППР и универсальная структура используемых для этого баз статистической информации (в том числе экспертно задаваемые «экстремальные точки», физические диапазоны, и распределения вероятности выигрыша для альтернатив при разных частных критериях надсистем). В соответствии с объектным подходом сформирована универсальная сетевая структура СЭ. Для формирования библиотек СЭ используются классификаторы, отражающие их специфику и аспекты представления (функциональный, конструкторский, технологический).

В процессе проектирования многоуровневая многоаспектная сетевая модель летательного аппарата и его подсистем динамически формируется по мере принятия решений из СЭ, которые выделяются из классификаторов и библиотек. Она имеет сетевую структуру, представляет собой однонаправленный граф (ОНГ) и формируется в виде дерева проекта средствами PDM-системы, причем дополнительные внутриуровневые связи реализуются средствами оригинальной МетаСАПР (Framework) САМСТО, разработанной в УГАТУ на кафедре авиационных двигателей.

Процесс проектирования сводится к динамическому построению дерева проекта, с поэтапным принятием структурных решений (с использованием СППР), получением с помощью Решателя промежуточных проектных решений, замещением с их помощью базовых значений (которые в начале берутся по прототипу), с возможностью возвратов и уточнений. При необходимости из вышестоящих в нижестоящие объекты передаются границы поиска решения и весовые коэффициенты оптимизации. Кроме оптимизации и согласования (идентификации), Решатель обеспечивает передачу границ поиска решений (области компромиссов) и признаков оптимизации в нижележащие страты. Окончательный выбор параметров производится с использованием построенного дерева проекта в рамках условной оптимизации.

Для реализации данной методологии разработан ряд конкретных CAD/CAM/CAE/PDM-приложений и систем имитационного сетевого моделирования. Методология иллюстрируется примерами проектирования самолета, двигателя, его узлов (компрессор, камера сгорания, турбина) и деталей, в том числе из композиционных материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ.

СЕКЦИЯ А. ДИНАМИКА, ПРОЧНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕРЕДАЧ С АРОЧНЫМИ И КОРСЕТНЫМИ ЗУБЬЯМИ

В.П. Шишов, П.Н. Ткач, О.А. Ревякина

*Восточноукраинский национальный
университет им. Владимира Даля, г. Луганск*

Зубчатые передачи входят в конструкцию большинства транспортных машин, энергетических установок и многих других агрегатов и в значительной степени определяют габаритные размеры, массу, надежность, долговечность и конкурентоспособность этих изделий. При этом резервы совершенствования традиционных передач практически отсутствуют. Поэтому задача оптимального проектирования становится особенно актуальной.

Передачи с арочными и корсетными зубьями занимают среди силовых передач особое место, т. к. имеют большую нагрузочную способность, плавность хода, легкость монтажа. Одним из перспективных направлений дальнейшего увеличения этих показателей является синтез по заданным критериям нагрузочной способности. Теоретически обоснованно, что зубчатые передачи, синтезированные по заданным критериям работоспособности, имеют в 2-2,5 раза большую нагрузочную способность в сравнении с известными образцами аналогичных цилиндрических передач с арочными и корсетными зубьями.

Наиболее важным из показателей является контактная прочность рабочих поверхностей зубьев. При линейном контакте она оценивается уровнем контактных напряжений, в значительной мере зависящих от приведенной кривизны рабочих поверхностей. Уменьшение кривизны оказывает положительное влияние на интенсивность износа зубьев, толщину масляного слоя в зоне контакта рабочих поверхностей, потери в зацеплении, теплонапряженность в зоне контакта.

Поэтому в качестве основного показателя нагрузочной способности выбрана приведенная кривизна рабочих поверхностей зубьев. Для синтеза передач с арочными и корсетными зубьями авторами получены оптимальные значения приведенной кривизны.

На основе проведенных исследований получены:

- дифференциальные уравнения, связывающие показатели нагрузочной способности и неизвестные функции, описывающие геометрию корсетных зубьев или геометрию инструментальной рейки (производящей поверхности) для нарезания колес;
- методика синтеза исходного контура режущего инструмента по заданным критериям работоспособности цилиндрических передач с арочными и корсетными зубьями;
- синтезированные исходные контуры режущего инструмента, обеспечивающие повышение критериев работоспособности передач с арочными зубьями;
- методика расчета и проектирования цилиндрических передач с арочными зубьями;

- методика определения геометро-кинематических и комплексных критериев работоспособности синтезированных передач;
- разработана методика определения экстремальных значений геометро-кинематических и комплексных показателей работоспособности передач, нарезанных режущим инструментом с обобщенной геометрией исходного контура. Сделаны выводы, даны рекомендации.

К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ РАСЧЁТНОЙ МОДЕЛИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ СИНТЕЗЕ КУЛАЧКОВЫХ МЕХАНИЗМОВ

В.В. Телегин

Липецкий государственный технический университет, Россия

В работе рассматриваются плоские кулачковые механизмы быстроходных машин-автоматов с вращающимся кулачком и движением исполнительного звена (коромысла) по схеме: *подъём – выстой – опускание – выстой*. Такие механизмы широко используются в системах переноса, транспортировки, подачи и других подобных, работоспособность которых во многом зависит от величины и характера протекающих в них динамических процессов.

Многочисленные исследования (теоретические и экспериментальные), а также опыт эксплуатации, позволяют выделить следующие факторы, влияющие в той или иной степени на динамику кулачковых механизмов:

- конструкция механизма и связанные с ней упруго-инерционные и диссипативные характеристики его звеньев;
- зазоры в кинематических парах;
- законы профилирования кулачка на участках подъёма и опускания;
- точность изготовления профиля кулачка;
- наличие и характер технологических нагрузок;
- наличие и характер конструкционных нагрузок, таких, как силовое замыкание и демпфирование.

Учёт перечисленных факторов определяет расчётную или динамическую модель механизма. Её адекватность реальному механизму можно в каждом конкретном случае проверить экспериментально. Однако такой подход оправдан лишь для подтверждения самого метода моделирования механизма (например, представления каждого из его звеньев конечным числом дискретных масс, соединённых упруго-диссипативными связями), необходимости учета тех или иных его параметров, оценки значений коэффициентов диссипации энергии. Кроме этого важно знать границы применимости моделей (их может быть несколько) для каждой из конструктивных схем механизма в зависимости от условий его работы (скорости, величины и характера внешних нагрузок), конструкций звеньев, степени изношенности кинематических пар. Другими словами необходима классификация механизмов по принципу: **конструкция – параметры – модель**.

В основе предлагаемой методики динамического синтеза лежит идея автоматического выбора и обчёта модели механизма исходя из его конструкции и параметров, которые меняются в процессе многочисленных итераций.

Работа представлена в виде системы автоматизированного проектирования кулачковых механизмов с элементами их динамического синтеза. Такими элементами являются, в частности, закон профилирования и допустимая точность изготовления кулачков, замыкающее усилие, параметры некоторых видов демпфирующих уст-

ройств. В качестве критериев при решении задач оптимизации используются минимальные и среднеквадратичные отклонения перемещений, скоростей и ускорений звеньев механизмов от идеальных, определяемых только кинематикой, значений. К числу граничных условий относятся максимально допустимые из условий прочности нагрузки.

Средой разработки системы автоматизированного проектирования кулачковых механизмов являются программные продукты фирмы Microsoft (Visual Studio 6.0) и AutoDesk® (AutoCAD 2002).

КОНТАКТНАЯ ЗАДАЧА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЦИЛИНДРА, ИМЕЮЩЕГО ВНУТРЕННЕЕ УПРУГОЕ ТРЕХСЛОЙНОЕ ПОКРЫТИЕ, С ЖЕСТКИМ ВАЛОМ

В.Г. Рябов, Л.В. Божкова, Г.И. Норицина

*Московский государственный технический университет «МАМИ»,
Россия*

С целью улучшения амортизационных свойств ряда машин и механизмов в последнее время наметилась тенденция применения многослойных упругих покрытий в местах сопряжения деталей. В связи с этим рассматривается задача о контактном взаимодействии трехслойного упругого покрытия цилиндрического отверстия в твердом теле с жестким валом.

В результате деформации упругих слоев произойдет соприкосновение жесткого цилиндра радиуса r_0 с внутренним упругим слоем по некоторой его части, характеризующейся углом θ_0 .

Предполагая справедливыми условия плоской деформации и пренебрегая силами трения в зоне контакта, определили величину зоны контакта (угол θ_0), закон распределения контактных давлений $p(\theta)$, напряженное и деформированное состояние упругих слоев, а также напряжения на связывающих поверхностях слоев.

При решении используются полярные координаты r, θ . В основу решения положен метод, предложенный в работе [1].

Для определенности присвоили порядковый номер каждому кольцевому слою, соответственно, 1, 2, 3, начиная от слоя непосредственно покрывающего цилиндрическое отверстие в твердом теле.

На основании результатов работы [1] можно представить в безразмерной форме компоненты тензора напряжений σ_{ri} радиальные $\sigma_{\theta i}$ и касательные $\tau_{r\theta i}$ ($i = 1, 2, 3$), радиальные w_i ($i = 1, 2, 3$) и касательные v_i ($i = 1, 2, 3$) перемещения каждого упругого слоя через ряд неизвестных безразмерных констант $a_0^{(i)}, b_0^{(i)}, a_1^{(i)}, b_1^{(i)}, c_1^{(i)}, d_1^{(i)}, d_1'^{(i)}, a_n^{(i)}, b_n^{(i)}, c_n^{(i)}, d_n^{(i)}$, где ($i = 1, 2, 3$), ($n = 2, 3, \dots$).

Основой исследования контактного взаимодействия цилиндра, имеющего внутри трехслойное упругое покрытие, с жестким валом, стало решение плоской смешанной задачи теории упругости для трехслойной кольцевой области, жестко заземленной по внешнему контуру и нагруженной по внутреннему контуру радиальной симметричной нагрузкой. Компоненты тензора напряжений и вектора перемещений представлены в безразмерном виде через 33 константы. Для определения этих констант получена система 33 линейных алгебраических уравнений. Найдено аналитическое соотношение результирующей нагрузки и зоны контакта.

Найденное аналитическое решение контактной задачи с помощью компьютерной программы позволяет при конкретных исходных данных (нагрузка, радиусы слоев покрытия, модули упругости и коэффициенты Пуассона материала слоев покрытия) численно определить величину зоны контакта, закон распределения контактных давлений, нагруженное и деформированное состояние упругих слоев.

Литература

1. Божкова Л.В., Чебанюк А.Н. Взаимодействие кольца, жестко посаженного на абсолютно твердое тело, с жестким основанием. – Известия ВУЗов СССР – № 8. – 1977. – С. 16-22.

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ КРУПНОГАБАРИТНОЙ УСТАНОВКИ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Ю.И. Фомичев, Н.С. Карташов, В.М. Бутин, А.И. Ермаков

*Московский государственный технический университет «МАМИ»,
Научно-производственное объединение «Лаборатория импульсной
техники», Российский государственный университет
нефти и газа им. А.М. Губкина, г. Москва, Россия*

Рассматриваются разработанные метод и программный комплекс прочностного расчетного анализа сложных современных оболочечных конструкций новой техники в условиях воздействия переменных вдоль меридионального и окружного направлений температурно-силовых нагрузок. Метод анализа заключается в расчете напряженно-деформированного состояния и в исследовании бифуркационной устойчивости конструкции под действием поверхностно-двумерных нагрузок.

Метод и программа предназначены для расчета составных многослойных тонкостенных упругих осесимметричных конструктивно или/и физически ортотропных оболочечных конструкций. Рассматриваемые метод и программа конечноэлементного анализа описаны в монографии [1]. Программный комплекс реализован на персональных компьютерах IBM PC/AT (286 – Pentium).

С помощью данного программного комплекса рассчитаны на прочность основные силовые элементы установки ультрафиолетовой дезинфекции воды разработки НПО «ЛИТ». Основной нагружающий фактор – внутреннее давление воды с расчетным давлением 14 кгс/см^2 .

Установка имеет большие габариты, относительно небольшие толщины, и работает под высоким давлением, поэтому обеспечение ее прочности является сложной инженерной и научной задачей. Учитывая длительный срок службы установки и многократные подъемы и сбросы давления, принято, что материалы деталей установки с целью исключения малоциклового усталости должны работать в пределах упругости. Данная расчетная работа возникла оттого, что первоначально спроектированная с плоским оребренным днищем входной камеры установка не выдержала испытательный уровень давления. При давлении 8 кгс/см^2 испытание было прекращено вследствие интенсивного растрескивания по сварным швам, особенно заметного в зоне соединения входного патрубка с оребренным днищем входной камеры. Было принято радикальное решение о замене плоского оребренного днища на торосферическое с плавными обводами. Также в месте приварки цилиндра к шпангоуту вводилась кольцевая накладка невысокой жесткости с целью снижения моментных напряжений. Требовалось расчетное обоснование прочности установки с введенными изменениями.

Была составлена расчетная схема входной камеры, включающая одновременно восемь оболочек. Для дискретизации использовано суммарно 102 конечных элемента с переменными длинами и толщинами. Распределение элементов задавалось с целью описания сложной геометрической формы и особенностей конструкции и обеспечения точности решения. В результате расчета получено, что расчетные напряжения удовлетворяют критерию прочности.

Описанная установка изготовлена, успешно прошла испытания, сдана в промышленную эксплуатацию и работает на Волжском автомобильном заводе.

Литература

1. Грибанов В.Ф., Крохин И.А., Паничкин Н.Г., Санников В.М., Фомичев Ю.И. Прочность, устойчивость и колебания термонапряженных оболочечных конструкций. – М.: Машиностроение, 1990. – 368 с.

РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ ОБОЛОЧЕЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ ЗАДАННОЙ НАДЕЖНОСТИ

Л.А. Гурьева, И.Г. Гурьев

*Полоцкий государственный университет, г. Новополоцк,
Республика Беларусь*

Рассмотрена задача по определению толщины сферической крышки и площади поперечного сечения опорного кольца при заданной надежности.

Сферический купол радиусом $R_{сф}$ нагружен давлением q , величина которого случайна с нормальным законом распределения (математическое ожидание $m_q = 2$ МПа; среднее квадратичное отклонение $\sigma_q = 0,2$ МПа). Кромки крышки жестко связаны с упругим кольцом ($R_k = 2$ м). Материал оболочки и кольца одинаков, его несущая способность случайна с нормальным законом распределения ($m_R = 500$ МПа; $\sigma_R = 50$ МПа). Необходимо определить толщину оболочки h и площадь поперечного сечения опорного кольца $A_{кольца}$, чтобы надежность $H_{зад} = 0,99$. Случайный разброс толщины крышки учитывался с доверительной вероятностью $H_h = 0,9986$, т. е. $H_{зад} / H_h = 0,99 / 0,9986 = 0,9914$.

Для $H = 0,9914$ гауссовский уровень надежности $\gamma_{кр} = 2,3832$. Коэффициент K определялся по формуле

$$K = \frac{m_R(1 - \gamma_{кр}^2 A_R^2)}{m_q(1 + \gamma_{кр} \sqrt{A_R^2 + A_q^2 - \gamma_{кр}^2 A_R^2 A_q^2}},$$

где $A_R = \frac{\sigma_R}{m_R} = \frac{50}{500} = 0,1$; $A_q = \frac{\sigma_q}{m_q} = \frac{0,2}{2} = 0,1$.

После вычислений $K = 177$.

Толщина сферической крышки была получена для различных значений $R_{сф} = 4$; 2,83; 2,31; 2,07 м и равнялась, соответственно, $h = 2,77$; 1,93; 1,5; 1,38 см.

Для кольца $H = 0,99$ гауссовский уровень надежности $\gamma_{кольца} = 2,326$.

Коэффициент K определялся по формуле

$$K = \frac{m_R(1 - \gamma_{кольца}^2 A_R^2)}{m_q(1 + \gamma_{кольца} \sqrt{A_R^2 + A_q^2 - \gamma_{кольца}^2 A_R^2 A_q^2}};$$

$K = 178,54$.

Площадь сечения кольца определялась при различных значениях R_{cf} , при этом рассматривались прямоугольные сечения с соотношением сторон $H/b = 2$.

Результаты расчета представлены в таблице 1.

Таблица 1

R_{cf} , м	$R_{кольца}$, м	$A_{кольца}$, м ²	b , м	H , м
4	2	0,0198	0,099	0,198
2,83		0,0113	0,075	0,150
2,31		0,008	0,064	0,128
2,07		0,003	0,039	0,078

ОПТИМАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ МЕЖДУ ЭЛЕМЕНТАМИ ОБОЛОЧЕЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ

Л.А. Гурьева

*Полоцкий государственный университет, г. Новополоцк,
Республика Беларусь*

Рассмотрена задача оптимального распределения надежности для конструкции, состоящей из пяти последовательно соединенных элементов – двух сферических днищ, двух распорно-стыковочных шпангоутов и конструктивно-ортотропной цилиндрической оболочки. Конструкция нагружена внутренним давлением q , величина которого случайна и распределена по закону Вейбулла с параметрами β_3, α_3 . Материал элементов оболочечной конструкции одинаков, его несущая способность также случайна и распределена по закону Вейбулла с параметрами β_2, α_2 . Для элементов конструкции считалась определяющей надежность по прочности.

Задача оптимизации заключалась в следующем. Необходимо минимизировать функцию массы

$$G = 2 \frac{\pi R_{tm}^2 B \rho \cdot \sqrt[\beta]{\alpha_3} \cdot \sqrt[\beta]{H_1}}{\sqrt[\beta]{\alpha_2} \cdot \sqrt[\beta]{1-H_1}} + 2 \frac{2\pi R_{ш}^2 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{R_{ш}}{R_{tm}}\right)^2} \cdot \rho \cdot \sqrt[\beta]{\alpha_3} \cdot \sqrt[\beta]{H_2}}{\sqrt[\beta]{\alpha_2} \cdot \sqrt[\beta]{1-H_2}} + \frac{2\pi R_{б}^2 \ell \rho \cdot \sqrt[\beta]{\alpha_3} \cdot \sqrt[\beta]{H_3}}{\sqrt[\beta]{\alpha_2} \cdot \sqrt[\beta]{1-H_3}},$$

при условии $H_1 H_2 H_3 H_4 H_5 \geq H_{зад}$; $0 < H_i < 1$; $H_1 = H_5$; $H_2 = H_4$.

Здесь R_{cf} , B , $R_{ш}$, $R_{ш}$, ℓ – геометрические параметры конструкции; ρ – объемный вес материала конструкции; H_i – надежность i -го элемента конструкции; $H_{зад}$ – заданная надежность конструкции.

Для решения поставленной задачи использован метод неопределенных множителей Лагранжа, применение которого привело к системе нелинейных уравнений.

Вышеизложенная методика иллюстрирована числовым примером.

Пусть $H_{зад} = 0,99$; $R_{cf} = 1$ м; $\alpha = 60^\circ$; $R_{ш} = R_{ш} = R_{cf} \cdot \sin 60^\circ = 0,866$ м; $B = 0,5$ м;

$\ell = 3$ м; $\beta_3 = 3$; $\alpha_3 = 0,08^3$ МПа³; $\beta_2 = 3$; $\alpha_2 = 447,7^3$ МПа³; $\rho = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³.

При этом оптимизационная система запишется так:

$$G = \frac{2,19\sqrt[3]{H_1}}{\sqrt[3]{1-H_1}} + \frac{3,28\sqrt[3]{H_2}}{\sqrt[3]{1-H_2}} + \frac{19,69\sqrt[3]{H_3}}{\sqrt[3]{1-H_3}} + \frac{3,28\sqrt[3]{H_4}}{\sqrt[3]{1-H_4}} + \frac{2,19\sqrt[3]{H_5}}{\sqrt[3]{1-H_5}}$$

при условии $H_1 H_2 H_3 H_4 H_5 \geq 0,99$; $0 < H_i < 1$; $H_1 = H_5$; $H_2 = H_4$.

В результате решения задачи получены $H_1 = H_5 = 0,99805608$; $H_2 = H_4 = 0,99805608$ и $H_3 = 0,99773603$.

Полученная конструкция, обладая нужной надежностью, имеет наименьшую массу

$$\sum G_i = 2 \cdot 17,536 + 2 \cdot 26,264 + 149,836 = 237,436 \text{ кг.}$$

ГНУТЫЕ СТЕРЖНЕВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ОДНОНАПРАВЛЕННО АРМИРОВАННЫХ ТЕРМОПЛАСТОВ

А.Л. Наркевич, В.П. Ставров

*Белорусский государственный технологический университет,
г. Минск*

Однонаправленное армирование термопластичных полимеров непрерывными волокнами позволяет получать изделия с повышенной жесткостью и прочностью даже при относительно низких механических характеристиках матричного полимера и недостаточной адгезии его к армирующим волокнам. В то же время область применения таких материалов ограничена: это преимущественно намоточные изделия и профили с прямолинейной осью. Однонаправленное армирование эффективно также для работающих на растяжение и изгиб стержневых элементов конструкции с криволинейной осью – тяг, кронштейнов, ручек, теннисных ракеток и т. п. Однако при изготовлении их возникают проблемы, обусловленные характером совместного деформирования компонентов в однонаправленно армированных композитных системах. В докладе приводятся результаты исследования особенностей формообразования, структуры и механических свойств гнутых стержней из однонаправленно армированных термопластов.

Гнутые стержни из композитных материалов на основе термопластичных полимеров и непрерывных волокон получали путем изгиба прямолинейных (изготовленных, например, пултрузией) профильных заготовок, а также в результате непрерывных процессов формообразования на криволинейных оправках с обкаткой роликами.

При изгибе прямолинейного стержня, армированного системой параллельных волокон, возникают напряжения, приводящие к разрушению или потере устойчивости волокон в сжатой зоне. Установлено, что при близких значениях модулей упругости при растяжении и изгибе пултрузируемых профилей на основе стеклоровинга и термопластов разрушающие напряжения отличаются в 1,5 (если матрица полиамид-6) и в 2 (матрица – полипропилен) раза. Снижение жесткости матрицы увеличивает вероятность потери устойчивости волокон в сжатой зоне. При изготовлении гнутых стержней с нагревом заготовок потеря устойчивости пучков волокон, находящихся в сжатой зоне сечения, происходит путем выпучивания в плоскости кривизны. Пучки, потерявшие устойчивость утрачивают способность сопротивления как растяжению, так и сжатию.

Исследована возможность повышения несущей способности гнутых стержней из однонаправленно армированных термопластов за счет различных технологиче-

ских приемов – создания градиентов температуры по толщине изгибаемой заготовки, надреза части волокон, изменения их кривизны относительно кривизны стержня, смещения пучков волокон относительно исходного положения в сечении заготовки. Найдены области применения перечисленных приемов, а также характеристики жесткости и прочности получаемых с их использованием гнутых стержней.

Анализируются варианты изготовления стержней с криволинейной осью путем формообразования на роликах из пучков стренг, полученных в результате пултрузионной пропитки стеклоровинга расплавом термопластичного матричного полимера (по т. н. *on-line*-технологии). Установлен диапазон оптимальных режимов процесса – скорости и усилия пултрузии, температуры, обеспечивающих управление структурой композита. Приводятся характеристики жесткости и прочности стержней, полученных на экспериментальной пултрузионной установке.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ ХРУПКОГО ПОКРЫТИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВОДНО-КАПЕЛЬНОЙ СТРУИ

В.П. Ставров, В.В. Ставров

Белорусский государственный технологический университет, г. Минск

А.И. Столяров, В.М. Ткачев

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

Исследуется статистическая модель разрушения хрупкого покрытия водно-капельной струей. Предполагается, что капли имеют сферическую форму. На основе экспериментальных данных (измерения выполнены в Лаборатории водно-струйных технологий Университета Ганновер, Германия) принято распределение диаметров капель по закону Вейбулла. Параметры распределения диаметров капель (среднее значение 0,05 мм, коэффициента вариации около 1) практически не зависят от номинального давления распыляемой воды, по крайней мере, в исследованном диапазоне от 10 до 60 МПа. Распределение скоростей, рассчитанное с учетом пульсаций давления воды в форсунке и сопротивления воздуха при движении капли от сопла до обрабатываемой поверхности, удовлетворительно согласуется с измеренным. Отрицательная асимметрия распределения скоростей капель объясняется видом распределения их диаметров. Распределение капель по координатам обрабатываемой поверхности найдено путем анализа следов воздействия водно-капельной струи на удаляемый слой модельного материала (фото- и видеопленки). Корреляционный и Фурье-анализ реализаций случайного поля повреждений на поверхности модельного материала подтверждает статистическую связь распределения скоростей капель с пульсациями давления воды в форсунке. Типично также неоднородное распределение капель по координатам, обусловленное отклонениями формы форсунок и пульсациями струи. Предложены варианты описания таких распределений.

Распределение давлений при воздействии единичной капли на поверхность покрытия получено с использованием приближенной модели распространения волн уплотнения при ударе капли. Показано, что на периферии контактной площадки возникают пики давления, в 2-3 раза, превышающие среднее ударное давление. Пик давления смещается в процессе растекания капли со скоростью, превышающей скорость распространения звука в материале покрытия, однако время его существования ограничено временем растекания капли, при котором радиус контакта достигает половины исходного радиуса капли.

Распределение напряжений и деформации в покрытии рассчитано по методу функций Грина и по методу конечных элементов. Установлен диапазон геометрических параметров и механических свойств покрытия, при которых наблюдается приемлемое соответствие результатов расчета. С использованием простейшего критерия хрупкого разрушения – наибольшего относительного удлинения – показано, что область локального повреждения от действия единичной капли может быть аппроксимирована полукругом, объем которого при скоростях капли, превышающих некоторое пороговое значение, аппроксимируется линейными функциями объема и скорости капли.

На основе описания локальных повреждений от единичной капли и распределений капель по скоростям, размерам и координатам, рассчитаны интегральные характеристики поврежденности покрытий из эпоксидной смолы, стекла и полиметилметакрилата на стальной и алюминиевой подложках.

Работа выполнена при финансовой поддержке INTAS (проект № 00-0268).

ДИНАМИКА ГИБКОГО МЕХАНИЗМА ДВОЙНОГО ПАРАЛЛЕЛОГРАММА

Р.К. Наурызбаев, К.А. Исаков

Казахский Национальный аграрный университет, г. Алматы

*Казахский национальный технический университет
им. К.И. Сатпаева, г. Алматы*

Дано научное обоснование состава машинного агрегата. Передаточный механизм – самоустанавливающийся шарнирный механизм двойного параллелограмма с двумя гибкими связями в замкнутом предварительно напряженном контуре. Приведенная жесткость механизма имеет нелинейный вид:

$$C_{np.} = 2CR^2 \cdot \cos(\varphi_D - \varphi_M) + 2C \cdot \varepsilon_0 \cdot [R^2 \cdot \cos(\varphi_D - \varphi_M) + R \cdot d \cdot \sin \varphi_D]$$

1. Динамическая модель двухмашинного агрегата моделируется из двигателя – ДВ, передаточного механизма – $C_{np.}$ и рабочей машины – РМ. Определены основные параметры динамической модели для расчета и выбора режима работы ее передаточного механизма с нелинейной моделью – $C_{np.}$. Динамический процесс, протекающий в двухмашинном агрегате, с учетом упругости тяговых связей передаточного механизма описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений вида:

$$\begin{cases} I_D \ddot{\varphi}_D + C_{np.} \cdot (\varphi_D - \varphi_M) + b \cdot (\dot{\varphi}_D - \dot{\varphi}_M) = M_D(\varphi_D, \varphi_M) - \frac{1}{2} \frac{dI_D}{d\varphi_D} \cdot \dot{\varphi}_D^2, \\ I_M \ddot{\varphi}_M + C_{np.} \cdot (\varphi_M - \varphi_D) + b \cdot (\dot{\varphi}_M - \dot{\varphi}_D) = M_M(\varphi_M, \varphi_D) - \frac{1}{2} \frac{dI_M}{d\varphi_M} \cdot \dot{\varphi}_M^2. \end{cases}$$

2. Дается научное обоснование математической модели в режиме установившегося движения машинного агрегата. Дифференциальное уравнение является математической моделью установившегося режима движения двухмашинного агрегата с передаточным механизмом гибкого параллелограмма. Она имеет вид записи:

$$I_M \cdot \Delta \ddot{\varphi} + C_{np.} \cdot \Delta \varphi + b \cdot \Delta \dot{\varphi} + M_M(\varphi_M, \varphi_M) = 0,$$

где $C_{np.} = 2CR^2 \cdot \cos \Delta \varphi + 2C\varepsilon_0 \cdot (R^2 \cos \Delta \varphi + R \cdot d \cdot \sin \omega_D \cdot t)$.

Приведенная жесткость $C_{np.}$ передаточного механизма является нелинейной функцией ее геометрических (R, d), жесткостных (C), упругих (ε_0), кинематических ($\Delta \varphi, \omega_D$) параметров расчетной динамической системы.

ПРОБЛЕМЫ МНОГООЧАГОВЫХ УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ТОНКОСТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В.П. Павелко, Ю.М. Тимощенко

*Авиационный институт Рижского технического университета,
Латвия*

Многоочаговые усталостные повреждения являются одним из наиболее опасных прочностных дефектов конструкции современных пассажирских самолетов. Такие повреждения возникают в зонах с множественными концентраторами напряжений с равными или близкими по величине максимальными напряжениями. Типичным элементом конструкции такого типа является тонкостенная пластинка или оболочка с периодической или двоякопериодической системой одинаковых отверстий (например, круговых). Если геометрические, механические и технологические характеристики всех элементарных ячеек такой структуры и условия их нагружения идентичны, то можно постулировать существование единой локальной кривой усталости для всех возможных вариантов конструкции, отличающихся количеством отверстий, расстоянием между ними, соотношением параметров внешней нагрузки (в известных пределах). Экспериментально получив локальную кривую на одном из вариантов, можно затем ее использовать в расчетах характеристик усталости всех других конструкций данного класса. При этом предметом исследований в равной степени являются наработка до зарождения трещины, скорость ее распространения, остаточная прочность и статистические закономерности развития процесса усталости. Для анализа многоочаговых усталостных повреждений проблема определения закона распределения усталостной долговечности и оценки его статистических характеристик имеет особо важное значение.

В докладе дан анализ некоторых закономерностей распределения усталостной долговечности до зарождения трещины по результатам испытаний листовых образцов шириной 100 мм и толщиной 2 мм из алюминиевого сплава Д16Т с системой круговых отверстий. Испытаны образцы двух типов с 4 и 8 круговыми отверстиями. Диаметр отверстий для разных групп образцов принимался равным 3, 5, 8, 10 и 20 мм. Система отверстий образовывала периодическую или двоякопериодическую структуру. Испытания проводились при регулярной циклической нагрузке. Максимальные напряжения цикла составляли 80 и 120 МПа, коэффициент асимметрии 0 и 0,5, а частота переменной нагрузки составляла 12 Гц.

Для получения возможно более полной информации о зарождении трещин около отверстий принимались меры по торможению их после возникновения по технологии, предусматривающей создание остаточных сжимающих напряжений пластическим деформированием материала на пути роста трещины. Показано, что распределение логарифма усталостной долговечности не противоречит нормальному закону распределения. Установлены закономерности влияния размера отверстия на оценки параметров распределения.

Рассматриваются методические вопросы построения модели развития многоочагового усталостного разрушения в тонкостенных элементах авиационных конструкций. В основу анализа характеристик сопротивления усталости положены закономерности влияния концентрации и градиента напряжений в зоне зарождения и развития разрушения.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТРЕЩИНЫ В СЕЧЕНИИ ВАЛА НА КРИТИЧЕСКИЕ ОБОРОТЫ РОТОРА ГТД

И.В. Павелко, С.В. Ярославцев

*Авиационный институт Рижского технического университета,
Латвия*

Большой интерес для эксплуатационных и ремонтных предприятий ГА представляет проблема создания эффективной системы технической диагностики трещин на основе анализа их влияния на изменение вибрационных показателей поврежденных элементов. В этой связи актуальной представляется задача оценки влияния трещин на критические обороты роторов авиационных ГТД. Ее решение позволит по изменению спектра критических частот судить о размерах и характере трещины в валу, а также о том, какую опасность та или иная трещина представляет в отношении возможности попадания критической частоты в диапазон рабочих режимов двигателя.

Ранее авторами на основе концепций эквивалентной податливости и эквивалентного упругого шарнира [1] уже исследовались вопросы влияния трещин различного характера на прочностные и жесткостные свойства стержневых систем в статике при различных условиях нагружения. При первом рассмотрении поставленной выше задачи оказывается, что концепция эквивалентного упругого шарнира применима и к ее решению. Действительно, известно, что критическая частота вращения зависит от жесткости вала. Это значит, что изменение этой величины под влиянием трещины вызовет соответствующее изменение спектра критических частот вращения. С другой стороны, известно, что прогибание вала при вращении моделируют как свободные изгибные колебания неподвижного вала. Очевидно, что для установления связи места нахождения, характера и характерного размера трещины с приращением податливости вала необходимо рассмотреть следующую расчетную схему: вал на двух шарнирных опорах под действием изгибающего момента. В этом случае теорема Максвелла имеет вид:

$$M_2 \alpha = 2 \int_S \frac{(1-\nu)^2}{E} K_1^2 dS = \frac{2(1-\nu)^2}{E} \int_S K_1^2 dS, \quad (1)$$

где α – абсолютный угол поворота сечения с трещиной; S – площадь ее поверхности. Относительная податливость складывается из податливости $\bar{\alpha}_0$ под действием единичного изгибающего момента в отсутствие трещины и приращения податливости $\Delta \bar{\alpha}$ в результате влияния трещины. Связь этого приращения с характерным размером трещины получается в результате преобразования выражения (1). Входящая в известное выражение для K_1 /2/ поправочная функция была представлена как полином третьей степени с нулевым свободным членом, что позволило взять интеграл в общем виде. Окончательный вид зависимости приращения податливости вала под влиянием трещины от ее характерного размера дает аппроксимация поправочной функции методом наименьших квадратов, в результате чего получены значения коэффициентов аппроксимирующего полинома. Данная зависимость позволяет оценить влияние характерного размера трещины на изменение жесткости вала, что однозначно связано с изменением спектра критических частот его вращения.

Л и т е р а т у р а

1. Pavelko, V.Pavelko. The valuation of stiffness of rods with cracks. Warszawa: Informator inst. tech. wojsk lot., 1997, p. 105 – 110.
2. Мураками Ю. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений. – Москва: «Мир», 1990.

НОВАЯ КОНСТРУКЦИЯ СТЕНДА ДЛЯ РАССТЫКОВКИ И СТЫКОВКИ ЧАСТЕЙ ПЛАНЕРА САМОЛЕТА ПРИ ЕГО РЕМОНТЕ

А.И. Пекарш, В.И. Шпорт, Б.Н. Марьин, В.Ф. Кузьмин

ФГУП «Комсомольское-на-Амуре авиационное
производственное объединение, Россия

Известные станды [1], используемые при ремонте планера самолета, содержат тележки, вместе с агрегатом планера перемещаемые по монорельсам и определяющих их линейное положение относительно друг друга. С помощью специальных винтовых передач на тележках возможно изменение углового положения агрегатов относительно перекрещивающихся под прямыми углами осей обуславливает зависимость линейных перемещений от угловых в плоскости стыка. На КнААПО разработана новая схема станда [2], угловые манипуляции в котором осуществляются относительно осей, расположенных под малыми углами (рис. 1).

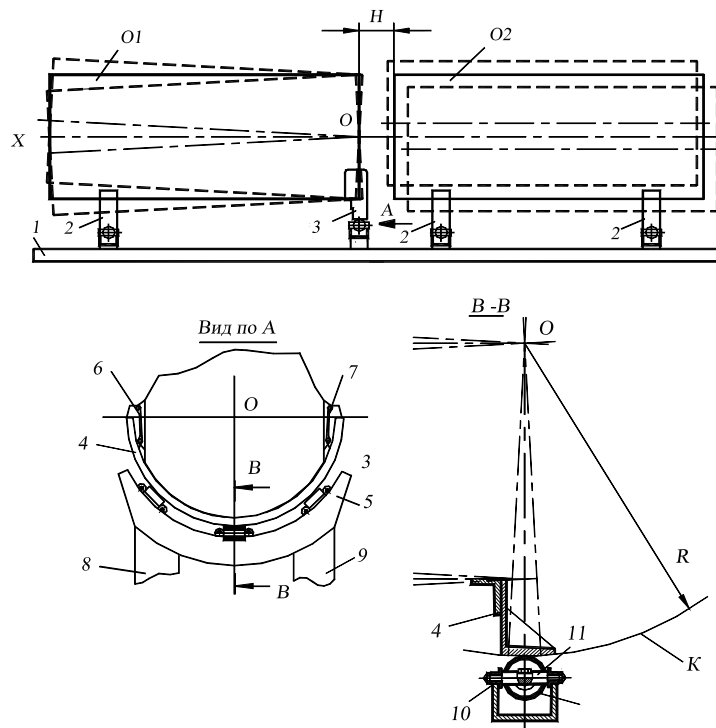


Рис. 1

При угловых манипуляциях с осью X агрегата O1 поверхность ложемента 4 перемещается по каткам 12, а при необходимости поворота относительно X ролики 10 перемещаются по поверхности ложемента 5. После совпадения продольных осей обеих частей по направлению, что можно определить по равенству размера H между сопрягаемыми поверхностями, агрегат O2 перемещают в продольном направлении до полного совмещения сопрягаемых поверхностей. Предложенное устройство повышает эффективность технологического процесса при ремонте авиационной техники.

Литература

1. Орлов К.Я. Ремонт самолетов и вертолетов. – М.: Транспорт, 1986. – С. 43.
2. Кузьмин В.Ф., Марьин Б.Н., Шпорт В.И. Установка для манипулирования частями объекта при их взаимной стыковке. Патент РФ № 2158700 В64 F 5/00. 1988. Бюл. № 31.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАЗРУШЕНИЯ ТОНКОГО СЛОЯ ВОЛОКНИСТОГО КОМПОЗИТА ПРИ РАСТЯЖЕНИИ

М.А. Клейнхоф, В.П. Павелко, И.В. Павелко

*Авиационный институт Рижского технического университета,
Латвия*

Разработана модель хрупкого разрушения тонкого слоя волокнистого композита с регулярной структурой армирования. Анализируется взаимодействие трех вероятных видов разрушения: разрыв волокон, отслоение матрицы от волокна в зоне его разрыва и растрескивание матрицы в этой же зоне. Моделируется упругое напряженное состояние в зоне разрыва одного из волокон в сечении $(0,0)$. Предполагается, что на участке $|x| \leq \pm a$ произошло отслоение волокна от материала матрицы. Напряжения на бесконечности в пластинке приняты $y_{x\infty} = y$, $y_{y\infty} = \phi_{xy\infty} = 0$. Волокна в бесконечно удаленной точке растягиваются с усилием

$$p_\infty = y A_0 \frac{E_0}{E}. \quad (1)$$

Согласно схеме нагружения элементарного участка волокна с номером i суммарная интенсивность силового взаимодействия $g_i(x)$, этого волокна с матрицей. Из условия равновесия следует

$$\frac{dp_i}{dx} = g_i(x). \quad (2)$$

Если ордината точки, в которой рассматривается взаимодействие волокна и пластинки $y_i = iL$, где $i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, то в точке с координатами x, y_i на пластинку действует элементарная сосредоточенная сила $dX_i = g_i dx, dY_i = 0$.

Известное решение плоской задачи теории упругости позволяет определить элементарную относительную деформацию $d\varepsilon_x$, которую вызывает эта сила в произвольной точке матрицы

$$2\mu d\varepsilon_x = K(x, y, \xi, \eta) dX_i, \quad (3)$$

принято $\xi = x_i, \eta = y_i$ – координаты точки приложения элементарной сосредоточенной силы dX_i, μ – модуль сдвига материала пластинки.

Из условия совместности деформации волокна и матрицы получено следующее уравнение для определения усилий в волокнах:

$$k \int_{\Gamma} K(x, y, \xi, \eta) p'(\xi) d\xi = 1 - p(x), \quad (4)$$

где константа $\Gamma = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \Gamma_i$ – линия контакта волокон с пластинкой, a – параметр, зависящий от соотношения упругих и геометрических характеристик.

Дан анализ вероятных вариантов развития разрушения слоя в зависимости от характеристик прочности и трещиностойкости материалов волокна и матрицы.

К ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЛИЯНИЯ ЧАСТОТЫ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА ЦИКЛИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ

Ф.Ф. Царук, С.Е. Бельский, В.Р. Соболев, А.В. Блохин

*Белорусский государственный технологический университет,
г. Минск*

Повышение надежности работы деталей машин, эксплуатирующихся в условиях сложного напряженного состояния, требует проведения большого количества усталостных испытаний. Использование колебаний высокой частоты обеспечивает за короткий промежуток времени наработку значительного числа циклов нагружения.

Однако в связи с отличием характеристик циклической прочности, получаемых при низких и высоких частотах нагружения для обоснования методики ускоренных усталостных испытаний необходимо определить корреляционные зависимости между схемой, параметрами колебаний и структурно-чувствительными свойствами конструкционных материалов. Для этого проведен теоретический анализ частотной зависимости эволюции дислокационной структуры на первом этапе развития процесса усталостной повреждаемости. Поскольку на развитие деформации наряду с движением дислокаций существенное влияние оказывает также их размножение и поведение в больших ансамблях, использована модель Келера. Уравнение, моделирующее данные процессы учитывает плотность материала, коэффициент вязкого трения, коэффициент Пуассона, частоту и амплитуду знакопеременного нагружения. Решение данного уравнения позволило определить критическую величину знакопеременного напряжения, при которой источник Франка-Рида начинает генерацию дислокаций и тем самым происходит развитие процесса усталостного разрушения материала. При малых частотах нагружения воздействие подвижных дислокаций заключается в том, что они уменьшают скорость распространения волн на величину, пропорциональную их вкладу в пластическую деформацию. С увеличением частоты возникают дополнительные факторы уменьшения упругих модулей среды, что коррелирует с положением о том, что поглощение упругой энергии в области малых частот невелико, поскольку не проявляются динамические характеристики движущихся дислокаций.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили установить, что критические напряжения достаточно точно соответствуют напряжениям, ниже которых не отмечается необратимых изменений структурно-чувствительных свойств материалов при неограниченно больших базах испытаний. Данные напряжения названы нами пороговыми напряжениями. Их экспериментальное определение осуществлялось во всем исследуемом диапазоне частот колебаний (0,1 кГц – 20 кГц). Пороговые напряжения определялись методами микротвердости, рентгеноструктурного и микроструктурного анализов, электросопротивления при достижении уровня циклических напряжений, ниже которых изменения параметров физико-механических свойств не регистрировались приборами. С превышением уровней пороговых напряжений, существенно зависящих от исследуемого материала и его прочностных свойств, и началом упрочнения отмечался резкий рост вышеуказанных характеристик.

В связи с тем, что кривые пороговых напряжений и пределов выносливости материалов располагаются в исследованном диапазоне частот (100 Гц – 20 кГц) практически эквидистантно, появляется возможность физически обоснованного прогнозирования низкочастотных характеристик циклической прочности по результатам высокочастотных испытаний.

ПОРОГОВЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ – ВАЖНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЦИКЛИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

С.Е. Бельский, Ф.Ф. Царук, А.В. Блохин

*Белорусский государственный технологический университет,
г. Минск*

Длительность и повышенная трудоемкость проведения усталостных испытаний конструкционных материалов вынуждают к поиску физических величин, позволяющих выявить закономерности протекания процесса усталостного повреждения и тем самым дать возможность прогнозировать поведение материала в поле переменных напряжений. В качестве одной из таких характеристик могут быть предложены пороговые напряжения, т. е. величины циклических напряжений, ниже которых не наблюдается принятыми методами исследований на выбранной базе испытаний изменений исследуемой структурно-чувствительной характеристики. В данной работе приведены результаты исследований кинетики пороговых напряжений медного и алюминиевых сплавов в широком диапазоне частот знакопеременного изгиба, определяемых с помощью микротвердости, как наиболее удобной для применения в экспериментальной практике и чувствительной к факторам нагружения характеристики.

Нагружение образцов знакопеременным изгибом производилось с помощью специально разработанных электродинамического ($f_{рез} = 0,22$ кГц) и магнестрикционных ($f_{рез} = 2,8, 8,8, \text{ и } 18,0$ кГц) резонансных стендов. Испытательные стенды работали в автоколебательном режиме с автоматическим поддержанием амплитуды колебаний образцов, которые представляли собой балочки прямоугольного сечения (1,8 x 6 мм), вырезанные вдоль направления проката, подвергнутые шлифовке, электрополировке и вакуумному отжигу. Нагрев образцов в электропечи сопротивления (макс. отклонение ± 2 К) производился с выдержкой образца при заданной температуре до нагружения в течение часа. Для построения кривых усталости испытания продолжались до появления в образце усталостной трещины заданного размера, что фиксировалось по падению резонансной частоты установки. Измерение микротвердости вдоль образца после нагружения позволяло легко определить величину пороговых напряжений $\sigma_{ан}$ по моменту начала ее роста.

В результате исследований кинетики пороговых напряжений на различных частотах нагружения было установлено закономерное их возрастание с ростом частоты знакопеременного изгиба, что дало возможность предложить методику ускоренного определения низкочастотных пределов выносливости по результатам высокочастотных испытаний со значительным снижением трудоемкости. Для одной и той же частоты нагружения было установлено, что кривые изменения пороговых напряжений закономерно изменяются в зависимости как от температуры испытаний, так и от температуры вылеживания после испытаний, уменьшаясь с ростом последней. В то же время, в отличие от времени выдержки, изменение базы числа циклов практически мало влияет на уровень $\sigma_{ан}$, что дает возможность проследить за кинетикой свойств материалов, имеющих различную степень повреждения в течение времени выдержки после нагружения.

Представляется возможным использование данной характеристики (возможно с незначительной модернизацией) для разработки эффективных технологий повышения усталостных характеристик конструкционных материалов и элементов конструкций, работающих в условиях переменных напряжений.

**ВЛИЯНИЕ ТИПА ТОЛКАЧА НА НАГРУЖЕННОСТЬ
МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ СКРЕПЕРА МОАЗ-6014****О.В. Леоненко***Могилевский государственный технологический университет,
Республика Беларусь*

Совершенствование металлоконструкции машины производилось предприятием, зачастую исходя из результатов испытаний, исследования машины в условиях эксплуатации, путем усиления слабых мест накладками, косынками заменой материала. Уменьшение металлоемкости производилось путем реализации плановых заданий по снижению металлоемкости. Устранение недостатков, связанных с недостаточной прочностью конструкции уже в процессе серийного производства машины, грозит предприятию немалыми убытками, потерей репутации и рынка сбыта продукции. Поэтому выявление нагруженных мест металлоконструкции на этапе проектирования, ее дальнейшее усовершенствование перед запуском в производство является важной и актуальной задачей.

В качестве объекта исследования был выбран скрепер МоАЗ – 6014 Могилевского автозавода им. С.М. Кирова и выполнен расчет действующих нагрузок для расчетных случаев в зависимости от различного типа толкача на базе тракторов как отечественного (Т-130М, Т-170 «Челябинский тракторный завод»), так и импортного производства (D5H, D6E, D7H, D8N, D9R, D10N, «Caterpillar», США; D275A, D375A «Komatsu», Япония; PR722B, PR732B, PR742B, PR752B, PR751B «Liebherr», Германия).

Для определения напряжений в металлоконструкции скрепера использовался метод конечных элементов (МКЭ) и соответствующее программное обеспечение. Была создана конечно-элементная модель и выполнен анализ напряженного состояния металлоконструкции скрепера для двух типов толкачей; на базе тракторов Т-170 и D10N.

По результатам анализа нагруженности металлоконструкции, были выявлены величины и векторность действующих напряжений, было разработано устройство по снижению динамических нагрузок со стороны толкача состоящего из подвижного, телескопического бампера, соединенного с задней рамой посредством гидроцилиндров, гидропневмоаккумуляторов и двух реле давления, имеющих зону нечувствительности /1/.

Использование этого устройства на скрепере по сравнению с базовой машиной, позволяет снизить в 1,87 раза динамическую составляющую нагрузки со стороны толкача Т-170, области напряжений уменьшаются и в целом по металлоконструкции не превышают 130 Мпа, что несомненно положительно скажется на долговечности и надежности металлоконструкции.

Применительно к толкачам импортного производства, начиная с класса выше чем отечественный трактор Т-170, необходимо или усиливать металлоконструкцию скрепера, или применять демпфирующее устройство, т. к. возникающие напряжения приближаются к пределу текучести материала, применяемого для металлоконструкции скрепера.

Л и т е р а т у р а

1. Леоненко О.В. Система автоматизации рабочего процесса скрепера. //Вестник Могилевского государственного технического университета. Серия «Транспортные и строительные машины». – 2001. – № 1. – С. 98-103.

УМЕНЬШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ РЕЗКИ МЕТАЛЛОВ**Э.И. Астахов, В.В. Кудин***Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

Лазерное технологическое оборудование, устанавливаемое в прессовых цехах, зачастую подвергается сильному ударно-вибрационному воздействию со стороны соседнего прессового оборудования. Согласно монтажных требований под лазерные комплексы для них необходим отдельный монолитный фундамент в виде плоской железобетонной плиты с размерами в плане (10,5 × 12,5 м), на которой монтируется все основное и вспомогательное оборудование. Для установок фирмы BISTRONIC максимальная амплитуда колебаний не должна превышать $[A] = 0,01$ мм; для установок фирмы TRUMPF максимальное виброускорение не должно превышать $[a] = 0,1$, $g = 0,981$ м. Задача состояла в разработке эффективного способа виброзащиты при минимальном объеме и стоимости.

Результаты измерения вибраций на запланированных площадках показали, что вибрации являются полигармоническими в полосе частот от 8 до 125 Гц с максимальными значениями в диапазоне (16 ÷ 31 Гц), которые значительно превысили допустимые по монтажным условиям: $A_{max} \approx 0,035$ мм > $[A] = 0,01$ мм, $a_{min} \approx 1,5$ м/с² > $[a] = 0,98$ м/с². Причем вибрации по вертикальной оси Z значительно превышали вибрации по осям X и Y. То есть условие виброзащиты: снижение вертикальных вибраций рабочих площадок в диапазоне частот (16 ÷ 31 Гц). Наиболее распространенным и эффективным (при широкополосной полигармонической вибрации) методом виброзащиты является виброизоляция. Виброизолированный фундамент в первом приближении может быть представлен одномассовой колебательной системой с 6-ю степенями свободы при вибрационном возмущении основания. С учетом преобладающих вертикальных вибраций можно для предварительных расчетов оставить одну линейную степень свободы по Z. Принимая по результатам экспериментальных измерений низшую частоту кинематического вибровозмущения $f_n = (16 \div 30$ Гц) из условия $f_c \ll f_n$ при оптимально низкой амплитуде колебаний $A_{max} < [A]$, рассчитана необходимая собственная частота колебаний виброизолированного фундамента $f_c \approx 3,5$ Гц. Результаты более точного расчета методом конечных элементов подтвердили полученную приближенную величину ($f_c = 3,56$ Гц). По этой f_c и известной массе плиты фундамента с оборудованием рассчитана приведенная суммарная жесткость системы виброизоляторов. Для обеспечения низкой частоты f_c и условий долговечности в качестве виброизоляторов взяты серийные металлические цилиндрические пружины. То есть главное условие оптимизации $A_{max} \leq [A]$ обеспечено путем виброизоляции фундаментной плиты с помощью пружинных виброизоляторов, размещенных между нижней поверхностью плиты и забетонированным коробом площадки.

Минимизация объема фундаментной плиты достигнута за счет уменьшения размера в плане. Изучение монтажной документации показало, что для исключения смещения лазерного луча относительно обрабатываемой заготовки необходимо, чтобы на одном жестком фундаменте находился лазерный модуль и устройство подачи и фиксации заготовки. Поэтому было предложено делать виброизолированный фундамент только под основное оборудование лазерного комплекса. Это позволило уменьшить размеры виброизолированной фундаментной плиты в плане до (2,9 × 7,8 м), что обеспечило снижение объема железобетона в 4,8 раза без снижения качества лазерной обработки.

**ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ
ЛИСТОВОГО МАТЕРИАЛА ДИСКРЕТНЫМ ВОЛОКНОМ****М.И. Михайлов, Д.Л. Стасенко, С.П. Садченко, А.В. Рыбаков***Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

Целью данной работы является определение оптимальных режимов МАО при обработке поверхности молотым порошком и дискретным волокном.

Исследования проводились на горизонтальном консольно-фрезерном станке модели 6Н982, на шпинделе которого смонтирована установка для МАО. Для обработки были выбраны заготовки, выполненные из немагнитных материалов, таких, как алюминий и нержавеющая сталь. В качестве абразивного материала применялся порошок, полученный размолотом в шаровых мельницах сплава FeVg и литое дискретное волокно из сложнoleгированного сплава $Fe_{93,7}-Br_{3,3}-Si_{2,1}-C_{0,9}$. Размеры порошка и дискретного волокна составили 315-630 мкм. В качестве исследуемых технологических параметров, в данной работе, рассматривались: частота вращения шпинделя станка ($n = 200-500$ об/мин), сила тока на обмотках электромагнита ($I = 5-8$ А), скорость перемещения заготовки ($S = 19-47,5$ мм/мин). Заготовка закреплялась в специальном приспособлении изготовленном из немагнитного материала, которое в свою очередь устанавливалось на столе станка. Геометрические размеры обрабатываемой поверхности пластины составляют 150×20 мм, причем обработка проводилась с обеих сторон пластины одновременно. Зазор между концентраторами магнитного поля и обрабатываемыми поверхностями составлял 2 мм. Обработка проводилась в 3 прохода.

Результаты исследований. Исследования показали, что масса снимаемого слоя металла зависит от всех исследованных технологических параметров, причем наибольшее влияние на массу съема оказывают вид абразивных частиц. В частности, с увеличением частоты вращения шпинделя масса съема плавно возрастает и составляет при обработке алюминиевой заготовки дискретным волокном от 10 мг при $n = 200$ об/мин до 47 мг – $n = 500$ об/мин, а при обработке нержавеющей стали порошком на тех же частотах от 3 до 20,5 мг. С увеличением силы тока масса снимаемого металла с алюминиевой заготовки дискретным волокном увеличивается от 47 до 70 мг при $I = 5$ и 8 А, соответственно, а при обработке порошком заготовки из нержавеющей стали от 10 до 32 мг, при тех же условиях. При увеличении скорости перемещения заготовки съем металла снижается с 32 до 16 мг ($S = 19, 47,5$ мм/мин) при обработке алюминиевой заготовки дискретным волокном и с 20,5 до 3 мг.

Шероховатость обрабатываемой поверхности составляет после обработки нержавеющей стали дискретным волокном – Ra 0,5, а после обработки порошком – Ra 0,46, при исходной шероховатости заготовки, в обоих случаях – Ra 0,72, и на нее незначительно влияют режимы обработки, а также форма абразивных частиц.

В результате проведенных исследований было установлено, что увеличение количества проходов выше трех не приводит к увеличению съема металла. Максимальную производительность МАО можно получить при следующих технологических параметрах работы: частота вращения шпинделя – не менее 500 об/мин, скорость перемещения заготовки – 19 мм/мин, сила тока – не менее 8 А.

Кроме того, установлено, что на обработанную поверхность наносится микропокрытие, состоящее из материала абразивных частиц, которое имеет непостоянную толщину по площади обработанной поверхности.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФРИКЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА, ИСПОЛЬЗУЕМОГО ДЛЯ ПОКРЫТИЯ СМП

М.И. Михайлов, З.Я. Шабакеева, И.А. Левин

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

*Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого
НАН Беларуси, г. Гомель*

Цель работы: исследование фрикционных характеристик и теплостойкости композиционного материала на основе эпоксиполиэфирных смол для дальнейшего использования его в качестве покрытия многогранных пластин режущего инструмента.

В состав композиционного материала были включены: эпоксидная смола (100 мас.ч.); полиэфирная смола (75 мас.ч.); наполнитель (100 мас.ч.) карбид кремния зеленый; ускоритель (0,4 мас.ч.).

Фрикционные характеристики композита определяли на модифицированной машине трения ММТ-1, позволяющей в широких пределах варьировать нагрузочно-скоростные параметры по методике трибоцентра ИММС НАН Беларуси.

Для проведения экспериментов были изготовлены образцы в виде пластин с размерами 4x15x40 мм, методом свободной заливки в формы, а также ролик диаметром 3 мм из стали 45. При исследовании амплитуда пути трения составила 10 мм. Значения скорости и нагрузки были переменными. В результате экспериментов были определены зависимости износа, коэффициента трения и температуры от нагрузки и скорости. Кроме того, были определены теплостойкость и коэффициент линейного теплового расширения, а также исследовано влияние температуры на структуру материала. Исследования теплостойкости и коэффициента линейного теплового расширения проводились на приборе типа Вика по ГОСТ 15065-69. Методика испытания заключалась в определении температуры, при которой стандартный индентор диаметром равным 1,13 мм под действием нагрузки внедрялся на глубину 1 мм в образец, нагреваемый с постоянной скоростью в воздушной среде. Величина нагрузки составляла 1 кг, 4 кг, 5 кг, скорость нагрева в печи равнялась 50 °С в час. При определении коэффициента линейного теплового расширения нагрузка на индентор не прикладывалась, а он под собственным весом внедрялся в нагреваемый образец материала. В результате эксперимента были получены зависимости перемещения индентора от температуры.

Влияние температуры на структуру материала определяли при значениях температуры 65 °С, 150 °С, 250 °С и 400 °С. Материал наносился на твердосплавные пластины и нагревался, после чего делались микрофотографии структуры композиционного материала. Полученные данные по теплостойкости, а также состояния микроструктуры, позволяют заключить, что в интервале температур 150-200 °С в предлагаемом материале не наблюдается значительных структурных изменений.

Анализируя полученные фрикционные характеристики материала, можно сделать вывод, что при скорости, равной 0,25 м/с, значение коэффициента трения увеличивается с возрастанием нагрузки, а износ материала уменьшается.

Проведенные исследования показали, что композиционный материал по своим фрикционным характеристикам и теплостойкости может использоваться в качестве покрытия многогранных пластин и, соответственно, отвечает требованиям, предъявляемым к условиям работы режущего инструмента (сборного резца).

**ПРОЦЕСС ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОЛЕСНЫХ МАШИН
С ЛЕСНЫМИ ПОЧВОГРУНТАМИ****А.В. Жуков, Д.В. Клоков, А.Н. Бычек, В.А. Симанович***Белорусский государственный технологический университет,**г. Минск*

В соответствии с концепцией развития лесозаготовительной отрасли лесного комплекса в Республике Беларусь принято решение по созданию собственного лесного машиностроения. Активное участие в решении этой проблемы принимает целый ряд машиностроительных предприятий и в первую очередь Минский тракторный завод.

С целью обоснования параметров лесных колесных машин в БГТУ разработан комплекс математических моделей процесса работы машин при выполнении ими технологических операций. Эти модели отражают сложную связь подсистем машины (двигатель, трансмиссия, ведущие мосты, движители, предмет труда), учитывают реальные возмущающие воздействия (неровности поверхности волока, крутящий момент двигателя), а также реальные параметры машины.

Динамические характеристики лесных дорог, необходимые для расчета математических моделей динамики движения лесозаготовительной машины с учетом упругой податливости грунта, определялись по экспериментально записанной осциллограмме ее колебаний, упругому прогибу дорожной одежды и параметров колесной нагрузки.

Система дифференциальных уравнений решалась методом Рунге-Кутты 4-го порядка в точности с помощью комплекса специальных программ. Основной модуль программ производит расчет систем уравнений по времени при заданных параметрах динамической системы. Далее производилась статистическая обработка данных. Для переходных процессов сравниваются максимальные показатели и характер изменения зависимостей. При установившихся режимах производится сравнение статистических показателей.

Разработанный комплекс расчетных моделей имеет удовлетворительную точность, что подтверждается сравнением среднеквадратичных значений и максимальных реакций системы, а также их спектральных плотностей. В основу текста эквивалентности приложено использование логарифмического преобразования оценки спектральной плотности, подчиняющейся нормальному распределению. По условию $D^2 \leq \chi_{n,\alpha}^2$, где n – число полос, на которые делится спектральная плотность, минус число наложенных ограничений; α – уровень значимости критерия (0,05).

Проведенные расчеты показали, что величина статистики D^2 не превышает значений области принятия гипотезы $\chi_{n,\alpha}^2$ равным 22,36.

Расчетные схемы позволяют решать различные задачи динамики лесных машин разного типа при выполнении ими технологических операций, что позволяет решать вопросы по обоснованию их параметров.

Как доказал опыт эксплуатации созданных машин, применение разработанных математических моделей и методики позволяют обоснованно выбрать параметры трелевочных машин, сократить время проектирования и доводки опытных образцов.

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ АКТИВИРОВАННЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ ПРОВОЛОК**М.А. Белоцерковский, В.А. Кукареко, П.Г. Сухоцкий***Институт надежности машин
НАН Беларуси, г. Минск*

Сравнение технико-экономических параметров покрытий, полученных газопламенным напылением порошковых, проволочных и прутковых материалов показало, что восстановление деталей узлов трения путем распыления проволок обеспечивает весьма благоприятное сочетание высокого качества покрытий при наиболее низких затратах на их получение.

Поскольку в слое протекают процессы быстрой кристаллизации, деформации и отпуска, а при распылении проволочных материалов происходит интенсивный перегрев и взаимодействие с воздухом, приводящее к появлению окислов, структурное состояние и свойства покрытий сложным образом зависят от сочетания параметров процесса распыления. В качестве распыляемого материала использовалась проволока диаметром 2 мм из стали 40Х13, газопламенное напыление осуществлялось на установке «ТЕРКО».

Установлено, что максимальное содержание кислорода в покрытиях составляет 1,50...1,70 % и достигается при расходах распыляющего воздуха более 0,35 м³/мин. Дальнейшее увеличение расхода распыляющего воздуха не приводит к заметному повышению концентрации кислорода. Фазовый состав покрытий включает: α -фазу (мартенсит), γ -фазу (аустенит), окислы Fe₃O₄, γ -Fe₂O₃ (в следах) и Cr₂O₃ (в следах). Слои формируются с относительно низким уровнем твердости ($HV = 2800$ МПа), аномально высоким содержанием остаточного аустенита ($V_\gamma = 30...50$ об. %; обычное содержание аустенита 3...5 об. %) и малой концентрацией окислов. Период кристаллической решетки мартенсита $a_\alpha = 0,2875$ нм, аустенита $a_\gamma = 0,3596$ нм.

Одной из наиболее вероятных причин появления «аустенитного эффекта» в покрытиях является относительно более высокая концентрация в них легирующих элементов, насыщение каплей расплава углеродом из пламени пропана, изотермическая выдержка нижележащих слоев в процессе напыления. Исходя из найденных значений температуры распада аустенита, термообработка напыленных деталей с целью повышения твердости покрытий практически невозможна. Поскольку мартенситное $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение может происходить при интенсивном пластическом течении, исследовалась возможность распада остаточного аустенита за счет поверхностного деформирования.

Напыленные покрытия в исходном состоянии имели твердость 360...380 МПа, микротвердость $HV_{30} = 2650$ МПа, содержание остаточного аустенита 40...45 об. %. После шестикратной обкатки шариком диаметром 5 мм с усилием около 1900 Н твердость покрытий составила 8000...8500 МПа, микротвердость $HV_{0,5} = 4100...4500$ МПа, а количество остаточного аустенита снизилось до 8 об. %.

**СОЗДАНИЕ ВИБРОДЕМПФИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ
МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ГАЗОПЛАМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ****М.А. Белоцерковский, П.Г. Сухоцкий, А.В. Федаравичус***Институт надежности машин**НАН Беларуси, г. Минск*

Зубчатые колеса, подшипники качения и узлы на их основе являются источниками вибрации и шума. Основным направлением улучшения виброакустических характеристик машин является применение виброизолирующих элементов, к которым предъявляются повышенные требования по вибродемпфирующим и прочностным характеристикам.

Главным недостатком упругого элемента из резины или каучука является низкая нагрузочная способность, особенно при повышенных окружных нагрузках и температурах. Кроме того, такие упругие элементы недостаточно устойчивы к воздействию химически агрессивных сред, в качестве которых могут выступать различные смазывающие вещества, используемые при работе редуктора или попадающие из окружающей среды. В процессе эксплуатации упругий резиновый элемент может отслаиваться и образовывать задир, теряя свои виброгасящие свойства.

В Институте надежности машин НАН Беларуси разработана технология газопламенного напыления вибродемпфирующих металлополимерных элементов с повышенным комплексом эксплуатационных свойств [1, 2]. В приведенном техническом решении комбинированный упругий элемент выполняется многослойным. Каждый из его слоёв представляет собой металлополимерную композицию из термопластичного полимера и легкоплавкого металла. Термопластичный полимер наносится газопламенным напылением порошков термопластичных полимеров. Легкоплавкий металл, в свою очередь, наносится с применением технологии проволочного газопламенного напыления.

Повышенные виброакустические характеристики редуктора обеспечены за счет того, что виброизолирующий элемент выполнен в виде многослойной композиционной металлополимерной системы, в которой расположено стопорное кольцо. Содержание в композиции термопластичного полимера, который обладает высокими демпфирующими характеристиками (модуль упругости $6 \div 14$ ГПа), позволяет демпфировать радиальные колебания и вибрации в диапазоне частот $0,5 \div 6,0$ кГц и при рабочих температурах до 250 °С. Содержание в композиции легкоплавкого металла упрочняет виброизолирующий элемент, повышает его жесткость и, таким образом, препятствует распространению вибраций в редукторе.

Исследования прочности на сдвиг в окружном направлении и виброизолирующих характеристик показали высокие надежность, износостойкость и виброизолирующие свойства, в комплексе превышающие свойства известных аналогов.

Л и т е р а т у р а

1. Патент РБ на полезную модель № 424 по заявке № и 20010142, кл. МПК 7 F 16 Н 1/48. Редуктор /М.А. Белоцерковский, В.Л. Басинюк, А.В. Федаравичус, М.В. Кирейцев (опубл. 30.12.2001 г.).
2. Положительное решение от 01.04.2002 по заявке № и 20020022, кл. МПК 7 F 16 Н 1/48. Редуктор /М.А. Белоцерковский, А.В. Федаравичус, П.Г. Сухоцкий.

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В СТАЛЯХ КАРБИДНОГО КЛАССА

В.М. Кенько, И.Н. Степанкин

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

Цель исследований: провести анализ упругих характеристик эвтектоидных карбидных частиц сталей ледебуритного класса.

Объект и методика исследований. В качестве объекта исследований выбраны наиболее распространенные среди быстрорежущих и штамповых сталей карбидного класса – стали Р6М5 и Х12М. Сравнительный анализ упругих характеристик осуществляли с помощью вычислительного комплекса «Нанотоп 203» на базе атомно-силового микроскопа. Использовали вольфрамозонд. Граничным условием для сравнительного анализа упругих свойств включений испытуемых материалов являлось – использование одного и того же зонда и его работа на одной опорной частоте при анализе обоих материалов.

Результаты исследований и их обсуждение. Результаты атомно-силового анализа свойств карбидных частиц показали, что сложные по химическому составу включения $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{V})_7\text{C}_3$, $\text{Fe}_4\text{W}_2\text{C}$, $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{V})_{21}\text{W}_2\text{C}_3$, $\text{Fe}_4\text{Mo}_2\text{C}$ сталей Р6М5 и Х12М так же, как и их простые соединения имеют более высокие, чем у металлической матрицы твердость и модуль упругости. Так, изменение фазы колебаний зонда при сканировании карбидной частицы стали Х12М и её окрестности составило 50-60 единиц. При сканировании образца из стали Р6М5 зарегистрировано изменение фазы колебаний в момент перехода кантиллевера с металлической матрицы на карбидную частицу на 25-30 единиц.

Величина скачка фазы колебаний пропорциональна упругим свойствам включения [1]. Так как модуль упругости металлической матрицы составляет порядка 2×10^{11} Па можно сделать вывод, что карбидные частицы стали Х12М имеют большую твердость и модуль упругости, чем избыточные карбидные частицы стали Р6М5. Различие упругих свойств включения и металлической матрицы обуславливает неравномерность деформаций частицы и окружающего металла под нагрузкой. Следовательно, на линии их соприкосновения будут возникать касательные напряжения. Это создает условия для более ускоренного накопления дислокаций на границе включение–матрица, в окрестности карбидных включений стали Х12М по сравнению со сталью Р6М5. Подобное обстоятельство в совокупности с особенностями структуры во многом объясняет более высокие механические свойства стали Р6М5 чем Х12М.

Литература

1. Чижик С.А. Трибомеханика прецизионного контакта (сканирующий зондовый анализ и компьютерное моделирование): Автореф. дис.... докт. тех. наук: 05.02.04 /Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси. – Гомель, 1998. – 40 с.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ТЕРМИЧЕСКОМ АКТИВИРОВАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ

В.А. Ковтун, В.Б. Шувалов, Ю.М. Плескачевский

*Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого
НАН Беларуси, г. Гомель*

Исследованы особенности формирования металлополимерных покрытий, содержащих дисперсные политетрафторэтилен (ПТФЭ) и полиэтилен низкого давления (ПЭНД), и наносимых методом электроконтактного припекания на металлическую подложку в виде ленты. Учитывая значительную разность теплофизических свойств металлических и полимерных частиц, особое внимание уделено процессу нагрева полимерных частиц, так как он в значительной мере влияет на выбор технологических параметров и определяет взаимодействие составляющих компонентов порошковой системы.

Произведена оценка температурного состояния частиц ПТФЭ и ПЭНД, находящихся в медной матрице при прямом пропускании электрического тока в процессе спекания металлополимерного композита. Для нахождения распределения температуры внутри полимерной частицы радиуса R в любой момент времени данная задача сводится к решению дифференциального уравнения теплопроводности следующего вида:

$$\frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right),$$

где $\tau > 0$; $0 < r < R$; $T(r, \tau)$ – температура внутри частицы в любой момент времени τ , при следующих граничных условиях: $T(r, 0) = T_0$ – начальная температура; $T(R, \tau) = T_d$ – температура начала термоокислительной деструкции; $T(0, \tau) \neq \infty$. Численное решение этого уравнения показало, что температура в центре полимерной частицы при стандартных технологических режимах переработки остается практически неизменной во время всего процесса спекания и не превышает начальной.

Проплавление частицы происходит в слое $R-r$, внутренняя граница которого соответствует температуре плавления $T_{пл}$. Поэтому представляет интерес определение r/R , то есть на какую часть радиуса полимерная частица прогревается до температуры плавления в условиях данной задачи. Для этого рассмотрено уравнение:

$$\frac{r}{R} = \frac{2}{\Theta} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{\sin n\pi \frac{r}{R}}{n\pi} \exp(-n^2 \pi^2 Fo),$$

где $\Theta = \frac{T_d - T(r, \tau)}{T_d - T_0}$ – относительная избыточная температура в полимерной частице

на относительном радиусе r/R ; $Fo = \tau/R^2$ – число Фурье; $T(r, \tau) = T_{пл}$.

Численное решение этого уравнения применительно к материалам, содержащим частицы ПТФЭ размером 150 мкм и частицы ПЭНД размером 120 мкм показывает, что толщина проплавленного слоя частиц не превышает 0,2-0,3 их радиуса при принятых технологических режимах. Структурные исследования порошковых ме-

таллополимерных покрытий подтвердили теоретические предпосылки и результаты проведенных расчетов.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (Проект № Ф99-249).

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ СПЕКАНИЯ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ Порошковой системы ЖЕЛЕЗО-НИКЕЛЬ-МЕДЬ

В.Б. Шувалов, В.А. Ковтун

*Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого
НАН Беларуси, г. Гомель*

Композиционные материалы и сплавы триботехнического назначения как на основе железа, так и на основе меди широко используются в узлах трения промышленного оборудования. Но композиты на основе матрицы железо-медь в широком диапазоне концентраций разработаны слабо, в первую очередь вследствие низкой взаимной растворимости этих металлов. Перспективность получения таких материалов заключается в возможности сочетания положительных свойств железной и медной основ. Это позволит получить материалы, имеющие стабильные характеристики в широком диапазоне нагрузочно-скоростных параметров, не вызывающие интенсивный износ контртела и обеспечивающие высокую надежность работы узлов трения. Это достигается формированием трехкомпонентной матрицы, в которой двойные системы железо-никель и никель-медь образуют непрерывный ряд твердых растворов и имеют низкие энергетические пороги взаимной диффузии, что оказывает положительное влияние на процесс спекания, сокращает его длительность и энергозатраты.

В Институте проводятся исследования с целью разработки металлокерамических материалов, предназначенных для работы в теплонагруженных узлах трения, при высоких скоростях скольжения и удельных нагрузках без подвода смазывающей и охлаждающей среды, представляющих интерес для авиационной промышленности. Матрица разрабатываемого материала представляет собой спеченную систему, состоящую из порошков переходных металлов железо-никель-медь в соотношениях 40-60, 15-30, 10-30 мас. %, соответственно, с размером частиц 20-160 мкм. В работе рассматриваются некоторые аспекты спекания в печи конвейерного типа в атмосфере эндогаза после предварительного прессования, и комбинированном спекании с использованием электроконтактного метода, основанного на одновременном воздействии на спекаемую шихту давлением и электрическим током высокой плотности (около 100 А/мм²).

Рассматриваются микроструктуры разрабатываемых материалов, образующиеся при твердофазном спекании, а также при спекании в присутствии небольших количеств жидкой фазы, которую образуют более легкоплавкая медь или сплав меди с никелем. Показаны преимущества электроконтактного спекания для обеспечения прочного соединения металлических частиц при спекании и сохранения наследственной структуры, химического состава, низкой зернистости исходных порошков, что во многом определяет физико-механические свойства и триботехнические характеристики композиционного материала.

УПРУГИЕ СВОЙСТВА ПОЛЯРНЫХ ПОЛИМОРФНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

А.Ю. Струкачѳв

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь

Коренное отличие полиморфных материалов от мономодификационных состоит в том, что хотя бы одна из обобщенных координат фазового состояния полиморфного соединения отлична от нуля только в одной полуплоскости его фазовой диаграммы, а именно – в области структурно-упорядоченного состояния. Физико-химическое свойство, отвечающее упомянутой «односторонней» координате, обнаруживает в области полиморфного превращения ярко выраженную нелинейную зависимость от температуры, давления и т. п., что открывает большие (но крайне мало изученные) возможности для управления свойствами материала, позволяя заменить трудоемкий синтез материала с требуемыми свойствами оптимизацией режима эксплуатации уже имеющегося материала. С учетом этого в первую очередь целесообразно проанализировать возможность управления теми характеристиками полиморфного материала, которые определяют его свойства при динамической эксплуатации. В настоящей работе исследованы температурная и частотная зависимости динамических упругих свойств материалов полярных кристаллографических классов как наиболее широко применяемых в технике.

Показано, что релаксационное взаимодействие между упорядочивающейся ионной структурой и изменяющимся во времени внешним воздействием можно однозначно охарактеризовать аддитивными кристаллографическими инвариантами, построенными на основе теоретико-групповых сочетаний рациональных функций параметра порядка Q и переменной внешней силы. Исходя из этого, доказано, что в квазиравновесном приближении (модель электрострикционного взаимодействия) термодинамический потенциал выражается в виде

$$F = F_0 + \frac{1}{2}\alpha Q^2 + \frac{\beta}{4}Q^4 + A Q^2(u_1 + u_2) + B Q^2 u_3 + \frac{1}{2}C_{11}(u_1^2 + u_2^2) + \frac{1}{2}C_{33}u_3^2 + C_{12}u_1u_2 + C_{13}u_3(u_1 + u_2) + C_{44}(u_4^2 + u_5^2) + \frac{1}{2}(C_{11} - C_{12})u_6^2,$$

где F_0 – регулярная часть потенциала, не изменяющаяся при полиморфном превращении, $\alpha = \alpha_T(T - T_0)$, α_T , β , A , B – положительные константы, T_0 – температура полиморфного превращения, u_ν – компоненты тензора деформаций ($\nu = 1, 2, \dots, 6$), C – тензор упругих жесткостей. В результате полиморфного превращения появляются дополнительные («аномальные») приращения компонент C_{ij} , где $i, j = 1, 2, 3$:

$$\Delta C_{11} = \Delta C_{22} = \Delta C_{12}; \Delta C_{13} = \Delta C_{23},$$

$$\Delta C_{11} = -\frac{2A^2(1 + 2i\Omega\tau)}{\beta(1 + i\Omega\tau)^2}, \Delta C_{13} = -\frac{2AB(1 + 2i\Omega\tau)}{\beta(1 + i\Omega\tau)^2},$$

$$\Delta C_{33} = -\frac{2B^2(1+2i\Omega\tau)}{\beta(1+i\Omega\tau)^2}, \Delta C_{44} = \Delta C_{66} = 0.$$

При $T \rightarrow T_0$ время релаксации $\tau \rightarrow \infty$, вследствие чего аномальные приращения ΔC_{11} , ΔC_{12} , ΔC_{22} , ΔC_{13} , ΔC_{23} и ΔC_{33} по мере приближения к точке T_0 убывают до нуля. В то же время, компоненты C_{44} и C_{66} в области полиморфного превращения не претерпевают каких-либо изменений.

АНАЛИЗ УСЛОВИЯ ДОСТИЖЕНИЯ АДГЕЗИИ МЕЖДУ СЛОЯМИ ПРИ ПЛАКИРОВАНИИ ПРОКАТКОЙ

Н.В. Селивончик, Ю.Л. Бобарикин

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

Процесс нанесения на металлическую основу металлического слоя покрытия путем совместной пластической деформации основы и плакирующего материала является достаточно перспективным, вследствие высокой производительности и малой энергоемкости. Проблемы надежности соединения между слоем покрытия и основой достаточно актуальны, так как именно качество этого соединения во многом обеспечивает эксплуатационные характеристики получаемого материала.

Целью исследований являлось получение условия достижения адгезии между слоями, как основного критерия качества соединения.

Методика исследований состояла в теоретическом определении аналитического условия достижения адгезии между слоями, и в его экспериментальном подтверждении на процессе плакирования прокаткой стали 08кп покрытием из алюминиевого порошка ПАВЧ-1.

В результате исследований получены аналитические зависимости для параметров, входящих в условие достижения адгезии между слоями:

$$t_d \geq t_a \geq t_p,$$

где t_d – время совместной пластической деформации или время перемещения контактных точек через зону деформации в процессе плакирования, с; t_a – время активации поверхности менее деформируемой основы в зоне соединения, с; t_p – время релаксации остаточных напряжений в более деформируемом покрытии, с.

Время совместной пластической деформации определяется по зависимости:

$$t_d = \frac{l_d}{g_n}, \text{ где } l_d \text{ – длина очага деформации, м; } g_n \text{ – скорость процесса дефор-}$$

мирования металла, м/с.

Если предположить, что активным центром при схватывании является дислокация с полем напряжения, то для определения времени активации используется следующая зависимость:

$$t_a = \frac{L \cdot b}{\dot{\epsilon} \cdot S}, \text{ где } L \text{ – путь движения дислокации до барьера, м; } b \text{ – модуль вектора}$$

Бюргерса для материала менее пластичной основы, м; $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации металла в зоне соединения, 1/с; S – изменение площади активного центра в месте выхода дислокаций к зоне соединения, м².

Время релаксации определяется зависимостью:

$$t_p = t_0 \exp\left(\frac{U}{k \cdot T}\right), \text{ где } t_0 \text{ период собственных колебаний атомов около равноос-}$$

ного положения, $t_0 = 10^{-13}$ с; k – постоянная Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/к; T – температура в очаге деформации, К; U – энергия активации процесса, контролирующего релаксацию внутренних напряжений, которая определяется как энергия активации самодиффузии по границам зерен при для процессов, протекающих при $T > 0,5T_{nl}$ и как энергия термически активируемых процессов (поперечное скольжение, пересечение дислокаций, трение в решетке, обусловленное силами Пайерлса) для процессов, протекающих при $T \leq 0,5T_{nl}$.

Величины параметров, входящих в зависимости для t_p, t_a определяются по нижеприведенным формулам:

$$S = \pi \cdot r^2, r^2 = \frac{1}{4\rho_\partial}, \dot{\epsilon} = \frac{\gamma_i}{\sqrt{3} \cdot t_\partial}, L = \rho_\partial^{-\frac{1}{2}}, \rho_\partial = \frac{\gamma_i}{b \cdot t_\partial \cdot \mathcal{G}_{3g} \cdot \exp\left(-\frac{A}{kT}\right)},$$

где r – радиус активного центра, м; ρ_∂ – плотность дислокаций на поверхности металлической основы в зоне соединения с порошковым слоем, $1/\text{м}^2$; γ_i – интенсивность поверхностной сдвиговой деформации основы, определяемая для процессов плакирования исходя из геометрических перемещений контактных точек на поверхности основы; b – вектор Бюргерса материала основы, м; $\mathcal{G}_{3g} = 5 \cdot 10^3 \text{ м/с}$ – средняя скорость звука в материале основы; A – свободная энергия образования перегибов дислокаций, Дж, которая является постоянной величиной для определенного материала.

Величина T определяется как сумма температуры начального нагрева материала T_0 и температуры, выделяемой в процессе пластической деформации металла по зависимости:

$$T = T_0 + \frac{(A_T + A_{II})\gamma_i}{2c\rho V + c_1\rho_1 t_\partial \mathcal{G}_n S_k + c_2\rho_2 t_\partial S_k^1 + c\rho t_\partial S_k^{11}} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}},$$

где T_0 – начальная температура, К; A_T – работа сил контактного трения, Дж; A_{II} – работа пластической деформации, Дж; c – удельная теплоемкость материала основы Дж/(кг К); ρ – плотность материала основы, кг/м³; c_1, ρ_1 – соответственно, удельная теплоемкость и плотность воздуха; S_k – площадь контакта очага деформации с воздухом, м²; S_k^1 – площадь контакта очага деформации с инструментом, м²; c_2, ρ_2 – соответственно, удельная теплоемкость и плотность материала инструмента; S_k^{11} – площадь контакта очага деформации с недеформируемой частью заготовки, м²; V – объем очага деформации, м³.

На основе анализа условия достижения адгезии между слоями сделан вывод, что для используемых материалов для выполнения данного условия можно изменять следующие технологические параметры процесса: температуру, скорость процесса деформирования, степень деформации, геометрию очага деформации.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили возможность практического использования полученных аналитических зависимостей.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ИЗНОСА РЕЖУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ КОРМОУБОРОЧНОЙ ТЕХНИКИ, УПРОЧНЕННЫХ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

В.А. Люцко

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

На Гомельском заводе самоходных комбайнов для повышения износостойкости режущих элементов измельчающих аппаратов кормоуборочных комбайнов КСК-100 и КПК4-75 внедрен процесс магнитно-электрического упрочнения (МЭУ). Главными критериями при выборе данного способа являлись: гарантированный срок службы 2 года, наработка не менее 12000 тонн зеленой массы, максимальный угол затупления режущей кромки 2 мм. Однако для более эффективного использования потенциала МЭУ для повышения износостойкости режущих элементов необходимо дальнейшее исследование по изучению эксплуатационных характеристик упрочненных поверхностей режущих элементов. В частности, представляет интерес изучение вопроса динамики износа режущих кромок в зависимости от количества измельченной массы, от материалов режущих элементов, ферропорошков и установления их влияния на качество измельчения.

С этой целью проводились лабораторные и стендовые исследования. Лабораторные исследования проводились на устройстве, изготовленном на базе маятникового копра МК-3А, а стендовые – на кормоизмельчителе ротационного типа КИР-1,5. Для исследований применялись серийно выпускаемые режущие элементы. Материал ножа – сталь 65Г с упрочнением сормайтотом, брусья изготавливались из стали 65Г, 45, 20 с последующим МЭУ ферропорошками ФБ-17, ФБ-20, ФХБ-1 ГОСТ 14848-69. Исследованию подвергались культуры 2-х видов: стебельчатые – кукуруза и травянистые – овес с викой. При технической экспертизе контролировались: радиус скругления режущей кромки бруса в трех сечениях по длине: на расстояниях 120 мм от концов и посередине бруса; угол заточки ножа, острота кромки лезвия ножа по толщине кромки и зазор между кромками ножа в этих же сечениях; среднее значение длины резки зеленой массы. Острота заточки ножа, радиусы скругления режущих кромок ножа и бруса определялись по оттискам на свинцовых пластинках толщиной до 4 мм. Затем на проекторе оттиски с увеличением в 50 раз методом световых теней проектировались на специальный экран, на котором были изображены профильные сечения ножа и бруса. Зазор между ножом и бруском контролировался с помощью набора щупов. Экспериментальные данные обрабатывались на ЭВМ.

Проведенные исследования позволили:

1. Получить зависимость, описывающую динамику износа режущих элементов в виде:

$$R = a \cdot N^q,$$

где a – коэффициент, зависящий от материалов режущих элементов, ферропорошка и зеленой массы (в проведенных исследованиях интервалы его колебаний 0,05-0,16); N – количество измельченной зеленой массы, т; q – показатель степени ($q \cong 2/3$).

2. Установить, что качество измельчения зависит как от радиусов затупления режущих элементов, от рабочего зазора между ними, так и от вида культуры зеленой массы.

ВЛИЯНИЕ ЭРОЗИИ НА ФОРМИРОВАНИЕ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ ПРИ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ УПРОЧНЕНИИ

Д.В. Мельников

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь

Анализ процессов, протекающих при магнитно-электрическом упрочнении, показывает, что толщина и качество наносимых покрытий находятся в сложной зависимости от многих факторов: силы технологического тока, магнитной индукции в зоне обработки, величины рабочего зазора между деталью и периферией ротора, скорости перемещения обрабатываемой поверхности детали, скорости вращения ротора, грануляции ферромагнитного порошка и скорости его подачи в зону обработки, химического состава и электромагнитных свойств материалов порошка и детали, исходной шероховатости обрабатываемой поверхности.

Экспериментальные исследования показали, что наибольшее влияние на показатели процесса оказывает сила технологического тока. С увеличением силы технологического тока до 80-90 А толщина и сплошность покрытия увеличиваются. При дальнейшем увеличении технологического тока показатели процесса магнитно-электрического упрочнения снижаются. Это объясняется тем, что при переносе материала ферромагнитного порошка на упрочняемую деталь протекают процессы механической и электрической эрозии.

При прохождении электрического тока по цепочкам из зерен порошка происходит электрический взрыв. Взрывной волной из зоны обработки выбрасываются образовавшиеся объемы жидкого металла и частицы зерен порошка. Скорость движения частиц металла зависит от энергетического воздействия и в начальный момент времени достигает до 20 м/с. Потери массы вследствие механической эрозии

$$m = K \cdot \frac{d^3 \cdot V^3 \cdot \rho_n^{3/2} \cdot \rho_d}{H^{3/2}},$$

где d – диаметр частицы, V – скорость полета частицы, ρ_n – плотность порошка, ρ_d – плотность детали, H – твердость детали по Виккерсу.

В основе электрической эрозии лежит эмиссия вещества, протекающая при прохождении разряда. Потери массы вследствие электрической эрозии

$$m = \frac{1}{B \cdot F_0^2} \cdot \int_0^t I^2 dt,$$

где B – величина, характеризующая свойства материала, F_0 – величина, характеризующая свойства межэлектродной среды.

Вывод. В результате экспериментальных исследований получены оптимальные значения силы технологического тока – 80-90 А. При увеличении силы технологического тока свыше 90 А толщина и сплошность покрытия уменьшаются, т. к. эрозионные процессы начинают превалировать над процессами переноса материала порошка.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИПОЛИЭФИРНЫХ СМОЛ

З.Я. Шабакаева

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

Цель работы: исследование физико-механических свойств композиционного материала на основе эпоксиполиэфирных смол и сравнение этих характеристик с исходными материалами.

Исследованию подвергались композиционные материалы на основе эпоксиполиэфирных смол, в состав которых входили: эпоксидная смола (ЭД-40), полиэфирная смола (ПЭ-265), полиамид (Л-20), наполнитель (карбид кремния зеленый), 3%-ный раствор парафина в стироле (марка Б). В качестве изменяемых параметров состава материала приняты содержание (мас.ч.) полиэфирной смолы и наполнителя. Содержание эпоксидной смолы во всех материалах составляла 100 мас.ч. Содержание полиэфирной смолы принималось: 25 мас.ч.; 50 мас.ч.; 75 мас.ч.; наполнителя – 50 мас.ч.; 80 мас.ч.; 100 мас.ч.

Исследование физико-механических свойств материалов осуществлялось по следующим параметрам: пределу прочности при сжатии с определением модуля упругости, пределу прочности при растяжении, твердости материала по Виккерсу, а также плотности материала. Полученные данные сравнивались с физико-механическими свойствами основных материалов, входящих в состав композита.

При исследовании прочностных характеристик использовались типовые методики. Испытание материала на прочность при сжатии проводилось на аппаратуре ConTex 94С. В процессе испытания производилась запись нагрузки и деформации с получением зависимости перемещения от величины нагрузки. По полученным данным определялся предел прочности и рассчитывался модуль упругости при сжатии. Предел прочности при разрыве определялся в соответствии с ГОСТ 11262-80 и ГОСТ 12423-66. Твердость материала исследовалась на микротвердомере ПМТ-3 по ГОСТ 15150-69 с использованием нагрузки в 100 и 200 г.

Полученный в результате исследования предел прочности (усредненный) при сжатии равнялся 65,6 МПа. Кроме того, по полученным данным производился расчет модуля упругости при сжатии, численное значение которого составило 506,6 МПа. Исходные материалы композиции имеют следующие значения предела прочности при сжатии: эпоксидная смола – 149 МПа, полиэфирная смола – 115 МПа. Исследование материала с определением предела прочности при растяжении позволило определить его усреднённое значение 23,1 МПа, что также отличается от показателей предела прочности исходных материалов эпоксидной (83 МПа) и полиэфирной (62 МПа) смол. Исследование материалов на твердость по Виккерсу позволило определить значение усредненной твердости (24 МПа). Сравнивая твердость образцов с твердостью исходных материалов эпоксидной (45 МПа) и полиэфирной (14 МПа) смол, можно видеть, что твердость нового материала отличается от твердости исходных материалов.

По стандартной методике была определена плотность образцов (1,502 г/см²), что выше плотности эпоксидной (1,2 г/см²) и полиэфирной (1,12 г/см²) смол.

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что исследуемый композиционный материал на основе эпоксиполиэфирных смол по сравнению с исходными материалами обладает отличительными от них физико-механическими свойствами и может использоваться в элементах крепления сборных резцов.

ПРИМЕНЕНИЕ АНТИФРИКЦИОННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ГРУППЫ ФЛУВИС В КОМПРЕССОРОСТРОЕНИИ**В.В. Серафимович, В.А. Шелестова, Г.Н. Горбацевич***Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого**НАН Беларуси, г. Гомель**Гродненский механический завод, Республика Беларусь*

Обязательным условием работы узлов трения и уплотнений машин, долгое время считалось наличие жидкой смазки – масла, воды, смазочно-охлаждающих смесей и др. Вместе с тем, жидкая смазка, уносимая рабочей средой, оказывала отрицательное влияние на многие технологические процессы, снижая их интенсивность и ухудшая качество конечного продукта.

В компрессорах, где загрязнение продуктами смазки особенно нежелательно, уплотнения необходимо изготавливать из самосмазывающихся материалов. Среди антифрикционных материалов, предназначенных для узлов уплотнений и опор сухого трения, одними из лучших считаются угленасыщенные фторопласты. Эти композиты сочетают в себе высокую термо- и химстойкость фторопласта-4 и прочность, легкость, высокую теплопроводность углеродных наполнителей.

Композиционный материал Флувис-20 совместно разработан и производится Институтом механики металлополимерных систем им. В.А. Белого Национальной Академии наук Беларуси (г. Гомель) и Гродненским механическим заводом. Он представляет собой фторопласт-4, наполненный специально модифицированными углеволокнами.

Промышленные испытания показали, что материал Флувис успешно работает в воздушной среде и в различных газах, в том числе в агрессивных средах, при глубоком вакууме и при криогенных температурах, в условиях высоких скоростей и нагрузок.

Специалисты ЗАО «Экотехсервис» (Санкт-Петербург) на основе более чем тридцатипятилетнего опыта применения насыщенных фторопластов в компрессоростроении используют композиционный материал Флувис-20 практически с сентября 1999 г. Флувис-20 используется в качестве уплотнительных колец и манжет без смазки, в детандерах сухого хода, насосах, торцевых опорах и уплотнениях, в качестве подшипников и опор скольжения поршней и валов, в качестве сепараторов, подпятников, запорных органов клапанов и др.

Главное преимущество уплотнений из Флувиса – это высокий срок службы в условиях сухого хода и отсутствие износа цилиндров и штоков, что исключает капитальный ремонт цилиндропоршневых групп компрессоров.

Основная область применения компрессоров без смазки это пищевая промышленность, пивоваренные заводы, производство пластмассовых бутылок, покраска автомобилей и другого оборудования, производство прохладительных напитков, химическая, фармацевтическая, нефтяная промышленность и т. д.

Последние исследования материалов группы Флувис показали, что возможности их дальнейшего совершенствования не исчерпаны. Модифицирование углеродных волокон и специальная обработка поверхности дают ощутимые результаты. Так, у Флувиса-20, наполненного углеволокнами, покрытыми тонким слоем ПТФЭ, интенсивность износа снижается в 1,5 – 2 раза.

В настоящее время проводятся работы по расширению марочного ассортимента композиционных материалов группы Флувис, в первую очередь в направлении создания материалов с большей жесткостью и стабильностью размеров.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ****А.И. Коршунов***Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

Наиболее широкое применение в ремонтном производстве для упрочнения и восстановления деталей машин триботехнического назначения получили самофлюсующиеся сплавы системы $Ni - Cr - B - Si$. Однако фактором, сдерживающим применение таких покрытий в узлах граничного и сухого трения является длительный период приработки, который сопровождается значительным суммарным износом трибосопряжений.

В работе была изучена возможность восстановления деталей машин и повышения износостойкости узлов сухого трения путем разработки комплексной технологии плазменного напыления хромоникелевых покрытий и последующей их модификации твердосмазочными пленками (MoS_2 , графит), пластичными металлами (медный сплав) и легкоплавкой эвтектикой (галлий – индий).

Анализ результатов фрикционных испытаний хромоникелевых покрытий в условиях сухого трения показал, что во всем диапазоне исследуемых нагрузок ($0,1 \div 10$ МПа) и скоростей скольжения ($0,1 \div 2$ м/с) интенсивность изнашивания покрытия в $2 \div 3$ раза меньше, чем закаленной стали 45 ($H_M = 4800$ МПа) и находится в пределах $(1,8 \div 2,5) \cdot 10^{-9}$. Для пар трения с исходным покрытием характерен более длительный период приработки, стабилизации температуры и достижения равновесной шероховатости поверхностей трения, чем для модифицированных покрытий. Фрикционное взаимодействие трибосопряжений без пленок характеризуется большими значениями коэффициента трения как в начальный период испытаний ($f = 0,25 \div 0,3$), так и в период завершения приработки ($f = 0,2$). С увеличением нагрузки до $3,0 \div 3,5$ МПа отмечается повышение температуры фрикционного контакта до $443 \div 513$ К, наблюдаются отдельные задиры поверхности и перенос фрагментов материала на контртело. Для пар трения с модифицированными покрытиями $Ga - In$ суммарный износ за период приработки оказался в $1,5 \div 2$ раза меньше, чем у пар трения без пленок. Температура фрикционного контакта для таких трибосопряжений повышалась до $393 \div 433$ К, а интенсивность изнашивания контртела составила $1,6 \cdot 10^{-9}$. Максимальная нагрузочная способность наблюдалась для покрытия с пленками из эвтектики $Ga - In$ и составила 6 МПа. Более высокие триботехнические характеристики модифицированных покрытий с приработочными пленками $Ga - In$ обусловлены пластифицирующим действием таких поверхностно-активных металлов, которые при фрикционном взаимодействии позволяют сосредоточить деформации в тонком слое пластифицированного металла, и обеспечивают положительный градиент механических свойств поверхности. Установлено, что характер и интенсивность абразивного изнашивания исходных и модифицированных покрытий $Ni - Cr - B - Si$ определяется количеством и распределением твердых боридных и карбидных фаз в матрице из γ – раствора никеля.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОГО ТЕЧЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ И БИОМЕХАНИКИ

С.Л. Гавриленко, В.Ф. Хиженок

*Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого
НАН Беларуси, г. Гомель*

Разрабатывается описание вязко-пластической деформации в условиях обработки материалов давлением, например, при получении изделий методом глубокой вытяжки [1], и при деформировании мягких тканей зубочелюстной системы (периодонта) при воздействии функциональных и корректирующих нагрузок [2]. Предлагаемые модели, по-видимому, могут быть использованы также для описания движения крови в капиллярах и более крупных кровеносных сосудах.

В названных приложениях является принципиальным учет порогового характера процесса течения, что делает важным уточнение методик идентификации указанных моделей, принимая во внимание как пороговое напряжение, так и нелинейную скоростную чувствительность. В частности, в настоящей работе определяются константы вязко-пластического материала в условиях течения Куэтта и Пуазейля. В первом случае имеем следующую систему уравнений:

$$\int_1^{b/a} \frac{1}{(r')^{2n+1}} \left(1 - \frac{\tau_0'(r')^2}{C_1^{(1)'}}\right)^n dr' - \frac{\Delta w^{(1)} ba}{\Delta w^{(3)} ba} \left(\frac{C_1^{(3)'}}{C_1^{(1)'}}\right)^n \int_1^{b/a} \frac{1}{(r')^{2n+1}} \left(1 - \frac{\tau_0'(r')^2}{C_1^{(3)'}}\right)^n dr' = 0;$$

$$\int_1^{b/a} \frac{1}{(r')^{2n+1}} \left(1 - \frac{\tau_0'(r')^2}{C_1^{(2)'}}\right)^n dr' - \frac{\Delta w^{(2)} ba}{\Delta w^{(3)} ba} \left(\frac{C_1^{(3)'}}{C_1^{(2)'}}\right)^n \int_1^{b/a} \frac{1}{(r')^{2n+1}} \left(1 - \frac{\tau_0'(r')^2}{C_1^{(3)'}}\right)^n dr' = 0.$$

Приближенные уравнения получаются из точных при разложении подинтегрального выражения по формуле Ньютона. Показано, что при малых τ_0 процедура вычисления этой константы неустойчива, в то время как τ_0 , сопоставимые по величине с параметром K , находятся лучше (ошибка порядка 10 %).

При описании течения Пуазейля исходя из зависимости для расхода материала в единицу времени получены 3 уравнения, позволяющие вычислить искомые константы

$$\frac{2\pi\dot{\varepsilon}_0}{K^n(n+1)(n+2)(n+3)} \frac{a^2}{P_i^i} \left(\frac{1}{2} aP_i^i - \tau_0\right)^{n+1} \times$$

$$\times \left\{ (n+1)(n+2) + 8 \left(\frac{\tau_0}{aP_i^i}\right)^2 + 4 \left(\frac{\tau_0}{aP_i^i}\right)(n+1) \right\} - Q_i = 0,$$

$$i = 1 \dots 3,$$

где a – радиус трубы, P_i^i – перепад давления в i – эксперименте, τ_0, k, n – константы материала, ε_0 – характерная скорость деформации. Указанная система решалась ме-

тодом секущих. При малых τ_0 ($\tau_0 < 0,1 K$) ошибка вычисления τ_0 превышает 20 % при отклонении Q_i в 1 %, однако с ростом отношения $\frac{\tau_0}{K}$ ошибка уменьшается и достигает 3-5 % при $0,7 < \frac{\tau_0}{K} < 1$. В дальнейшем полученные аналитические оценки планируется сопоставить с результатами расчетов при помощи известных программных продуктов.

Литература

1. Гавриленко С.Л., Шилько С.В., Васин Р.А. Определение характеристик вязкопластического материала в условиях течения Куэтта //Прикл. механика и техн. физика. – 2002. – № 3. – С. 502–508.
2. Шилько С.В. Адаптивность дентального аппарата и напряженное состояние зуба человека //Механика композиц. материалов и конструкций. – 1999. – Т. 5. – № 1. – С. 49–59.

СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛОСОВОГО КОМПОЗИЦИОННОГО АНТИФРИКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА С НАПОЛНИТЕЛЕМ НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

Ю.Л. Бобаркин, А.Н. Швецов, С.В. Шишков

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

В мировой практике создания антифрикционных материалов для самосмазывающихся подшипников скольжения наиболее эффективными являются композиционные материалы, состоящие из металлической матрицы и наполнителя, содержащего в качестве основного смазывающего компонента политетрафторэтилен (ПТФЭ) или фторопласт. Из этих материалов изготавливаются подшипники скольжения различных конструкций, работающие без дополнительной смазки в широком диапазоне давлений и скоростей с высокими антифрикционными свойствами.

Одним из видов таких материалов является металлофторопластовый композит, представляющий собой стальную полосу с напеченной на нее металлической порошковой матрицей, содержащей наполнитель на основе фторопласта.

Разработаны два способа изготовления данного материала. Один из них предназначен для получения металлофторопластовых полос с широким диапазоном изменяемых геометрических размеров. Он отличается применением порошковой бронзы для матрицы и пропиткой ее пастой на основе фторопласта. Операции спекания проводятся в электропечах сопротивления. Способ позволяет изготавливать полосы с максимальными размерами, лимитируемыми размерами используемого оборудования. Основным недостатком этого способа является его относительно высокая энергоемкость и низкая производительность. Для устранения приведенных недостатков во втором разработанном способе используется электроимпульсное спекание порошкового слоя. Он отличается применением композиционной порошковой металлофторопластовой шихты. Имеет относительно высокую производительность, низкую энергоемкость, но существует ограничение ширины получаемых полос, связанное с размерами зоны электроимпульсного нагрева.

Материал имеет следующие геометрические характеристики: толщина стальной полосы-подложки – 0,8... 1,2 мм, толщина рабочего антифрикционного слоя – 0,2... 0,5 мм, ширина полосы – 10... 250 мм, длина полосы – 100... 500 мм. По результатам лабораторных испытаний материал имеет следующие эксплуатационные характеристики: $PV = 0,5$ МПа·м/с, коэффициент трения 0,12, интенсивность износа 0,0003... 0,0017 г/км в зависимости от режимов эксплуатации.

БЕЗАСБЕСТОВЫЕ ФРИКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫЕ ДЛЯ РАБОТЫ В СРЕДЕ МАСЛА

В.П. Сергиенко, И.А. Левин, А.В. Купреев

*Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого
НАН Беларуси, г. Гомель*

Роль фрикционных устройств в обеспечении безопасной, надежной и долговечной работы мобильных машин и механизмов непрерывно возрастает. К материалам, используемым во фрикционных узлах, предъявляются все более жесткие требования по величине и стабильности коэффициента трения, по износостойкости, экономическим и экологическим показателям, возможности работать при низких и высоких температурах в условиях сухого трения и при наличии смазки.

В ИММС НАНБ разработаны полимерные безасбестовые фрикционные материалы (ПБФМ) на основе термостойких полимерных связующих, органических и минеральных мелкодисперсных наполнителей и синтетических маслостойких модификаторов, обладающие высокими триботехническими и прочностными характеристиками, что позволяет использовать их в тормозных и передаточных фрикционных узлах высокой энергоемкости.

В работе приводятся результаты комплексных исследований фрикционных материалов, предназначенных для работы в среде масла. Изучено влияние природы металлических дисперсных и волокнистых наполнителей на износостойкость и механическую прочность ПБФМ. Установлено, что максимальной износостойкостью и прочностью обладают фрикционные материалы, содержащие наполнители на основе медных сплавов. Обнаружено, что повышению износостойкости ПБФМ при использовании металлических наполнителей способствует модификация фенолформальдегидных смол серосодержащими эластомерами. Исследование ПБФМ с металлическими волокнами показали, что такие композиции имеют высокую плотность, превышающую рекомендованную стандартами низкую термомеханическую прочность и нестабильный коэффициент трения.

Сделано заключение, что оптимальные фрикционно-износные и прочностные характеристики ПБФМ, обеспечивающие надежную и эффективную работу узла трения в широком диапазоне температур, давлений и скоростей могут быть обеспечены только сочетанием нескольких типов армирующих волокон.

Материалы прошли стендовые и ресурсные испытания на РУП «ПО МТЗ» в узле вала отбора мощности тракторов «Беларус», по результатам которых они рекомендованы к серийному внедрению.

ПОКРЫТИЕ, УМЕНЬШАЮЩЕЕ ОБРАТНОЕ РАДИОЛОКАЦИОННОЕ ОТРАЖЕНИЕ

В.Н. Мизгайлов

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Рассматривается высокотехнологичный способ получения покрытия, уменьшающего обратное радиолокационное отражение, использующий новые физические принципы для построения структур металло-полимерных систем.

При создании малозаметных для радиолокационного обнаружения летательных аппаратов широкое распространение получили технологии, основанные на использовании поглащающих материалов и покрытий, рассеивающих энергию облучения в направлении, отличающемся от направления облучения радара. При этом одной из наиболее важных проблем, препятствующих использованию радиопоглощающих покрытий, являются их высокие весогабаритные характеристики.

В предлагаемом способе получения покрытия основной технический результат заключается в уменьшении веса покрытия при обеспечении высокого уровня уменьшения обратного радиолокационного отражения. Дополнительный технический результат заключается в возможности получения заданного отражения от поверхности объекта в целом.

Достижение основного технического результата обеспечивается тем, что в способе получения покрытия, уменьшающего обратное радиолокационное отражение, заключающемся в том, что на участок электропроводной радионепрозрачной поверхности объекта, вносящий существенный вклад в обратное радиолокационное отражение, наносят электропроводный слой и слой для закрепления последнего на поверхности, наносят в виде электроизоляционной пленки, на электроизоляционной пленке или на электропроводном слое формируют отображение прямолинейной плоской решетки или прямолинейной плоской сетки, шаг которой выбирают из интервала, равного не менее одной пятой и не более двух целых рабочей длины волны радиолокационного излучения, а электропроводный слой наносят в соответствии с отображением в виде участков электропроводной радионепрозрачной пленки, разделенных друг от друга щелями. Кроме того, получение отображения решетки или сетки на электроизоляционной пленке и нанесение участков электропроводной радионепрозрачной пленки, разделенной щелями, осуществляют нанесением гибкой ленты. Величину шага или шагов прямолинейной плоской решетки или прямолинейной плоской сетки выбирают в соответствии с заданными направлениями радиолокационного отражения (что обеспечивает достижение дополнительного технического результата).

Приводятся примеры для плоских электропроводных поверхностей, экспериментально подтверждающие, что формирование покрытий данным способом уменьшает обратное радиолокационное отражение.

Экспериментально установлено, что формирование покрытия согласно изобретению на участках поверхности объекта, вносящих существенный вклад в обратное радиолокационное отражение обеспечивает уменьшение отражения как от «блестящих точек», так и от объекта.

Возможности метода иллюстрируются для уголкового металлического двугранного отражателя, когда гибкая металло-полимерная лента со структурой реализующей способ, нанесения на внутреннюю поверхность отражателя, и экспериментально достигается снижение по биссектрисе угла максимального уровня отражения минимум на 10-12 децибел.

ВЛИЯНИЕ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ПРОЦЕССЫ ОТВЕРЖДЕНИЯ И СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ ИЗ ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

М.М. Рыженко Н.В. Друзик

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь

Эпоксидные смолы и покрытия на их основе стойки к воздействию агрессивных сред, обладают высокой адгезионной прочностью к различным материалам. Необходимость получения покрытий из эпоксидных композиций с изменяющимися показателями свойств обусловлена разнообразием условий их эксплуатации.

Исследование стадий процесса отверждения эпоксидных композитов представляет интерес для направленного регулирования свойств и оптимизации технологий их получения.

С этой целью было изучено влияние модификаторов и дисперсных наполнителей на процесс отверждения эпоксидной смолы, при помощи полиэтиленполиама (ПЭПА). В качестве модификатора использовали каучук СКН 26-1А, а – дисперсных наполнителей: графит, оксид титана и аэросил. Смолу, каучук и наполнители смешивали в червячном смесителе, выдерживали для удаления газовой воздушной включений. Затем в смесь добавляли ПЭПА, перемешивали в течение 5-10 мин, при остаточном давлении 0,133 Па и температуре 293 К. Покрытие из эпоксидной композиции с различной концентрацией наполнителей наносили на стальные пластины 50x20x1 мм литьем под давлением в литьевые формы.

Процесс отверждения эпоксидной композиции изучали методом ДТА по термограммам с целью определения изменения механизма и теплоты отверждения в зависимости от концентрации и вида наполнителя. Завершенность процесса отверждения покрытия контролировали по изменению микротвердости. Исследованиями ДТА установлено, что скорость отверждения при введении графита ниже, чем у чистой смолы ЭД-20, а экзотермический пик начала отверждения смещается в область более низких температур (с 388 до 378 К). В то время как при введении оксида титана и аэросила экзотермический пик начала отверждения смещается в область более высоких температур. Причем экзотермический пик при температуре 553-618 К, наличие которого объясняется изомеризацией эпоксигрупп в карбонильные и термической полимеризацией по эпоксидным группам, смещается в область 723 К. Это, по-видимому, связано с уменьшением энергии активации разложения композита из-за уменьшения подвижности макромолекул связующего.

Как следует из полученных данных по изменению механических свойств смесевых эпоксидных композиционных покрытий по сравнению с эпоксидными, они характеризуются более высокой прочностью на сжатие, адгезионной и ударной прочностью. Это повышение свойств, (прочность сжатия на 42 %; адгезионная – на 40 %; ударная – на 33 %), по-видимому, обусловлены также изменением подвижности макромолекул связующего и дефектности структуры.

Установлено, что дополнительное модифицирование ЭД-20 каучуком приводит к увеличению работы разрушения покрытий в связи с образованием взаимопроникающих сеток и дополнительных химических сшивок. Возможно, что этот процесс модифицирования и объясняет повышение механических свойств и их стабильность в течение длительного времени эксплуатации.

**ПУТИ УЛУЧШЕНИЯ ФОРМУЕМОСТИ
ТОНКОСТЕННЫХ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ
ИЗДЕЛИЙ ИЗ РЕАКТОПЛАСТОВ
ДЛЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

П.Д. Петрашенко

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

Существенным недостатком конструкционных композиционных материалов на основе терморезактивных связующих (реактопластов) является их низкая текучесть на стадии формования изделий. Это ограничивает возможность получения сложнопрофильных тонкостенных изделий либо требует применения высоких удельных давлений прессования для обеспечения требуемого уровня качества изделий.

В работе приводятся результаты физико-химических исследований процессов модификации фенолформальдегидных смол (ФФС) гетероцепными термопластами, изложены технологические принципы их совмещения и конструктивные методы улучшения формуемости высокопрочных сложнопрофильных изделий.

Исследован механизм модификации реактопластов на основе ФФС гетероцепными термопластичными полимерами. Установлено, что при отсутствии в композите активных наполнителей модификация термопластом приводит к уменьшению времени отверждения исходного связующего и, тем самым, к снижению текучести материала. При введении в композит таких наполнителей, например, стекловолокна, ровинга, органических волокон наблюдается существенное повышение текучести композита. Методами ИК спектроскопии и дифференциально-термического анализа установлено, что химическое взаимодействие между полимерами в наполненных композициях отсутствует. Следовательно, механизм повышения текучести композитов состоит в смазочном действии термопласта.

Обсуждается оригинальный способ получения сложнопрофильных тонкостенных изделий путем пресс-литья с одновременным перемещением в пресс-форме внутренней оформляющей поверхности в направлении течения композита. Способ позволяет не изменяя состав и свойств исходного материала за счет новых технических решений в конструировании оснастки и ведении технологического процесса обеспечить возможность получения сложнопрофильных изделий гарантированного уровня качества.

Таким образом, предложенные методы получения сложнопрофильных тонкостенных изделий из реактопластов позволят существенно расширить номенклатуру деталей для машиностроения и смежных отраслей промышленности и обеспечить снижение энерго- и металлоемкости продукции.

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ РУЛЕВЫХ ПРИВОДОВ ДЛЯ ВЫСОКОАВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАНЕВРЕННЫХ САМОЛЕТОВ

А.А. Борцов, Г.В. Квасов, П.Г. Редько

ОАО «ПМЗ Восход», г. Павлово-на-Оке, Россия

С.В. Константинов, А.З. Тарасов, А.В. Беляев

АООТ «ОКБ Сухого», г. Москва, Россия

В.Е. Кузнецов

СПбГЭТУ (ЛЭТИ), Россия

В работе рассматриваются основные проблемы, возникающие при разработке, создании и испытаниях рулевых приводов для высокоавтоматизированных систем управления перспективных маневренных самолетов. На примере проекта рулевого привода с непосредственным управлением рассмотрены основные подходы к синтезу алгоритмов управления приводом и формированию структуры адаптивных регуляторов, обеспечивающих требуемую для управления самолетом стабильность динамических характеристик привода в реальных условиях эксплуатации.

ВЛИЯНИЕ ПОРИСТОСТИ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ОБРАБОТКЕ ОПТИЧЕСКОГО СТЕКЛА

Д.М. Авдеев, А.А. Бойко, В.М. Кенько

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

Работоспособность алмазно-абразивных кругов на керамической связке существенно зависит от пористости и напряженного состояния материала при шлифовании оптического стекла. В процессе работы при низкой пористости керамической связки наблюдается засаливание рабочей поверхности кругов и снижение их режущей способности. При большой пористости керамической связки наблюдается повышенный износ алмазно-абразивных кругов вследствие уменьшения прочности и твердости материала. В то же время наличие пор способствует лучшему самозатачиванию круга и уменьшает засаливание его рабочей поверхности, что повышает стойкость круга и позволяет работать на повышенных режимах шлифования.

В связи с этим актуальным являются исследования влияния пористости на напряженно-деформированное состояние (НДС) и получение алмазно-абразивных материалов на керамической связке с оптимальной пористостью, обладающих высокими прочностными свойствами и режущей способностью.

Проведены численные исследования напряженно-деформированного состояния алмазно-абразивного инструмента с использованием метода конечных элементов. В качестве модели рассмотрено единичное алмазное зерно, жестко закрепленное в керамической связке, с одинаковыми по размерам порами, распределение которых по образцу носит случайный характер. Пористость варьировалась в диапазоне от 5 до 30 %.

Результаты исследования показали, что при увеличении пористости происходит рост эквивалентных напряжений и наблюдается перераспределение напряжения в глубь материала вокруг пор. Существенную роль на величину возникающих на-

пряжений играет расстояние между порами, алмазным зерном и порами и удаление их от рабочей поверхности инструмента. Также наблюдается незначительный рост касательных напряжений и перемещения максимума между порами.

Проведены исследования влияния величины пористости на работоспособность алмазно-абразивных кругов, в частности, величину съема обрабатываемого материала (оптическое стекло) на станке ПШ-50. Результаты приведены на рис. 1. Как видно из рисунка, максимальная величина съема при обработке оптического стекла составляет $\Delta h_{\max} = 2,3 \cdot 10^{-4}$ м/час при пористости 19-25 %.

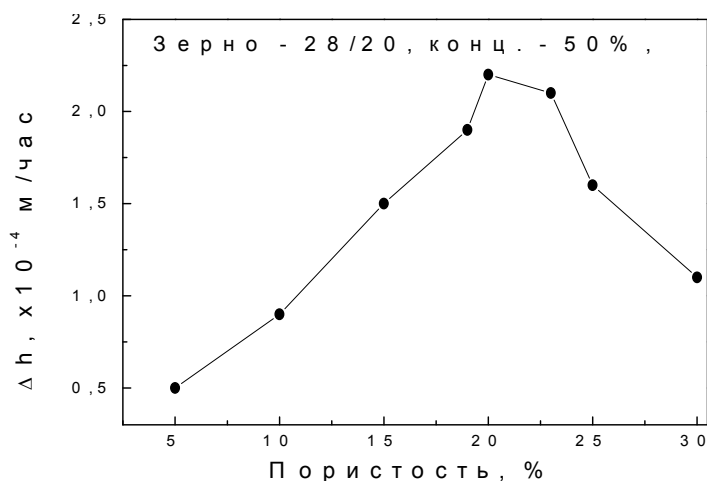


Рис. 1. Зависимость скорости съема обрабатываемого материала от пористости инструмента

Сравнивая полученные экспериментальные и расчетные данные, можно сделать вывод, что увеличение пористости инструмента приводит к смещению максимума напряжений в глубь материала вокруг пор и на межпоровые перешейки, что способствует более легкому выкрашиванию зерна, увеличивая скорость обновления режущего слоя инструмента, уменьшая засаливание, однако при увеличении пористости выше 25 % прочностные характеристики инструмента уменьшаются в 2-3 раза и износ инструмента возрастает на порядок.

СЕКЦИЯ Б. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНСТРУИРОВАНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАШИН

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СОПРЯЖЕНИЯХ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

С.В. Шилько, А.П. Бабин, В.Е. Старжинский, М.В. Зернин

*Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого
НАН РБ, г. Гомель, Брянский государственный технический
университет, Россия*

Динамичное развитие микросистемной техники обусловлено рациональным сочетанием в изделиях механических и электрических компонентов наряду с использованием технологий микроэлектроники для изготовления узлов машин. Значительной эффективностью обладают микроэлектромеханические системы (МЭМС), выполняющие функцию передачи энергии и движения. Как и в устройствах традиционного исполнения, типичным компонентом МЭМС являются трибосопряжения (подшипники, зубчатые колеса, шарниры и т. д.).

В докладе анализируются вопросы прочностного расчета указанных трибосопряжений. В связи с миниатюрным исполнением МЭМС существенно возрастает роль контактных явлений, обычно не принимаемых во внимание в расчетных схемах конструкций макроскопических размеров. Так, при уменьшении размеров трибосопряжений существенно возрастает (по сравнению с объемными факторами) роль сил трения и адгезии. Детали МЭМС, включающие тонкие пленки микрометрической толщины, оказываются весьма чувствительными к поверхностным силам. В результате существенно и иногда катастрофически снижаются механические характеристики и надежность устройств, вплоть до полного разрушения деталей в результате схватывания сопряженных поверхностей. В условиях контактного взаимодействия масштабный фактор проявляется также в сопоставимых размерах деталей сопряжений и структурных составляющих материала приповерхностных слоев.

Кроме того, обсуждается возможность применения методов прикладной механики для прочностного анализа трибосопряжений микроскопических размеров. К числу эффективных процедур численного анализа следует отнести метод граничных элементов, позволяющий выполнить весьма экономичный анализ напряженно-деформированного состояния контактной области с учетом трения, реальной геометрии деталей и произвольного сочетания нормальной и касательной нагрузок. В рамках метода конечных элементов наиболее перспективными, на наш взгляд, являются модификации, не требующие перестройки матрицы жесткости в процессе итерационного поиска решения. К таким методам относятся методы дополнительных напряжений и деформаций. Так как каждый из этих вариантов накладывает существенные ограничения на свойства материалов, разработана их модификация, позволяющая существенно расширить решаемый класс задач. Среди средств экспериментальной механики выделен поляризационно-оптический метод, позволяющий детально исследовать концентрацию разрушающих напряжений в приповерхностных слоях материала деталей на фотоупругих моделях.

Применительно к миниатюрным опорам трения с антифрикционным покрытием указанными методами исследовано напряженно-деформированное состояние сопряжения шар – двухслойное основание с учетом высоких значений коэффициента трения и упругопластического характера деформирования материала компонентов. Даны результаты сопоставления компонент напряженного состояния и характеристик жесткости, полученные расчетным и экспериментальным путем.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ В ДРОБИЛКАХ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ С ШАРНИРНО СОЧЛЕНЕННЫМИ РАБОЧИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ НА ОСНОВЕ ЕДИНИЧНОГО АКТА СОУДАРЕНИЯ

В.В. Береснев

*Могилевский государственный технический университет,
Республика Беларусь*

Ввиду сложности процесса до недавнего времени, при моделировании машин для измельчения каменных материалов ударного действия, широко применялось физическое моделирование. Параметры, полученные на исследуемой модели, переносились на проектируемую машину с учетом законов подобия. Но на практике невозможно достичь полного подобия параметров и тогда применялось приближенное моделирование, точность которого определялась экспериментом. В настоящее время наибольшее применение получили математические и экспериментальные факторные модели.

Экспериментальные факторные модели просты по конструкции, экономичны, дают ясное представление о степени влияния того или иного фактора, но у них есть существенные недостатки: они не отражают всех физических свойств технической системы, а представляют лишь некоторые формальные зависимости выходных параметров от внутренних и внешних факторов в ограниченной области факторного пространства, в которой осуществлялось их варьирование в эксперименте.

В данной работе приоритет отдан математической модели. Несмотря на свою громоздкость и сложность, математические модели при создании имеют то преимущество, что они непосредственно описывают физические свойства технической системы и позволяют осуществлять имитационное моделирование функционирования технической системы в неограниченной области факторного пространства. Это делает возможным проведение эксперимента при любых значениях начальных параметров и в любое удобное время для исследователя, что имеет особую важность на сегодняшний день, когда каждая подготовка и проведение эксперимента требует больших временных и материальных затрат.

При моделировании рабочих процессов, протекающих в машинах для измельчения каменных материалов ударного действия, одной из важнейших и трудоемких задач является исследование взаимодействия рабочего элемента с частицей материала. Сложность данного исследования заключается в том, что на взаимодействие рабочего элемента с частицей материала оказывает влияние большое количество факторов: частота вращения, размер и масса рабочего элемента, скорость и масса частицы и т. д. В роторно-цепных дробилках (РЦД) эта задача усложняется еще и тем, что рабочий элемент представляет собой не единичное сплошное тело, а гибкую систему, где с ростом числа шарниров возрастает и число степеней свободы, что ведет к резкому увеличению объема математической модели.

Разработана математическая модель взаимодействия шарнирно сочлененного рабочего элемента с частицей материала, которая позволяет определить:

- значение ударного импульса при соударении рабочего элемента с частицей материала;
- исследовать динамику поведения рабочего элемента после соударения рабочего элемента с частицей материала;
- значения работ, затрачиваемых на разрушение и деформацию частицы, изменение ее скорости и восстановление рабочего элемента.

Отличительной особенностью этой модели является описание динамики поведения рабочего элемента в зависимости от различных факторов, что позволяет с достаточной высокой точностью проводить вычислительный эксперимент на ЭВМ с целью исследования и выбора рациональных параметров рабочего элемента РЦД, частично или полностью отказавшись от физического эксперимента. Это позволит сэкономить временные и материальные затраты на разработку и проектирование РЦД.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ЗАГРУЗКИ САМОХОДНОГО КОРМОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА КСК-100

В.Б. Попов

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

Опыт эксплуатации самоходных кормоуборочных комбайнов показывает, что их рабочий процесс характеризуется значительными колебаниями со стороны урожайности с/х культуры и физико-механических свойств растительной массы как в течение уборочного сезона, так и в течение дня и даже в пределах одного и того же поля. Качество ручного регулирования скорости комбайна, определяемое в значительной степени квалификацией и состоянием оператора, подтверждает его неспособность эффективно компенсировать интенсивно изменяющиеся внешние воздействия. Непрерывное колебание внешней нагрузки вынуждает оператора, во избежание забивания рабочих органов растительной массой, постоянно недогружать двигатель КСК-100, поэтому средняя величина развиваемой им мощности ниже возможной. Автоматически регулируя скорость поступательного движения комбайна на уровне близком к максимуму загрузки ДВС, можно повысить производительность комбайна, сократить удельный расход топлива и время уборки.

В энергетическом аспекте КСК-100, как объект регулирования, представляет собой динамическую систему с двумя основными потребителями энергии. Развиваемая ДВС мощность через клиноременные передачи передается на привод рабочих органов (адаптер, питающий аппарат, измельчающий барабан) и объемный гидропривод ходовой части. Возможен вариант автоматического регулятора загрузки (АРЗ), использующий датчик частоты вращения (ДЧВ), установленный в лючке против махового колеса двигателя. Отраженная на регуляторной характеристике связь между развиваемой двигателем мощностью, моментом нагрузки и частотой вращения вала двигателя позволяет последней лишь косвенно характеризовать загрузку ДВС. Однако энергетический аспект выполняемого кормоуборочным комбайном технологического процесса характеризуется, в первую очередь, моментами нагрузки на рабочие органы и ходовую часть, вовремя оценить которые, измеряя один вышеупомянутый параметр, невозможно. Естественной регулируемой величиной в систе-

ме автоматического регулирования (САР) загрузки КСК-100 является текущее суммарное значение мощности на рабочих органах и ходовой части.

Важным фактором по реализации САР является подготовленность к ней КСК-100. Под этим подразумевается возможность бесступенчатого регулирования поступательной скорости комбайна, установки датчиков без дополнительной конструкторской доработки и наличие источника питания для функциональных элементов АРЗ. На ходовой части КСК-100 применяется бесступенчатая гидростатическая трансмиссия. Узким местом в проблеме автоматизации загрузки КСК-100 долгое время оставался выбор надежных датчиков, позволяющих в условиях уборки снимать необходимую информацию. Дополнительно к ДЧВ предлагается использовать магнитоупругие датчики крутящего момента (ДКМ) и давления (ДД), которые исчерпывающе характеризуют загрузку рабочих органов и ходовой части. ДКМ в форме кольца охватывает вал контрпривода, скручивание которого пропорционально изменяет магнитное поле. ДД устанавливается в клапанной коробке гидромотора. Множительное устройство преобразует информацию с трех датчиков в сигнал, пропорциональный потребляемой мощности, и далее делает возможным реализацию управляющего воздействия на объект регулирования в виде отклонения “флажка” гидронасоса.

ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ФРОНТА ПЛАВЛЕНИЯ ПРИ НАГРЕВЕ ДВИЖУЩЕЙСЯ С ПОТОКОМ ПЛАЗМЫ ПОЛИМЕРНОЙ ЧАСТИЦЫ

М.И. Цырлин, Д.А. Родченко, П.М. Буй

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Рассмотрено движение и нагрев полимерной частицы в потоке низкотемпературной плазмы в процессе осаждения полимерных покрытий. Распределение температуры в материале частицы определялось с помощью одномерного уравнения теплопроводности (для сферического случая и зависящих от температуры теплофизических свойств материала). Движение фронта плавления в полимере рассчитывалось через интегральный учет зависимости теплоемкости от температуры в области фазового перехода. Разработана оригинальная сопряженная процедура неявного решения уравнения теплопроводности и явного определения координаты фронта плавления, состоящая в сведении разностных уравнений и соответствующих граничных условий к системе линейных уравнений с 3-диагональной матрицей. При этом использовались представления:

$$\lambda_* \frac{T_k^n - T_*}{h_2} - \lambda_* \frac{T_* - T_{k-1}^n}{h_1} = \rho_* H \frac{\Delta}{\tau} + \rho_* C_* \frac{T_k^n - T_{k-1}^n}{2} \frac{\Delta}{\tau}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} \rightarrow \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\tau}, \quad \frac{\partial T}{\partial r} \rightarrow \frac{T_{i+1} - T_{i-1}}{2h}, \quad \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \rightarrow \frac{T_{i+1} - 2T_i + T_{i-1}}{h^2}. \quad (2)$$

Здесь i и n – соответственно, номера расчетной точки по координате и по времени; τ – шаг сетки по времени; h – шаг сетки по координате; k – номер точки по координате, граничащей с фронтом плавления (фронт проходит между точками с номерами k и $k-1$); H – безразмерная энтальпия плавления (определяемая интегралом от горба на кривой $c(T)$); h_1 и h_2 – расстояния от фронта до точек с номерами, соот-

ответственно, k и $k - 1$; Δ – перемещение фронта за один шаг по времени. Параметры со звездочкой относятся к состоянию полимера при температуре плавления. Упомянутая процедура входила одним из блоков в решение общей задачи движения полимерной частицы в плазменном потоке, которая реализована на базе 5-этапного метода Кутта-Мерсона четвертого порядка с автоматическим контролем шага [1].

Данные расчетов свидетельствуют о существенном влиянии переменности теплофизических свойств материалов и условий нагрева в процессе полета на конечные результаты моделирования. В ряде случаев наблюдается существенное влияние переменности теплофизических свойств полимеров (зависимости соответствующих параметров от температуры) на результаты расчета распределения температуры материала по радиусу частицы. Как правило, неучет этого приводит к занижению температуры в центре частицы и к ее завышению на поверхности. Расчеты подтверждают меньшую вероятность полного проплавления частиц из фторсодержащих олигомеров по сравнению с эпоксиолигомерами при тех же технологических режимах и условиях формирования покрытий в плазменной струе. Для ряда полимеров определены технологические параметры и режимы (дисперсность, время нахождения в плазме и т. п.), для которых наблюдается практически полное проплавление частиц (например, для высоковязких фторполимеров дисперсность ~ до 40 мкм, полиэтилена ~ до 60 мкм, время ~ 10–3 ÷ 10–4 с).

Литература

1. Lance G.N. Numerical methods for high speed computers. – L., 1960. – 188 p.

К ВОПРОСУ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ГЕОМЕТРИИ ЗУБЬЕВ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНТАКТНЫХ ДАВЛЕНИЙ ПРИ ИЗНОСЕ

Г.П. Тариков, В.В. Комраков

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

Исследование влияние износа контактирующих поверхностей трибосопряжений на изменение их геометрии и распределение контактных напряжений представляет известный интерес.

Рассматривается задача о контакте зубьев бочкообразной формы с учетом изнашивания их поверхностей в процессе эксплуатации. Для определения формы и размеров площадок контакта в исследуемых точках линии зацепления разработана специальная методика, которая заключается в следующем.

Задаемся сближением δ упругих тел и, выбрав определенный шаг изменения δ_i – от 0 до ожидаемого значения, определяем форму и размеры площади контакта как линии пересечения контактирующих поверхностей. Используя полученные результаты, изготавливаем аналог площадки контакта, который представляет собой набор токопроводящих пластин (в случае осесимметричной задачи аналог представляет собой набор концентрично расположенных колец). Разбиваем поверхность аналога на ряд малых площадок F . С помощью зонда и измерительного комплекса определяем плотность заряда на каждой из площадок, после чего определяем значение полного поверхностного заряда Q , которое в соответствующем масштабе дает значение силы P , действующей на упругие тела

$$P = Q \cdot \gamma_p,$$

где γ_p – масштабный коэффициент. Постепенно, изменяя количество токопроводящих пластин и проводя измерения по п. 4, добиваемся того, чтобы полученная сила P была равна заданной силе P_3 , т. е. необходимо соблюдение условия

$$Q \cdot \gamma_p = P_3.$$

Зная размеры аналога площади контакта, используя его геометрическое подобие площади контакта, определяем действительные размеры последней. После этого определяют распределение контактных давлений по площадке контакта. Процесс износа рассматривается на протяжении времени эксплуатации T . Интервал времени $(0, T)$ разделим на n равных частей τ и будем считать, что на каждом i – ом интервале ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) давление на площадке контакта не зависит от времени.

Зная закон распределения контактных давлений, определяется величина износа контактирующих поверхностей в рассматриваемых точках линии зацепления за определенное время τ .

В результате исследований получены действительные размеры площадок контакта, распределение контактных давлений и величина износа контактирующих поверхностей в рассматриваемых точках линии зацепления за каждый промежуток времени τ .

Предлагаемая методика позволяет при исследовании нескольких исходных контуров выбрать оптимальную геометрию контактирующих поверхностей еще на стадии проектирования.

К РЕШЕНИЮ КОНТАКТНЫХ ЗАДАЧ ТЕРМОУПРУГОСТИ

Г.П. Тариков, Н.В. Ковалева

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

При работе высоконагруженных и быстроходных узлов современных машин, например, зубчатых передач, выделяется значительное количество тепла на поверхностях контакта соприкасающихся элементов. Вследствие этого, возникают значительные температурные напряжения в контактирующих телах, что приводит к перераспределению контактных давлений и изменению размеров и формы площадки контакта. Исследования влияния температуры на эти изменения представляют известный интерес.

Рассмотрена система двух тел, находящихся в скользящем контакте. Нормальная сила, сдавливающая тела, приводит к образованию области контакта, которая при отсутствии сил трения будет иметь размеры, определяемые теорией Герца.

При определении напряжений и перемещений, вызванных касательными усилиями, используются допущения теории Герца – каждое их контактирующих тел рассматривается как упругое полупространство.

Известно, что если тела имеют одинаковые упругие постоянные, то касательные усилия, передаваемые через площадку контакта, вызывают равные по величине и противоположно направленные перемещения в любой точке области контакта. Следовательно, искривление поверхности одного тела сопровождается искривлением поверхности другого и перераспределение нормального давления не происходит. При этом форма и размеры области контакта определяются профилями поверхностей контактирующих тел и действующими нормальными нагрузками и не зависят от касательных усилий.

Для тел с различными упругими свойствами влияние касательных усилий на нормальное давление, а также на форму и размеры области контакта мало, особенно когда коэффициент скольжения $f \ll 1$.

При решении контактных задач с учетом касательных усилий можно пренебрегать их влиянием на нормальные давления и геометрию области контакта. Напряжения и перемещения, вызванные действием нормальных давлений и касательных усилий, независимы, а результирующие напряжения и перемещения могут быть найдены их наложением.

Предполагается, что при скользящем контакте для каждой малой площадки области контакта применим закон трения скольжения Амонтона, согласно которому:

$$\frac{|q(x, y)|}{p(x, y)} = \frac{|Q|}{P} = f, \quad (1)$$

где f – коэффициент трения скольжения.

Термоупругая контактная задача для полупространства, в случае, когда касательные усилия отсутствуют, приведена к двумерному интегральному уравнению первого рода, с учетом того, что на площадке контакта задана температура. Решая уравнение, можно найти закон распределения нормального давления $p(x, y)$ на площадке контакта Ω .

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ

М.И. Цырлин

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель,

Получение высококачественных плазменных полимерных покрытий с заданными свойствами связано с оптимизацией технологии напыления, которая в основном осуществляется чисто экспериментальным путем. Из-за сложности и многочисленности физико-химических, механических и других процессов, протекающих в системе "плазмотрон-плазма-полимер-основа", из-за их тесной взаимозависимости приобретает важное значение разработка математической модели процесса плазменного напыления порошковых полимерных материалов с программной реализацией.

В основу разработки математической модели было положено комплексное моделирование всех стадий процесса со сквозной передачей данных с одной стадии на другую.

Функционально сам процесс плазменного напыления согласно технологическим особенностям был разбит на три стадии: генерация плазменной струи; ввод распыляемого порошка в плазменную струю, его нагрев и ускорение; взаимодействие расплавленных частиц порошка с основанием.

Задача математического описания 1-ой стадии процесса по определению температуры вдоль плазменной струи в модели была решена с применением аппроксимации экспериментальных данных для различных типов установок, конструкций плазмотронов и режимов их работы.

Скорость частиц при движении в плазменной струе во 2-ой стадии процесса рассчитывалась с использованием уравнения, описывающего взаимодействие высокоскоростной плазменной струи с вводимыми в нее частицами по-

рошка. С учетом текущей координаты частиц и имеющегося в базе данных двумерного распределения скорости и температуры в незагруженной плазменной струе решалась задача нагрева порошка из условий конвективного и лучистого теплообмена с использованием дифференциального уравнения теплопроводности Фурье-Киргофа в сферических координатах.

Считая, что частицы перед попаданием на основание имеют шарообразную форму и находятся в жидком или размягченном состоянии, устанавливалась взаимосвязь между их начальной формой и формой после попадания на поверхность. В модели, описывающей 3-ю стадию процесса, осуществлялось также описание формирования рельефа поверхности покрытия с расчетом пористости.

Представленное физико-математическое описание теплофизических и газодинамических процессов, имеющих место при плазменном напылении порошковых полимерных материалов, практически реализовано в программно-математическом комплексе Plasma Spraying Process of Polymeric Materials. Программное описание процесса плазменного напыления разработано в среде Foxpro.

Разработанный программный комплекс применен для исследования и оптимизации процесса нанесения эпоксидных покрытий. Установлено, что минимальная пористость плазменных покрытий достигается при расходе плазмообразующего газа $(1,4-1,6) \cdot 10^{-3}$ м³/с и расходе порошка $(0,060-0,075) \cdot 10^{-3}$ кг/с, дистанциях ввода полимера в СВЧ-плазменную струю 0,015–0,023 м и дистанциях напыления 0,145–0,160 м.

К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ТОЧЕНИИ

А.А. Жолобов, А.М. Будкевич

*Могилевский государственный технический университет,
Республика Беларусь*

На сегодняшний день, как у нас, так и за рубежом выполнено большое количество работ по определению и повышению точности механической обработки, созданию методик оценки качества станочных систем и процессов механической обработки. Это многообразие работ, посвященных данной тематике, подводит к созданию автоматизированной системы, которая бы могла прогнозировать точность механической обработки. Такое моделирование процессов обработки деталей позволит еще на стадии проектирования металлорежущего оборудования получить аналитические зависимости и расчеты, по которым можно будет судить о точности формы, размеров, взаимного положения и качества поверхностей, обработанных на данном станке, деталей. В связи с этим на кафедре "Технология машиностроения" Могилевского государственного технического университета уже в течение нескольких последних лет проводились и проводятся работы по подготовке информационного обеспечения и созданию автоматизированной системы. На сегодняшний день уже создана и опробована автоматизированная система по прогнозированию шероховатости поверхности при наружном или внутреннем точении. Эта спроектированная система, на основе задаваемых ей режимов резания, свойств заготовки и геометрии режущего инструмента, моделирует процесс резания и, в конечном счете, прогнозирует величину шероховатости поверхности. Правда, на данном этапе работы удалось учесть и смоделировать только процесс колебания резца без учета остальных факто-

ров технологической системы СПИД (станок-приспособление-инструмент-деталь), влияющих на точность и качество получаемых поверхностей.

В основу данной модели положено уравнение Лагранжа второго рода:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial q_i} = Q_i,$$

где T , Π – соответственно, кинетическая и потенциальная энергия; Φ – диссипативная функция Релея; q_i – обобщенная координата; Q_i – обобщенная сила.

Математическая модель, получаемая на основе данного уравнения, представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений, учитывающих инерционные, упругие и диссипативные элементы технологической системы, и где в качестве обобщенных координат выступают перемещения вершины, вызываемые силами резания, в свою очередь зависящими от постоянно изменяющейся по времени глубины резания.

Созданная математическая модель также дает возможность проследить за процессом формирования поверхности во времени и пространстве, выявить влияние различных факторов, связанных с геометрией режущей части резца, сечения державки или вылета резца, изменения режимов резания на шероховатость поверхности. При этом отпадает необходимость в предварительном изготовлении режущего инструмента и заготовки, не требуются затраты на обработку и контроль деталей.

Помимо этого, такой метод подхода к прогнозированию шероховатости поверхности позволяет производить её усложнение путём включения в модель новых факторов. Так на кафедре уже делаются попытки включения в рассмотрение жесткости заготовки, податливости элементов станка и его кинематических движений.

НОВЫЕ ЧЕРВЯЧНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ОСОБОТОЧНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС И ИХ САПР

В.А. Настасенко

Херсонский государственный технический университет, Украина

Зубчатые передачи нашли достаточно широкое применение в авиации, при этом от точности и качества их изготовления во многом зависят передаваемые мощности и окружные скорости, которые постоянно растут у современных машин. Поэтому повышение точности и качества зубчатых передач является актуальной проблемой машиностроения.

В настоящее время реальное промышленное производство зубчатых колес ограничено 3-й степенью точности, изготовление которых осуществляют червячными инструментами ААА класса точности. Однако известны экспериментальные случаи обработки зубчатых колес 2-й и 1-й степеней точности, при этом используют дорогостоящее высокоточное CNC оборудование, программируемое по 8-9 движениям, а для минимизации погрешностей зубообрабатывающего инструмента червячные инструменты заменяют концевыми, с более простыми и технологичными (поэтому – более точными) режущими лезвиями. Однако такие инструменты, выигрывая в точности по сравнению с червячными, уступают им по производительности и по экономичности. Причиной этому является не только меньшая их стойкость, но и необходимость обработки колес методом единичного деления, что ведет к потребности последовательного нарезания друг за другом каждой межзубой впадины при прерывистом делении с обратными ходами.

Такой процесс, в совокупности с высокими затратами использования CNC оборудования, резко снижает экономичность зубообработки.

Снижение затрат зубообработки колес 2-й и 1-й степеней точности за счет перехода к более экономичным и производительным червячным инструментам и более простому, чем CNC, зуборезному оборудованию, является актуальной задачей. Однако для ее реализации исходным является решение задачи уменьшения погрешностей существующих червячных зуборезных инструментов, что является главной целью выполненной работы.

Основными факторами, ведущими к погрешностям червячных инструментов, среди которых наиболее сложными являются червячные фрезы, являются:

1) несоответствие винтовой производящей поверхности основного червяка и расположенных на его цилиндрической поверхности режущих кромок по отношению к инструментальной рейке, сформированной плоским исходным зубчатым контуром;

2) формирование винтовой передней и затылованной задней поверхностей, обработка которых является нетехнологичной, что увеличивает погрешности изготовления;

3) формирование длинных режущих лезвий, что ведет к погрешностям их формы и направления;

4) необходимость выполнения у фрез переточек по передней поверхности, а для червячных шеверов и шлифовальных кругов – правок по винтовой поверхности, что не только ведет к технологическим погрешностям на данных операциях, но и к органическим погрешностям обкатки, вызванных уменьшением наружного диаметра инструментов.

Автором предложено комплексное устранение этих погрешностей путем выполнения червячных инструментов гиперболоидными и исключения переточек и затылования за счет оснащения их зубьев неперетачиваемыми пластинами из твердого сплава или сверхтвердых материалов (патенты РФ № № 2124421, 2134183, 2134184, 2147495, 2147496, 2169061). Разработаны способы и оборудование для изготовления данных инструментов и их САПР.

КВАЗИСТАЦИОНАРНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО НАГРЕВА МЕТАЛЛОВ

Д.Г. Кроль, И.А. Концевой

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь

Цель работы: исследование высокоинтенсивного теплового воздействия на металлы при квазистационарной стабилизации поверхностного источника энергии.

Математическая модель содержит следующие уравнения и краевые условия:

$$\partial u / \partial t + \partial q / \partial x = 0; \quad q + \partial \Lambda / \partial x = 0; \quad t > 0, \quad x \in [0, x_w];$$

$$u(T) = \int_0^T c(T) dT, \quad c(T) = \rho(T) c_p(T); \quad \Lambda(T) = \int_0^T \lambda(T) dT;$$

$$t = 0, \quad T(x, 0) = T^0 \equiv const; \quad x = 0, \quad q(0, t) = q_0(t); \quad x = x_w, \quad T(x_w, t) = T_w \equiv const,$$

где t – время; x – декартова координата; x_w – толщина пластины; T – температура; q – удельный тепловой поток; c – объемная теплоемкость; λ – коэффициент теплопроводности. Граничный тепловой поток $q_0(t)$ характеризует нестационарное тепловое воздействие на левую границу. Решение задачи выполнено численным методом интегральных соотношений А.А. Дородницына. Выявлены факторы, оказывающие влияние на эволюцию теплового поля в металлах.

Приведем пример расчета нагрева пластины из железа. Теплофизические свойства $c(T)$, $\lambda(T)$ в интервале $T, K \in [300, 1042]$ аппроксимируются полиномами третьей степени. Здесь $c, Дж/(м^3 \cdot K) \in [3,5415 \cdot 10^6, 7,43026 \cdot 10^6]$; $\lambda, Вт/(м \cdot K) \in [79,9, 32,0]$. Краевые условия: $T(x,0) = 300 K$; $q_0(t) = 6,5 \cdot 10^6 ((A t^4 - 1) \exp(-16 t) + 1) Вт/м^2$; $T_w(t) = 300 K$; $x_w = 0,005 м$. На рис. 1 приведены следующие варианты граничного теплового потока: 1. $(q_0)_{max} = 19,5 \cdot 10^6 Вт/м^2$; $A = 14224,4 c^{-4}$; 2. $(q_0)_{max} = 15,925 \cdot 10^6 Вт/м^2$; $A = 20517 c^{-4}$; 3. $(q_0)_{max} = 13 \cdot 10^6 Вт/м^2$; $A = 28205,8 c^{-4}$. Все три примера рассматриваются на интервале времени $t, c \in [0, 7]$. На рис. 2 представлены зависимости безразмерного градиента температуры g_0 от безразмерного теплового потока Q_0 для левой границы для соответствующих вариантов теплового воздействия.

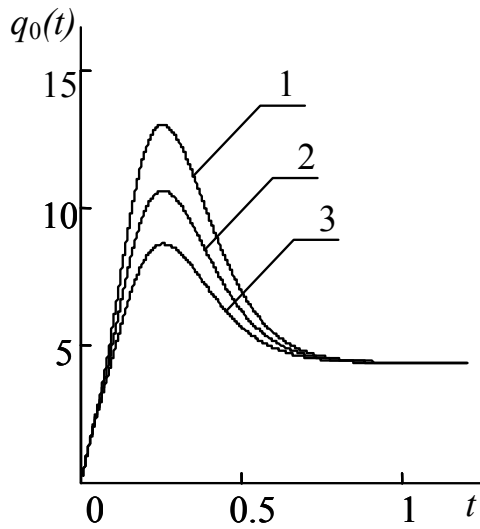


Рис. 1

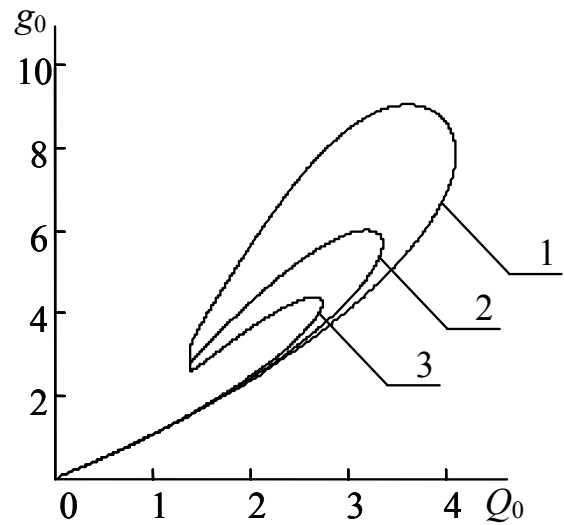


Рис. 2

Данная работа выполнена под научным руководством проф. О.Н. Шабловского.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО СОСТАВА НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ ДЛЯ ПЕРЕКАЧКИ НЕФТИ ПО ТРУБОПРОВОДАМ

Ю.Н. Колесник

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

Доля энергетических затрат в структуре себестоимости транспортировки нефти достигает 70 %. Поэтому задача повышения энергетической эффективности перекачки является весьма актуальной.

Эффективность работы электрооборудования нефтеперекачивающей трубопроводной системы характеризуется удельным расходом электроэнергии на перекачку нефти. Этот показатель подвержен значительным изменениям (рис. 1) за счет динамики объема перекачки, конфигурации участков нефтепровода, физико-химических свойств нефти, типа и состава работающего насосно-силового оборудования (рис. 2) и т. д.

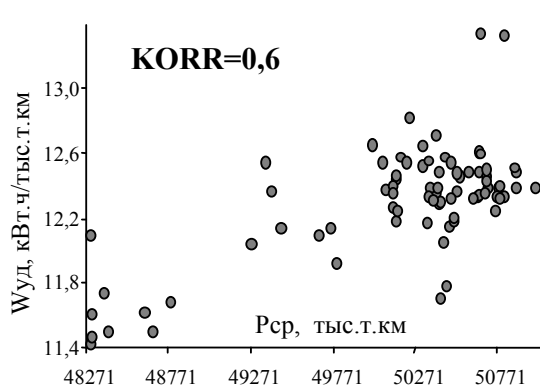


Рис. 1. Корреляционное поле точек зависимости суточного удельного электропотребления от перекачки за квартал

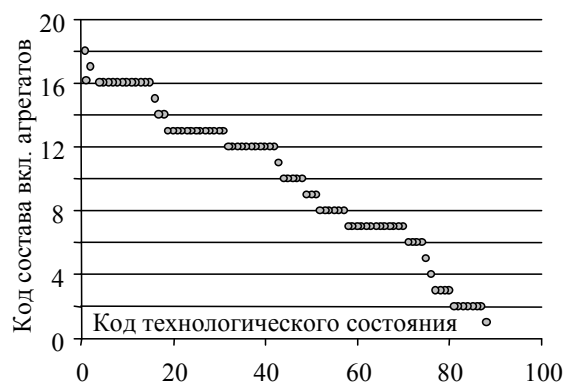


Рис. 2. Структурная модель режимов работы одного из участков нефтепровода «Дружба»

Разработана методика оценки эффективности потребления электрической энергии для трубопроводного транспорта нефти, позволяющая предложить следующий алгоритм формирования энергосберегающих режимов работы насосных агрегатов при диспетчерском управлении процессом перекачки нефти.

1. Производится кластеризация суточных значений перекачиваемой нефти (с неизменным составом включенных агрегатов).

2. Фактические значения суточных удельных расходов электроэнергии приводятся к режиму с базисным образом (конфигурацией) и вязкости нефти.

3. Приведенные значения суточных удельных расходов электроэнергии ставятся в соответствие суточным значениям кластеров объемов перекачиваемой нефти.

4. Из множества значений удельных расходов электроэнергии, соответствующих заданному объему перекаченной нефти (кластеру структурной модели перекачки), выбираются минимальные. Состав работающих агрегатов за данные сутки является энергосберегающим, и рекомендуется при заданных объемах и характеристиках перекачиваемой нефти, фактических состояниях системы нефтепровода, в процессе диспетчерского управления.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА
УПЛОТНЕНИЯ ПОЛИЧАСТОТНЫМ ВИБРАТОРОМ****В.И. Семчен, С.Б. Партнов, В.А. Команченко***Могилевский государственный технический университет,
Республика Беларусь*

Долговечность и устойчивость земляных сооружений зависят от качества уплотнения. Уплотнение – это одна из важнейших операций в технологическом цикле строительства.

В настоящий момент остро стоит вопрос внедрения новых технических решений и методов в проектировании моторных вибрационных катков. Одним из направлений исследований является моделирование и создание поличастотных вибровозбудителей. Преимуществами поличастотного вибровозбудителя является возможность изменения параметров вибрации в зависимости от характеристик уплотняемой среды в широких пределах.

Физико-механические свойства дорожно-строительных материалов накладывают жесткие ограничения на процесс уплотнения и характеристики уплотняющих машин. Поэтому знание свойств уплотняемой среды и понимание динамики ее изменения в процессе уплотнения являются ценными данными для правильной компоновки, подбора и эксплуатации уплотняющих машин.

Нужный эффект уплотнения может быть достигнут только при условии правильного выбора давлений под вальцами катка. Для получения больших деформаций эти давления должны быть возможно более близкими к предельно прочностным показателям материала, но не превышать их.

В качестве объекта исследований была выбрана оригинальная модель поличастотного вибровозбудителя. В данной модели для изменения величины возмущающей силы, а следовательно и давлений под вальцами используется дебаланс с изменяемой массой и координатами центра масс, а так же с изменяемой частотой вращения дебаланса. Такие решения позволяют эффективно и качественно уплотнять различные материалы. Кроме того предлагаемая модель позволяет изменять параметры вибрации в широких пределах не дискретно, а плавно что благоприятно сказывается на свойствах уплотняемой среды.

Создание математической модели позволяет сопоставить развиваемые под вальцами катка контактные напряжения, а следовательно и параметры на них влияющие, с пределом прочности материала на протяжении всего периода уплотнения за счет аналитического их определения в зависимости от свойств уплотняемого материала и параметров вибровозбудителя.

Так как каждой величине плотности γ соответствуют определенные величины сцепления C и угла внутреннего трения φ , то для определения контактных напряжений на всех этапах уплотнения необходимо получить зависимости изменения C и φ от плотности материала γ .

Уравнения регрессии зависимости плотности от контактных напряжений имеют вид: для супеси $\gamma = 1,23 + 0,128 \varepsilon^{\sigma_k}$, для суглинка $\gamma = 1,14 + 0,158 \varepsilon^{\sigma_k}$, для асфальтобетона $\gamma = 1,18 + 0,164 \varepsilon^{\sigma_k}$, где γ – текущее значение плотности материала; ε – основание натуральных логарифмов.

ПРИБОР ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ СТЕПЕНИ УПЛОТНЕНИЯ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ В ПРОЦЕССЕ УКАТКИ

С.Б. Партнов, В.А. Команденко, В.И. Семчен

*Могилевский государственный технический университет,
Республика Беларусь*

Важнейшим элементом технологического процесса строительства автомобильных дорог является уплотнение их оснований и покрытий, от качества проведения которого зависят эксплуатационные свойства дорожной конструкции. Актуальность вопроса оперативного контроля плотности асфальтобетона определяется резким снижением его качества при недоуплотнении и, как следствие этого, уменьшение срока службы дорожной одежды. Исправить бракованные участки после остывания асфальтобетона невозможно. Поэтому важно иметь оперативную информацию о степени уплотнения в процессе укатки.

Известно, что в процессе уплотнения изменяется коэффициент сопротивления качению и, как следствие этого, момент сопротивления перекачиванию катка. Экспериментально установлено, что между коэффициентом сопротивления и плотностью уплотняемого слоя существует тесная корреляционная зависимость. В процессе укатки коэффициент сопротивления уменьшается из-за увеличения плотности покрытия, поэтому, имея информацию об изменении момента сопротивления, можно судить о степени уплотнения дорожного покрытия.

Измерительным элементом данного устройства является датчик момента, установленный на валу, соединяющим вал двигателя с насосным колесом гидротрансформатора или на полуоси. Исполнение датчика момента бесконтактное, на валу установлены только металлические диски с радиальными прорезями, число которых может достигать до восьми. Вблизи вала по концам его гладкой поверхности на кронштейне монтируются преобразователи импульсные щелевые с возможностью вхождения дисков в щели преобразователей. Поэтому при работе двигателя диски проходят в щели преобразователей, прохождение выступа диска на выходе преобразователей формирует импульс прямоугольной формы. На каждый выступ формируется по одному прямоугольному импульсу. При работе катка последовательность импульсов, снимаемая с преобразователя, установленного на полуоси вальца, отстает по фазе от последовательности импульсов, снимаемых с преобразователя, установленного у двигателя.

Для формирования сигнала установлены: вычитающий элемент, выполненный на двух резисторах, соединенных встречно; выпрямитель, сглаживающий фильтр. На выходе вычитающего элемента появляется равнополярная последовательность импульсов, каждый из которых в данный момент времени имеет ширину, пропорциональную величине момента на валу двигателя. После выпрямителя формируется последовательность однополярных импульсов с помощью сглаживающего фильтра, постоянная времени которого выбрана в соответствии с заданными требованиями на проектирование датчика момента. Изменение момента через электронную систему преобразуется в напряжение постоянного тока, уровень которого пропорционален моменту сопротивления перекачиванию, который измеряется прибором, установленным на щитке приборов в кабине катка. На шкале прибора имеется сектор, показание прибора, соответствующее указанному сектору, позволяет машинисту реагировать на процесс укатки. По показаниям прибора можно судить о степени уплотнения и о целесообразности продолжения укатки дорожного покрытия катком данной массы.

В докладе приводятся схема устройства для контроля степени уплотнения, его техническая характеристика, а также результаты экспериментальных исследований процесса укатки асфальтобетонных покрытий с использованием прибора предлагаемой конструкции.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА С ПРЕРЫВИСТЫМ ДВИЖЕНИЕМ ВЫХОДНОГО ЗВЕНА

А.Г. Семин, А.М. Тимофеев, А.В. Локтионов

*Витебский государственный технологический университет,
Республика Беларусь*

В некоторых машинах исполнительный орган совершает поступательное или вращательное движение с остановками, длительность которых зависит от требований технологического процесса и может колебаться в широких пределах. Например, подача ткани на швейной машине осуществляется при помощи кулачково-рычажного механизма. Кулачок представляет собой диск с двумя пазами (копирный диск), расположенными на его торцевых плоскостях. Характер пазов на диске зависит от вида выполняемой строчки. Чем сложнее рисунок, тем большую продолжительность должен иметь паз кулачка, что значительно увеличивает его габариты. По этой причине копирные диски располагаются вне корпуса машины, что значительно ухудшает ее внешний вид. Из-за особенностей работы механизма некоторые участки пазов кулачка выполняются в виде дуг окружностей небольшого радиуса.

Другим примером является подача холстиков в механизме тисков и прочеса в отделительном приборе гребнечесальных машин, которая производится при помощи мальтийского механизма. Наличие высших кинематических пар, появление жестких и мягких ударов не позволяют использовать указанные механизмы при высоких скоростях.

С целью ликвидации отмеченных недостатков предлагается к применению в указанных условиях зубчато-рычажный механизм.

Рассматриваемое устройство с приближенной остановкой (квазиостановкой) выходного звена представляет собой планетарный механизм, у которого на сателлите есть выступ с пальцем, шарнирно связанным с камнем, внутри которого проходит кулиса, вращающаяся вокруг оси водила. Время, в течение которого кулиса имеет остановку, а также качество квазиостановки (величины ее перемещения при кажущейся остановке), зависят от расстояния между пальцем и осью сателлита. Чем больше это расстояние, тем больше выстой имеет кулиса, но тем хуже его качество. Минимальная величина этого расстояния соответствует половине диаметра делительной окружности сателлита.

Получены аналитические зависимости, позволяющие определить угловые перемещения кулисы, ее угловые скорости и ускорения. Расчеты показали, что исследуемый механизм позволяет получить остановку ведомого звена продолжительностью до 80 % цикла. Перемещения кулисы составляют менее 0,5 % цикла, что близко к идеальной остановке. Количество остановок за один цикл работы зависит от отношения чисел зубьев колес. Если центральному колесу сообщить соответствующую скорость, то можно получить любое количество остановок за цикл.

Предлагаемый механизм имеет лучшие динамические характеристики, чем известный механизм мальтийского креста. Так, при четырех остановках кулисы за один оборот водила максимальное ускорение в 10 раз меньше, чем у соответствующего четырехлепесткового мальтийского механизма. Это позволяет применять зубчато-рычажный механизм как в условиях малого нагружения, так и для передачи значительных нагрузок.

ОБОСНОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ НОЖЕЙ ИЗМЕЛЬЧАЮЩЕГО БАРАБАНА КОРМОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА

П.Е. Голушко, В.П. Чаус, А.Н. Малофей

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

Измельчающий барабан кормоуборочного комбайна КСК-100А выполняет две функции: измельчение и транспортирование растительного материала.

Важным параметром ножа измельчающего барабана является угол разгрузки, т. е. угол, за время которого с ножа полностью сходят частицы растительной массы и выбрасываются в горловину трубопровода.

На скорость движения растительной массы по поверхности ножа и длительности ее пребывания на ней влияют коэффициент трения о поверхность ножа, угол загиба ножа и длина загнутой части ножа.

Уравнение движения частиц по поверхности ножа имеет вид:

$$L = \frac{U_2}{U_2 - U_1} (X_0 - fR_1) e^{U_1 \varphi} + \frac{U_1}{U_1 - U_2} (X_0 - fR_1) e^{U_2 \varphi} + fR_1, \quad (1)$$

где $U_1 = -f + \sqrt{1 + f^2}$; $U_2 = -f - \sqrt{1 + f^2}$;

f – коэффициент трения;

X_0 – начальное положение частиц на ноже;

R_1 – радиус-вектор положения частиц на ноже;

φ – угол поворота ножа, при котором частицы перемещаются с положения « X_0 » на конец ножа « L ».

Решая уравнение (1) относительно угла поворота φ и после соответствующих преобразований, получим:

$$\varphi = \sqrt{\frac{2(A - U_2 + U_1)}{U_2 \cdot U_1 (U_1 - U_2)}}, \quad (2)$$

где $A = \frac{-2\sqrt{1 + f^2} (1 - f \cdot \operatorname{tg} \beta)}{\frac{X_0}{L} - f \cdot \operatorname{tg} \beta}$;

β – угол загиба ножа;

L – длина загнутой части ножа.

Зависимость угла поворота барабана φ , при котором частицы сходят с ножа, от угла загибания β показывает, что при угле загиба $\beta < 30^\circ$ угол поворота барабана для сброса частиц изменяется в основном по прямолинейному закону. Дальнейшее увеличение угла β ведет к резкому ухудшению схода частиц как при изменении коэффициента трения f массы о сталь, так и при разном расположении частиц на ноже в начальный период $\frac{X_0}{L}$. Предлагаем для барабана с обратным вращением угол загиба ножа принимать в пределах $\beta = 20 \div 25^\circ$. При этом угол разгрузки будет находиться в пределах $\varphi = 100 \div 110^\circ$.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ АБРАЗИВНЫХ СЛОЕВ

С.Э. Завистовский

*УО «Полоцкий государственный университет», г. Новополоцк,
Республика Беларусь*

Процесс осаждения покрытия под действием электростатического поля можно разбить на три последовательно протекающие стадии:

- 1) зарядка частицы, формирование заряженного диполя с последующей его ориентацией вдоль главной оси в электростатическом поле;
- 2) отрыв и полет заряженного диполя под действием электростатического поля;
- 3) контакт и проникновение движущейся частицы в вязкую основу.

На каждой из стадий действуют свои закономерности и критериальные ограничения, взаимосвязь которых может быть представлена в виде следующей математической модели.

1 стадия

В процессе выполнения данного этапа происходит ориентация частицы абразива относительно главной оси, момент ее отрыва и начало полета под действием сил электростатического притяжения.

Принимая самые неблагоприятные условия нанесения покрытия, при которых векторы электростатической силы и силы тяжести направлены в противоположную сторону, получим характеристическое выражение для расчета рационального размера частицы абразива:

$$a \leq \frac{9}{g} \frac{\varepsilon_0}{4\rho} \frac{3\varepsilon}{\varepsilon + 2\varepsilon_0} E^2.$$

2 стадия

Сущность моделирования процесса массопереноса состоит в решении характеристического уравнения относительно баланса работы электростатического поля по перемещению частиц абразива из начальной точки в конечную. Зная соотношение всех составляющих параметров, можно рассчитать максимальную скорость абразивной частицы как функцию дистанции напыления:

$$V = \sqrt{2L(9\varepsilon\Theta E^2 - 4\rho ag) / \pi\rho a^3},$$

где $\Theta = \frac{3\varepsilon}{\varepsilon + 2\varepsilon_0}.$

3 стадия

Рассматриваются закономерности формирования покрытия из частиц ориентированного вдоль главной оси свободного абразива, внедряющегося в вязкую основу при движении на максимальных скоростях. Торможение частицы обусловлено вязкими свойствами вещества основы:

$$v = \frac{mV}{24\pi C_x a^2}.$$

Разработанная система математических выражений представляет собой математическую модель технологического процесса электростатического нанесения покрытий из произвольных, в т.ч. и абразивных частиц, и является математической основой конструирования специальной технологической оснастки.

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА СЕКЦИИ КОСИЛКИ-ПЛЮЩИЛКИ РОТАЦИОННОЙ КНР-6.0

В.Б. Попов

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

Во время транспортного переезда рабочие секции КНР-6 складывают, существенно уменьшая её габариты по ширине. Перевод секций в вертикальное положение выполняется одновременно двумя симметрично расположенными подъемными механизмами, внутренние параметры которых определяются по результатам синтеза механизма подъема (МП).

В результате моделирования процесса подъема секции были получены аналитические математические модели (ММ) геометрического, кинематического, силового и динамического анализов. Результаты анализов движения нагруженного поршня гидроцилиндра (ГЦ) МП показывают, что в диапазоне изменения обобщенной координаты передаточное число (ПЧ) МП плавно уменьшается от 6,755 до 2,441; в установившемся режиме приведенная к поршню нагрузка прямо пропорциональна ПЧ МП, если пренебречь тепловыми и инерционными потерями; учет влияния приведенных к штоку ГЦ силы инерции секции и сил трения в парах, а также потерь давления в гидромагистрали приводит к росту давления в ГЦ в момент начала движения секции до предельного уровня 14,6-15,2 МПа (согласуется с экспериментом).

Конструктор синтезировал МП традиционно, задаваясь его структурой и руководствуясь соображениями компоновки секции. Проектная задача была сведена к выбору удовлетворяющего требованиям варианта из серии, проанализированной графоаналитически. Такой подход оставляет неисследованными массу комбинаций внутренних параметров МП, обладающих меньшими начальными значениями ПЧ.

ПЧ – это один из выходных параметров МП, зависящий только от сочетания его внутренних параметров, который аналитически определяется по выражению:

$$I(S) = \varphi'_3(S) \cdot l_{S3} \cdot \cos[\varphi_3(S) + \varphi_{S3}],$$

где, $\varphi'_3(S)$ – аналог угловой скорости поворота секции; l_{S3} – расстояние от основания звена l_3 до центра тяжести секции; φ_{S3} – постоянный угол между l_3 и l_{S3} .

Параметрический синтез МП заданной структуры выполняется с целью определения его внутренних параметров, обеспечивающих снижение начального значения целевой функции – передаточного числа МП при одновременном выполнении условий работоспособности МП. Условия работоспособности (функциональные ограничения) представляют собой формализованные выражения для технических требований к МП и задаются системой неравенств:

$$\begin{cases} S < l_3 + \sqrt{(Y_{03} - Y_{01})^2 + (X_{03} - X_{01})^2} \\ 1,3 м \leq \Delta Y_{S3}(S) = Y_{S3}(S_{MAX}) - Y_{S3}(S_0) \leq 1,31 м, \\ 89^\circ \leq \Delta \varphi_3(S) = \varphi_3(S_{MAX}) - \varphi_3(S_0) \leq 91^\circ \end{cases}$$

где, $\Delta Y_{S3}(S)$ – изменение вертикальной координаты центра тяжести; $\Delta \varphi_3(S)$ – изменение угла поворота секции; $Y_{01}, X_{01}, Y_{03}, X_{03}$ – координаты крепления звеньев МП.

В условиях автоматизированного проектирования процедура оптимизационного параметрического синтеза МП формируется на базе ММ анализа, прямых и функциональных ограничений, целевой функции, осуществляющего стратегию поиска экстремума – метода оптимизации и решается на ПЭВМ.

ПРИМЕНЕНИЕ БИОМЕХАНИЧЕСКИХ АНАЛОГИЙ К ОПТИМИЗАЦИИ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Т.В. Семенова, С.В. Шилько

*Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого
НАН Беларуси, г. Гомель*

В целях оптимизации структуры композиционных материалов представляет интерес изучение механических свойств их природных прототипов – биотканей, в частности, опорно-двигательного и дентального аппарата. Указанные ткани имеют выдающиеся упруго-прочностные и антифрикционные характеристики, оптимизированные в процессе эволюции. Для использования биомеханических аналогий в технике необходимо построить модели биоматериалов, оценить их эффективные упругие характеристики и особенности напряженно-деформированного состояния. В частности, цель настоящего исследования заключалась в анализе напряженно-деформированного состояния биотрибосопряжений в целом и их локальных ("мезо")фрагментов, в частности, при действии контактной нагрузки, что позволяет дать обоснованные рекомендации по повышению долговечности антифрикционных покрытий деталей машин.

Особенностью биоматериалов является существенная физическая нелинейность органической компоненты. В большинстве случаев таковой является материал белкового происхождения коллаген, объемное содержание которого сравнительно мало, но вследствие низкого модуля упругости определяет необходимую эластичность биокомпозита и способствует высокой ударной вязкости последнего. Минеральная компонента, имеющая существенно более высокий модуль упругости, является высокостабильным «несущим каркасом» биокомпозита. Кроме того, для структуры биоткани характерно изменение плотности, связанное с локализацией твердой фазы и преимущественным армированием в зонах концентрации напряжений. В связи с этим, предлагаются расчетные схемы, отражающие реальную структуру биоткани (в частности, периодонта зуба и эмалевого покрова).

Для моделирования биотканей используются макромеханический (в случае периодонта) и мезомеханический (при описании эмалевого покрова) подходы. Расчетная схема периодонта имеет вид адгезионного соединения двух жестких тел посредством нелинейно-упругой прослойки. При помощи метода конечных элементов получены распределения напряжений в тканях периодонта при различных видах нагружения.

Мезомеханический подход использован для анализа напряженно-деформированного состояния неоднородной структуры зубной эмали, состоящей из весьма твердых эмалевых призм и низко модульных коллагеновых включений. В задаче о синтезе антифрикционного покрытия на основе биомеханической аналогии в виде зубной эмали рассмотрен фрагмент двухфазного волокнистого композита с размерами 1000×1000 мкм при толщине эмалевых призм $h_1 = 100$ мкм и прослойки коллагена

$h_2 = 0,2h_1 = 20$ мкм. Проведенные расчеты позволяют оценить эффективные механические свойства биотканей и выработать рекомендации по получению оптимальной структуры конструкционных композиционных материалов и покрытий триботехнического назначения.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (Проект № Т 02 Р-014).

РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И НОВОЙ ТЕХНИКИ

К.Н. Буздалкин

*Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого
НАН Беларуси, г. Гомель*

Сделана попытка сформулировать и разработать принципы создания моделей процессов потребления топливно-энергетических ресурсов в рамках решения проблем энергосбережения. Принципы базируются на подходе, в котором элементы объекта описываются тремя входными потоками: энергии, материи и информации, что позволяет проводить оптимизацию системы как по сочетанию в одном процессе различных видов энергий, так и по видам используемого сырья и материалов, различным сценариям их обработки.

Особое внимание уделено формализации количественных и качественных закономерностей, свойственных энергопотребляющим системам, и так называемым общесистемным вопросам, относящимся к общей структуре системы, организации взаимосвязи между ее элементами, совокупному взаимодействию элементов системы с внешней средой, т. е. вопросам системного анализа.

Целью проводимой работы является создание методической основы для практической деятельности инженеров-технологов, инженеров-конструкторов и специалистов в области энергоаудита, а также разработка аналитического аппарата для оценки энергоэффективности технологических процессов и новой техники, позволяющего исключить необходимость проведения дорогостоящих экспериментальных исследований.

Идея разработки методической основы для оценки энергоэффективности технологических процессов и новой техники возникла как реакция на интерес, проявляемый предприятиями и институтами к оптимизации конструктивно-технологических решений с точки зрения их энергоэффективности при модернизации имеющихся и создания новых технологий и техники.

Для демонстрации разработанных моделей и методов используются оригинальные примеры, взятые из практики проведения энергетического обследования предприятий, выполненных автором в Беларуси и России. Подбор примеров произведен таким образом, чтобы не повторять известные нормативно-методические рекомендации Госкомэнергосбережения РБ, Госкомэнергонадзора РФ и соответствующие публикации в области моделирования тепло- и массообменных процессов, а показать вклад различных факторов, определяющих энергоэффективность технологических процессов и установленного оборудования, и применение предлагаемых методов оптимизации на литейных заводах, производствах строительных материалов и предприятиях аграрно-промышленного комплекса.

Результаты энергофинансового мониторинга, проведенного сотрудниками института на ряде промышленных предприятий, выявили резервы экономии энергоресурсов от 20 до 50 % от полного энергопотребления. Снижение энергопотребления можно осуществить без снижения объема и качества продукции с минимальными затратами. Рост цен на энергоносители и одновременное снижение цен на средства автоматизации обусловили в Республике Беларусь и Российской Федерации рентабельность энергосберегающих проектов внедрения новых материалов, оборудования и технологий. Срок окупаемости таких проектов составляет от 4 до 9 месяцев.

УПРАВЛЕНИЕ ИНЖЕНЕРНЫМИ ДАННЫМИ В CALS

В.Г. Павлюченко, Д.Н. Свирский

*УО «Витебский государственный технологический университет»,
Республика Беларусь*

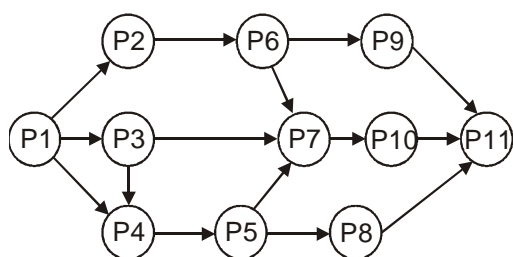
В сложившихся экономических условиях основным аспектом деятельности промышленного предприятия является выпуск конкурентоспособной продукции. Для осуществления поставленной задачи предприятиям необходимо внедрять CALS (Continues Acquisition and Life cycle Support)-технологии на всех этапах проектирования и изготовления образцов продукции. CALS-технологии позволяют решать задачи электронного информационного взаимодействия предприятий, занятых производством сложной наукоемкой продукции, какие бы программные и технические средства там ни применялись. Основной задачей CALS на предприятии является доставка необходимых инженерных данных в правильном формате, в нужное место и установленные сроки.

Базовыми элементами CALS-технологии являются: семейство CAD-систем, обеспечивающих полный цикл проектирования изделия; комплекс технологических САПР- и САМ-систем проектирования технологических процессов и управляющих программ для оборудования с ЧПУ; системы PDM (Product Data Management) и CAPP (Computer Aided Process Planning), осуществляющие информационное обеспечение, планирование и контроль на различных этапах проектирования и производства изделия; одна из систем ERP/MRP, обеспечивающая управление материальными и финансовыми потоками предприятия.

Ключевым элементом CALS-технологии является система CAPP, задача которой состоит не только в том, чтобы осуществлять накопление информации о производимом изделии, но и координации взаимодействия различных CAD/CAM-систем, применяемых в проектировании изделия. Проблема заключается в том, что структурные подразделения современного предприятия, как правило, применяют различные CAD/CAM-системы для осуществления проектирования изделия, а существующие системы управления проектом позволяют поддерживать взаимодействие в рамках одной CAD/CAM-системы или семейства систем одного разработчика. Для решения указанной проблемы предлагается структурная организация данных, реализованная с использованием тензорной технологии. Описание информации об объекте производства представляется интенционалом:

$$\text{Int}(R) = [(a_1, \text{Dom}(a_1)), \dots, (a_j, \text{Dom}(a_j)), \dots, (a_n, \text{Dom}(a_n))],$$

где a – имя атрибута; $\text{Dom}(a)$ – его домен (множество значений, из которого данный атрибут может принимать свои значения).



Инженерные данные, представляемые современными САД-системами, состоят преимущественно из геометрической информации и ограниченного набора атрибутивных элементов, необходимых для составления перечня материалов (bill of material). Состав инженерных данных различается в различных системах. Предлагаемый вариант организации инженерных данных позволяет

использовать различные типы данных для представления проектируемого изделия, гибко настраивать систему САРР с учетом особенностей организации производства на конкретном предприятии. Для управления инженерными данными указанного типа наиболее целесообразным является организация системы САРР с использованием маркированных сетей Петри. На рисунке представлен фрагмент сетевой модели технической подготовки производства. Указанная организация системы САРР реализуется на РУПП «Витязь».

РАДИОЛОКАЦИОННОЕ СЕЧЕНИЕ РАССЕЙЯНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

В.П. Кудин

*Международный институт трудовых и социальных отношений,
Гомельский филиал, Республика Беларусь*

Б.А. Верига

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

Радиолокационное сечение рассеяния летательных аппаратов является одной из важнейших характеристик, определяющих радиовидимость объектов. Существуют различные методы расчета сечения рассеяния. Наиболее плодотворным, по видимому, является подход, основанный на замене сплошной металлической поверхности рассеивателя решетчатой моделью [1] с последующим численным решением электродинамической задачи для тонкопроволочной структуры [2]. Однако алгоритмизация получающихся при этом интегральных уравнений, с учетом контактов между проводниками, встречает определенные трудности.

Целью настоящей работы является проверка применимости предложенного в [3] универсального алгоритма для расчета характеристик рассеяния летательных аппаратов. Алгоритм основан на специальном выборе совокупности базисных кусочно-синусоидальных функций тока, в результате чего после применения метода Галеркина в системе линейных алгебраических уравнений естественным образом учитываются условия Кирхгофа для тока в узлах.

Проиллюстрируем возможности алгоритма и вычислительной программы на примере расчета сечения обратного рассеяния модели самолета длиной 31 м и размахом крыльев 16 м (рис. 1). На рис. 2 приведены результаты на частоте 5 МГц для горизонтальной плоскости наблюдения. Сплошные линии – падающая плоская волна поляризована горизонтально, кружочки – вертикально.

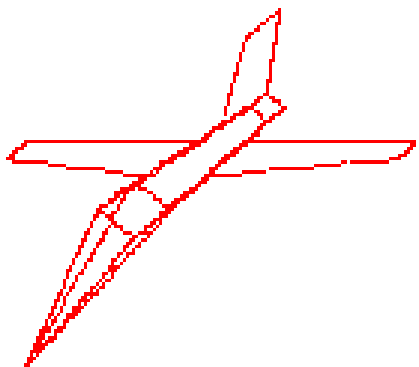


Рис. 1

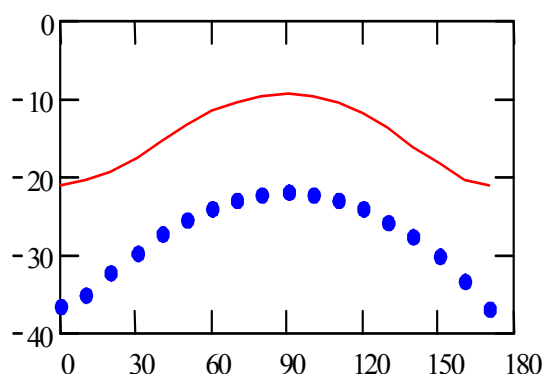


Рис. 2

Выводы. В данной работе предложен алгоритм и вычислительная программа для расчета радиолокационного сечения рассеяния металлических тел, моделируемых решетчатой структурой. Приведены примеры расчета для самолета.

Литература

1. Richmond J. H. A wire-grid model for scattering by conducting bodies. IEEE Transactions, 1966, Vol. AP-14, N 6 – P. 782-786.
2. Вычислительные методы в электродинамике /Под ред. Р. Митры. – М.: Мир, 1977.
3. Кудин В.П., Рубан А.П. Алгоритмизация задач возбуждения проволочных структур //Известия вузов. Сер. Радиоэлектроника. – 1986. – Т. 29, № 8. – С. 10-15.

АНАЛИЗ ПРОВОЛОЧНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ В СОСТАВЕ БЕСКОНЕЧНОЙ ПЛОСКОЙ ФАР

В.П. Кудин

*Международный институт трудовых и социальных отношений,
Гомельский филиал, Республика Беларусь*

Модель бесконечной плоской фазированной антенной решетки (ФАР) является чрезвычайно удобной и плодотворной при анализе больших конечных решеток. Если излучатели бесконечной решетки возбуждаются равноамплитурно с прогрессивным фазовым набегом, то такому условию подчиняются и поля решетки, в частности, токи на излучателях. Таким образом, достаточно определить распределение токов на одном излучателе, так называемом «центральном». Следовательно, по своей размерности задачи о бесконечной ФАР и о единичном излучателе эквивалентны, единственным отличием является способ вычисления матрицы взаимных импедансов.

Существует два способа расчета матрицы взаимных импедансов: поэлементный и спектральный. В поэлементном подходе вклад каждого излучателя, окружающего «центральный», вычисляется непосредственно и, таким образом, элементы матрицы взаимных импедансов находятся с помощью двойных рядов, каждый член которых представляет собой взаимодействие двух элементов. При всей очевидной наглядности и простоте поэлементный подход сопряжен с проблемой сходимости двойных рядов и трудностью введения диэлектрических слоев и укрытий.

В спектральном подходе подобных проблем и ограничений нет. Однако до сих пор спектральный подход использовался исключительно для токовых гармоник, параллельных плоскости решетки.

Целью данной работы является обобщение развитого в [1] метода анализа произвольной проволочной конструкции на случай бесконечной решетки таких конструкций с гексагональной сеткой расположения. Основой служит спектральный подход к нахождению матрицы взаимных импедансов токовых гармоник.

В данной работе спектральный подход обобщается на случай токовых гармоник, произвольным образом ориентированных в пространстве. В итоге взаимный импеданс двух гармоник в бесконечной плоской фазированной решетке с гексагональной сеткой расположения элементов выражается в виде двойного ряда, каждый член которого представляет собой замкнутое аналитическое выражение.

Полученные формулы являются совершенно строгими и удобными в вычислительном отношении. Кроме того, в данном случае достаточно просто вводится многослойная диэлектрическая среда, например, если структура находится над плоской поверхностью земли или содержит радиопрозрачное укрытие.

Л и т е р а т у р а

1. Кудин В.П., Рубан А.П. Алгоритмизация задач возбуждения проволочных структур //Известия вузов. Сер. Радиоэлектроника. – 1986. – Т. 29, № 8. – С. 10-15.

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ШНЕКОВЫХ ЭКСТРУДЕРОВ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ

А.Н. Голубев, К.С. Матвеев, А.В. Гусаков

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет», Республика Беларусь

Шнековые экструдеры занимают особое место в технологическом парке оборудования, предназначенного для рециклинга отходов промышленности. Широкий ассортимент выпускаемой продукции, возможности переработки отходов разнообразных по своему химическому составу и агрегатному состоянию, быстрое перенастройка и адаптация технологического процесса к различным производствам определяют расширение сферы применения экструзионных установок. На трех обувных предприятиях г. Витебска установлены шнековые экструдеры, которые являются результатом разработок научных сотрудников УО «ВГТУ». Установки осуществляют выпуск продукции, используемой в собственном производстве из отходов кожи и пенополиуретанов. Продукция представляет собой длинномерное профильное композиционное изделие прямоугольного и трапецеидального сечения, в последующем подвергаемое резке на изделие «вкладыш на низ обуви».

Увеличение объемов производства потребовало повышения производительности оборудования, но принимаемые технологические меры исчерпали свои возможности, поэтому встал вопрос о необходимости модернизации экструзионных установок, что позволило бы увеличить объем выпускаемых вкладышей на 10-15 %. Для решения поставленной задачи был предпринят комплекс исследований, который показал необходимость моделирования процесса с целью определения оптимальных параметров прессующего органа экструдера (шнека).

Цель исследований данной работы заключается в моделировании процесса экструзии композиционной смеси и оптимизации конструкции шнековых экструдеров.

Использование модели движения частиц материала и расчета шнековых машин для переработки термопластичных материалов в отношении отходов, подвергаемых рециклингу, не представляется возможным ввиду отсутствия у перерабатываемых материалов термопластичных свойств. Дело в том, что натуральная кожа, являющаяся наполнителем, не термопластична, а пенополиуретан приобретает термопластичные свойства только в результате длительного термомеханического воздействия, при этом его смесь с кожей обладает высокой теплоемкостью, что затрудняет процесс деструкции, который интенсивно протекает в конусной части фильеры. Поэтому только при движении смеси по поверхности фильеры у нее проявляются свойства, присущие термопластам.

Применение модели движения сыпучих материалов к экструдировающим установкам позволило осуществить необходимый расчет. Апробация конструктивных параметров фильеры и шнека, изготовленных в соответствии с расчетными данными на экспериментальной модели экструдера, показала следующие положительные результаты:

- увеличение производительности на 12-15 %;
- снижение потребляемой мощности двигателя на 20 %;
- повышение качества изделий за счет стабилизации скоростных параметров процесса экструзии.

Таким образом, расчетные данные, полученные при проведении работы, позволили повысить производительность эксплуатируемого оборудования без внесения существенных изменений в конструкцию самих установок.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА

Н.А. Дубинский

*Учреждение образования «Витебский государственный
технологический университет», Республика Беларусь*

Использование железных композиционных материалов (КМ) позволяет не только повысить прочность и надежность деталей машин, но и заменить легированные стали. Однако процесс осаждения КМ недостаточно изучен. Цель настоящего исследования заключается в изучении влияния параметров процесса электролиза на свойства КМ на основе железа с включениями оксида алюминия, каолина и силиката кальция, полученных электрохимическим способом.

Для получения образцов, обладающих изотропными свойствами, проведены исследования распределения тока на поверхности катода. Результаты экспериментов показали, что ток по ширине катода распределяется приблизительно по параболическому закону. Поэтому для проведения исследований использовали только области образцов, расположенные в центре катода. Увеличение температуры электролита от 40 до 80 °С ведет к уменьшению содержания частиц порошка в покрытии, например, если при температуре электролита 40 °С содержание частиц в КМ увеличивается от 4,9 – 5,1 масс. % ($I = 20 \text{ А/дм}^2$) до 7,7 масс. % ($I = 70 \text{ А/дм}^2$), то при температуре электролита 80 °С содержание частиц в покрытии снижается от 2,1 – 2,3 масс. % ($I = 20 \text{ А/дм}^2$) до 0,6 – 0,8 масс. % ($I = 70 \text{ А/дм}^2$). При увеличении скорости потока электролита от 0,01 м/с до 0,1 м/с возрастает диаметр частиц, включающихся в КМ с 2 до 15 мкм. Однако при увеличении скорости движения потока электролита от 0,25 м/с диаметр частиц уменьшается до 2 мкм. Изменение плотности тока от 20 до

80 А/дм² и уменьшение температуры электролита от 80 до 40 °С приводит к увеличению в осадке количества частиц больших размеров. С увеличением содержания порошка в электролите с 10 до 100 г/л, количество частиц в покрытии возрастает, дальнейшее увеличение концентрации порошка в электролите не приводит к увеличению содержания частиц в покрытии, т.к. при концентрации 100 г/л происходит насыщение электролита и дополнительное введение частиц приводит к их седиментации. С увеличением содержания порошка в КМ от 1,5 до 7,7 масс. % пористость осадков возрастает (содержащих: Al₂O₃ от 0,12 до 0,65 %; каолин от 0,12 до 0,66 %, силикат кальция от 0,12 до 0,66 %).

Покрытия с включением 1,5 – 4,3 мас. % частиц порошка обладают максимальной прочностью 70 – 75 МПа. Проведенная оптимизация результатов исследований показала, что осадки такого состава получаются при следующих условиях: концентрация порошка Al₂O₃ в ванне равна 100 г/л, температура электролита 50 °С, плотность катодного тока 30 А/Дм²; каолина – 100 г/л, температура электролита 80 °С, плотность катодного тока 50 А /Дм²; силиката кальция – 100 г/л, температура электролита 60 °С, плотность катодного тока 30 А /Дм². Скорость роста КМ до 11 % превышает скорость роста «чистого» гальванического железа. Так, с увеличением плотности тока от 20 до 50 А/дм² скорость роста КМ увеличивается для покрытий, содержащих: Al₂O₃ от 260 до 633 мкм/ч; каолина от 260 до 620 мкм/ч и силиката кальция от 261 до 618 мкм/ч.

В результате исследований предложен новый способ электрохимического осаждения КМ, упрочненных частицами, который позволяет получать материалы с заданными структурой и свойствами за счет распределения в объеме покрытия частиц порошка и пористости.

УСТАНОВКИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Н.А. Дубинский

*Учреждение образования «Витебский государственный
технологический университет», Республика Беларусь*

Проблема увеличения прочности и надежности деталей машин неразрывно связана с разработкой оборудования для получения новых материалов. Преимущества композиционных материалов, полученных электрохимическим способом, хорошо известны. В то же время промышленность Республики Беларусь и стран СНГ не выпускает необходимые специализированные установки для осаждения композиционных материалов. Использовать же имеющиеся установки для нанесения гальванических покрытий без внесения конструктивных изменений не представляется возможным ввиду того, что в них отсутствует возможность регулирования ряда параметров процесса электрохимического осаждения для получения материалов с заданными свойствами.

Целью работы является разработка и изготовление установок, позволяющих осаждавать композиционные материалы с заранее заданными свойствами.

Были разработаны и изготовлены две установки для осаждения композиционных материалов. Первая установка конструктивно состоит из корпуса, в котором находятся теплоэлектронагреватели, с помощью которых поддерживалась необходимая температура электролита. Конструкция предусматривает возможность регулирования температуры от 20 до 100 °С для получения покрытий с заданным массовым

содержанием в них частиц порошка. Контроль температуры осуществляется с помощью спиртового термометра со шкалой от 0 до 100 °С и ценой деления в один градус. Внутри корпуса расположена ванна объемом 15 л, где установлены катод и анод. В качестве катода служит модель. Перемешивание электролита осуществлялось с помощью лопастной мешалки, расположенной между анодом и катодом. В качестве электропривода использовали двигатель постоянного тока. Скорость вращения электродвигателя изменяли при помощи реостата путем подачи на него необходимого напряжения.

Питание анода и катода происходило от широтно-импульсного модулятора, который позволяет подавать импульсный ток с регулируемым импульсом силы тока как по значению амплитуды, так и по времени импульса, а также постоянный ток с регулируемой величиной силы тока от 0,1 до 100 А. Контроль силы тока проводили с помощью амперметра со шкалой от 0 до 100 А.

Для получения композиционных материалов с анизотропными свойствами в ванну устанавливаются анод, конструктивно состоящий из квадратных либо прямоугольных элементов, и экраны. Изменяя расстояние между участками анода и катодом, а также экранируя отдельные участки катода, задаем необходимую плотность тока между участками анода и изделием.

Вторая установка конструктивно состоит из гальванической ванны объемом 15 л, катода (в качестве которого служит модель), анода, источника тока и генератора ультразвуковых колебаний.

Необходимо отметить, что нанесение композиционных покрытий с помощью импульсного тока и ультразвука позволяет получать качественные материалы и увеличить скорость их осаждения.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ АДАПТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ И БИОТКАНЕЙ

Т.Н. Хихлуха, Н.Н. Бодрунов, Е.М. Петроковец

*Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого
НАН Беларуси, г. Гомель*

В.Н. Киряков

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Радикальное повышение качества машин в настоящее время связывается с созданием адаптивных материалов и конструкций, способных автоматически переобстраивать свою структуру в соответствии с заданными критериями (максимальной прочностью, линейностью деформирования и т. д.). Для создания таких материалов привлекаются их биологические аналоги, например, твердые и мягкие ткани опорно-двигательного аппарата и зубочелюстной системы, демонстрирующие различные приспособительные реакции.

Использование указанных аналогий в технике затрудняется сложностью определения деформационных характеристик биотканей, связанных с трудностью получения стандартных образцов, обеспечением их нормального физиологического состояния во время испытаний и отсутствием стандартов, регламентирующих определение упругих модулей, пределов прочности и текучести адаптивных материалов.

Опыт экспериментального исследования механических свойств полимерных композиционных материалов, в т. ч. термопластов и эластомеров, в условиях стати-

ческого растяжения–сжатия показал целесообразность создания специального программного обеспечения таких испытаний.

Разработанное авторами программное обеспечение ориентировано на использование графического и матричного представления данных, полученных с помощью датчиков усилий, перемещений, скоростей, ускорений и температуры, сопряженных с испытуемым образцом, после аналого-цифрового преобразования. В результате создается развернутый протокол испытания, включающий схему испытания, диаграммы деформирования типа P - δ и σ - ε , а также структурированные сведения о виде материала, типе и размерах образца, температуре и др. параметрах. Производится расчет ряда стандартных деформационно-прочностных характеристик материала, включая пределы прочности и текучести, модуль упругости, коэффициент Пуассона, относительное удлинение при разрыве. Осуществляется передача экспериментальных результатов в качестве исходных данных для конечно-элементного анализа образца (по локальной сети).

Применение программного обеспечения подразумевает использование испытательных стендов с контроллером, выполняющим стабилизацию усилия или перемещения нагружающего устройства в условиях развитой (десятки и сотни процентов) относительной деформации образцов. В связи с этим при разработке программного обеспечения использовано современное испытательное оборудование типа ComTen-94C и Instron-5560.

Работа выполнена при поддержке совместного фонда БРФФИ–РФФИ (проект T02P – 014).

СТРУКТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГИХ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ОБЪЕКТОВ В СРЕДЕ SIMULINK ПАКЕТА MATLAB

Г.С. Ленеvский, В.Н. Ситников, Д.С. Потапович

*Могилёвский государственный технический университет,
Республика Беларусь*

Все реальные физические системы являются по существу системами с распределёнными параметрами (СРП). Уравнения, описывающие процессы в таких системах, обычно можно вывести из основных законов сохранения и уравнений движения материальных тел.

Однако возникает множество ситуаций, когда необходимо смоделировать поведение СРП, т. е. решить систему соответствующих дифференциальных уравнений в частных производных:

- 1) идентификация параметров СРП по динамическим данным (данным временных рядов);
- 2) структурный анализ и проектирование объектов с распределёнными параметрами;
- 3) проектирование и определение параметров (настройка) систем автоматического управления СРП и т. д.

Было предложено множество методов моделирования процессов в СРП: аппроксимация моделями с сосредоточенными параметрами; метод характеристических уравнений и стохастическая аппроксимация; аппроксимация конечным набором ортогональных функций и т. д. Широкое применение находят и численные методы решения дифференциальных уравнений в частных производных. Однако их

использование, как правило, сопряжено с необходимостью написания объёмной программы на одном из известных языков программирования.

Предлагается способ составления структурных схем в среде SIMULINK пакета MATLAB. Распределённые объекты представляются в виде самостоятельных блоков, что позволяет:

- 1) легко составлять структурные схемы СРП любой сложности (включая различные типы преобразователей электрической энергии и двигателей);
- 2) моделировать процессы в таких системах;
- 3) контролировать поведение большого количества координат;
- 4) строить системы автоматического регулирования СРП;
- 5) оперативно вносить изменения в параметры системы и настройки регуляторов;
- 6) получать данные о спектральной плотности и гармоническом составе сигналов, временных и частотных характеристиках системы.

В основу математического описания блоков с распределёнными параметрами положены численные схемы Лакса первого порядка, двухшаговые методы Лакса-Вендрофа и метод квазивторого порядка точности.

Предложенным способом были смоделированы процессы, протекающие в электрических и механических частях шахтной подъёмной установки с бицилиндроконическим барабаном (БЦКБ). Произведены анализ погрешностей, связанных с выбранным методом численного интегрирования, и сравнительный анализ различных способов аппроксимации.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕДУКТОРНОГО И БЕЗРЕДУКТОРНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА СТЕНДА ИСПЫТАНИЯ ПРУЖИН

А.В. Бескровный

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

Во многих отраслях народного хозяйства используются технические устройства и машины, элементы которых совершают возвратно-поступательные, возвратно-вращательное, шаговое, колебательное или иные периодические и непериодические движения [1]. В настоящее время, в связи с развитием полупроводниковой силовой техники, с внедрением программного и компьютерного управления, происходит развитие электроприводов, позволяющих получать колебательное движение непосредственно на валу двигателя без применения редукторов с помощью различных законов управления.

В Гомельском государственном техническом университете им. П.О. Сухого было разработано математическое и программное обеспечение для исследования колебательных режимов безредукторных асинхронных электроприводов, позволяющее определять их технические и энергетические характеристики. Однако имеется необходимость выяснения в ряде случаев целесообразности применения безредукторных приводов вместо редукторных.

С этой целью была разработана новая, более полная модель, позволяющая проводить исследования не только безредукторных приводов, но и редукторных, в частности, с кривошипно-шатунным механизмом на валу. Это дает возможность произвести сравнительный анализ стенов на стадии предпроектной разработки различных типов приводов для получения возвратно-поступательного движения.

Эта модель состоит из следующих блоков дифференциально-алгебраических уравнений:

- уравнения, моделирующие источники электропитания статорных обмоток асинхронного электродвигателя при различных способах создания колебательного и автоколебательного движения;
- система дифференциальных уравнений электрического равновесия асинхронного электродвигателя, записанная в потокосцеплениях статорных и роторных обмоток в координатах α , β ;
- дифференциальные уравнения механического равновесия асинхронного электродвигателя, учитывающие силы сухого и жидкостного трения, инерционную, маятниковую или пружинную позиционную нагрузки, а так же наличие или отсутствие механического преобразователя;
- алгебраические уравнения расчета параметров модели, фазных токов по потокосцеплениям и энергетических показателей по обобщенному КПД.

В докладе излагаются результаты сравнительного анализа автоколебательного безредукторного электропривода и электропривода с кривошипно-шатунным механизмом применительно к стендам испытания пружин.

Л и т е р а т у р а

1. Грачев С.А., Луковников В.И. Безредукторный электромашинный привод периодического движения. – Минск: Вышэйшая школа, 1991.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПОТОКОВ В ТРУБОПРОВОДЕ

Э.М. Виноградов

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

А.Б. Вериго

РУП Гомельтранснефть «Дружба», Республика Беларусь

Задача о нестационарном движении вязкой жидкости по цилиндрическим трубам давно привлекла специалистов в области механики жидкости и газов. Частные решения этой задачи рассмотрены многими авторами, а схема решения для случая ламинарного течения изложена в [1]. Здесь приведены решения задач о приведении в движение покоящейся в круглой цилиндрической трубе вязкой жидкости под действием мгновенного перепада давления и при воздействии периодических во времени перепадов давления. Реальные временные воздействия на входе трубопровода могут быть чрезвычайно разнообразными и определяются режимами работы насосных агрегатов или внешними воздействиями на поток. Важность решения данной задачи имеет особое значение при разработке и исследовании параметров расходомеров, для точности измерения расходов в переходном режиме.

При мгновенном скачкообразном приложении градиента давления $\Delta p/l$ и начальном значении скоростей потока $v(r,0) = 0$ при граничных условиях на стенке $r = a$ $v(a,t) = 0$ временные изменения скоростей $v(r,t)$ определены в [1].

Здесь же решено дифференциальное уравнение для скоростей потока при пульсирующем гармоническом изменении давления на входе.

Нами предлагается общий подход на основе теории электрических цепей. Для этого определим изображение $v(r,p)$ и тогда при любом временном воздействии перепадов давления $U_{вх}(t)$ профиль потока $V_{вых}(r,t)$ определяется, как:

$$V_{вых}(r,t) = L^{-1}[p \cdot v(r,p) \cdot U_{вх}(p)]. \quad (1)$$

Выражение (1) является основным для расчета динамики профиля потока при нестационарных перепадах давления. В докладе рассмотрены наиболее часто встречаемые в трубопроводном транспорте варианты изменения давления: экспоненциальный выход насоса в режим; гармонические пульсации потока; импульсные «выбросы» давления.

В расчетной модели был выбран трубопровод диаметром $D = 0,8$ м, вид жидкости – нефть с параметром вязкости $\nu = 20 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\mu = 17 \cdot 10^{-3}$ Пас. Постоянная времени установления потока при этом превышает 30 минут. На протяжении переходного процесса профиль скоростей существенно отличается от установившегося, что приводит к дополнительным погрешностям при измерении расхода. Для расходомеров, адаптированным к параболическому профилю, относительная погрешность в течение переходного режима достигает 5 %.

Явление длительного переходного процесса имеет место и для массовых трубопроводов воды. При их относительно малых диаметрах ($D \approx 0,1$ м) вследствие более низкой вязкости воды, переходной процесс имеет длительность в сотни секунд, что необходимо учитывать при «проливке» расходомеров.

В докладе рассматриваются эквивалентные электрические схемы, моделирующие вышерассмотренную задачу и задачу движения неньютоновской вязкопластичной жидкости, имеющей трение между слоями.

Литература

1. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1973. – 848 с.

МОДУЛЬ РЕГИСТРАЦИИ УСКОРЕНИЙ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ

Э.М. Виноградов, Р.Н. Орышко

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

А.М. Бордовский, А.Б. Вериго

РУП Гомельтранснефть «Дружба», Республика Беларусь

В настоящее время для регулярной очистки внутренней поверхности трубопроводов от парафиносмолистых соединений и мусороподобных отложений применяются простые и недорогие чистящие снаряды. Перспективным является их использование в качестве базы для монтажа устройств контроля состояния трубопровода.

На кафедре «Промышленная электроника» Учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого» разработан модуль регистрации ускорений (МРУ), предназначенный для измерения и записи ускорений, которые возникают при движении снаряда внутри трубы. Принцип работы МРУ основан на том, что движущийся с постоянной скоростью в потоке нефти снаряд при столкновении с различными препятствиями (не полностью открытые задвижки, сужения трубы и т. п.) испытывает удары. Регистрируя возникающие при этом ускорения, а также время их появления, можно определить местоположение

дефекта по трассе трубопровода и выявить его характер. Конструктивно МРУ представляет собой полый металлический цилиндр диаметром 220 и длиной 180 мм, закрепленный в хвостовой части чистящего снаряда. Электронная часть МРУ включает: бесконтактный датчик ускорения, однокристалльную микроЭВМ, запоминающее устройство объемом 2 Мбайт, аккумуляторную батарею емкостью 4 Ач. При движении снаряда по трубопроводу микроЭВМ каждые 10 мс опрашивает датчик ускорения. Если ускорение превышает определенный порог, то начинается запись данных в запоминающее устройство, при этом регистрируется текущее время. После прибытия снаряда, он извлекается из трубопровода, МРУ подключается к переносному компьютеру и выполняется считывание собранных данных. Дальнейшая обработка данных выполняется с помощью компьютера.

Разработанный МРУ был испытан на РУП Гомельтранснефть «Дружба» на трассе Бобовичи–Мозырь. Время движения составило 15 часов, объем записанных данных 126 кБайт. Пороговое ускорение – 0,5 g, максимальное ускорение – 6 g, скорость движения снаряда – 1,96 м/с.

Обработка результатов эксперимента проводилась с помощью специально разработанной базы данных, которая предоставляет возможность их табличного и графического анализа. На рис. 1 приведен график зарегистрированных ударов на участке трубопровода 28–30,5 км. На рис. 2 представлен развернутый график удара в точке А. Расстояние до точки А – 29248 м. По карте нефтепровода было определено, что на данном расстоянии находится задвижка. Из полученных данных следует, что задвижка, вероятно, не полностью открыта. На основании анализа собранных данных и полученных модельных математических соотношений можно оценить уменьшение эффективного сечения трубопровода по величине ускорения в заданной точке.

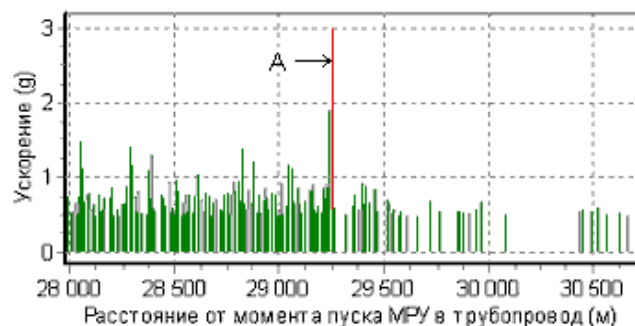


Рис. 1. График ударов по трассе трубопровода на участке 28-30,5 км

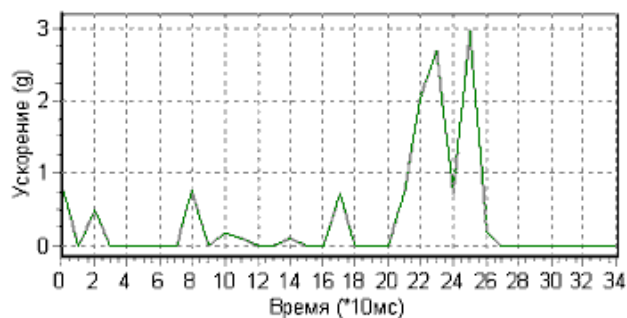


Рис. 2. Развернутый график удара в точке А

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МЕЖФАЗНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕТАЛЛ-ПОЛИМЕР В УСЛОВИЯХ ПРОТЕКАНИЯ КОНТАКТНЫХ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ

А.В. Рогачев, М.В. Буй, С.С. Сидорский

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Рассмотрены особенности адгезионного взаимодействия в гетерогенных системах на основе полимеров. Отмечается, что в рамках релаксационно-диффузионной теории представляется возможность аналитического описания межфазных процессов, учитывая при этом основные экспериментально установленные закономерности физико-химических изменений в граничных слоях.

Рассмотрены два варианта формирования гетерогенных систем, содержащих промежуточный слой. Сформулированы модели, описывающие структуру граничного слоя полимера, содержащего свободную поверхность, находящегося между твердыми поверхностями. Показано, что в тонких слоях, как и в полубесконечных средах, на начальных стадиях формирования контакта имеет место немонотонное изменение плотности активных центров. Сделан анализ динамики активных центров при различных внешних условиях. Показано, что повышение поверхностной энергии твердой подложки сопровождается снижением когезионной прочности полимерного слоя, что необходимо учитывать при выборе оптимальных технологических режимов формирования соединений.

Проведено аналитическое описание структуры промежуточных слоев в системах металл-полимер-металл. Установлено, что увеличение толщины слоя способствует возрастанию межфазного взаимодействия. При использовании достаточно тонких слоев полимера имеет место индукционный эффект, проявляющийся в зависимости от межфазного взаимодействия на границе Me^1 -П от природы второй металлической фазы в системе Me^1 -П- Me^2 . Показано, что механизм данного эффекта, установленного ранее экспериментально, обусловлен процессами энергодиффузии в граничных слоях.

Сформулирована и решена задача «растворения» металлической поверхности в контакте с полимером. При этом учитывалось, что интенсивное взаимодействие атомов металла с макромолекулами полимеров приводит к образованию кислородсодержащих соединений и кинетика данного процесса лимитируется содержанием в зоне кислорода. Образовавшиеся соединения оказывают иницирующие или ингибирующее (в зависимости от природы системы металл-полимер) влияние на процессы окисления. Разрушение металлической поверхности происходит в результате диффузии образовавшихся соединений. Последние два предположения основываются на общепризнанных представлениях о закономерностях протекания химических реакций с участием органических соединений и наблюдаемой экспериментально корреляцией кинетических зависимостей накопления в полимере металлсодержащих соединений и карбонильных групп.

В соответствии с данными допущениями описание кинетики процесса диспергирования распадается на две взаимосвязанные задачи. Первая – определение кинетики окисления поверхности металла в условиях непрерывного ухода из зоны реакции окисленных соединений. Вторая задача сводится к установлению кинетики протекания диффузионных процессов с учетом временной зависимости мощности источников.

В результате численного решения задачи о встречной диффузии кислорода и комплексов полимер-окисел через тонкий плоский слой полимерного вещества получены данные, позволяющие объяснить экспериментально установленные немонотонные распределения концентрации металла и комплексов по толщине слоя в соединениях, формируемых термообработкой порошковых материалов и вакуумной металлизацией.

МЕЗОМЕХАНИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Д.А. Черноус, Т.В. Семенова

*Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого
НАН Беларуси, г. Гомель*

Значительное расширение области практического использования легких пористых и ячеистых пластмасс привело в настоящее время к появлению большого числа экспериментальных и теоретических работ, посвященных анализу механического поведения таких материалов. Основным параметром, определяющим механическое поведение пористого материала, является объемная доля содержания твердой фазы V_f . Объемная доля V_f определяется как отношение кажущейся плотности пористого материала к плотности материала твердой фазы. При $V_f > 0,3$ приемлемые оценки механических характеристик пористых материалов позволяют получить известные методы механики композитов. Для прогнозирования деформирования пористых материалов при $V_f < 0,3$ используются различные мезомеханические модели структуры. При $V_f < 0,2$ структура большинства открытопористых пластмасс (поропластов) может моделироваться стержневой конструкцией. Анализ деформирования данной конструкции осуществляется методом выделения структурного элемента. Наиболее часто такой элемент состоит из 4 стержней, соединенных в недеформируемом узле.

Однако для эластичных поропластов при $0,087 < V_f < 0,3$ внутренняя структура характеризуется значительной хаотичностью, не позволяющей выбрать повторяющийся структурный элемент. Для анализа таких материалов оказывается более приемлемой "одностержневая" модель. Данная модель состоит из хаотически ориентированных стержней, соединенных в недеформируемых узлах. При описании механического поведения такой модели рассматривается деформирование отдельного стержня с последующим ориентационным усреднением полученных результатов. При этом принимают, что стержни воспринимают только продольную нагрузку. Данное упрощение обусловлено тем, что для тонких стержней поперечная (изгибная) жесткость пренебрежимо мала по сравнению с продольной. Вместе с тем, при потере стержнем статической устойчивости происходит резкое уменьшение его продольной жесткости. Следовательно, при описании больших деформаций моделируемого пористого материала следует рассматривать стержни, воспринимающие как продольную, так и поперечную нагрузку.

В докладе предложен упрощенный 4-стержневой структурный элемент для описания деформирования пористых материалов при $V_f < 0,087$. При анализе данного элемента рассматривается нагружение только в одном направлении без последующего ориентационного усреднения. Показано, что использование данного структурного элемента позволяет получить приемлемые оценки модуля Юнга жесткого пенополиуретана и описать его деформационное поведение при конечных упругопластических деформациях. Для анализа деформирования эластичных по-

ристых материалов предложен метод ориентационного усреднения, позволяющий учесть поперечную и продольную жесткости стержня при использовании одно-стержневой модели. Показано, что пренебрежение поперечной жесткостью приводит к значительным погрешностям при описании больших (более 5 %) деформаций исследуемых материалов.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ-РФФИ (проекты T00M-020 и T02P-014).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОБОИН В ПЛАСТИНАХ ИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

О.А. Шевченко, А.Г. Джорджишвили

Национальный авиационный университет, г. Киев, Украина

Рассмотрена проблема моделирования сквозных пробоин, вызванных действием баллистических объектов (пуль, снарядов, осколков) в пластинах из композиционного материала при одноосном растяжении. Пробоина моделируется сквозным отверстием с двумя зонами повреждения, которые располагаются в местах наибольшей концентрации растягивающих напряжений в направлении наиболее вероятного развития разрушения. В подходе, на котором базируется предложенная модель, полагается, что в материале в месте наибольшей концентрации напряжений возникает и с ростом нагрузки увеличивается зона повреждения, и что разрушение наступает, когда данная зона достигает своей критической длины. Данная зона представляется эквивалентной (фиктивной) трещиной, которая при предельной нагрузке достигает своей критической длины. Предельная величина данной зоны повреждения определяется на основе испытаний стандартных образцов на прочность и трещиностойкость.

Предложенная модель пробоины применима, когда направление разрушения является перпендикулярным приложенному напряжению и происходит в наиболее ослабленном сечении пластины. Размер зоны повреждения определяется на основе анализа результатов испытаний образцов из выбранного материала. Вначале определяется предел прочности при растяжении. Затем испытываются плоские образцы с боковыми пропилами, которые моделируют трещину, и по результатам этих испытаний определяется критический коэффициент интенсивности напряжений (КИН) для трещины нормального отрыва.

На основании полученных экспериментальных результатов определяем критическую длину зоны повреждения, при достижении которой происходит разрушение элемента. Зона повреждения эквивалентна трещиноподобному дефекту. Поэтому пробоина моделируется эллиптическим отверстием с двумя выходящими из него трещинами, длина которых равна критической величине зоны повреждения.

Для проверки предложенной модели были проведены экспериментальные исследования. Для испытаний был выбран композиционный материал «слоистый углепластик, отформованный из однонаправленных слоев углеродной ткани, с одним наружным слоем из органоволокнистой ткани». Две опертые по контуру прямоугольные пластины из данного материала были пробиты высокоскоростными баллистическими объектами со стороны, противоположной органоволокнистому слою. В результате образовались сквозные пробоины в форме вытянутого в направлении большей жесткости материала эллипса (с отношением радиусов 1:1,5) и с рядом несквозных трещин в направлении армирования наружного слоя, перпендикулярного направлению большей жесткости.

По результатам испытаний стандартных образцов, изготовленных из данного композиционного материала, был найден предел прочности при растяжении, а по образцам с боковыми пропилами – было найдено значение критического КИН. Для испытываемого материала расчетный критический размер зоны повреждения составил 1,22 мм. С использованием предложенной модели была вычислена предельная нагрузка для пластины из выбранного композиционного материала с эллиптическим отверстием (моделирующим пробоину) и зонами повреждения. Результаты испытаний образцов шириной 50 мм с пробоинами показали, что полученная разрушающая нагрузка отличается от рассчитанной не более, чем на 8 %. Кроме того, можно сделать вывод, что начальные несквозные трещины, идущие от пробоин, практически не оказывают влияния на предельную нагрузку, а лишь несколько изменяют траекторию разделения пластины с пробоиной на части по сравнению с отверстием в пластине.

СЕКЦИЯ В. АЭРОДИНАМИКА; ПНЕВМО- И ГИДРОСИСТЕМЫ МАШИН И АППАРАТОВ

ЛАЗЕРНЫЙ ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПУЛЬСАЦИОННО-ВИБРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ГИДРОГАЗОВЫХ СИСТЕМ

О.А. Журавлев, Ю.Н. Шапошников, Ю.Д. Щеглов,
С.Ю. Комаров, А.С. Плясунов

*Самарский государственный аэрокосмический
университет им. С.П. Королева, Россия*

Актуальность проблемы снижения виброакустических нагрузок определяется такими тенденциями, как растущая энерговооруженность создаваемых механизмов и машин, наличие требований к их материалоемкости, ужесточение ограничений на создаваемые шум и вибрацию. Эти обстоятельства выдвинули задачу снижения шума и вибрации за последнее десятилетие в число важнейших естественнонаучных и технических проблем, имеющих общеэкологическую значимость. Большая роль здесь отводится исследованию виброакустических характеристик создаваемых установок.

Наряду с методами математического моделирования необходимо развитие диагностических систем и стендов, позволяющих анализировать процессы возбуждения колебаний в сложных механических и гидрогазовых системах на всех этапах их разработки. Требуется панорамные методы исследований, обеспечивающие бесконтактное определение собственных частот и форм колебаний протяженных конструкций, выделение структурных образований в потоках рабочих сред, визуализацию процессов взаимодействия газожидкостных потоков с элементами конструкций, стенками колеблющихся трубопроводов.

Диагностическая система для одновременной регистрации динамических процессов в газожидкостных средах и записи амплитудно-частотных характеристик конструктивных элементов отличается научной новизной. Она может быть создана на основе оптических методов исследований. Для проведения подобных исследований в НИИ акустики машин СГАУ создан диагностический стенд, основанный на методе лазерного “ножа” [1] и лазерно-компьютерной системе записи спеклинтерферограмм вибрирующей поверхности конструкции [2]. В докладе дано описание систем стенда и приведены результаты его применения для исследования кавитационных процессов в потоке керосина на входе в высокооборотный шнекоцентробежный насос и анализа пространственных колебаний трубопровода при регулировании жесткости заделки.

Показана эффективность метода подавления кавитации на входе в топливный насос за счет установки неподвижного конуса перед лопатками шнека, а также подтверждена необходимость рассмотрения трубопровода в качестве распределенной системы, характеризующейся нелинейными свойствами.

Л и т е р а т у р а

1. Журавлев О.А., Мединская Л.Н., Шорин В.П. Лазерная диагностика двухфазных течений. – Куйбышев: КуАИ, 1989. – 74 с.

2. Журавлев О.А., Комаров С.Ю., Шапошников Ю.Н., Щеглов Ю.Д. Помехоустойчивый интерферометр для автоматизированной диагностики объектов /Доклады международной научно-технич. конференции, посвященной памяти генерального конструктора аэрокосмической техники академика Н.Д. Кузнецова. – Самара: СГАУ. – 2001. – Ч. 1. – С. 159-164.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАСТВОРИМОСТИ ГАЗА НА ЖЕСТКОСТЬ ПНЕВМОГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ПОДВЕСКИ КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ

М.И. Жилевич, Е.М. Заболоцкий

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Заболоцкий М.М.

Белорусский автомобильный завод (БелАЗ), г. Жодино

Цель работы – оценка упругих свойств (УС) пневмогидравлической подвески (ПГП) с учетом растворимости (Р) газа (технического азота) в минеральном масле.

Работа пневморессоры основана на принципе сжатия и расширения газа, подчиняющегося политропическому закону. Для оценки УС ПГП пользуются зависимостью $p_x = p_0(L_0/(L_0 - \Delta x))^n$, где Δx – отклонения поршня от начального положения L_0 , соответствующего, в частности, положению снаряженного автомобиля; p_x и p_0 – давление в цилиндре (Ц) в промежуточном и начальном положениях, соответственно. Различают статическую ($n=1$) и динамическую ($n=1,3\dots 1,4$) упругую характеристику (УХ).

В цилиндрах ПГП карьерных самосвалов (КС) БелАЗ газовая и жидкая фаза не разделены, поэтому в процессе работы подвески имеет место растворение азота в масле, характеризуемое коэффициентом растворимости $k=V_p/V_{ж}$, где V_p – объем газа, растворяемого в объеме жидкости $V_{ж}$ до ее полного насыщения при некотором давлении в Ц. Для компенсации потерь газа на Р при заправке Ц азотом вне КС (в растянутом положении) увеличивают начальное давление, а при заправке Ц на КС увеличивают L_0 подкачкой дополнительного количества газа. Расчет соответствующего p_x или L_0 проводят по зарядной характеристике $p_x = p_0(F L_0 + k V_{жс}) / (F(L_0 - \Delta x))$, где F – активная площадь поршня, предполагая, что после приработки дополнительно заправленный азот растворяется, и изменение УС ПГП происходит по статической УХ без учета Р.

В ходе эксплуатации КС отмечено повышение жесткости ПГП при перевозке грузов на большие расстояния, причем УХ восстанавливается после разгрузки КС. Одной из предполагаемых причин изменения УС является Р азота в масле. Поэтому возникла необходимость оценить УС ПГП для указанных условий эксплуатации с учетом изменения приведенного к н.у. объема газа, участвующего в формировании УХ, по причине растворения некоторого его количества при загрузке КС. В результате получена зависимость, устанавливающая связь между степенью загрузки КС (p_x) и отклонением Δx от снаряженного L_0 положения $p_x = p_0(F L_0 + k V_{жс}) / (F(L_0 + \Delta x) + k V_{жс})$.

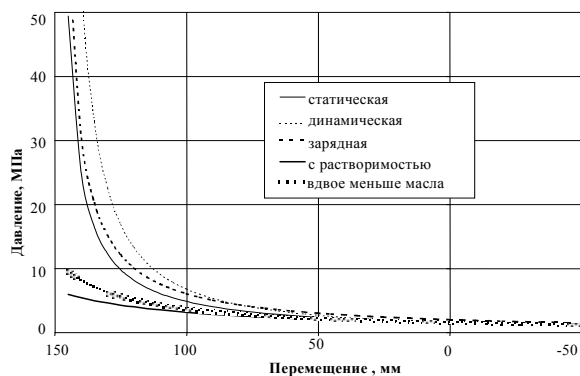


Рис. 1

$V_{ж}$ (см. рис. 1) лишь в некоторой степени позволяет снизить прогиб и приблизиться к УХ. Решением проблемы может быть разделение газовой и жидкой сред, дополнительная подкачка азота для КС, предназначенных для перевозки грузов на большие расстояния, или существенное уменьшение $V_{ж}$.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ДВУХЗВЕННЫХ ПНЕВМОЦЕПЕЙ В ОДНОЗВЕННЫЕ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ИХ ДИНАМИКИ

В.П. Автушко, П.Р. Бартош, С.В. Гиль

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

При разработке математических моделей разветвлённых пневматических приводов различного назначения часто возникает необходимость выполнять с допустимой для расчёта погрешностью преобразование двухзвенных пневмоцепей в однозвенные. Такая задача представляет практический интерес, так как это позволяет понизить порядок математической модели многозвенного привода.

В работе рассмотрены два варианта преобразования двухзвенных пневмоцепей в однозвенные.

1. При $(\mu A)_2 > (\mu A)_1$ ($\beta = (\mu A)_1 / (\mu A)_2 < 1$) ёмкость объёмом V_1 наполняется или опорожняется через дроссель с пропускной способностью $(\mu A)_1$, давление в ёмкости $p_{1\phi}$. При этом в процессе наполнения промежуточная ёмкость V_2 относится к ресиверу, а в процессе опорожнения – к атмосфере и, следовательно, не учитывается.

2. При $(\mu A)_2 < (\mu A)_1$ ($\beta > 1$) ёмкость объёма $V_2 = V_1 + V_2$ наполняется или опорожняется через дроссель с пропускной способностью $(\mu A)_2$, давление в ёмкости $p_{2\phi}$. При этом выполняется присоединение промежуточной ёмкости V_2 к наполняемому (или опорожняемому) объёму V_1 , (где $(\mu A)_1$ и $(\mu A)_2$ – пропускные способности пневмосопротивлений, расположенных, соответственно, между ёмкостями V_1 , V_2 и между ресивером (атмосферой) и ёмкостью V_2).

Для описания динамических процессов, происходящих в двухзвенных и однозвенных пневмоцепях, использованы уравнения балансов мгновенных массовых расходов воздуха в узлах пневмоцепей. Составляющими указанных балансов являются мгновенные массовые расходы воздуха в ёмкостях (уравнения состояния воздуха в ёмкостях) и мгновенные массовые расходы воздуха через пневматические сопротивления, полученные при использовании гиперболической газодинамической функции расхода воздуха.

Рассчитанные по различным зависимостям характеристики для задних Ц КС БелАЗ-7513 представлены на рис. 1, причем прогиб ППП по характеристике с учетом Р существенно больше остальных при равном нагружении, так как увеличивается ход поршня за счет растворяемого газа. После длительной работы ППП на груженом КС ($p_x \approx 10$ МПа) поршень максимально приближается к упору, что соответствует более жесткому участку УХ. Уменьшение

Предложена безразмерная форма дифференциальных уравнений, описывающих динамику двухзвенных и однозвенных пневмоцепей, с использованием относительных параметров $\gamma = V_1/V_2$ и $\beta = (\mu A)_1/(\mu A)_2$, которая позволила получить решение указанной задачи в общем виде.

По разработанным алгоритмам составлено четыре программы для расчёта на ЭВМ погрешностей ϵ замены двухзвенных пневмоцепей на однозвенные для указанных вариантов преобразований. Расчёт погрешностей проводился для широкого диапазона изменения безразмерных параметров β и γ .

По результатам расчётов получены универсальные номограммы для определения погрешностей замены двухзвенных пневмоцепей на однозвенные в зависимости от параметров β и γ . Эти номограммы позволяют оценивать не только погрешности замены двухзвенных пневмоцепей на однозвенные, а также решать обратную задачу: определять область относительных параметров β и γ двухзвенной пневмоцепи, при которой с заданной погрешностью можно проводить такую замену.

ЛИНЕЙНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СЛЕДЯЩИХ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С СИЛОВОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

С.В. Гиль

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Для предварительного выбора и качественной оценки параметров системы регулирования давления воздуха, в состав которой входят следящие пневмоаппараты с силовой обратной связью, необходимо её линейная (линеаризованная) математическая модель. Такая модель позволяет получить структурную схему рассматриваемой системы, с помощью которой можно выполнить структурный и частотный анализ системы и выявить причинно-следственные связи между процессами, происходящими в отдельных элементах системы. Кроме того, такая модель позволяет получить аналитические связи между основными конструктивными параметрами системы и показателями быстродействия, точности и устойчивости, с помощью которых можно проводить предварительное исследование системы аналитическими методами.

Степень приближения линейной модели к реальным процессам в следящих пневмосистемах существенно зависит от принятого метода линеаризации основных нелинейных функций. Для линеаризации наиболее важной и сложной расходно-перепадной характеристики пневмосопротивления с переменным проходным сечением в работе использован метод интерполяционного многочлена первой степени, который позволяет получить меньшие погрешности линеаризации нелинейностей по сравнению с другими методами.

На основании предложенной ранее нелинейной модели ускорительного клапана и применения линеаризации расходно-перепадных характеристик пневмосопротивлений вышеуказанным методом разработана его линейная модель, которая представлена в виде линеаризованных дифференциальных уравнений для одномассовой и безмассовой расчётных схем. В работе получены передаточные функции динамических звеньев линейной модели ускорительного клапана, главные передаточные функции замкнутой системы, а также разработаны структурные схемы для двух вариантов расчётных схем ускорителя и исследованы его частотные характеристики для различных конструктивных параметров систем.

В результате анализа структурных схем ускорительного клапана установлено, что они имеют главную и местную обратные связи. Главная отрицательная обратная связь является пневмомеханической и представляет собой последовательное соединение пропорционального звена и форсирующего звена первого порядка. Эта связь обеспечивает механизм отслеживания давления в наполняемой ёмкости. Коэффициент передачи пропорционального звена является коэффициентом обратной связи ускорителя. Наличие форсирующего звена в главной обратной связи объясняет установленную при экспериментальном исследовании ускорительного клапана зависимость перемещения его впускного клапана при прочих равных условиях от объёма наполняемой ёмкости и пропускной способности трубопровода, соединяющего ёмкость с ускорительным клапаном, так как постоянная времени этого звена зависит от указанных параметров.

Разработанная линейная математическая модель ускорительного клапана является универсальной и может быть использована для других следящих аппаратов, имеющих силовую отрицательную обратную связь.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРОПНЕВМОМОДУЛЯТОРА В ЦИКЛИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

В.П. Автушко, М.И. Жилевич

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Цель работы – разработка математической модели (ММ) и программного обеспечения (ПО) для исследования динамики тормозного пневмопривода в циклическом режиме торможения-оттормаживания для двухфазового и трехфазового алгоритма функционирования электропневмомодулятора (ЭПМ).

Для составления ММ используются уравнения баланса мгновенных массовых расходов в узлах расчетной схемы и гиперболическая газодинамическая функция расхода воздуха через пневмосопротивления. Фаза торможения описывается уравнениями

$$\left. \begin{aligned} \frac{dp_M}{dt} &= \frac{N}{V_M} (\mu f)_{\partial 1} p_p \frac{p_p - p_M}{B_1 p_p - p_M} - 2 \frac{N}{V_M} (\mu f)_2 p_M \frac{p_M - p_T}{B_1 p_M - p_T}; \\ \frac{dp_T}{dt} &= \frac{N}{V_T} (\mu f)_2 p_M \frac{p_M - p_T}{B_1 p_M - p_T} - \frac{k}{V_T} p_T \frac{dV_T}{dt}. \end{aligned} \right\}$$

а модель фазы оттормаживания имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \frac{dp_T}{dt} &= - \frac{N}{V_T} (\mu f)_2 p_T \frac{p_T - p_M}{B_1 p_T - p_M} - \frac{k}{V_T} p_T \frac{dV_T}{dt}; \\ \frac{dp_M}{dt} &= 2 \frac{N}{V_M} (\mu f)_2 p_T \frac{p_T - p_M}{B_1 p_T - p_M} - \frac{N}{V_M} (\mu f)_3 p_M \frac{p_M - p_a}{B_1 p_M - p_a}. \end{aligned} \right\}$$

где $N = k \nu_0 B_0$; ν_0 – местная скорость звука, $\nu_0 = \sqrt{kRT}$; R – газовая постоянная; T – температура воздуха; k – показатель адиабаты; B_0 и B_1 – коэффициенты аппроксимации функции расхода; p_p , p_M , p_T , p_a – давление воздуха, соответственно, в ресивере, ЭПМ, тормозной камере (ТК) и атмосферное; $(\mu f)_2$, $(\mu f)_3$, $(\mu f)_{\partial 1}$ – пропускная способность трубопровода, соединяющего ЭПМ и ТК, выпускного клапана и экви-

валентного дросселя, представляющая собой последовательное соединение трубопровода от ресивера до ЭПМ и его впускного клапана; V_T – объем ТК, зависящий от площади диафрагмы F_T и ее перемещения z , причем $V_T = V_0 + F_T z$, $F_T = a - bz$, а V_0 – начальный объем, b и a – коэффициенты, зависящие от типоразмера ТК; закон изменения z определяется нелинейной силовой характеристикой тормозного механизма $z(p_T)$, которая обычно определяется экспериментально и аппроксимируется нелинейной зависимостью.

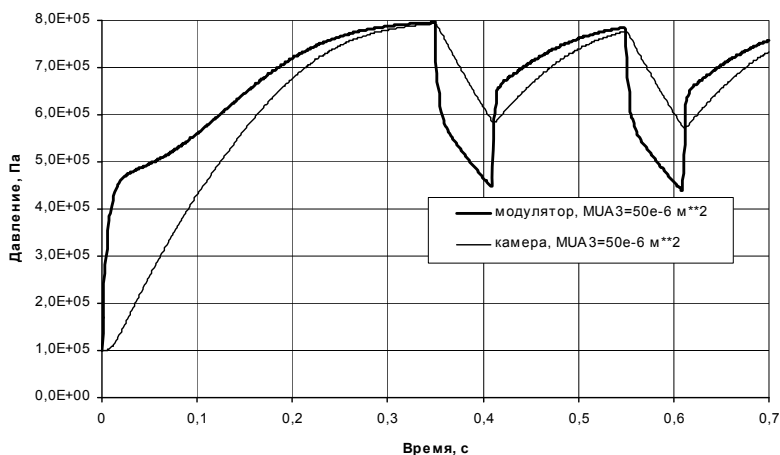


Рис. 1

Разработанные ММ и ПО позволяют проводить многовариантный анализ динамических процессов в ЭПМ при некоторых фиксированных данных (давление в системе питания, размеры и характеристики ТК, свойства рабочей среды) в зависимости от варьируемых параметров (пропускная способность трубопроводов и клапанов на различных участках, объем камер ЭПМ, частота срабатывания, алгоритм и скажность сигналов управления). На рис. 1 в качестве примера представлены результаты расчета динамики ЭПМ в двухфазовом режиме работы с частотой 5 Гц.

О ВЕЛИЧИНЕ ЗАЗОРА В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОМ УЗЛЕ АКСИАЛЬНО-ПОРШНЕВЫХ ГИДРОМАШИН

А.В. Михневич, Ю.А. Андреев

Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь

Условия работы распределителя аксиально-поршневых машин зависят от характера течения жидкости между контактирующими поверхностями распределительного диска и блока цилиндров. Характер течения жидкости определяет режим трения между соответствующими контактирующими поверхностями и, в свою очередь, зависит от величины зазора h между этими поверхностями. Поэтому определение величины торцевого зазора в распределительном узле, анализ его зависимости от различных факторов имеют важное значение для прогнозирования надежной и устойчивой работы аксиально-поршневых гидромашин.

Для определения величины торцевого зазора h в настоящей работе использован экстремальный принцип минимума диссипации механической энергии, согласно ко-

торому практически допустимым является такое движение жидкости, при котором скорость диссипации механической энергии минимальна.

Скорость диссипации механической энергии в торцевом зазоре распределительного узла аксиально-поршневых гидромашин определяется выражением

$$N_{\text{дис}} = \mu \left[\frac{\pi p_0^2 h^3}{12 \mu^2} \left(\frac{1}{\ln \frac{R_2}{R_1}} + \frac{1}{\ln \frac{R_4}{R_3}} \right) + \frac{\pi \omega^2}{2h} (R_4^4 - R_3^4 + R_2^4 - R_1^4) \right], \quad (1)$$

где P_0 – давление нагнетания;

R_1 – внутренний радиус распределительного диска;

R_2, R_3 – внутренний и наружный радиусы серповидного окна распределительного диска;

R_4 – наружный радиус распределительного диска;

μ – коэффициент вязкости рабочей жидкости;

ω – угловая скорость вращения блока цилиндров.

Исследуя функцию $N_{\text{дис}}(h)$ на минимум, можно получить следующее выражение для величины зазора h , при котором скорость диссипации механической энергии в щели торцевого зазора минимальна:

$$h = \sqrt[4]{\frac{2\omega^2 \mu^2}{p_0^2} \frac{R_4^4 - R_1^4}{\frac{1}{\ln \frac{R_2}{R_1}} + \frac{1}{\ln \frac{R_4}{R_3}}}}. \quad (2)$$

Таким образом, величина торцевого зазора зависит от геометрических размеров распределителя, скорости вращения блока цилиндров, вязкости рабочей жидкости и давления нагнетания.

Полученное выражение (2) хорошо согласуется с известными экспериментальными зависимостями величины торцевого зазора, а также момента трения от давления нагнетания P_0 , скорости скольжения ω , вязкости рабочей жидкости μ .

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УЗЛОВ АКСИАЛЬНО-ПОРШНЕВЫХ ГИДРОМАШИН ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

А.В. Михневич, Ю.А. Андреев

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

Одним из основных элементов объемных гидромашин является узел распределения рабочей жидкости. Этот узел определяет надежность и долговечность гидромашин, их чувствительность к загрязнению рабочей жидкости, шумовую характеристику и способность гидромашин работать при высоких давлениях.

В настоящее время в аксиально-поршневых гидромашинах используются распределительные узлы с плоским и сферическим распределительными дисками.

Для нормальной работы аксиальных гидромашин необходимо обеспечить устойчивый режим жидкостного трения в зазоре между контактирующими поверхностями распределительного узла при минимальных утечках рабочей жидкости, то есть величина зазора должна быть больше величины суммарной шероховатости контактных поверхностей.

При форсировании объемных гидромашин по давлению возрастает напряженность работы распределительного узла. В частности, увеличение давления P_0 приводит к уменьшению зазора h , что в сочетании с зависимостью вязкости рабочей жидкости от давления обуславливают существенное увеличение трения в распределительном узле при повышении рабочего давления P_0 .

Наибольшие напряжения возникают в зоне, где давление рабочей жидкости максимально, т.е. в зоне нагнетательных серповидных окон распределительного диска. Большие боковые поверхности и значительная длина серповидных окон у многих конструкций распределительных дисков при высоких давлениях рабочей жидкости приводит к существенным деформациям в зоне нагнетательных серповидных окон.

Максимальный прогиб внешнего кольца распределительного диска в секторе нагнетания определяется по формуле

$$f_{\max} = \frac{5P_0 b l^4}{386EJ},$$

где l – длина серповидного окна;

b – высота внешней поверхности нагнетательного серповидного окна;

E – модуль упругости материала распределителя;

J – момент инерции сечения внешнего кольца распределителя относительно нейтральной оси.

Для аксиально-поршневой гидромашин марки 207,25 при $P_0 = 36$ МПа расчетное значение $f_{\max} \approx 26$ мкм.

Для сферических распределительных дисков такой существенный прогиб приводит к резкому уменьшению зазора между распределительным диском и блоком цилиндров в зоне нагнетания. То есть для сферических распределительных дисков фактор деформации для сферических распределительных дисков является основным, ограничивающим повышение рабочего давления. Для плоского распределителя деформации в распределительном диске не оказывают столь существенного влияния на величину зазора. Поэтому для аксиально-поршневых гидромашин высокого давления предпочтительна плоская конфигурация распределительного узла.

МЕТОД РАСЧЕТА ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ НА ТРЕНИЕ В ПОДШИПНИКАХ СКОЛЬЖЕНИЯ ШЕСТЕРЕННОГО НАСОСА

Е.И. Станюк, И.А. Веренич

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Для опорных подшипников скольжения считают, что масло заполняет зазор между двумя круглыми цилиндрическими поверхностями. Предполагаем, что участки масляной пленки имеют одну и ту же среднюю температуру. При низком давлении масляная плёнка рвётся, и её дальнейшее течение происходит в виде отдельных струй или в виде масляной пены. При низкой температуре гидродинамика масла существенно отличается от картины течения вязкой жидкости в тонком слое.

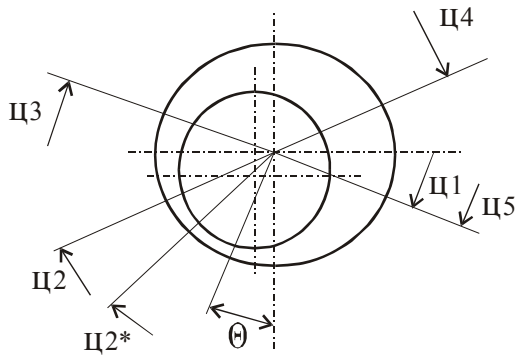


Рис.1

Кроме того, температурные режимы в различных зонах зазора отличаются друг от друга. Расчётная схема (рис. 1) подшипника насоса принимается в следующем виде. Зазор между шейкой вала и подшипником разбивается на 5 зон: рабочая зона с угловой протяженностью $\varphi_1 - \varphi_2^*$; зона кавитационного течения после обрыва пленки $\varphi_2^* - \varphi_2$; карман (холодильник) с угловой протяженностью $\varphi_2 - \varphi_3$; нерабочая зона с угловой протяженностью $\varphi_3 - \varphi_4$; карман (холодильник) с угловой протяженностью $\varphi_4 - \varphi_5$.

В первой зоне потери вычисляются по известной формуле:

$$N_{1-2^*} = \frac{\mu_{1-2^*} L U^2}{\psi} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2^*} \frac{d\varphi}{s} + 0,5\psi\chi F U \sin \theta,$$

где μ – средняя вязкость в зоне; L – длина подшипника; U – окружная скорость; $s = 1 - \sin(\varphi - \theta)$ – безразмерная величина масляной плёнки (отнесена к радиальному зазору); ψ – относительный зазор; χ – относительный эксцентриситет; θ – угол нагрузки; F – нагрузка на подшипник.

Для потерь N_{2^*-2} получим:
$$N_{2^*-2} = \frac{\mu_{2^*-2} L U^2}{\psi} s^{-*} \int_{\varphi_{1_2^*}}^{\varphi_{2^*}} \frac{d\varphi}{s^2}.$$

При определении мощности N_{3-4} при низких скоростях принимаем, что силы трения в зоне $\varphi_3 \dots \varphi_4$ подчиняются тем же закономерностям, что и в зоне $\varphi_{2^*} \dots \varphi_2$. При высоких скоростях струйный характер течения нарушается, и соответствующая часть зазора заполнена масляной пеной. Формула для N_{3-4} запишется в виде:

$$N_{3-4} = \frac{\mu_{3-4} L U^2}{\psi} s^{-*} (\varphi_3) \int_{\varphi_3}^{\varphi_4} \frac{d\varphi}{s^2}.$$

Если оба кармана в термогидродинамическом отношении можно считать идентичными, а ширину пограничного слоя – равной длине подшипника ($b = L$), то

$$N_{4-5} = N_{2-3} = 0,93\mu U^2 L \sqrt{\text{Re}_c}.$$

В докладе представлены результаты расчета потерь мощности на трение в подшипниках скольжения шестеренного насоса по представленной методике.

КИПЕНИЕ АЦЕТОНА НА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ТРУБАХ С ПРОДОЛЬНОМ ОРЕБРЕНИЕМ В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ

**А.В. Овсянник, Н.А. Вальченко, Д.А. Дробышевский,
М.Н. Новиков, Е.А. Коршунов**

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

Актуальность исследований определяется широким распространением оребренных поверхностей в промышленности, в связи с их универсальностью для различных теплоносителей, технологичностью изготовления и сборки, возможностью работы на загрязненных теплоносителях.

В работе проведены экспериментальные исследования теплообмена при кипении ацетона на гладкой и оребренной поверхностях с различной геометрией ребра в горизонтальном кольцевом канале в условиях «стеснения» (затрудненного отвода паровой фазы). Исследовалось пять типов поверхностей. Из них три оребренных, со следующими профилями ребра: трапециевидный, прямоугольный и треугольный. В качестве контрольных опытов на созданной установке были проведены эксперименты по кипению воды и ацетона при атмосферном давлении на технически шероховатой и полированной горизонтальных трубках в диапазоне тепловых потоков 6-100 кВт/м². Полученные опытные данные при кипении на гладкой поверхности удовлетворительно согласуются с результатами других авторов на технически гладких поверхностях и подтверждают положительное влияние условий «стеснения». Коэффициенты теплоотдачи при малых тепловых потоках (6-40 кВт/м²) получены на 10-30 % выше, чем при кипении в большом объеме. По результатам проведенных экспериментальных исследований кипения ацетона на оребренных поверхностях построены зависимости: $q = f(\Delta t)$, $\alpha = f(q)$ и сделаны следующие выводы:

- развитое кипение на оребренной поверхности начинается при более низких тепловых потоках, чем на гладкой (5 кВт/м² и 8 кВт/м², соответственно) и более низких температурных напорах (2 °С и 5 °С, соответственно);
- при кипении ацетона средние коэффициенты теплоотдачи на оребренной поверхности в 2-3 раза выше, чем на гладкой;
- определены закономерности влияния профиля ребра на вид кривой кипения.

СПОСОБЫ АКТИВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ОБЪЕМНЫХ ГИДРОПРИВОДОВ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ТЕХНИКО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Д.Н. Андрианов

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

На настоящем этапе развития техники большое распространение получил объемный гидропривод, который применяется в большом количестве технологических и мобильных машин различной конструкции и назначения. Такое широкое распространение вызвано большим количеством преимуществ по сравнению с другими типами приводов: малая масса и габаритные размеры, возможность легкой компоновки привода на машине, бесступенчатое регулирование, простота организации автоматического или автоматизированного управления, надежная защита от перегрузок.

Наряду с этими неоспоримыми преимуществами существуют и значительные недостатки, сдерживающие дальнейшее распространение объемных гидроприводов.

Это высокая (по сравнению с другими приводами) стоимость, относительно высокий уровень шума, чувствительность к изменению температуры рабочей жидкости и т. д. Основным же недостатком объемных гидроприводов является их невысокий, по сравнению с другими типами приводов, КПД.

Повышение технико-экономических показателей гидравлических приводов возможно при использовании адаптивного способа управления работой привода.

Адаптивная система включает в себя центральный управляющий блок (процессор), различные датчики (давления, температуры, крутящего момента и т. д.), отслеживающие текущее состояние системы и исполнительные устройства, реализующие команды управляющего блока. Применение адаптивного управления позволяет значительно повысить технико-экономические показатели работы привода, и при использовании в качестве источника энергии двигателя внутреннего сгорания (ДВС), снизить расход топлива.

Вторым путем повышения технико-экономических показателей привода является использование новых типов гидромашин с улучшенными характеристиками. Рассмотрим пример применения таких гидромашин в трансмиссии мобильного транспортного средства. Известна гидравлическая противобуксовочная система. Основой данной системы служит сдвоенный насос. В нормальном транспортном режиме подача обоих насосов складывается и подается в гидролинию, общую для двух мотор-колес (или осей). При попадании одного из колес на участок с низкими сцепными свойствами начинается буксование транспортного средства, т. е. весь расход рабочей жидкости подводится к одному (буксующему) колесу, остальные же остаются неподвижными. В этом случае расход сдвоенного насоса делится и поступает независимо на каждое колесо (ось). Таким образом, появляется техническое противоречие – при нормальной работе привода необходим одинарный насос, а при условии буксования – сдвоенный насос. Стоимость сдвоенного насоса незначительно меньше стоимости двух одинарных насосов и значительно больше стоимости подобного одинарного насоса того же объема.

Все это и привело к идее создания насоса, который сочетал бы в своей конструкции преимущества одинарного и сдвоенного насосов. Этот насос имеет два устройства подвода-отвода рабочей жидкости и блок регулирования, позволяющий делить подачу насоса между двумя этими устройствами. В транспортном режиме поток рабочей жидкости поступает только в одну гидролинию, т. е. работает как одинарный насос. В случае необходимости поток рабочей жидкости делится на два, т. е. получается сдвоенный насос, при этом подачу можно делить в различном сочетании (1:1, 1:3, 1:5 и т. д.).

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ ВОЗДУХА В ШИНАХ НА НАГРУЖЕННОСТЬ ПОДМОТОРНОЙ РАМЫ СКРЕПЕРА МОАЗ – 6014

М.Э. Подымако

*Могилевский государственный технический университет,
Республика Беларусь*

Рабочий цикл скрепера состоит из рабочего и транспортного режимов. В рабочем режиме наличие подвески может вызывать явление самозатягивания или самовыталкивания рабочего органа скрепера, что приводит к неуправляемому процессу. Поэтому в большинстве скреперов подвеска отсутствует, и в этом случае единственным упругим и одновременно демпфирующим элементом являются шины, которые полностью определяют колебания и плавность хода машины.

Целью данной работы является исследование влияния давления воздуха в шинах на нагруженность подмоторной рамы тягача скрепера. В качестве расчетного случая принят один из экстремальных, с точки зрения нагруженности, режимов: наезд колесами одного борта груженого скрепера на единичную неровность.

Инерционная сила в вертикальной плоскости от агрегата или элемента определяется по формуле:

$$F_{ii} = m_i \cdot (\ddot{z} \pm \ddot{\varphi} \cdot l_{\varphi i} \pm \ddot{\gamma} \cdot l_{\gamma i}),$$

где m_i – масса i -го агрегата или элемента, кг; \ddot{z} – вертикальное ускорение центра масс скрепера, м/с^2 ; $\ddot{\varphi}$, $\ddot{\gamma}$ – угловые ускорения скрепера, соответственно, относительно поперечной и продольной осей, проходящих через центр масс скрепера, с^{-2} ; $l_{\varphi i}$, $l_{\gamma i}$ – расстояния, соответственно, от поперечной и продольной осей скрепера до центра масс i -го агрегата или элемента, м.

На графиках рис. 1-2 показаны зависимости инерционной силы тягача от давления воздуха p (МПа) в шинах и высоты неровности h (м) для скоростей движения 10-40 км/ч (2,78–11,1 м/с).

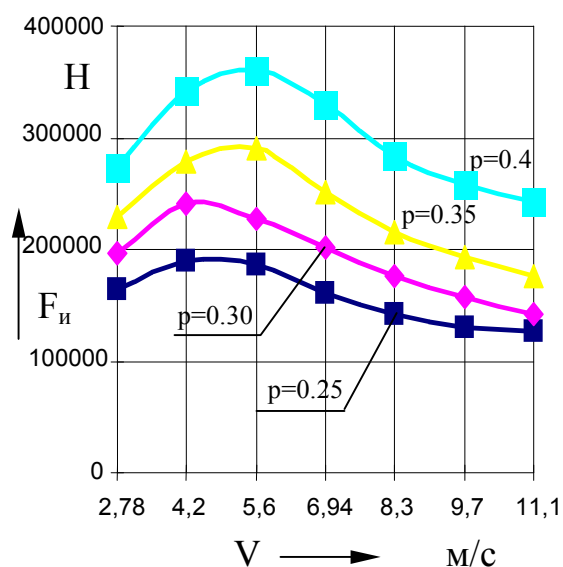


Рис. 1. Зависимость инерционной силы тягача от давления в шинах ($h=0,35$ м)

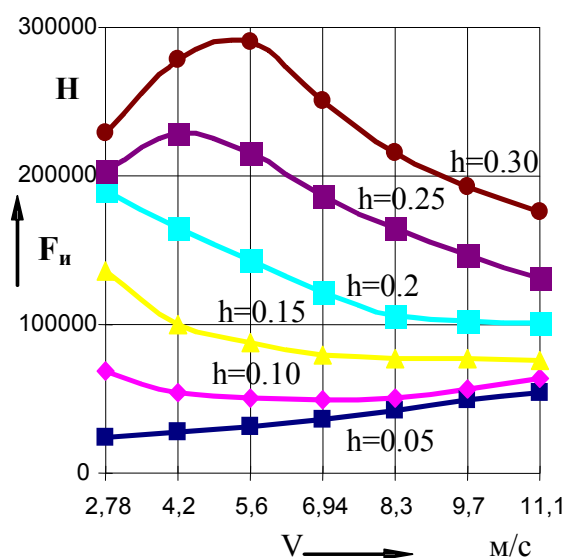


Рис. 2. Зависимость инерционной силы тягача от высоты неровности ($p=0,35$ МПа)

Анализ графика рис. 1 показывает, что уменьшение давления в шинах на 15 % позволяет снизить величину инерционных сил на 20-40 %.

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ОСОБЕННОСТИ МОРФОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТНО МОДИФИЦИРОВАННЫХ РЕЗИН

М.А. Ярмоленко

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

При реализации методов поверхностной модификации резинотехнических изделий удается значительно снизить поверхностную энергию резины, улучшить ее защитные свойства и получить триботехнические сопряжения, характеризующиеся при определенных режимах эксплуатации минимальными значениями износа и коэффициента трения, и в конечном счете, в 2-5 раз повысить долговечность герметизирующих элементов.

Целью настоящей работы является исследование влияния модифицирования бутадиен-нитрильных резин комбинированными полимерными покрытиями на основе полиуретана (ПУ) и политетрафторэтилена (ПТФЭ) на их триботехнические свойства, изучение морфологии получаемых модифицированных резин, определение эффективности воздействия предварительной активационной обработки поверхности, установление влияния на нее предварительной одноосной деформации резины.

Модифицирование проводилось путем нанесения покрытий методом осаждения из активной газовой фазы, получаемой электронно-лучевым диспергированием исходной смеси полимеров в вакууме. Толщина покрытия определялась при помощи кварцевого измерителя толщины и составляла 0,5 мкм. Предварительная активационная обработка поверхности резины перед нанесением покрытия осуществлялась в плазме низкочастотного тлеющего разряда (в течение 120 с) ионами остаточного воздуха при токе 10 мА и напряжении 1500 В.

Истирание резины производилось при возвратно-поступательном движении по схеме шарик–плоскость на микротрибометре ММТ при следующих режимах: нагрузка $N = 0,20$ Н (контактное давление по Герцу $P_{\max} = 2,538 \cdot 10^6$ н/м²); средняя скорость скольжения $V_c = 4,4 \cdot 10^{-4}$ м/с; длина дорожки трения – 8 мм; индентор – стальной шарик диаметром 4 мм.

Изучение морфологии поверхностей модифицированных бутадиен-нитрильных резин осуществлялось на растровом электронном микроскопе S-806 (Hitachi, Япония).

Показано, что при модифицировании резин различными методами наблюдается весьма значительное (почти в 6 раз) снижение коэффициента трения. Наименьшие значения коэффициента трения ($f_{\text{тр}} = 0,19 - 0,2$) имеют покрытия, формируемые при одновременном диспергировании смеси полимеров ПУ и ПТФЭ в массовом соотношении 2:1. Определено влияние каждого из компонентов бинарного покрытия на коэффициент трения. Проведен сравнительный анализ триботехнических свойств резин модифицированных полимерными покрытиями, получаемыми одновременным диспергированием исходной смеси и послойным нанесением отдельных ее компонентов.

На основании анализа РЭМ изображений поверхностей модифицированных резин был подтвержден различный механизм диспергирования ПУ и ПТФЭ. Определена морфология покрытий, получаемых при осаждении летучих продуктов диспергирования смеси ПУ и ПТФЭ при различном их соотношении. Показано влияние предварительной активационной обработки резин на структурную неоднородность получаемых бинарных покрытий, а также на начальные стадии роста полимерных покрытий.

Установлено появление анизотропии триботехнических свойств для предварительно деформированных и модифицированных в активной газовой фазе резин.

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ И ИЗНОС ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ШИН

Ю.И. Фомичев, Э.А. Томило

Московский государственный технический университет «МАМИ», Россия

Камерные и бескамерные шины представляют собой торообразные незамкнутые в меридиональном направлении оболочки вращения. Шина является многослойной оболочечной конструкцией. В настоящей работе объектом исследования выбрана сверхнизкопрофильная радиальная шина 175/70R13 модели ИН-251. Основными нагрузками при эксплуатации данной шины являются внутреннее давление величиной 2 кгс/см^2 и радиальная нагрузка от веса автомобиля в 400 кгс. При прикладывании данной вертикальной нагрузки на накачанную шину между шиной и плоской опорой (дорогой) возникает реактивное контактное давление, которое распределяется по ширине беговой дорожки вдоль меридиана и на 30° по окружности шины.

Для расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) рассматриваемой сверхнизкопрофильной радиальной шины применен программный комплекс расчета составных многослойных осесимметричных ортотропных оболочечных конструкций при неосесимметричных температурно-силовых нагрузках [1]. Метод расчета основан на методе конечных элементов и на методе Фурье.

Выполнено три вариантных расчета. Во всех вариантах механические свойства армированных силовых слоев приводились к свойствам ортотропного материала.

В первом варианте рассчитывалось НДС шины при действии только внутреннего осесимметричного давления. Определено контактное противодействие обода колеса на борт шины.

Во втором варианте рассчитано НДС накачанной шины при воздействии неосесимметричной нагрузки от веса автомобиля. Расчет выполнялся с исходными рассчитанными жесткостными характеристиками силовых слоев. Прогиб в центре пятна контакта получился меньше экспериментального.

В третьем варианте рассчитано НДС накачанной шины при воздействии неосесимметричной нагрузки от веса автомобиля и сниженной жесткости бреккерных слоев. Получен экспериментальный прогиб. Определены все компоненты НДС.

Для расчета шины на износ разработана методика, в которой линейный износ h шины рассматривается как величина, пропорциональная удельной работе сил трения [2]. Получено следующее выражение

$$h = \xi \lambda^2 f^2 P^{4/3} C_2^{2/3} L / 16,5 C_1 R^{5/3},$$

где λ – коэффициент Ляме; f – коэффициент статического трения; P – погонная нормальная нагрузка; C_2 и C_1 – нормальная и касательная жесткости шины, соответственно; L – пройденный путь в процессе эксплуатации; R – радиус шины; ξ – коэффициент пропорциональности.

Коэффициент ξ определяется экспериментально методом ускоренных испытаний шины на износ. Зная величину коэффициента ξ , можно приближенно прогнозировать долговечность шины по линейному износу ее протектора.

Литература

1. Фомичев Ю.И. Программный комплекс прочностного анализа осесимметричных оболочечных конструкций при неосесимметричном нагружении // Научные труды II Международного семинара «Современные проблемы прочности» имени В.А. Лихачева. – Новгород: НовГУ им. Ярослава Мудрого, 1998. – Т. 2. – С. 82 – 86.
2. Глаголев Н.И., Томило Э.А. Трение качения, тяга, напряженное состояние и износ пар качения. – М.: ИПЦ «Финпол», 1996. – 187 с.

СЕКЦИЯ Г. ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

КВАНТОВЫЙ ПОДХОД К ИЗМЕРЕНИЮ И АНАЛИЗУ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ (АЭ)

М.Д. Банов, Ю.Е. Пионтек, В.Н. Турко

Авиационный институт РТУ, РНЭЦ “АВИАТЕСТ”, г. Рига, Латвия

Каждый элементарный акт АЭ – разрыв межатомных связей, срыв лавины дислокаций с точек закрепления, быстрое образование свободной поверхности (например, скачок микротрещины) – сопровождается импульсным излучением освобожденной энергии в матрицу материала. А известные приборы регистрируют число превышений сигналом установленного уровня дискриминации, максимальную амплитуду сигнала, длительность импульсов и время их нарастания.

Очевидно, что перечисленные параметры сигнала несут косвенную информацию об энергии АЭ, выделяемой в процессе разрушения материала.

Трудности с измерением энергии АЭ обусловлены двумя факторами. С одной стороны, быстроменяющийся сигнал АЭ статистически распределен во времени. А с другой стороны, его необходимо выделить на фоне низкочастотных помех. Причем, уровень помех может на несколько порядков превышать уровень сигнала АЭ.

Для выделения сигнала АЭ применяют фильтры, полагая, что спектр сигнала на выходе усилительно-преобразовательного канала $S_{\text{вых}}(\omega)$ и спектр сигнала, воздействующего на датчик $S_{\text{АЭ}}(\omega)$, связывает соотношение $S_{\text{вых}}(\omega) = S_{\text{АЭ}}(\omega) \cdot F(\omega)$, где $F(\omega)$ – частотная характеристика усилительно-преобразовательного канала. Вместе с тем, соотношение справедливо при работе фильтров в установившемся режиме, когда собственными переходными процессами можно пренебречь.

Однако между элементарными актами АЭ, распределенными по закону Пуассона, наиболее вероятным является минимальный интервал времени. Поэтому, под воздействием сигнала АЭ до вынужденных колебаний, резонанса и частотной характеристики в фильтрах дело не успевает дойти.

Проблему решает квантовый подход к измерению и анализу сигналов АЭ, разработанный специалистами Авиационного института РТУ и РНЭЦ “АВИАТЕСТ” (Рига), суть которого в следующем.

При общепринятом подходе измерения анализу подвергаются изменения сигнала в зависимости от изменения времени $\Delta\mu = \mu(\Delta t)$. При квантовом подходе в качестве источника информации о сигнале АЭ принимают обратную функцию $\Delta t = \mu^{-1}(\Delta\mu)$ и акт элементарного измерения заключается в определении интервала времени $\tau_i = t_x - t_i$, за который сигнал изменяется на квант (порцию) $\Delta\mu = \text{const}$, где t_i – момент начала измерения; t_x – момент изменения сигнала на квант. Если обосновано выбрана величина кванта АЭ, интервалы приращения сигнала квантами несут достоверную информацию об энергии, выделяемой при разрушении материала. При этом достигается адаптивная дискретизация сигнала, что существенно снижает количество информации, подлежащей передаче по линиям связи, обработке и регистрации.

КОНЦЕПЦИЯ РАЗРАБОТКИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ РЕЖИМАМИ БОЛЬШЕГРУЗНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

В.П. Абрашкин, А.Ю. Ефремов, А.А. Пехтерев, В.Н. Ситников

*Могилевский государственный технический университет,
Республика Беларусь; ПО БелАЗ, г. Жодино, Республика Беларусь*

На кафедре «Электропривод и АПУ» Могилевского государственного технического университета совместно со специалистами отдела электромеханических трансмиссий ПО БелАЗ проводятся работы по созданию и внедрению микропроцессорных систем управления большегрузными автомобилями.

Из всей совокупности основных машинных узлов и агрегатов современного автомобиля особо выделяется энергетическая подсистема, автоматическое управление которой является центральной задачей автоматизации управления автомобилем в целом.

Начата разработка универсальной распределенной микропроцессорной системы управления большегрузными автомобилями.

Концепция построения такой системы:

- распределенность компонентов управляющего устройства в пространстве и во времени, означающая размещение аппаратных компонентов в таких местах автомобиля, в которых будет обеспечено оптимальное соотношение между протяженностью силовых и информационных коммуникаций, а также распределение времени вычисления управляющих воздействий между компонентами;
- комбинированный принцип структурной организации;
- централизованная с информационной точки зрения и распределенная конструктивно структура управления;
- принцип масштабируемости, заключающийся в возможности расширения системы путем простого добавления аппаратных и программных компонентов;
- принцип человеко-машинного управления, заключающийся в частности в том, что, рассматривая тот или иной процесс управления (тот или иной участок управляющего устройства на текущем уровне детализации) не следует заранее, кроме совершенно очевидных случаев, определять исполнителя этой операции – человека или машину;
- принцип интеллектуального управления: под интеллектуальностью следует понимать человекоподобное поведение – из чего следует, что ее можно распространить на подсистемы нижнего уровня устройства управления и рассматривать их как составляющие сенсорных и эффекторных подсистем; для верхних уровней управления термин «интеллектуальность» предполагает применение современных методов управления, например, искусственных нейронных сетей или алгоритмов нечеткого управления.

В соответствии с предложенной концепцией был разработан опытный вариант системы, содержащий микроконтроллер среднего уровня, условно названный «Аксон-100» и несколько микроконтроллеров нижнего уровня «Аксон-10». Микроконтроллер «Аксон-100» координирует процесс управления и осуществляет интерфейс с водителем. Локальные микроконтроллеры «Аксон-10» выполняют отдельные функции управления энергетическими режимами, например, регулирование тока возбуж-

дения генератора и ослабление поля тягового двигателя в автомобилях с электромеханической трансмиссией. Программное обеспечение позволяет программировать контроллеры «Аксон-10» при помощи «Аксон-100», который, в свою очередь, может программироваться от инструментального бортового компьютера.

Опытные экземпляры двух контроллеров «Аксон-10» прошли испытания на автосамосвале БелАЗ-7513 в условиях полигона.

ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМ ИНТЕЛЛЕКТОМ

В.П. Абрашкин, С.А. Рынкевич, Е.Н. Якубов

*Могилевский государственный технический университет,
Республика Беларусь*

В настоящее время автоматизация управления техническими объектами вышла на качественно новый уровень – уровень создания мехатронных систем, использующих искусственный интеллект [1]. Интеллект для технических систем в наиболее общем понимании – это способность к человекоподобному поведению [2]. Интеллектуальной системе присущи следующие функции: понимание какого-либо языка; осмысленные восприятие, обработка, хранение и поиск информации; самостоятельное принятие решения в зависимости от текущей ситуации; возможность совместной работы с другими такими же системами.

В Могилевском государственном техническом университете ведутся работы по созданию систем управления мехатронными компонентами в составе управляемых технических устройств, таких как автомобили и многодвигательные электроприводы сложных технологических установок. Разработаны технические требования и принципы построения мехатронной системы управления с распределенным интеллектом.

В целях расширения возможностей управления предлагается распределить интеллектуальные функции между отдельными компонентами системы. Это достигается за счет включения в состав компонентов системы локальных семантических интерпретаторов, обеспечивающих общение компонентов на общем языке с элементарными семантическими конструкциями, ориентированными на реализацию в конкретных микропроцессорных архитектурах для встраиваемого применения. Предусматриваются компоненты визуализации с драйверами для различных дисплеев, в том числе для графических дисплеев с сенсорными пленками. Компоненты обработки информации совместно с компонентами визуализации, а также программно-аппаратными сенсорными и эффекторными компонентами образуют библиотеку макроэлементов, из которых можно конструировать систему управления наподобие Simulink-моделей пакета Matlab.

В системе предусмотрена возможность интеллектуальной обработки информации с использованием средств нечеткой логики и аппарата искусственных нейронных сетей. Работа с информацией в системе основана на принципах интеллектуальности ввода, преобразования, накопления и обмена. Интеллектуальность ввода и преобразования информации заключается в широких возможностях выбора методов измерения и преобразования сигналов. Под интеллектуальностью накопления понимается размещение информации в форме структурированной базы знаний. Под интеллектуальным обменом информации понимается возможность организации систем типа «мульти-мастер» на основе встроенных интерфейсов с семантическими фильтрами на входах.

Литература

1. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П. Принципы организации интеллектуального управления мехатронными системами //Мехатроника. – 2001. – № 1. – С. 29-38.
2. Лохин В.М., Захаров В.Н. Интеллектуальные системы управления: понятия, определения, принципы построения //Мехатроника. – 2001. – № 2. – С. 27-35.

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ РЕЖИМАМИ АВТОМОБИЛЯ
С ГИДРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИЕЙ****В.П. Тарасик, С.А. Рынкевич***Могилевский государственный технический университет,
Республика Беларусь*

Потенциальные свойства автомобиля в реальных условиях эксплуатации не используются в полной мере, что снижает его эффективность. Это объясняется влиянием окружающей среды, создаваемыми этой средой помехами, а также несовершенством существующих систем управления. Автоматизация управления позволяет в значительной степени улучшить показатели эффективности автомобиля, однако, как показывает опыт, полный учет всевозможных факторов могут обеспечить лишь адаптивные системы. При этом возникает необходимость изучения физических свойств объекта управления, внешней среды и человека как неотъемлемого звена автоматизированных систем управления (АСУ). АСУ должны принимать правильные решения по управлению автомобилем и одновременно обеспечивать его безопасность, устойчивость, управляемость. Для этого АСУ должны использовать большой объем информации, обрабатывать ее в режиме реального времени и обладать свойствами, присущими логическому мышлению человека. Такие системы называют интеллектуальными системами управления (ИСУ). При их создании возникают проблемы разработки алгоритмов и программного обеспечения, обеспечивающих повышение показателей эффективности и безопасности.

В Могилевском государственном техническом университете проводятся исследования ИСУ энергетическими режимами двигателя и трансмиссии автомобилей и городских автобусов. Цель данной работы – исследовать эффективность интеллектуального управления городским автобусом МА3-103 полной массой 18 т, оснащенного двигателем мощностью 169 кВт и гидромеханической трансмиссией.

В процессе исследований была разработана методика синтеза алгоритмов ИСУ для автобуса. В ее основу положен математический аппарат теории нечетких множеств.

Проведены исследования на математических моделях с имитацией внешних условий и режимов движения городского автобуса по типовому маршруту протяженностью 6800 м, включающему остановки и административные ограничения (дорожные знаки и светофоры). Автомобиль рассматривался как система с сосредоточенными параметрами, функционирующая в условиях внешней среды, оказывающей на систему многофакторные случайные воздействия. Физические свойства объекта описывались системой обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений. Выбраны следующие информационные переменные: скорость и ускорение автомобиля, положения педалей акселератора и тормоза, номер включенной передачи, скорости изменения положения педалей акселератора и тормоза, величина уклона продольного профиля опорной поверхности дороги. Характеристики информационных переменных описаны функциями принадлежности. Для учета характеристик внешней среды и управляющего воздействия водителя составлены 30 продукционных

правил. Для оценки эксплуатационной эффективности автобуса при движении по маршруту использованы следующие критерии: средняя скорость движения на маршруте; средний путевой расход топлива; удельная производительность. Безопасность оценивалась по способности ИСУ распознавать и прогнозировать опасные ситуации, для чего были составлены соответствующие критерии.

Получены результаты, позволяющие прогнозировать повышение показателей скоростных свойств и топливной экономичности на 5,5 – 6,5 % и безопасности автомобиля с интеллектуальным управлением по сравнению с управлением по программе, не обладающей адаптивными свойствами.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЙ НЕСТАЦИОНАРНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ

К.С. Матвийчук

Институт механики им. С.П. Тимошенко НАН Украины, г. Киев

Исследуются свойства технической устойчивости динамических состояний систем автоматического управления переменной структуры с нестационарными внутренними параметрами при существовании внешних воздействий на функционирование систем. Нестационарные внутренние параметры рассматриваемых систем изменяются с ограниченной скоростью, непрерывно в заданных диапазонах при подходяще выбранных параметрах разрывных законов управления процессами, с регулированием по координате рассогласования и по внутренней исполнительной координате и их производных конечного порядка. Коэффициенты заданных уравнений движения системы изменяются во времени и скачкообразно совместно со скачкообразным изменением параметров регулирования процесса. Получены достаточные условия технической устойчивости по мере заданных нестационарных, внешне возмущаемых динамических процессов переменной структуры при всех возможных начальных распределениях значений из заранее заданного относительно меры множества начальных состояний. Применяется прямой метод Ляпунова и метод дифференциальных неравенств с использованием свойств нормированных положительно определенных квадратичных форм. Для установления критериев технической устойчивости заданных динамических систем переменной структуры в статье выбраны соответствующие исходному процессу скалярные задачи Коши сравнения. Построена связь между свойствами собственных значений квадратичных форм соответствующих функций Ляпунова и полученными критериями технической устойчивости заданных процессов с переменной структурой. Предложенный в работе подход исследования технической устойчивости вынужденных движений в нестационарных системах с переменной структурой не зависит от условий существования в системах скользящего режима, в основе которого лежит главное идеализированное предположение о возможных мгновенных переключениях в процессе регулирования. Формулируемые в настоящей работе условия технической устойчивости характерны не только тем, что управляемый процесс с переменной структурой рассматривается на заранее заданном ограниченном интервале времени, но и тем, что ограничения на начальные состояния процесса не зависят от условий заданного мажорирования последующих состояний регулируемого процесса в течение заданного промежутка времени. Необязательность условия отрицательной определенности или неположительности полной производной функции Ляпунова на состояниях исходного процесса, в отличие от устойчивости по Ляпунову, расширяет область значений для параметров управляемого исходного процесса [1, 2].

Литература

1. Матвийчук К.С. О технической устойчивости вынужденных систем автоматического управления с переменной структурой // ПИМ. – 2001. – Т. 37. – № 3. – С. 112-124.
2. Матвийчук К.С. Условия технической устойчивости решений автономных дифференциальных уравнений с разрывным управлением // Дифференц. уравнения. – 2001. – Т. 37. – № 9. – С. 177-1185.

АНАЛИЗ УРАВНЕНИЯ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ МЕТОДОМ КОМПЕНСАЦИИ

В.И. Луковников, Ю.А. Рудченко

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь

Эффективность применения безредукторного электропривода возвратно-вращательного (колебательного) движения с мягким реверсом обусловлена тем, что он позволяет не только уменьшить металлоемкость и исключить электромеханические удары в рабочей машине, но и осуществить плавное оперативное регулирование частоты и амплитуды колебаний, облегчить интеграцию привода с рабочим инструментом, повысить динамические и энергетические показатели, а значит, в целом повысить производительность рабочей машины и качество выпускаемой продукции.

Цель работы заключается в создании математического обеспечения для анализа и синтеза условий возникновения, устойчивости и бифуркаций автоколебаний в однофазном и трехфазном электродвигателе для его выбора в качестве силового элемента стенда испытания пружин.

Предварительно было получено уравнение автоколебательного движения трехфазного асинхронного электродвигателя, которое затем было преобразовано в дифференциальное уравнение интегральных кривых. Используя идею компенсации в установившемся режиме диссипативных сил активными «подпитывающими» электромагнитными усилиями асинхронного электродвигателя, удалось построить фазовые траектории движения системы «трехфазный АД – линейная пружина» и определить бифуркационные диаграммы.

Их совокупность позволяет получить критериальные уравнения, определяющие условия возникновения устойчивых и неустойчивых автоколебаний, что является научной основой построения инженерной методики проектирования автоколебательного асинхронного электропривода стенда испытания пружин.

Преимущество используемой нами идеи компенсации при решении уравнения движения перед общеизвестным методом Ван дер Поля, который по нашей проверке дает идентичный результат, заключается в том, что в критериальные соотношения удается ввести кроме уравнений связи параметров нагрузки, АД и его электропитания еще и начальные условия пуска, которые существенно влияют на получение устойчивого автоколебательного режима.

Литература

1. Луковников В.И., Веппер Л.В. Исследование автоколебательного движения однофазного асинхронного электродвигателя с линейной пружиной на валу // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2001. – № 2. – С. 33-42.

**ЛИНЕЙНО НЕЗАВИСИМЫЙ БАЗИС В СИСТЕМАХ
ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ****Б.А. Верига, Н.И. Вяхирев***Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

Для передачи информации по линиям связи широко используется разложение сигналов по различным системам ортогональных базисных функций. В [1] решена задача оптимизации базисных функций, которые вне заданных интервалов времени и частоты имеют минимальную энергию. Однако явного выражения функций нет и поэтому их практическая реализация очень затруднительна. В [2] предложены функции, которые по величинам энергии вне заданных интервалов времени и частоты не уступают функциям, полученным в [1]. Они выражаются в явном виде и, что самое главное, легко реализуются на практике.

В докладе рассмотрена предложенная в [2] система базисных функций

$$\varphi_k(t) = \frac{\sin N\omega_0(t - k \cdot \Delta t)}{N \cdot \sin \omega_0(t - k \cdot \Delta t)} \cdot \cos^p(t - k \cdot \Delta t), \quad (1)$$

где $k=0, 1, 2 \dots N$, N , ω_0 , p – параметры; $\Delta t = \pi/N\omega_0$ – интервал дискретизации. Функции (1) являются неортогональными, но линейно независимыми, имеют ограниченный по частоте спектр. В точках отсчета $t_k = k\Delta t$ лишь одна функция (1) не равна нулю, остальные обращаются в нуль. Базисные функции (1) содержат конечное число боковых лепестков. Учитываются лишь те лепестки, амплитуда которых убывает при удалении от максимума функции.

Коэффициенты разложения s_k сигнала по базисным функциям (1) определяются из решения системы линейных уравнений $[V]=[r] \cdot [C]$. Элементами матрицы $[r]$ являются коэффициенты корреляции между функциями $\varphi_k(t)$ и элементами столбца $[V]$ – коэффициенты корреляции между функцией $\varphi_k(t)$ и сигналом.

Практическая реализация определения коэффициентов разложения s_k довольно проста. Предварительно вычисляется матрица $[r]^{-1}$. Обращение $[r]$ не вызывает сложности, так как она является симметричной матрицей Тёплица. Обратная матрица так же является симметричной матрицей Тёплица. Каждый коэффициент s_k получается как линейная комбинация величин v_n с известными коэффициентами из матрицы $[r]^{-1}$. Эта операция может быть выполнена с помощью сумматоров на операционном усилителе.

Таким образом, неортогональность функций (1) не является серьёзным препятствием к их применению для разложения сигналов и использованию в системах передачи информации. В докладе обсуждается возможная реализация модема в системах передачи информации.

Л и т е р а т у р а

1. Котельников В.А. Импульсы с наименьшей энергией в спектре за пределами заданной полосы //Радиотехника и электроника. – 1997. – Т. 42. – № 4. – С. 436-441.
2. Осипенко И.В. Кандидатская диссертация. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2002.

**АСИНХРОННЫЙ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ
РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ С ИЗМЕНЕННЫМИ
ПОЛЮС-ФАЗАМИ В ТОРЦЕВОЙ ЧАСТИ СИЛОВОГО РОТОРА****О.Н. Парфенович***Могилевский государственный технический университет,
Республика Беларусь*

Асинхронный с короткозамкнутым ротором регулируемый электродвигатель (1), у которого ротор вентилятора встроен в полюю, выступающую за пакет статора, часть силового ротора, не обеспечивает интенсивного отвода электрических потерь от силового ротора, если обмотка статора выполнена многополюсной.

У многополюсных электромашин, указанной конструкции, частота вращения малого ротора вентилятора не будет превышать значения $n = \frac{60f}{p}$ (здесь f – частота напряжения сети, Гц; p – число пар полюсов обмотки статора двигателя). Тем самым снижаются условия охлаждения электродвигателя, ухудшается использование его по выходной мощности и моменту при работе на естественной и регулировочных (напряжением) характеристиках.

Указанный недостаток устранен в конструкции двигателя с измененными полюс-фазами в торцевой части его силового ротора (рис. 1).

Электродвигатель содержит: статор 1 с сердечником; ротор 2 с удлиненным сердечником; стержневую обмотку 3 части ротора 4 в пределах длины сердечника статора 1 и стержневую обмотку 5 части ротора 6, выступающей за сердечник статора 1; короткозамкнутые кольца 7 на торцах ротора 2, кольцевую перегородку 8; отверстия 9 в подшипниковом щите 10 двигателя; ротор 11 вентилятора со стержневой обмоткой и лопастями вентилятора 12; лопасти теплорассеивателя и вентилятора 13, закрепленного на короткозамкнутом кольце 7 выступающей части ротора 6; коллектор-распределитель 14, состоящий из распределительных дисков 15, 16, разделенных радиальными перегородками 17 на секторы 18; шесть кольцевых коллекторов 19, связанных токопроводящим материалом с секторами 18 через отверстия 20, 21.

Такая конструкция электродвигателя позволяет получить частоту вращения ротора 11 вентилятора 12, соответствующую 2-полюсному асинхронному электродвигателю, близкую к 3000 об/мин, независимо от числа пар полюсов статора 1 двигателя. Для этого необходимо чтобы распределительный диск 16, примыкающий к пакету части ротора 6, имел шесть секторов (по числу полюс-фаз двухполюсного трехфазного электродвигателя) и, соответственно, шесть отверстий 21 в этих секторах, распределительный диск 15, примыкающий к пакету ротора 4, имел количество секторов, соответствующее числу полюс-фаз обмотки статора 1 электродвигателя и такое же количество отверстий 20 (по одному в секторе).

Через отверстия 20, 21 в секторах 18 полюс-фазы части ротора 4 с помощью кольцевых коллекторных шин 19 соединяются с одноименными полюс-фазами части ротора 6.

Принцип работы электродвигателя следующий. При подаче трехфазного напряжения на обмотку статора 1, например шестиполюсной машины, силовой ротор 2 на естественной характеристике будет вращаться с частотой близкой к 1000 об/мин, а ротор 11 вентилятора 12 будет вращаться с частотой близкой к 3000 об/мин, независимо от частоты вращения ротора 2, и в том случае, если последняя регулируется изменением напряжения на обмотке статора 2. При этом производительность вентилятора 12 вос-

растает в 9 раз. Таким образом улучшаются условия охлаждения электродвигателя, что позволяет эффективнее использовать массогабаритные параметры электродвигателя на 1 кВт его полезной мощности.

Предлагаемая конструкция расширяет возможности использования параметрического (напряжением) регулирования частоты вращения асинхронного с к.з. ротором электродвигателя

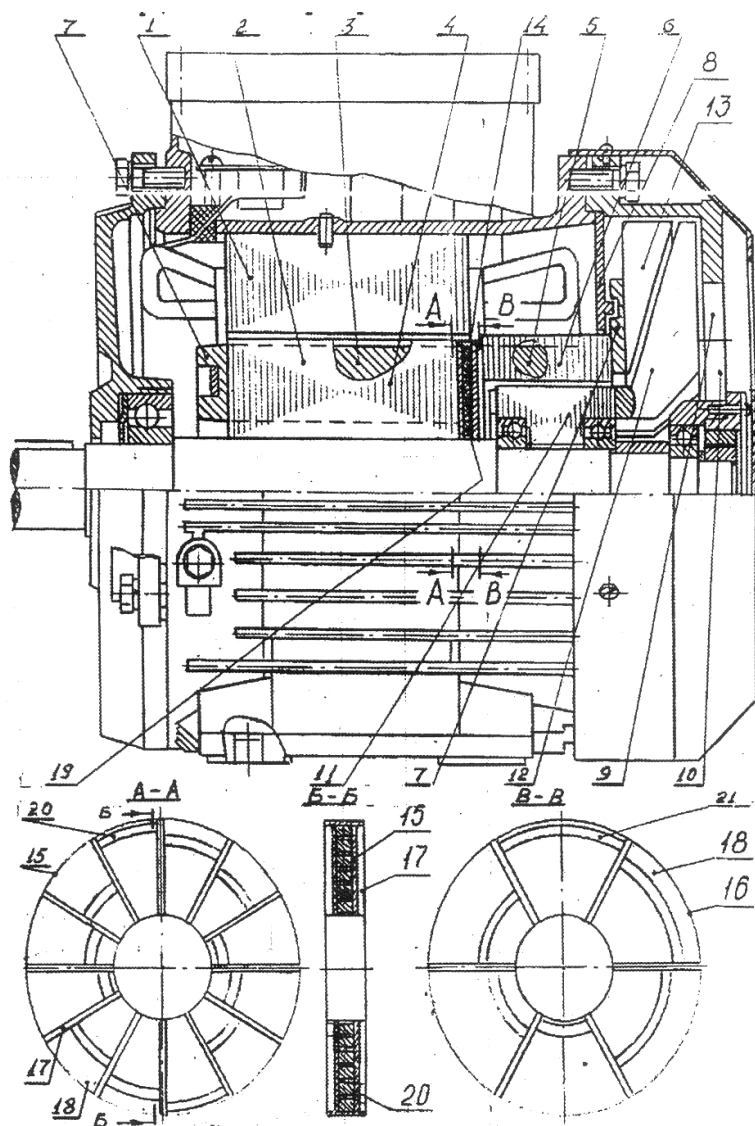


Рис. 1. Электродвигатель с измененными полюс-фазами в торцевой части ротора

Литература

1. Парфенович О.Н., Кебеде Д.Н. Регулируемый асинхронный с короткозамкнутым ротором электродвигатель в электромеханотронном исполнении // Энергетика (Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ). – 1998. – № 3. – С. 42-45.

ВЛИЯНИЕ СПОСОБОВ ТОРМОЖЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НАГРУЗОЧНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В.А. Савельев

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь

В [1] предложено для лабораторных испытаний различного рода приводов вращательного движения использовать нагрузочный электропривод (ЭП) – устройство, позволяющее физически моделировать на валу исследуемого двигателя момент сопротивления. В соответствии с изложенным в [2], возможности такого ЭП должны позволять моделировать с заданной точностью любой по величине и знаку момент сопротивления при любой по величине и знаку скорости вращения исследуемого привода.

Использование различных способов торможения при реализации нагрузочного ЭП накладывает свои ограничения на диапазон возможных значений момента сопротивления. Рассмотрим эти ограничения.

При использовании динамического торможения необходимо замкнуть цепь якоря на тормозное сопротивление с широтно-импульсным регулированием последнего в замкнутой системе с обратными связями по скорости и току. При таком способе торможения будут ограничены:

- величина минимального момента сопротивления при максимальной скорости за счёт конечной величины тормозного сопротивления;
- величина минимальной скорости при максимальном моменте сопротивления за счёт естественного суммарного сопротивления якорной цепи машины;
- максимальная мощность нагрузочного электропривода за счёт ограниченной мощности рассеивания тормозного сопротивления;
- возможность перевода привода в двигательный режим.

Таким образом, главным сдерживающим фактором является необходимость реализации достаточно большого по номиналу тормозного сопротивления со значительной мощностью рассеивания.

При использовании торможения противовключением регулирование также осуществляется в замкнутой системе с обратными связями по скорости и току. Якорь нагрузочной машины питается от регулируемого преобразователя, причём, напряжение имеет знак, противоположный ЭДС вращения. Для получения достаточно мягких механических характеристик разомкнутого привода, также необходимо вводить достаточное добавочное сопротивление. Как следствие, ограничения будут, в основном, аналогичны рассмотренным в предыдущем случае.

С точки зрения автора, наиболее приемлемым способом торможения является рекуперативное. Такой способ не требует введения добавочного сопротивления, за счёт чего значительно сокращается расход энергии, появляется возможность испытания мощных приводов, а область возможных значений момента сопротивления и скорости вращения ограничена только возможностями нагрузочной машины.

Литература

1. Савельев В.А. Универсальный испытательный стенд //Материалы междунар. НТК «Современные проблемы машиноведения». – Гомель: ГПИ им. П.О. Сухого, 1998. – С. 111-113.
2. Кочубиевский И.Д., Стражмейстер В.А. Динамическое моделирование нагрузок при испытаниях автоматических систем. – М.–Л.: Энергия, 1965. – 144 с.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ С ТОРМОЗНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

В.В. Соленков, В.В. Брель

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

Асинхронные двигатели с электромеханическими тормозными устройствами (АД с ЭМТУ) предназначены в основном для повторно-кратковременных режимов работы. В зависимости от предъявляемых к ним требований и условий эксплуатации, частота включений таких электродвигателей изменяется в достаточно широких пределах: от нескольких десятков до двух, трех и даже пяти тысяч включений в час. При этом значительную часть в общей длительности их циклов работы составляют электромеханические переходные процессы.

С учетом известных допущений процесс электромеханического преобразования энергии в АД с ЭМТУ может быть описан системой дифференциальных уравнений. Отличие её от общеизвестных систем состоит в наличии дополнительного слагаемого $2 \cdot u_s / 3$, учитывающего напряжение u_s на обмотке растормаживающего электромагнита, включенного последовательно с одной из фаз двигателя и слагаемого M_T , учитывающего тормозной момент из-за трения фрикционных накладок механического тормоза.

Конструктивные и схемные особенности, присущие разным типам тормозных электродвигателей, не влияют на вид предложенной математической модели, но заставляют специально формировать переменные u_s и M_T в каждом конкретном случае. В работе показаны особенности формирования u_s и M_T для двух схем управления АД с ЭМТУ. В одной из них последовательно с одной из фаз базового двигателя включен однообмоточный электромагнит, а во второй – двухобмоточный электромагнит с выпрямителем и форсировкой.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили выработать рекомендации, которые следует принимать во внимание при проектировании тормозных электродвигателей на базе единой серии 4А.

1. Наличие дополнительного тормозного момента на валу при пуске, характерное для АД с ЭМТУ нормально-замкнутого типа, приводит к увеличению максимального (ударного) значения электромагнитного момента не более, чем на $0,5 \cdot M_{баз}$, а времени разгона до установившейся скорости в $1,6 - 2,5$ раза по сравнению с соответствующими характеристиками обычных асинхронных двигателей.

2. Чем меньше затухание электромеханических переходных процессов в базовых асинхронных двигателях, тем больше влияние на эти процессы электромагнита тормозного устройства в несимметричных схемах управления АД с ЭМТУ.

3. Время трогания растормаживающих электромагнитов постоянного тока с форсировкой, применяемых в АД с ЭМТУ, не должно превышать $0,03-0,04$ с.

МНОГОРЕЖИМНЫЙ ТИРИСТОРНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД РОЛЬГАНГОВ

Д.Н. Комяков

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь

В настоящее время в металлургической промышленности на машинах производства проволоки для охлаждения закольцованной проволоки используется рольганг с много-режимным электроприводом принудительного воздушного охлаждения.

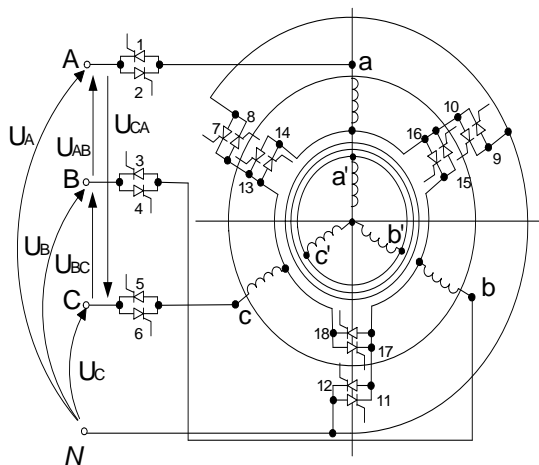


Рис. 1. Схема асинхронного универсального электропривода периодического движения в трехфазном исполнении

1 режим – это режим рабочей скорости, которая обеспечивает нормальное охлаждение при оптимальной производительности машины и максимальном качестве проволоки.

2 режим обеспечивает ползущую скорость, диапазон этой скорости достаточно велик – от нескольких оборотов в минуту до половины рабочей скорости.

3 режим – это режим останова, когда на валках рольганга остаётся раскаленная проволока. Тогда во избежание деформации валков привод переводится в качающийся режим, при котором валки совершают колебательные движения с амплитудой $\pm 180^\circ$.

В действующем приводе используются ДПТ, которые значительно уступают АД в стоимости ремонтных работ и ТО на этом производстве, а так же являются более дорогими и восприимчивыми к факторам окружающей среды. Именно экономические показатели обусловили необходимость замены в данных приводах ДПТ на АД.

Предложено использовать на данной машине тиристорный асинхронный электропривод. Схема такого привода представлена на рис. 1. Управление данным приводом осуществляется за счет коммутаций таким образом, что к трехфазной сети подключаются последовательно статорные обмотки АД в прямом и обратном направлениях. Предлагаемый вариант обеспечит значительно более дешевое и простое получение колебательного и ползущего режимов работы за счет изменения порядка переключения тиристорov и изменения законов их коммутации [1].

Особенностью работы этого привода на малых оборотах является вибрация, возникающая непосредственно на валу двигателя из-за пульсаций напряжения и тока через коммутируемые вентили преобразователя.

Это позволит в аварийных ситуациях, когда требуется низкая скорость, получить кроме заданной скорости ещё и вибрацию, возникающую естественным путем на валу двигателя без применения дополнительных устройств, что уменьшит количество брака за счет снижения пролежней на проволоке во время движения на малых оборотах.

Л и т е р а т у р а

1. Грачев С.А., Луковников В.И. Безредукторный электромашинный привод периодического движения. – Мн.: Выш. шк., 1991.

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ НАГРУЗОЧНОГО СТЕНДА**В.А. Савельев***Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

В настоящее время в практике для электроприводов, работающих в режимах пуска, торможения и реверса и требующих стабилизации скорости в заданном диапазоне регулирования, широко применяются системы с обратными связями по току и скорости. Настройка таких систем с учётом всех требований к показателям качества в установившихся и, особенно, в переходных режимах в конечном итоге определяет производительность всего механизма. Особенно серьёзные проблемы возникают при настройке контура скорости, когда в условиях лаборатории нет возможности увидеть как поведёт себя контур с учётом реальных инерционных звеньев рабочего механизма. В работе [1] проблему наладки электроприводов в условиях лаборатории предлагается решать при помощи универсального нагрузочного стенда.

Автором проанализированы возможности входящего в состав такого стенда нагрузочного электропривода (НЭ) в динамике. При анализе использовалась структурная схема, аналогичная предложенной в [1], с тем отличием, что сигнал компенсирующей положительной обратной связи по скорости поступает не на общий регулятор момента, а непосредственно на вход преобразователя (последовательная коррекция). При таком подходе несколько упрощается реализация условия инвариантности.

При выполнении условия инвариантности, т. е. при полной компенсации возмущающего воздействия со стороны скорости, быстродействие системы при воспроизведении момента сопротивления определяется лишь достаточно малой электромагнитной постоянной времени $T_{я}$ якорной цепи. Характеристическое уравнение такой системы имеет первый порядок, т. е. переходной процесс по заданию является аperiodическим, что соответствует требованию получения минимального перерегулирования. Регулятор момента при этом может быть безынерционным.

Однако, с другой стороны, максимально возможное быстродействие НЭ на основе машины постоянного тока ограничено величиной динамического тока якоря.

Полагая величину $\frac{di_{я}}{dt}$ постоянной (нарастание тока под контролем задатчика интенсивности), можно определить время, за которое ток (момент сопротивления) достигнет установившейся величины ($t_{уст.}$). Для машин малой и средней мощности,

где $\left(\frac{di_{я}}{dt}\right)_{\max} = (30 \div 40)I_{я.ном.}$, величина $t_{уст.} \approx (0,025 \div 0,03)$ с. Для машин большой

мощности, где $\left(\frac{di_{я}}{dt}\right)_{\max} = (15 \div 20)I_{я.ном.}$, $t_{уст.} \approx (0,05 \div 0,07)$ с.

Л и т е р а т у р а

1. Савельев В.А. Универсальный испытательный стенд //Материалы междунар. НТК “Современные проблемы машиноведения”. – Гомель: ГПИ им. П.О. Сухого, 1998. – С. 111 – 113.
2. Луковников В.И., Захаренко С.И., Захаренко В.С., Савельев В.А. Инвариантный электромеханический стенд испытания трансмиссий //Известия вузов. Энергетика. 1999. – № 1. – С. 33- 37.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В НАГРУЗОЧНОЙ ЧАСТИ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СТЕНДОВ С РЕКУПЕРАЦИЕЙ ЭНЕРГИИ

С.И. Захаренко, В.В. Тадарев, В.С. Захаренко, В.А. Савельев

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь

При испытаниях различных двигателей, механических передач от нагрузочной части в первую очередь требуется регулирование тормозного момента или мощности в заданном диапазоне изменения скорости. В некоторых случаях необходим режим “холодной” обкатки при работе нагрузочной машины в двигательном режиме.

Принципиально обеспечить предъявляемые требования могут машины постоянного тока с независимым возбуждением (МПТ), синхронные (СМ), асинхронные с короткозамкнутым (АМКЗ) и фазным (АМФР) ротором.

Каждой из указанных машин требуется управляемый преобразователь в силовой цепи для регулирования момента и скорости. Исключение составляет стенд, в котором двигателем и нагрузочной машиной являются МПТ, что позволяет рекуперировать энергию в цепь якоря двигателя.

Совместно с МПТ используется нереверсивный тиристорный преобразователь. Необходимый режим работы обеспечивается выбором режима работы преобразователя (выпрямительный или инверторный). Недостатками являются: наличие щеточно-коллекторного узла и низкий коэффициент мощности при малых скоростях обкатки.

Применение в нагрузочной части АМКЗ требует использования преобразователя частоты с инвертором тока. Причем, для регулирования момента необходим регулируемый источник реактивной энергии. Стоимость такого преобразователя на порядок и более выше, чем стоимость тиристорного преобразователя. В результате подобная нагрузочная часть практически не конкурентоспособна с остальными видами.

Наиболее полно рекуперация энергии для АМФР осуществляется в схеме асинхронно-вентильного каскада (АВК). Нереверсивный тиристорный преобразователь обеспечивает рекуперацию энергии скольжения в сеть как в тормозном, так и в двигательном режиме. Однако двигательный режим возможен при скорости меньше синхронной, а тормозной – при сверхсинхронной. Недостатком является наличие мощного дросселя в цепи постоянного тока, ограничивающего сквозные токи, не протекающие через обмотку ротора при малом скольжении. Преимуществом оказывается наличие двух каналов рекуперации энергии: по цепи статора и по цепи ротора, что позволяет использовать преобразователь меньшей мощности и обеспечивает более высокий коэффициент мощности рекуперированной энергии, чем с МПТ.

Для СМ только в режиме “горячей” обкатки схема преобразователя аналогична схеме АВК с соответствующими недостатками, а коэффициент мощности такой же, как и при использовании МПТ. Если необходим режим “холодной” обкатки, то в качестве преобразователя требуется преобразователь частоты, что приводит к резкому увеличению стоимости нагрузочного устройства.

Литература

1. Асинхронно-вентильные нагружающие устройства / С.В. Хватов, В.Г. Титов, А.А. Поскробко, В.Ф. Цыпкайкин. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.
2. Захаренко В.С., Савельев В.А. Принципы построения испытательных стендов //Материалы межд. науч.-техн. конф. «Современные проблемы машиноведения». – Гомель: ГПИ им. П.О. Сухого, 1998. – Т. 2. – С. 113 – 114.

**АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ОПЫТОВ
СВОБОДНОГО ВЫБЕГА МОЩНЫХ СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ****В.В. Курганов, Ю.В. Крышнев***Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

Обеспечение устойчивости синхронной двигательной нагрузки при нарушениях внешнего электроснабжения является актуальной задачей промышленной электроэнергетики. Среди известных способов самозапуска эквивалентного синхронного двигателя (ЭСД) предпочтение следует отдать быстродействующему АВР (БАВР), при котором возбужденные СД в течение первого проворота ротора относительно вектора напряжения сети переключаются на резервную секцию шин. При этом обеспечивается непрерывность технологического процесса без предварительной разгрузки приводимых механизмов двигателей.

Алгоритм работы устройства БАВР синхронных двигателей можно условно разделить на 4 этапа: 1) обнаружение факта потери питания нагрузки с СД по изменению направления мощности в питающей линии (в режиме любого КЗ) или по величине углового ускорения ЭСД (в режиме трехфазного КЗ либо в режиме отключения питающей линии); 2) отключение вводного выключателя на аварийной секции шин; 3) измерение величины углового ускорения выбега ЭСД и расчет располагаемого времени до включения секционного выключателя; 4) включение секционного выключателя.

Для успешного внедрения устройства БАВР на конкретном предприятии необходимо предварительно провести опыты выбега защищаемых СД в рабочем диапазоне загрузки приводимых механизмов. Обработка результатов таких опытов позволяет уточнить обобщенный тип приводимого механизма γ , вычислить начальное угловое ускорение свободного выбега ЭСД ε_0 , относительный начальный момент трения m'_{mp} и начальный угол выбега δ_0 .

Разрешающая способность применяемых в настоящее время устройств регистрации аналоговых сигналов всегда позволяет с достаточной точностью определить моменты времени t_i , когда угол выбега ЭСД δ_i равен $n\pi$ рад, где n – целое число полупроворотов ротора ЭСД относительно вектора резервного источника питания. Зная, например, общий вид аналитической зависимости $\delta(t)$ для наиболее распространенного в промышленности вентиляторного типа приводимых механизмов ($\gamma=2$), параметры выбега ЭСД ($\varepsilon_0, m'_{mp}, \delta_0$) можно найти при помощи метода наименьших квадратов. Согласно этому методу, наиболее вероятнейшее значение параметров $\varepsilon_0, m'_{mp}, \delta_0$ дает минимум функции:

$$S = \sum_{i=1}^n (\delta_i - \delta(t_i; \varepsilon_0, m'_{mp}, \delta_0))^2, \quad (1)$$

где n – число экспериментальных точек.

Условие (1) эквивалентно системе уравнений в частных производных, которая может быть решена аналитически только для $\gamma = 0$, а для $\gamma > 0$ ее решение может быть найдено численными методами при помощи ЭВМ.

Анализ 14 осциллограмм опытов выбега мощных СД с приводимым механизмом вентиляторного типа, зарегистрированных на различных промышленных предприятиях, показал высокую сходимость экспериментальных данных с аналитической формулой (для диапазона углов $\delta = 0..6\pi$ среднеквадратическое отклонение находилось в диапазоне 7 – 15 %).

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ ПРИ ПИТАНИИ ОТ ИНВЕРТОРА ТОКА И ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

В.В. Логвин, А.И. Рожков

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

В настоящее время все большее распространение получают асинхронные электроприводы с частотным управлением. Однако существует два подхода реализации питания асинхронного двигателя (АД) при таком способе регулирования. В связи с этим интересен сравнительный анализ двух систем векторного управления при питании АД от автономного инвертора тока (АИТ) и автономного инвертора напряжения (АИН). Посылкой для такого сравнения послужили видимые различия в переходных процессах, как для скорости АД, так и момента им развиваемого.

О том, как строятся системы векторного управления, писалось много. Представлялись функциональные и структурные схемы таких электроприводов (ЭП). Однако большинство авторов приходят к выводу, что непосредственное измерение потока в воздушном зазоре при помощи датчиков Холла не дает необходимой точности. И с развитием цифровой техники величина магнитного потока вычисляется через другие, легко измеряемые параметры двигателя, а именно – снимаемые со статора. Однако реализовать системы, которые бы полностью обходились без использования датчиков, пока не удается.

Функциональные схемы векторных ЭП как и на АИТ, так и на АИН выглядят одинаково. Различиями являются сами преобразователи частоты, то есть их схемная реализация, и сигналы управления, поступающие на инверторы.

Для моделирования переходных процессов для обоих способов питания использовался один и тот же двигатель. Произведен расчет прямого пуска АД на холостой ход и наброс нагрузки на величину момента близкого к критическому.

Величины	АИН	АИТ
Пуск		
$t_{п}, c$	0,402	0,33
$M_{МАХ}, Нм$	95	314,5
$\varepsilon, рад/c^2$	781	1261
Наброс нагрузки		
$t_{п}, c$	0,175	0,018
$\varepsilon_1, рад/c^2$	217	388
$S_x, \%$	12,1	2,2

Сравнение данных говорит о первенстве питания от АИТ в системах, где важной является возможность широкого изменения параметров пуска, и в создании электроприводов с высокой жесткостью механической характеристики. Большая перегрузочная способность позволит создавать системы с высокими нагрузочными моментами при равных мощностях двигателей. Жесткая характеристика приводит к возникновению систем с высокой точностью, а высокое быстродействие позволяет производить регулирование в механизмах с периодическим изменением момента нагрузки (до 6 Гц) от 0 до номинального.

ВИБРОДИАГНОСТИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РОТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ И ПРОЦЕССОВ

В.И. Луковников, Д.А. Хабибуллин, В.В. Логвин

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

Любая машина, имеющая в своей конструкции вращающиеся элементы, подвержена вибрации, причем, каждому агрегату присущ свой “вибропортрет”. Так, построив своего рода паспорт “здорового” агрегата, в процессе эксплуатации можно контролировать текущее его состояние, а также отмечать появляющиеся отличия, которые будут свидетельствовать о появлении дополнительных факторов, влияющих на вибрационное состояние агрегата.

В ГГТУ им. П.О. Сухого разработана методика вибродиагностирования технического состояния роторных агрегатов взрывобезопасных химических, нефтехимических и нефтеперекачивающих производств, согласованная с Проматомнадзором РБ, и получена лицензия на право осуществления на территории Республики Беларусь деятельности по вибродиагностированию электроустановок для химических производств, где возможно образование взрывоопасных сред.

Данная методика используется для вибродиагностирования по общему уровню и спектру вибрации подшипниковых опор роторных агрегатов как с электрическим приводом, так и с другим типом привода.

В методике представлены схемы расположения точек измерения вибрации на типовых роторных агрегатах – насосном, вентиляторном, турбокомпрессорном. В каждой точке вибрацию измеряют в трех взаимноперпендикулярных направлениях: вертикальном, горизонтально-поперечном и осевом по отношению к оси агрегата.

Методика сориентирована на периодический контроль агрегатов с помощью как отечественных, так и зарубежных переносных виброанализаторов типов СК-2300 (Россия, г. Москва, ИТЦ Оргтехдиагностика ДАО, “Оргэнергогаз”) или VIBROTEST 60 (Германия, г. Дрезден, фирма SCHENK), имеющих взрывозащиту вида 1 Exibll AT3/CT5/AT6 и определяющих как общий уровень, так и амплитудно-частотный спектр сигнала вибрации. Для выявления дефектов роторных агрегатов на низких частотах (до 50 Гц) используется информация о виброперемещениях. Дефекты на средних частотах (до 5000 Гц) хорошо выявляются по информации о виброскорости. На высоких частотах (до 50000 Гц) необходимо пользоваться информацией о виброускорении.

Для диагностики общего технического состояния агрегата определяется среднеквадратичное значение (СКЗ) виброперемещения, виброскорости или виброускорения в точках измерения. В соответствии с таблицей “Нормы вибрации и оценки технического состояния роторного оборудования по стандарту ISO 2372” по величине максимального из измеренных в контрольных точках СКЗ устанавливаются четыре оценки состояния роторного агрегата: хорошо (А), пригодно (В), еще допустимо (С), не допустимо (Д). Оценка “не допустимо” характеризует высокую вероятность отказа, в этом случае агрегат останавливают для ремонта.

В методике также приведено определение остаточного ресурса работы агрегата по данным виброизмерений с помощью тренда дефекта.

**ОСОБЕННОСТИ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО И ТОКОВОГО
УПРАВЛЕНИЯ РАЗОМКНУТЫМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ****С.Н. Кухаренко, А.И. Рожков***Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

Современные силовые полупроводниковые преобразователи электроэнергии с цифровым управлением позволяют создать вторичные источники электропитания с характеристиками идеальных источников тока или ЭДС [1,2].

В данной работе на основе единой методологии построены 12 математических моделей разомкнутых электроприводов постоянного и переменного тока при электропитании от реальных и идеальных источников тока и ЭДС, позволяющих произвести обобщенный сравнительный анализ потенциального и токового управлений, с целью выявления их особенностей и получения общих рекомендаций.

Аналитическое и численное исследования матмоделей для случая прямого пуска электроприводов позволили подтвердить известные и установить новые факты. Так, например, было подтверждено, что пуск электродвигателей постоянного тока со всеми видами возбуждения от реального источника тока, идеального и реального источника напряжения всегда возможен при выполнении условий пуска и заканчивается режимом установившегося вращения.

При электропитании же от идеальных источников токов пуска ДПТ с независимым и последовательным возбуждением при выполнении условий пуска, хотя и возможен, но приводит к непрерывному росту скорости и якорного тока. Пуск ДПТ с параллельным возбуждением в этих условиях неопределен, так как его скорость может установиться на двух различных уровнях, в зависимости от постоянных времени якорной цепи и цели возбуждения.

Частотный пуск АД от реального источника тока, идеального и реального источника напряжения тоже всегда возможен и заканчивается установившимся режимом. Пуск же его от идеального источника тока заканчивается автоколебаниями скорости около установившегося положения.

Все это позволило сделать важный вывод – электропривод постоянного или переменного тока, подключенный к идеальному источнику тока, следует обязательно снабжать быстродействующей обратной связью по нагрузочному моменту.

В работе получены критериальные уравнения связи параметров электропитания, электродвигателя и нагрузки, позволяющие оптимально синтезировать такие обратные связи.

Литература

1. Шрейнер Р.Т., Ефимов А.А., Калыгин А.И. Математическое моделирование и управление активными преобразователями //Электротехника. – 2000. – № 10. – С. 42-49.
2. Ефимов А.А., Шрейнер Р.Т. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока. – Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2001. – 250 с.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ АВТОНОМНЫХ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ВИБРАТОРОВ

М.Н. Погуляев

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

Проектирование электромеханических преобразователей (ЭМП) для работы в составе высокочастотных автономных электрогидравлических вибраторов (ЭГВ) имеет свои особенности. Это связано с необходимостью выполнения ряда требований, предъявляемых к таким преобразователям как со стороны гидравлической части вибратора (получение требуемых значений амплитуды линейных колебаний якоря $x_{m.mp}$ и собственной частоты f_0 ЭМП, в 2,5-3,0 раза превышающей максимальную рабочую частоту ЭГВ), так и со стороны электронного источника, питающего ЭМП (полная мощность такого источника $S_{m.ист}$ ограничена). Кроме того, при работе ЭМП на повышенных частотах существенное влияние на его характеристики оказывают такие факторы, как электромагнитная жесткость и ЭДС движения, заметно возрастают потери на гистерезис и вихревые токи. Для преобразователей современных высокочастотных автономных ЭГВ параметры $x_{m.mp}$ и f_0 могут достигать значений: $x_{m.mp} \geq 0,1$ мм, $f_0 = 900 \dots 1000$ Гц при $S_{m.ист} \leq 100$ ВА. Достижение этих, почти предельных величин, невозможно без оптимизационного подхода к проектированию подобных ЭМП.

Целью данной работы является разработка методики оптимального проектирования быстродействующих ЭМП для автономных ЭГВ, отвечающим указанным выше требованиям.

Для создания такой методики использована уточненная автором математическая модель (ММ) обобщенного преобразователя ограниченной мощности, с помощью которой, в частности, была построена ММ электромагнитного мостового преобразователя с поляризацией, применяемого в автономных ЭГВ сейсмокомплексов СВ и СВП. Используя данную модель, были получены необходимые расчетные соотношения и создано математическое обеспечение, пригодное для проведения синтеза ЭМП, оптимального по быстродействию. Его основу составляют уравнения целевой функции (1) и ограничений (2)

$$f_0 = \varphi(d_{тор}, h, m_{зол}, a_{тор}, n_{тор}). \quad (1)$$

$$\begin{cases} I_m \leq I_{m.ист}, \\ x_m \geq x_{m.mp}, \\ B_m \leq k_s \cdot B_s, \end{cases} \quad (2)$$

где $d_{тор}$ – диаметр торсиона; h – размер окна катушки; $m_{зол}$ – суммарная масса золотника и тяги; $a_{тор}$, $n_{тор}$ – расчетные коэффициенты; $I_{m.ист}$ – максимально допустимое значение тока источника питания; I_m , x_m , B_m – расчетные значения амплитуды потребляемого тока, линейных колебаний якоря и магнитной индукции в якоре; B_s , k_s – индукция насыщения материала якоря и коэффициент запаса по насыщению.

После анализа существующих методов решения подобных задач для поиска оптимума целевой функции (1) был выбран метод упорядоченного перебора, не тре-

бующий сложных математических преобразований целевой функции и ограничений. Это позволило разработать простую и эффективную методику, алгоритм и программу расчета параметров быстродействующих ЭМП. Оптимизация конструктивных параметров используемого в сейсмокомплексах СВ и СВП преобразователя с использованием данной методики, позволила повысить его собственную частоту почти в 1,6 раза.

СТЕНД ИСПЫТАНИЯ ПРУЖИН НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Л.В. Веппер, А.В. Козлов

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

Идея применения линейных асинхронных электродвигателей в электроприводах сводится к тому, чтобы устранить кинематические передачи между двигателем и рабочими органами машины. Поэтому механическая часть таких электроприводов лишена каких-либо кинематических передач, а вторичная цепь машины является рабочим органом. Таким образом, электропривод на основе линейных двигателей, в общем, является более надежным, по сравнению с вращающимися двигателями, и имеет более высокий КПД.

В ГГТУ им. П.О. Сухого на кафедре “Автоматизированный электропривод” разрабатывается стенд испытания пружин на основе линейных двигателей.

Стенд испытания пружин состоит из линейного асинхронного двигателя с выведенными статорными обмотками, счетчика количества колебаний на основе путевого выключателя, крепежа пружин и сменного груза, который позволяет добиться устойчивых автоколебаний. Питание стенда осуществляется от трехфазной сети. Двигатель имеет возможность работать как в трехфазном, так и в однофазном режиме, при использовании различных схем соединения статорных обмоток двигателя. Скорость перемещения ротора регулируется изменением числа пар полюсов. Ротор двигателя выполнен полым, что снижает общий момент инерции механизма. Счет числа колебаний необходим для соблюдения методики испытания.

Стенд пригоден для испытания пружин с различной жесткостью. Например, возможно применение данного стенда для испытания пружин при производстве самоходных комбайнов и другой техники.

Методика испытания пружин приведена согласно ГОСТ 16118-70 и состоит в следующем:

1. Пружины сжатия предварительно сжимаются до соприкосновения витков, затем разгружаются и снова нагружаются последовательно до заданных высот или деформаций.

2. Пружины растяжения предварительно растягиваются до максимальной деформации, потом снова разгружаются.

Высота пружины, сжатой до соприкосновения витков, контролируется с помощью универсальных средств измерения как самостоятельная операция. Измерение высоты (длины) пружины растяжения при максимальной деформации, указанной в чертеже или в технологической карте, выполняют универсальными средствами измерения. Испытания выполняются по заданным режимам нагружения, которые указаны в чертеже или другой документации. Если в процессе испытаний произойдет поломка более 10 % пружин предъявленной партии, то испытания повторяют с удво-

енным количеством циклов нагружений. Если при повторном испытании произойдет поломка хотя бы одной пружины, партия считается не выдерживающей испытания.

Часто для испытания пружин применяют кратковременное обжатие. Оно заключается в том, что каждую пружину сжатия обжимают до соприкосновения витков от 3 до 7 раз с чередующимися полными разгрузками, а каждую пружину растяжения растягивают до максимальных деформаций от 3 до 10 раз с чередующимися полными разгрузками.

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ

В.А. Карпов, Е.А. Ляввин, Л.А. Захаренко,

В.И. Шуликов, С.Н. Самсонов

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

Измерение и регулирование температуры является одной из наиболее распространенных операций, используемых в промышленности. Как правило, в качестве первичных датчиков используются термоэлектрические преобразователи (термопары) и термопреобразователи сопротивления (термосопротивления), номинальные статические характеристики которых хорошо изучены [1,2]. До недавнего времени измерители температуры выпускались либо на один, либо на другой тип датчика со всевозможными градациями диапазонов измерения. В связи с появлением современных средств программной обработки сигналов появилась возможность получить в одном устройстве измеритель, способный работать с различными типами датчиков, обеспечивая при этом требуемый диапазон измерений, и реализовать в нем широко используемые в промышленности алгоритмы управлений (П, ПД, ПИД). Кроме того, одним из достоинств микропроцессорной обработки сигналов является возможность программной настройки прибора, что позволяет отказаться от дорогостоящих подстроечных элементов и долговременной процедуры настройки.

В докладе рассматривается универсальный измеритель температуры, предназначенный для работы с платиновыми и медными термосопротивлениями и ТХК и ТХА термопарами. Измеритель реализован на основе PIC – контроллера 16F877, имеющего в своем составе 5-канальный 10-разрядный АЦП, два 10-разрядных ЦАП (в виде ШИМ сигнала), 8Кб 14 разрядной памяти программ. Это позволило реализовать: максимальный диапазон измерения для каждого датчика с погрешностью 0,5 %; гальваническое разделение выходного унифицированного и управляющих сигналов от измерительной цепи; программный выбор типа датчика, уставки температуры, законов управления и их основных параметров; компенсацию температуры холодного спая; инвариантность к влиянию тока питающего термосопротивления и ряд других технических возможностей, рассмотренных в докладе.

Для обеспечения настройки в данном приборе реализован алгоритм автоматической коррекции погрешностей, заключающийся в настройке прибора по двум точкам (двум эталонным напряжениям). Путем решения системы из двух уравнений находится смещение и крутизна каждого канала измерения. Аналогичная процедура используется и для выходного унифицированного сигнала. Отмеченное обстоятельство существенно снижает трудоемкость при настройке измерителя.

Основные технические характеристики измерителя:

Класс точности, %	0,5
Потребляемая мощность, Вт	1,5

Коммутируемые цепи, А/В	2/220
Унифицированный выходной сигнал, mA	0-5/4-20
Габаритные размеры, мм	65X65X100

Схема подключения термопреобразователей сопротивления – трехпроводная.

Информация отображается на 2-строчном 8-символьном ЖКИ.

Настройка и управление режимами работы осуществляется 3 кнопками.

Данным преобразователем предполагается заменить параметрический ряд измерителей ЦР 8001, состоящий из семи приборов.

Л и т е р а т у р а

1. ГОСТ 6651-94 “Термопреобразователи сопротивления.”
2. ГОСТ 3044-94 “Преобразователи термоэлектрические.”

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СЕЙСМОПРИЕМНИКОВ

А.И. Никеевков, В.В. Щуплов

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

Измерение параметров сейсмоприемников без отключения от сейсмодатчика является актуальной задачей в промышленной геофизике, т. к. дает возможность получить более достоверную информацию. Кроме того, такой метод измерения и контроля позволяет оперативно определить неисправные сейсмоприемники.

Как известно [1], эквивалентная схема электродинамического сейсмоприемника имеет вид последовательно включенной катушки индуктивности, активного сопротивления и параллельного колебательного звена – электрического эквивалента механической колебательной системы.

Параметрами, характеризующими работоспособность сейсмоприемника являются: β – степень затухания сейсмоприемника; ω_0 – собственная частота колебаний; K – коэффициент преобразования.

Для проверки этих параметров разработано микропроцессорное устройство, позволяющее без вибрационной платформы определить эти параметры. Измерение параметров осуществляется в несколько этапов. На первом этапе определяется собственная частота по способу резонанса [1]. На втором этапе определяется напряжение на сейсмоприемнике, при этом на сейсмоприемник подаются постоянная и переменная составляющие тока возбуждения. По переменной составляющей тока возбуждения через сейсмоприемник измеряется амплитуда и фаза на катушке сейсмоприемника на некоторой частоте f_1 .

Пропускание постоянной составляющей позволяет затормозить катушку сейсмоприемника и тем самым отключить механический импеданс. На третьем этапе производятся измерения аналогичные второму этапу, но на другой частоте возбуждения сейсмоприемника f_2 . По полученным измерениям производятся вычисления степени затухания, коэффициента преобразования. В качестве дополнительной информации об исправности сейсмоприемника измеряется активное сопротивление катушки сейсмоприемника.

Разработанное устройство включает измерительный и вычислительный блоки. Измерительный блок включает перестраиваемый по частоте генератор тока возбуждения сейсмоприемника, аналого-цифровой преобразователь, схему сравнения, опорный резистор, дифференциальный усилитель, аналоговые ключи. Вычислительный блок состоит из микроконтроллера, устройства клавиатуры и четырехразрядного табло, выпол-

ненного на семисегментных индикаторах. Измерения частоты производятся в диапазоне частот от 3 до 30 Гц, активное сопротивление в диапазоне до 10 кОм.

Устройство позволяет измерить параметры сейсмоприемников типов СВ-5, СВ-10, СВ-20 не только в лабораторных, но и в полевых условиях.

Литература

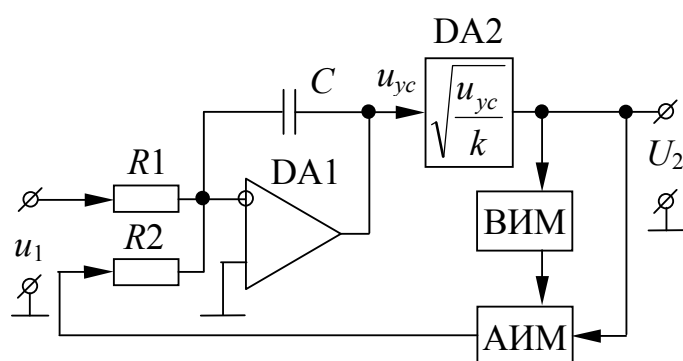
1. Слущковский А.И. Сейсморазведочная аппаратура. – М.: Недра, 1970. – 344 с.

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ФИЛЬТРАЦИИ НА ТОЧНОСТЬ КОМПЕНСАЦИОННОГО КОРНЕИЗВЛЕКАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

С.И. Леонов

*Учреждение образования Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

В измерительно-вычислительных устройствах компенсационного типа степень низкочастотной фильтрации влияет не только на величину пульсаций выходного сигнала постоянного тока или напряжения, но и на точность этих устройств.



Таким устройством является компенсационное корнеизвлекающее устройство (КИУ) [1], предназначенное для линейризации квадратично зависящих от расхода сигналов дифференциально-трансформаторных и емкостных преобразователей разности давлений. Функциональная схема КИУ представлена на рисунке. Принцип действия КИУ заключается в автоматическом уравнивании средних значений входного напряжения u_1 и квадрата выходного напряжения U_2 постоянного тока. Квадрирование напряжения U_2 осуществляется путем импульсного перемножения, при этом время-импульсный модулятор ВИМ преобразует напряжение U_2 методом двухтактного интегрирования в длительность прямоугольного импульса, а АИМ придает импульсу амплитуду, равную U_2 . Разность средних значений напряжения u_1 и периодической последовательности импульсов выделяется интегрирующим усилителем на DA1, а функциональный преобразователь DA2 необходим для коррекции статических и динамических свойств КИУ [1].

Выходное напряжение имеет пульсации, период первой гармоники которых равен длительности полного цикла преобразования ВИМ. Поэтому результат интегрирования этой гармоники в первом такте не равен нулю. Также из-за пульсаций выходного напряжения вершина импульса не будет плоской. Вследствие этого перемножение напряжения U_2 будет производиться с погрешностью

$$\delta_{\Pi}(U_2) = \sin \frac{\pi U_2}{2U_{\text{оп}}} \cdot (\pi k U_2 \cdot \omega CR2)^{-1} \cdot \left[\frac{2U_{\text{оп}}}{\pi U_2} \cdot \sin \frac{\pi U_2}{2U_{\text{оп}}} \cdot \sin \left(\frac{\pi U_2}{2U_{\text{оп}}} + \varphi \right) - \frac{2}{\pi} \cos \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right) \right],$$

где $U_{\text{оп}}$ – опорное напряжение постоянного тока ВИМ; $k=0,1 \text{ В}^{-1}$ – коэффициент пропорциональности DA2; $\omega = 2\pi / (40 \text{ мс})$ – частота первой гармоники пульсаций выходного напряжения; $\varphi = \arctg \left\{ \sin \left(\frac{\pi U_2}{U_{\text{оп}}} \right) \cdot \left[1 - \cos \left(\frac{\pi U_2}{U_{\text{оп}}} \right) \right]^{-1} \right\} - \frac{\pi}{2}$.

Максимальное по модулю значение этой погрешности в диапазоне $U_2=0..10 \text{ В}$ составляет $0,25/(\omega CR2)$. Выходное напряжение КИУ имеет вид:

$$U_2 = \sqrt{\frac{R2}{R1} \cdot \frac{2U_{\text{оп}}U_1}{1 + \delta_{\Pi}}} \approx \sqrt{\frac{R2}{R1} 2U_{\text{оп}}U_1} \cdot \left(1 - \frac{\delta_{\Pi}}{2} \right) = \sqrt{\frac{R2}{R1} 2U_{\text{оп}}U_1} \cdot \left(1 - \frac{0,125}{\omega CR2} \right).$$

Видно, что погрешность КИУ составляет половину погрешности перемножения. Отсюда для заданной погрешности КИУ ($\delta_{\text{КИУ}} = -10^{-3}$) может быть рассчитана необходимая постоянная времени интегрирующего усилителя: $CR2 = 0,125(\omega \cdot \delta_{\text{КИУ}})^{-1} \approx 0,8 \text{ с}$.

Литература

1. Абаринов Е.Г., Леонов С.И. Анализ и расчет компенсационного корнеизвлекающего устройства на основе время-импульсного умножителя //Технічна електродинаміка, тематичний випуск “Системи керування та контролю напівпровідникових перетворювачів”. – Київ: Інститут електродинаміки НАН України, 1999. – С. 103-106.

ДВУМЕРНЫЕ ДИСКРЕТНЫЕ ФУНКЦИИ УОЛША В ЗАДАЧЕ СИНТЕЗА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРАВЛЕННОСТИ ГРУППЫ СЕЙСМОПРИЕМНИКОВ

В.В. Щуплов, А.И. Никеенков

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь

Результаты сейсморазведки зависят как от качества выделения сигнала на фоне помех, так и от знания направления прихода сейсмической волны в точку их регистрации. Методы пространственной фильтрации сигналов достаточно полно освещены в периодической печати.

Применение одномерных дискретных функций Уолша для формирования системы парциальных диаграмм направленности на базе N линейно расположенных сейсмоприемников дает систему ортогональных диаграмм направленностей, которые обладают свойством равенства парных отношений с точностью до постоянного множителя [1].

В этом сообщении рассматривается случай, когда сейсмоприемники расположены на плоскости (т. е. имеют две координаты) на расстоянии d друг от друга.

Двумерную диаграмму направленности рассматриваемой группы сейсмоприемников с точностью до постоянного множителя можно записать в виде:

$$F(\alpha, \beta) = \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N A_{kl} e^{-j(k\alpha + l\beta)},$$

где k – номер сейсмоприемника по оси X ; l – номер сейсмоприемника по оси Y ; α, β – обобщенные угловые направления прихода сейсмической волны; $A_{k,l}$ – весовые множители.

В качестве весовых множителей $A_{k,l}$ предлагается использовать двумерные дискретные функции Уолша $f(m, n, k, l)$, где m, n – двумерный номер функции; k, l – двумерный номер сейсмоприемника.

Факторизуемость двумерных функций Уолша дает возможность записать выражение для пространственной характеристики сейсмоприемников в факторизованном виде

$$F_{m,n}(\alpha, \beta) = F_m(\alpha) F_n(\beta),$$

где $F_m(\alpha)$, $F_n(\beta)$ – одномерные диаграммы направленности.

Полученные двумерные диаграммы направленности также обладают свойством равенства попарных отношений для соответствующих координат α и β .

Л и т е р а т у р а

1. Современные проблемы машиноведения: Материалы международной научно-технической конференции (научные чтения, посвященные 105 годовщине со дня рождения Павла Осиповича Сухого). (5 – 7 июля 2000 г., г. Гомель) /Под общей ред. д.т.н., профессора А.С. Шагиняна. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2000. – Т. 2. – 246 с.

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ ТЕПЛООВОГО ДАТЧИКА РАСХОДА

В.А. Карпов, С.А. Мурашко

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

Сущность работы большинства тепловых расходомеров заключается в поддержании постоянной разности температуры пограничного слоя с измерением электрической мощности, расходуемой для этих целей, которая оказывается функционально связанной с измеряемым массовым расходом. Температуру пограничного слоя измеряют в виде разности температур измеряемой среды и температуры стенки измерительного участка трубопровода в области нагрева. Основным недостатком отмеченного способа измерения является неконтролируемая потеря тепла в окружающую среду. Для снижения тепловых потерь используют теплоизоляцию нагреваемого участка трубопровода, уменьшая при этом быстродействие и точность, особенно в области малых расходов [1].

В докладе рассмотрен способ, позволяющий снизить влияние тепловых потерь в окружающую среду и технические решения, реализующие данный способ. Сущность предложенного способа заключается в том, что формируется два пограничных слоя с разными температурами, причем верхний по потоку имеет большую температуру, чем нижний, с последующим нахождением выходного сигнала в виде разности мощностей, расходуемых на поддержание соответствующих температур. При этом можно записать:

$$P_1 = \alpha S_1 \Theta_1 + K_1(t_2 - t_0); P_2 = \alpha S_2 \Theta_2 + K_2(t_3 - t_0),$$

где P_1, P_2 – мощности, расходуемые на поддержание температур пограничных слоев $\Theta_1 = t_2 - t_1; \Theta_2 = t_3 - t_1; t_0, t_1, t_2, t_3$ – температуры окружающего воздуха, измеряемой

среды, измерительных участков трубопровода в местах формирования пограничных слоев; S_1, S_2 – эффективные площади теплообмена между нагревателем и измеряемым потоком; α – коэффициент теплообмена, зависящий от массового расхода; K_1, K_2 – конструктивные коэффициенты, определяющие тепловые потери в окружающую среду. При выполнении нагревателей идентичными ($S_1 = S_2 = S, K_1 = K_2 = K$) для разности мощностей ΔP можно получить:

$$\Delta P = P_2 - P_1 = \alpha S(t_3 - t_2) + K(t_3 - t_2).$$

Откуда видно, что значения температур окружающего воздуха и измеряемой среды не влияют на результат измерения.

Рассмотрены реализации датчиков расхода отличающиеся между собой ветвлением измерительного участка трубопровода, где происходит стабилизация температур пограничных слоев. Рассмотренные технические решения обладают независимостью поддержания температур пограничных слоев от напряжения питания термопреобразователей и определяются только соотношением пассивных компонентов измерительной цепи.

Рассмотренный в докладе материал может найти применение не только при рассмотрении тепловых преобразователей расхода, но и в других устройствах, основанных на тепловом принципе действия (термохимических, термокондуктометрическом и пр.). Кроме того, реализации могут быть распространены на измерение расхода с использованием подающего и обратного трубопроводов, где полезным является разность в отмеченных сечениях трубопроводов. Такая ситуация чрезвычайно распространена при подаче топлива в двигателях автомобильного транспорта и горелках, работающих на мазуте.

Литература

1. Френкель Б.А. Автоматизация экспериментальных установок. – М.: Химия, 1990.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ДИФМАНОМЕТРОВ С ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ТРАНСФОРМАТОРНЫМ ДАТЧИКОМ

Е.Г. Абаринов, П.П. Изотов

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

Дифманометры с дифференциально-трансформаторным датчиком (ДТД) работают в широком температурном диапазоне. Например, дифманометры типа ДМ-3583М эксплуатируются при температуре окружающего воздуха от -30 °С до $+50$ °С, а дифманометры типа ПД при температуре от $+5$ °С до $+50$ °С. Изменение температуры окружающего воздуха, как отмечается в [1, 2], приводит к объемному расширению жидкости (этиленгликоль, дистиллированная вода, кремнеорганическая жидкость), которой в дифманометрах заполняется либо внутренняя полость мембранного блока, либо внутренняя полость между мембранами, воспринимающими давления, а также к изменению модуля упругости материала чувствительного элемента (мембраны, мембранного блока) и к изменению линейных размеров чувствительного элемента и самого дифманометра. Изменение этих параметров дифманометра влечет за собой появление дополнительной погрешности измерения разности давления.

В литературе представлены материалы экспериментальных исследований влияния температуры окружающей среды на дифманометр с тензопреобразователем «Сапфир-22М». Для дифманометров с ДТД такие материалы отсутствуют. Поэтому было проведено исследование температурной погрешности этих дифманометров на заводах «Промприбор» (г. Ивано-Франковск) и «Спутник» (г. Молодечно).

Анализ полученных результатов показал, что по приведенной погрешности дифманометры ДМ-3583М завода «Промприбор» удовлетворяют требованиям ГОС-Та 22520-85 «Датчики давления, разрежения и разности давлений с электрическими аналоговыми выходными сигналами. Общие технические условия», а дифманометры ПД завода «Спутник» – нет.

Если дифманометр используется в составе теплосчетчика в качестве измерителя расхода теплоносителя по перепаду давления, то согласно МИ 2164-91 «Теплосчетчики. Требования к испытаниям, метрологической аттестации, поверке» он должен быть аттестован по относительной погрешности. Относительная погрешность дифманометров ДМ-3583М в диапазоне измерения 10...100 % от номинального перепада давления составляет 3,5...4 % на каждые 10 °С, что будет соответствовать относительной погрешности 1,8...2 % на каждые 10 °С в диапазоне измерений 30...100 % от номинального расхода теплоносителя. Относительная погрешность дифманометров ПД в диапазоне измерения 1...100 % от номинального перепада давления составляет 37...62 % на каждые 10 °С, что будет соответствовать относительной погрешности 17...27 % на каждые 10 °С в диапазоне измерений 10...100 % от номинального расхода теплоносителя.

Принимая во внимание систематический характер температурной погрешности, ее можно скомпенсировать, повысив тем самым точность дифманометров. При этом необходимо учитывать нелинейную зависимость величины температурной погрешности от температуры окружающей среды.

Л и т е р а т у р а

1. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества: Справочник. – 4-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. – 701 с.
2. Преображенский В.П. Теплотехнические приборы. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергия, 1978. – 703 с.

ИМПУЛЬСНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ИМПЕДАНСНЫХ СВОЙСТВ БИОСЕКМЕНТОВ

А.В. Ростокин

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

Измерения импеданса тканей живых организмов на постоянном и переменном токе имеет важное практическое значение для диагностики и медицинских исследований. На измерении импеданса основаны методы импедансной реографии и биоимпедансной спектроскопии [1].

Нарушение водно-электролитного баланса возникает при различных заболеваниях живого организма, а необратимые изменения имеют место после прекращения жизнедеятельности. Эти нарушения, очевидно, сопровождаются изменением импедансных свойств. Кроме того, импедансные свойства биологических тканей на уровне организма в целом и на клеточном уровне имеют нелинейный характер и характеризуются вентильными параметрами. При этом, чаще всего, вентильные свой-

ства наиболее выражены для здорового организма. При различных заболеваниях они изменяются и постепенно исчезают после прекращения жизнедеятельности.

При длительном воздействии переменным током, что имеет место при реографии или при использовании мультимастотного биоимпедансного анализа, имеет место разогрев сегментов организма. При этом различные сегменты изменяют свои свойства с разной скоростью.

В докладе рассматривается возможность создания диагностического устройства, использующего сверхширокополосные воздействия в виде коротких временных импульсов с нулевым средним значением амплитуды напряжения или тока.

Эквивалентная схема измерений представлена на рис. 1.

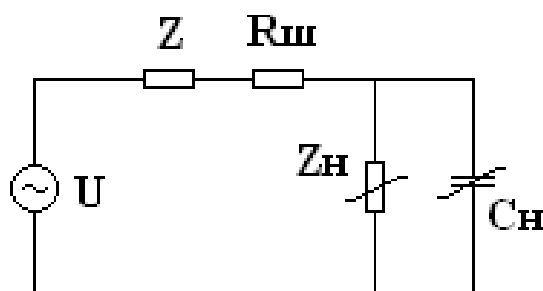


Рис. 1. Эквивалентная схема измерений:

U – генератор импульсных напряжений; Z – ограничивающий ток резистор;
Rш – токовый шунт; Zн и Сн – эквивалентные нелинейные элементы объекта

Показано, что при определенном выборе временной формы сигнала U и измерении тока на Rш, возможно восстановление параметров Zн и Сн в заданной полосе частот и оценка импедансных свойств биологических сегментов.

Рассмотрена конкретная электрическая схема измерительного устройства, приведены результаты первичных измерений на сегментах биологических тканей и на эквивалентных импедансных объектах.

Литература

1. Иванов Г.Г. и др. Мультимастотный сегментарный биоимпедансный анализ в оценке изменений объема водных секторов организма //Российский Интернет-журнал анестезиологии и интенсивной терапии.

К ВОПРОСАМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИМПЕДАНСА ДАТЧИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО РАСХОДОМЕРА

Е.Г. Абаринов, А.А. Кондратьев

Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь

В настоящее время, как в России, так и в Республике Беларусь, наряду с другими типами расходомеров широкое применение находят электромагнитные расходомеры (ЭМР) [1]. Поэтому не вызывает сомнения актуальность проблемы повышения точности расходомеров и теплосчетчиков данного типа. Определенное влияние на точность преобразования оказывает комплексный характер внутреннего сопротивления датчика ЭМР [2].

Подтвержденная экспериментом эквивалентная схема замещения датчика ЭМР при измерениях на малых токах (доли мА, мкА) в настоящее время практически нигде в публикациях не приводится. Поэтому разработка устройства для измерения внутреннего комплексного сопротивления датчика ЭМР является целесообразной. Чтобы иметь более полную картину об эквивалентной схеме замещения датчика, необходимо, чтобы измерения проводились в диапазоне частот. Измерение на малых токах позволит определить параметры датчика в условиях, наиболее приближенных к реальному режиму его работы.

Анализ существующих методов определения комплексного сопротивления показал, что наиболее оптимальной схемой для измерения внутреннего импеданса датчика ЭМР является схема, основанная на принципе выделения ортогональных составляющих (рис.1).

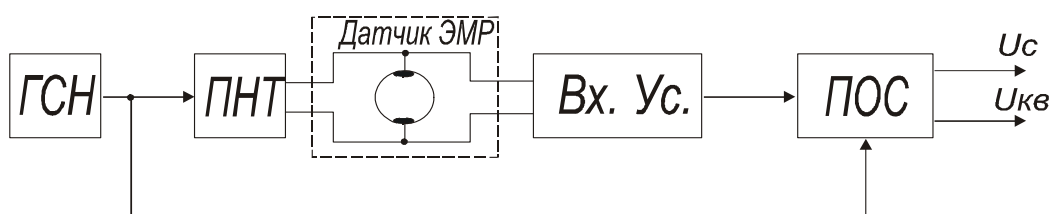


Рис. 1. Функциональная схема измерителя внутреннего комплексного сопротивления датчика ЭМР: ГСН – генератор синусоидального напряжения; ПНТ – преобразователь напряжения в ток; Вх.Ус. – входной усилитель; ПОС – преобразователь ортогональных составляющих; U_c , $U_{кв}$ – сигналы на выходах синфазного и квадратурного каналов ПОС

Следует отметить, что Вх.Ус. должен обладать достаточно большим входным сопротивлением (10 – 100 МОм), чтобы исключить влияние внутреннего сопротивления датчика на измеряемый сигнал.

Л и т е р а т у р а

1. Кузовков В.М., Кавригин С.Б. Электромагнитные расходомеры: проблемы и перспективы. Коммерческий учет энергоносителей (материалы IX Международной научно-практической конференции) /Сост. В.И. Лачков – СПб.: Политехника, 2000.
2. Финаев В.Е. Анализ влияния внутреннего сопротивления электромагнитного датчика расхода на метрологические характеристики расходомера. Метрологическое обеспечение качества – 2000: Материалы междунар. научн.-техн. конф. /Под ред. В.Л. Соломахо – Мн.: Тесей, 2000.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ И ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ПРИМЕСЕЙ НА ПОКАЗАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ РАСХОДОМЕРОВ

В.Е. Финаев

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь

В состав электромагнитных расходомеров или электромагнитных теплосчетчиков входит электромагнитный датчик расхода, принцип действия которого основан на том, что в жидкости, движущейся в магнитном поле, возникает электродвижущая сила, действующая в направлении, перпендикулярном движению и магнитному полю. Таким образом, в электромагнитном датчике расхода происходит преобразова-

ние среднего значения скорости жидкости в трубопроводе в электрический сигнал, который может быть представлен в следующем виде [1]:

$$U = \iiint_{\tau} \vec{W}(x, y, z) \vec{v}(x, y, z) dx dy dz, \quad (1)$$

где: $\vec{W}(x, y, z) = [\vec{j}(x, y, z) \times \vec{B}(x, y, z)]$ – распределение весового вектора в рабочей области (области жидкости, в которой действует магнитное поле);

τ – объем рабочей области;

$\vec{v}(x, y, z)$ – распределение скорости потока в рабочей области;

$\vec{B}(x, y, z)$ – распределение вектора индукции магнитного поля в рабочей области;

$\vec{j}(x, y, z)$ – распределение вектора виртуального тока в рабочей области.

Как видно из выражения (1), выходной сигнал электромагнитного датчика расхода зависит от распределений вектора индукции магнитного поля и вектора виртуального тока в рабочей области, которые изменяются при наличии в жидкости ферромагнитных и электропроводящих примесей. Исследование количественного влияния ферромагнитных и электропроводящих примесей на показания электромагнитных датчиков расхода было проведено в Гомельском государственном техническом университете имени П.О. Сухого. При этом исследовалась компьютерная модель датчика расхода методом конечных элементов с помощью программного пакета ANSYS 5.5 и находилась относительная чувствительность выходного информационного сигнала к средней в поперечном сечении канала скорости жидкости на единицу объема рабочей области датчика.

В докладе приводится методика применения метода конечных элементов к исследованию свойств электромагнитных датчиков расхода и полученны зависимости относительного изменения чувствительности выходного информационного сигнала к средней в поперечном сечении канала скорости жидкости на единицу объема рабочей области датчика при различных профилях скоростей жидкости, концентрации примесей, их магнитной проницаемости и удельном сопротивлении.

Литература

1. Вирбалис Ю.А. Исследование магнитной цепи электромагнитных измерителей расхода. Коммерческий учет энергоносителей; Совершенствование измерений расхода жидкости, газа и пара (материалы Форума двух Международных научно-практических конференций). – СПб.: Политехника, 1999. – С. 108-113.

ПОВЫШЕНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ СГЛАЖИВАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

И.В. Муринов

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь

В измерительных преобразователях переменного напряжения, выходной сигнал которых содержит постоянную составляющую, несущую полезную информацию о результате преобразования, для выделения этой составляющей применяются сглаживающие фильтры, важной метрологической характеристикой которых является время установления выходного сигнала (ГОСТ 8.009-84). Другим показателем качества сглаживающего фильтра является коэффициент пульсаций, определяемый отношением амплитуды переменной составляющей выходного напряжения фильтра к

его постоянной составляющей. Амплитуда пульсаций на выходе сглаживающего фильтра в измерительном преобразователе не должна превышать абсолютной погрешности установления, определяемой классом точности преобразователя. Современные приборы должны обеспечивать класс точности от 0,1 до 0,01 и для уменьшения амплитуды пульсаций обычно увеличивают постоянную времени фильтра, что приводит к снижению быстродействия. Например, время установления однозвенного фильтра в преобразователе среднего значения класса точности 0,1 на частоте 25 Гц составляет 28 с при постоянной времени 4 с. Поэтому для современных вольтметров переменного тока и помехозащищенных преобразователей, рабочий диапазон которых начинается с десятков Герц, в особенности предназначенных для учета динамики изменения контролируемой величины, повышение быстродействия является актуальной задачей. Для уменьшения времени установления можно использовать многозвенные фильтры, схема одного из которых приведена на рис.1.

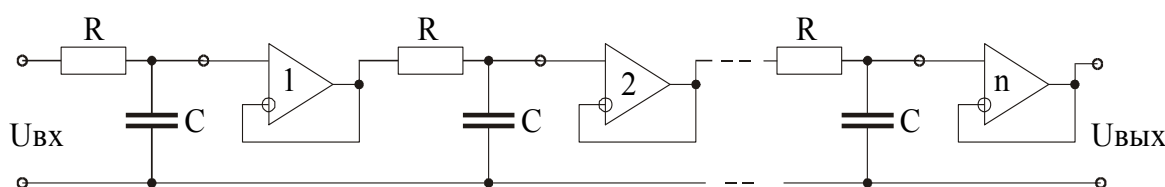


Рис. 1. Многозвенный фильтр из развязанных пассивных инерционных звеньев

Получены результаты сравнительного исследования временных характеристик пассивных и активных многозвенных фильтров, применяемых для повышения быстродействия сглаживающих фильтров, показано, что пассивные фильтры имеют значительные преимущества и предложен метод выбора числа звеньев сглаживающих пассивных фильтров в зависимости от заданного быстродействия, коэффициента пульсаций и от частоты пульсаций.

Л и т е р а т у р а

1. Абаринов Е.Г., Муринов И.В. / Выбор и расчет многозвенных сглаживающих фильтров информационных преобразователей среднего значения по заданному быстродействию //Измерительная техника. – М.: Изд-во стандартов, 1999. – № 12.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИОГЛОГРАФИЧЕСКИХ АНТЕНН

Д.Н. Зелинский, В.Н. Мизгайлов

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Радиоголографическими антеннами принято называть антенные устройства, построенные на основе радиоголографических принципов. Основной физической идеей, положенной в основу, является предположение, что требуемая диаграмма направленности подобной антенны представляет предметный пучок плоских волн, которые используются в записи радиоголограммы, а источник возбуждения в будущей антенне должен формировать опорный сигнал. Этим опорным сигналом с любым видом формы волнового фронта и облучается радиоголографическая структура, которая была записана с участием опорного и предметного поля.

Очевидно, что реальная антенна должна быть построена либо как самостоятельная излучающая система, либо как элемент некоторой радиосистемы расположенный на объекте-носителе. Технические приемы построения таких антенн суще-

ственно отличаются. Общим в подходе к проектированию радиологических антенн может быть применение метода конструктивного синтеза. Суть метода конструктивного синтеза сводится к последовательному применению аналитического решения задачи синтеза и экспериментального. При этом экспериментальные данные вводятся в расчет и являются неотъемлемой частью решения задачи построения антенны. Подобный подход работает продуктивно, когда антенна является частью поверхности объекта и нет строгих решений задачи дифракции электромагнитных волн для этого объекта.

Проверку правильности предлагаемых методов синтеза и анализа радиологических антенн удобно осуществить для технических задач допускающих как расчет поля дифракции, так и экспериментальную проверку структуры дифракционных полей. В качестве примера рассматривается возможность построения радиологической антенны с диаграммой направленности до 120° вблизи плоского металлического экрана, когда в качестве облучателя используется рупор, имеющий ширину диаграммы в этой плоскости не более 60° . Аналитически рассчитывается структура радиолограммы вблизи металлической плоскости. Экспериментально проверяются результаты расчетов радиолограммы. Радиолограмма технически выполняется в виде совокупности металлических пассивных элементов. Радиолограмма облучается опорным сигналом из рупора, впаянного в металлическую плоскость, и измеряется диаграмма направленности системы рупор – металлическая плоскость – радиолограмма. Результат измерения даёт требуемую ширину диаграммы направленности в 120° и подтверждает правильность подхода к построению радиологической антенны.

Приводятся и примеры, которые иллюстрируют процесс построения радиологических антенн, как самостоятельных устройств. В частности, рассматриваются варианты плоских антенных систем, у которых в качестве радиолограмм используются щелевые системы излучателей. Рассмотрены несколько типов малогабаритных плоских радиологических антенн для приема спутникового телевидения и для целей построения остронаправленных связных антенн.

Исследованы вопросы согласования радиологических щелевых синфазных антенн в полосе частот от 8 ГГц до 12,5 ГГц. Экспериментально измерены диаграммы направленности плоских антенн отличающихся размерами излучающих раскрывов. Установлено, что ширина диаграммы направленности по уровню половинной мощности 2° на $2,5^{\circ}$ достигается для радиологической антенны с наружными габаритами поверхности излучения $18,5 \lambda$ на $18,5 \lambda$ и высотой $0,39 \lambda$. Даются практические рекомендации по применению того или иного типоразмера антенны.

ОГРАНИЧЕНИЕ ВНУТРЕННИХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

А.Н. Бохан, В.В. Кротенок

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

Перенапряжения в распределительной сети зависят от многочисленных факторов. При этом определяющее значение имеет режим заземления нейтрали. В республике Беларусь, также как и в России абсолютное большинство сетей 6,10 кВ выполняются с изолированной или компенсированной нейтралью. В большинстве случаев нарушения нормальной работы этих сетей связаны с однофазными замыканиями на землю. Благоприятные условия для самопогашения дуги и меньшая вероятность пе-

рехода в междуфазные повреждения возникают при малых токах замыкания на землю. Согласно ПТЭ допустимыми считаются токи до 5 А для сетей с высоковольтными электрическими машинами, и не более 30,20 А для остальных сетей 6,10 кВ. Дальнейшему развитию повреждений могут способствовать многочисленные внутренние перенапряжения, сопровождающие однофазные замыкания на землю. Для улучшения режимов работы сетей и уменьшения перенапряжений находит применение резистивное заземление нейтрали. Сопротивление высокоомного резистора определяется как $R_N=1/(900C)$, где C - эквивалентная емкость сети. В сетях с компенсацией емкостного тока для уменьшения перенапряжений применяется установка резистора параллельно реактору ($R \approx$ до $8 R_N$).

Разработку и оптимизацию средств снижения перенапряжений в распределительных сетях целесообразно проводить поэтапно.

На первом этапе определяется оптимальный режим заземления нейтрали и выполняются расчеты, позволяющие выявить условия возникновения продолжительных резонансных и феррорезонансных режимов при возможном изменении параметров расчетной схемы. Анализ частотных характеристик сети позволяет выявить гармоники, на которых возможно возникновение резонанса. Феррорезонансные явления обычно проявляются при неполнофазных и несимметричных режимах сети и сопровождаются перенапряжениями высокой кратности (4.5...6). Обычно это актуально для трансформаторов малой мощности, например, трансформаторов напряжения. Как правило, анализ этих режимов не поддается аналитическому описанию и возможен только при компьютерном моделировании электрической сети с учетом ряда допущений.

На втором этапе определяются места установки ОПН и их параметры. Ограничение перенапряжений для электродвигателей может быть достигнуто установкой устройств индивидуальной компенсации ($Q_{кб} \approx S_{дв}/3$). Выбор ОПН для сети с изолированной или компенсированной нейтралью связан с возможностью длительной работы его при однофазных замыканиях на землю. Это возможно при отсутствии длительных резонансных и феррорезонансных перенапряжений; наибольшее напряжение сети не должно превышать номинального напряжения ОПН ($U_{нс}=1,2U_{опн}$); не нарушается термическая стойкость ОПН при длительных замыканиях на землю. Рассматриваемые места установки ОПН: начало линии, вывода электродвигателей и трансформаторов. Для сетей с большим емкостным током замыкания на землю рекомендуется увеличивать количество комплектов ОПН, устанавливаемых в различных местах сети.

Как альтернативу резистивному заземлению нейтрали можно рассматривать возможность установки ОПН в нейтраль вспомогательного трансформатора, в том числе параллельно дугогасящему реактору. Преимуществом предлагаемого места установки ОПН является то, что он включается при перенапряжениях, связанных с замыканиями на землю любой фазы. Тепловыделение в указанном ОПН будет меньше чем для ОПН подключенного к фазам сети, что создает более благоприятные условия для его работы.

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КЛЮЧЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ****С.Н. Кухаренко, Д.В. Шереметьев***Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

У разработчиков силовой электроники сложилось устойчивое мнение об абсолютном преимуществе силовых полупроводниковых приборов с потенциальным управлением (полевые транзисторы, IGBT модули). В качестве доказательства целесообразности применения таких приборов приводится факт малой мощности управления. Однако экспериментальные и аналитические исследования показывают, что использование таких транзисторов не всегда оправдано с точки зрения цены, эксплуатационных затрат, КПД и массогабаритных показателей. У таких приборов мощность управления в статическом режиме ничтожно мала, однако, с увеличением частоты (порядка 100 кГц и выше) мощность потерь на управление становится соизмеримой с потерями на управление биполярными транзисторами. Если учесть то, что потери в силовом ключе состоят из потерь на управление и потерь от коммутируемого тока, то во многих случаях оказывается, что применение биполярных транзисторов значительно эффективнее. Необходимо также отметить, что технология производства биполярных транзисторов совершенствовалась, и в настоящее время необходима переоценка эффективности применения того или иного полупроводникового прибора.

В докладе представлены экспериментальные зависимости статических потерь в различных типах транзисторов. Дана сравнительная характеристика полевых и биполярных транзисторов, работающих на границе насыщения ($U_{КБ}=0$) [1]. Показаны преимущества современных биполярных транзисторов, производимых в России, с полевыми и IGBT структурами аналогичного класса по току и напряжению.

Предложена методика математической обработки результатов исследования работы транзисторов в ключевом режиме с применением обычных электроннолучевых осциллографов вместо цифровых при наблюдении быстропротекающих процессов. При этом проводилось фотографирование изображений и их последующая оцифровка.

В результате применения данного метода получены различные параметры, характеризующие процесс переключения транзистора, в том числе зависимости входного сопротивления полупроводниковых приборов в функции времени при различных управляющих воздействиях. Полученные результаты доказывают необходимость форсирующего управляющего воздействия. Представленная методика позволяет производить выбор оптимального значения управляющего воздействия (напряжения и тока) для конкретного типа транзистора. Соответственно, данные исследования позволяют сформулировать требования к электрическим характеристикам управляющих и коммутируемых цепей при создании оптимальных траекторий переключения, а также получить необходимые сведения о возможностях того или иного полупроводникового прибора для оценки эффективности его использования.

Рассмотренная методика исследований опробована при выборе силовых приборов и технических решений для железнодорожного преобразователя типа ПСЖ.

Литература

1. Веднеев Г.М. Силовые биполярные транзисторы при работе в ключевых режимах. – Тр. Моск. энергетического ин-та, 1991. – Вып. 487. – С. 15-22.

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ СИЛОВЫХ МАСЛЯНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Д.И. Зализный, Д.М. Лось

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

Силовые трансформаторы – это один из основных элементов системы электро-снабжения. В процессе их эксплуатации должна быть обеспечена надежная защита от аварийного режима.

Как известно, аварийный режим силового трансформатора определяется максимально допустимыми значениями его основных тепловых параметров. Согласно ГОСТ 14209-85, к основным тепловым параметрам силовых масляных трансформаторов относят: температуру наиболее нагретой точки (ННТ) обмотки, температуру ННТ масла и тепловой износ изоляции. Сейчас широко применяются манометрические термометры типа ТКП – 160, контролирующие температуру масла трансформаторов в верхних слоях. Но они не позволяют осуществлять контроль остальных тепловых параметров, которые в большей степени влияют на нагрузочную способность силовых трансформаторов, чем температура ННТ масла.

Разработчиками предлагалось много вариантов устройств для контроля температуры ННТ обмотки и теплового износа изоляции. Но все они не нашли должного применения из-за их низкой надежности и высокой стоимости.

Основная проблема контроля температуры ННТ обмотки состоит в том, что обмотка находится под высоким напряжением и покрыта изоляцией. Поэтому устройства, осуществляющие непосредственное измерение температуры ННТ обмотки, как правило, имеют высокую стоимость и сложны в эксплуатации из-за специальных требований, предъявляемых к датчикам. В связи с чем, наиболее оправданным является использование устройств, работающих на основе метода тепловых моделей. Суть метода состоит в том, что измерение температуры ННТ обмотки производится косвенно с использованием в вычислительном блоке устройства алгоритма, в основе которого лежит математическая тепловая модель силового трансформатора.

Нами разработано устройство, в котором применена математическая тепловая модель силового масляного трансформатора, как системы из трех однородных тел: обмотки, масла и магнитопровода. Данная модель максимально приближена к реальным тепловым процессам, протекающим в силовом трансформаторе.

На основе полученных расчетных соотношений нами разработана принципиальная схема требуемого устройства. Его принцип действия состоит в следующем. В процессе работы устройство измеряет ток нагрузки силового трансформатора, температуру окружающего воздуха и в режиме реального времени рассчитывает температуру ННТ обмотки и тепловой износ изоляции. Результаты выводятся на цифровой, либо стрелочный индикатор. По достижении температуры ННТ обмотки или суточного теплового износа изоляции максимально допустимых значений, устройство формирует специальный сигнал аварийного режима, который может быть использован для тепловой защиты трансформатора.

Разработанное устройство по сравнению с приборами-аналогами имеет такие преимущества, как низкая стоимость (не более 100 у.е.), максимальная безопасность эксплуатации, расширенные функциональные возможности.

Внедрение данного устройства в эксплуатацию позволит максимально эффективно использовать по мощности силовые трансформаторы.

ИНТЕГРИРУЮЩИЙ ЧЕТЫРЕХТАКТНЫЙ АЦП

Ю.А. Козусев

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь

Интегрирующие двухтактные АЦП получили широкое распространение в системах обработки информации благодаря высокой помехозащищенности и точности. Известен четырехтактный способ преобразования, ставящий целью снижение погрешностей операций интегрирования и сравнения [1, 2]. Этот способ основан на тестовом методе коррекции аддитивной погрешности и позволяет снизить влияние инструментальных погрешностей интегратора и компаратора. Общий недостаток таких способов преобразования состоит в том, что величина тест-сигнала непосредственно входит в результат преобразования и приводит к дополнительной погрешности. Для исключения этого и других недостатков предложен алгоритм преобразования:

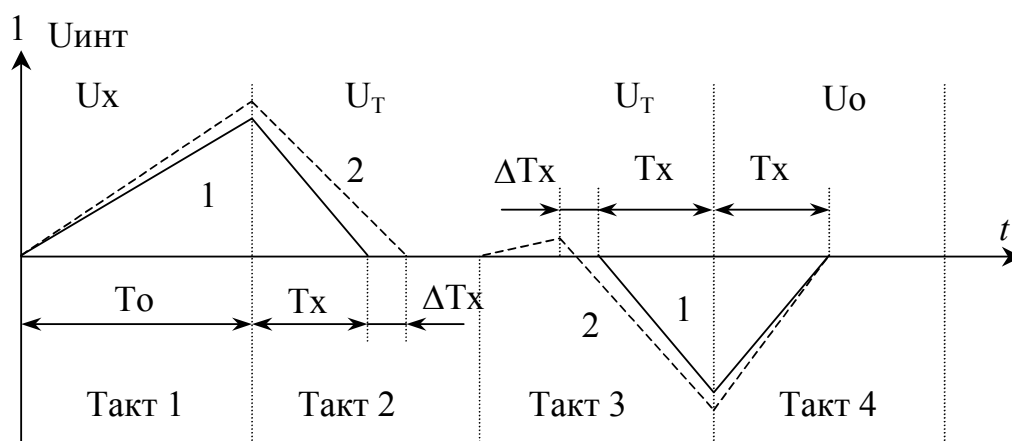


Рис. 1. Результат интегрирования: 1 – преобразование без погрешности; 2 – погрешность тактов 1-2 компенсируется в тактах 3-4

Разработанный способ четырехтактного преобразования [3] на основе этого алгоритма содержит два такта интегрирования тест-сигнала U_T с полярностью, противоположной полярности U_x . Накопленная в тактах $\bar{1}2$ погрешность интегрирования ΔT_x исключается в тактах $\bar{3}4$. Аналогично исключается погрешность выделения интервала T_x благодаря тому, что в тактах 2 и 4 $U_{\text{инт}}$ сравнивается с нулем “сверху” и “снизу”. Сигнал U_T служит для компенсации погрешности, эта величина не входит в результат преобразования и требуется лишь ее кратковременная стабильность. Реализованный тестовый метод коррекции на основе неточного тестового сигнала, а также совпадение полярностей измеряемого U_x и эталонного U_0 напряжений определяют преимущества данного способа четырехтактного преобразования.

Литература

1. Analog-digital conversion notes/D. Sheingold. – Norwood: Analog Devices, 1977.
2. Патент США N3872466.
3. Авторское свидетельство СССР N1381709.

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ВЛ 6-10 КВ: ВОЗМОЖНОСТЬ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ С УЧЕТОМ ОТКЛОНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ**Г.Ф. Куценко, А.А. Парфёнов***Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

Как известно, уровень рабочего напряжения в сети существенно влияет на технико-экономические характеристики электроприемников, поэтому ГОСТ 13109-97 нормирует допустимые отклонения напряжения на их выводах. Как и для многих других показателей качества электроэнергии, для отклонения напряжения установлены два вида нормированных значений: нормально допустимые ($\pm 5\%$) и предельно допустимые ($\pm 10\%$).

В данной работе исследуется возможность взаимного резервирования воздушных линий электропередачи 6-10 кВ при аварийном отключении питания какой-либо линии и анализируется величина отклонения напряжения при этом. Исследования проводились на примере моделей ВЛ 6-10 кВ. Модель представляет собой схему линии определенной конфигурации со своей структурой и параметрами.

Анализ отклонения напряжения был проведен для различных значений коэффициентов загрузки всех трансформаторов линии от 0,35 до 1. Эти значения коэффициентов нагрузки соответствуют согласно суточному графику нагрузки часам максимальной и минимальной нагрузки. Резервирование линий проводилось по следующей формуле:

$$m_i + m_j, \quad (1)$$

где m_i – № модели линии, остающейся в работе; m_j – № модели линии отключенной.

Анализ результатов расчета показывает, что при коэффициенте нагрузки равном 1,0 отклонения напряжения в узлах модели удовлетворяют нормально допустимым нормам при резервировании по следующим формулам: 1+1, 1+2, 1+3, 2+1, 2+2, 2+3, 3+1, 3+2, 3+3. При коэффициенте нагрузки равном 0,35 – 1+1, 1+2, 1+3, 1+4, 1+5, 1+6, 2+1, 2+2, 2+3, 2+4, 2+5, 2+6, 3+1, 3+2, 3+3, 3+4, 3+5, 3+6, 4+1, 4+2, 4+3, 4+4, 4+5, 4+6, 5+1, 5+2, 5+3, 6+1, 6+2, 6+3.

Также возможно резервирование не всей линии, а части линии. При этом возобновляется питание не всех потребителей, присоединенных к линии а лишь их части. Так, при максимальной нагрузке линии с соблюдением нормально допустимых норм качества возможно резервирование по следующим формулам: 1+4 до узла 2', 1+5 до узла 4', 1+6 до узла 3', 1+7 до узла 8', 2+4 до узла 2', 2+5 до узла 4', 2+6 до узла 3', 2+7 до узла 8', 3+4 до узла 4', 3+5 до узла 6', 3+6 до узла 5', 3+7 до узла 11'. Резервирование 4, 5, 6, 7 с другими моделями невозможно даже частично.

При минимальной нагрузке линии с соблюдением нормально допустимых норм качества возможно резервирование по следующим формулам: 1+7 до узла 2', 2+7 до узла 2', 3+7 до узла 3', 4+7 до узла 4', 5+4 до узла 2', 5+5 до узла 4', 5+6 до узла 3', 5+7 до узла 8', 6+4 до узла 2', 6+5 до узла 4', 6+6 до узла 3', 6+7 до узла 8'. Резервирование седьмой модели частично при минимальной нагрузке также невозможно.

Таким образом, рассматривая возможность резервирования ВЛ 6-10 кВ с соблюдением качества электроэнергии по параметру «установившееся отклонение напряжения» на примере моделей, можно сделать вывод, что невозможно резервирование какой-либо линии с любой другой. Прежде чем произвести подключение линии к другой, необходимо провести анализ качества электроэнергии, а затем – резервирование. Полученные нами результаты расчетов будут использованы при составлении программы для автоматизации анализа возможности резервирования ВЛ 6-10 кВ.

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ВЛ 6-10 КВ: РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Г.Ф. Куценко, А.А. Парфёнов

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П.О. Сухого», Республика Беларусь*

При проектировании и эксплуатации электроустановок и систем для решения многих технических вопросов требуется провести ряд расчетов, среди которых заметное место занимают расчеты токов коротких замыканий, которые являются одной из причин нарушения нормальной работы электрических установок.

При коротких замыканиях из-за больших токов может повыситься температура токоведущих частей и произойти повреждение проводников и изоляции. Развиваемые при этом электродинамические усилия могут разрушить электрооборудование. Понижение напряжения вследствие короткого замыкания при определенной его длительности приводит к остановке – «опрокидыванию» электродвигателей. В магистральных сетях короткие замыкания могут нарушить устойчивость электрической системы, что представляет собой наиболее серьезную и длительно устраняемую аварию.

Следовательно, для того чтобы свести к минимуму отрицательные последствия от коротких замыканий необходимо знать значения токов коротких замыканий в определенных точках сети. Значения этих токов используются при расчете уставок аппаратов релейной защиты. Основное назначение релейной защиты и заключается в том, чтобы установить факт и определить место повреждения, подать команду на отключение поврежденного элемента при аварийных режимах (короткое замыкание). Согласно Правилам устройства электроустановок в сетях напряжением 6-10 кВ на одиночных линиях с односторонним питанием от многофазных замыканий должна устанавливаться двухступенчатая токовая защита, первая ступень которой выполнена в виде токовой отсечки, а вторая – в виде максимальной токовой защиты с независимой или зависимой характеристикой выдержки времени.

В данной работе произведен расчет токов короткого замыкания в воздушных линиях электропередачи 6-10 кВ. Исследования проводились на примере моделей ВЛ 6-10 кВ, построенных по результатам исследования воздушных линий электропередачи РУП «Гомельэнерго». Модель представляет собой схему линии определенной конфигурации со своей структурой и параметрами. Далее был проведен сравнительный анализ значений токов короткого замыкания и значений токов при максимальной нагрузке линий. Исходя из этого анализа был сделан вывод о возможности срабатывания релейной защиты. Оценивалась возможность срабатывания только максимальной токовой защиты, так как ток срабатывания токовой отсечки не зависит от максимального рабочего тока линии.

Таким образом, проанализировав результаты расчетов можно сделать вывод, что не все линии удовлетворяют требованиям чувствительности максимальной токовой защиты, а следовательно, не будет обеспечено срабатывание релейной защиты.

Анализ срабатывания защиты проводился при максимально возможной нагрузке линий электропередач. В то же время реальная нагрузка линий согласно данным диспетчерской службы РУП «Гомельэнерго» составляет 20-50 % от максимально возможной, и при этом уровне нагрузки чувствительность релейной защиты будет обеспечена почти во всех линиях.

НАДЕЖНОСТЬ МАТЕРИАЛА ВОССТАНОВЛЕННОЙ ДЕТАЛИ

В.Э. Завистовский

*Полоцкий государственный университет, г. Новополоцк,
Республика Беларусь*

Использование покрытий при восстановлении работоспособного состояния рабочих поверхностей деталей машин неизбежно приводит к возникновению микро- и макродефектов, оказывающих существенное влияние на процесс накопления повреждений и надежность детали. Целью настоящей работы является разработка расчетного метода оценки надежности материалов деталей машин, подвергающихся восстановлению путем нанесения покрытий.

Предположим, что материал восстановленной детали представляет собой систему, состоящую из трех элементов: основной металл – переходная область – покрытие. Каждый из этих элементов может быть оценен через значения физико-механических характеристик. Так как в структуре восстановленного материала эти элементы расположены последовательно друг за другом, то его надежность, представленная в виде вероятности безотказной работы, можно определить как надежность последовательно соединенных элементов, т. е.:

$$P(t) = [P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot P_3(t)] \cdot k_{m. mex}, \quad (1)$$

где $P_1(t) \dots P_3(t)$ – вероятность безотказной работы основного металла, переходной области и покрытия, соответственно; $k_{m. mex}$ – коэффициент технологичности, зависящий от способа и температурного режима нанесения покрытия.

Вероятность безотказной работы материала детали при заданных эксплуатационных нагрузках может быть принята равной 1, надежность же основного металла восстанавливаемой детали может быть оценена через следующие механические характеристики:

$$P_1(t) = \frac{(\gamma \cdot \sigma_{on})}{\sigma_{on}}, \quad (2)$$

где $\sigma_{on} = \sigma_m$ – для пластичного и $\sigma_{on} = \sigma_v$ – для хрупкого материала; γ – коэффициент, учитывающий влияние накопленных повреждений ($0,5 \leq \gamma \leq 1,0$).

Надежность переходной области $P_2(t)$ может быть оценена через прочность сцепления σ_{cy} материала покрытия с основным материалом, т. е.

$$P_2(t) = \frac{(k_d \cdot \sigma_{cy})}{\sigma_{on}}, \quad (3)$$

где k_d – коэффициент объемной диффузии материала покрытия в основной материал.

Надежность покрытия $P_3(t)$ можно оценивать через пористость следующим образом:

$$P_3(t) = \frac{P_{обц.н}}{P_{ом}}, \quad (4)$$

где $P_{обц.н}$ – пористость общая покрытия; $P_{ом}$ – пористость основного материала.

Приведенная модель позволяет оценить надежность материала восстановленной детали и учесть ее при расчетах надежности изделия (машины) в целом.

Научное издание

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МАШИНОВЕДЕНИЯ

**Тезисы докладов
международной научно-технической конференции
(научные чтения, посвященные Павлу Осиповичу Сухому)
4-6 июля 2002 года**

Корректоры: О.Н. Сакунова, Л.Ф. Теплякова, Н.Г. Мансурова
Компьютерная верстка и дизайн: Е.Н. Герасименко, В.В. Камелицкий,
Н.Б. Козловская

Тезисы докладов отпечатаны в авторской редакции

Подписано в печать 20.06.2002.
Формат 60x84/8. Гарнитура «Таймс». Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 16,6. Уч. – изд. л. 12,5. Изд. № 61.
Тираж 180 экз. Заказ № 283.

Учреждение образования «Гомельский государственный технический
университет имени П.О. Сухого».
Лицензия ЛВ № 399 от 12.06.2001.
246746, г. Гомель, пр. Октября, 48, т. 47-71-64.

Отпечатано на ризографическом оборудовании
Учреждения образования «Гомельский государственный технический
университет имени П.О. Сухого».
Лицензия ЛП № 114 от 12.06.2001.
246746, г. Гомель, пр. Октября, 48, т. 47-71-64.