

## СОДЕРЖАНИЕ

## ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

<i>Грунтович Н. В., Токочакова Н. В.</i> Структура и задачи компьютерной интеллектуальной системы технического учета и управления потреблением топливно-энергетических ресурсов .....	10
<i>Пантелеенко Ф. И.</i> Тенденции развития восстановительно-упрочнительных технологий .....	14

## Секция А. ДИНАМИКА, ПРОЧНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

<i>Гурский Е. П., Курьло Р. Р., Сорокин Д. П.</i> Оценка эксплуатационной надежности грузовых вагонов и выбор протяженности гарантийного участка .....	17
<i>Короткевич С. В., Холодилов О. В., Соловей Н. Ф.</i> Анализ эксплуатационных свойств пластичных смазочных материалов .....	18
<i>Белоногий Н. Ю., Холодилов О. В.</i> Повышение достоверности ультразвукового контроля элементов колесных пар вагонов .....	19
<i>Баханович А. Г.</i> Современные методы повышения надежности зубчато-ременных передач .....	20
<i>Сенько В. И., Пастухов И. Ф., Макеев С. В., Пастухов М. И.</i> О несущей способности надрессорных балок тележек грузовых вагонов .....	21
<i>Гориченко С. Ф., Чернин Р. И.</i> Совершенствование технологии разборки соединений с натягом колесных пар .....	22
<i>Чернин И. Л., Гориченко С. Ф., Чернин Р. И.</i> Контроль прочности напрессовки колец буксовых подшипников на шейки осей колесных пар .....	23
<i>Путьято А. В.</i> Компьютерное моделирование гидродинамической нагруженности области люка-лаза вагона-цистерны .....	24
<i>Горбунов В. П., Григорьев В. Ф.</i> Влияние параметров точности многоцелевого станка на технологическую надежность .....	25
<i>Галай Э. И., Рудов П. К.</i> Тормозная эффективность пассажирских поездов .....	26
<i>Щербаков С. А.</i> О расчете сил для Г-образных прихватов .....	27
<i>Кульгейко М. П., Петровский В. П., Дмитриченко Е. Э.</i> Увеличение ресурса работы редуктора главного привода прессы формовки камней силикатных .....	28
<i>Андреев С. Ф.</i> К расчету геометрических параметров замкнутой оболочки .....	29

Секция Б. МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ  
И ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

<i>Кулакевич А. Н., Щербаков С. А.</i> Исследование технико-экономических показателей обработки алмазов кругами с алмазоабразивными композициями .....	31
<i>Стеценко В. Ю., Ривкин А. И., Гутев А. П., Певнев А. М.</i> Структурно-высокодисперсный силуминовый модификатор для чугунов и медных сплавов .....	32
<i>Стеценко В. Ю., Ривкин А. И., Гутев А. П., Коновалов Р. В.</i> Модифицирование силуминов мелкокристаллическими алюминиевыми сплавами .....	33

<b>Короткевич С. В., Бобович С. О., Пинчук В. Г.</b> Самоорганизация поверхности металла при трении.....	34
<b>Копытков В. В., Селькин В. П., Гуринович Л. М.</b> Влияние неорганических солей на кислотность водорастворимых полимеров.....	35
<b>Купреев М. П., Леонович Е. Н.</b> Разработка и исследование технологических режимов изготовления шлифовальных кругов из кубического нитрида бора на керамической связке.....	36
<b>Пинчук В. Г., Свиридова В. В., Короткевич С. В.</b> Кинетика деструкционных структур в поверхностном слое металлов при фрикционном нагружении.....	37
<b>Лин Д. Г., Воробьева Е. В., Марченко Н. В., Плескачевский Ю. М., Селькин В. П.</b> Исследование процесса переноса металла подложки в полимер при термическом и радиационном воздействиях.....	38
<b>Лозенко В. В., Шепелевич В. Г.</b> Стабильность структуры и свойств быстрозатвердевших сплавов системы Zn–Pb при отжиге.....	39
<b>Мазенкова О. Л., Матвеев К. С., Солтовец Г. Н.</b> Влияние макроструктуры отходов интегральных полиуретанов на технологию переработки.....	41
<b>Сивцова П. А., Шепелевич В. Г.</b> Структура и микротвердость быстрозатвердевших фольг промышленного сплава АМЦ.....	42
<b>Колос А. А.</b> Создание новых материалов на основе композиций из текстильных и полимерных отходов и технологии их переработки.....	43
<b>Карпович О. И.</b> Температурные зависимости вязкоупругих свойств термопластичных полимеров.....	44
<b>Цырлин М. И., Сивак О. А.</b> Исследование триботехнических свойств упрочненных поверхностей направляющих металлорежущих станков.....	45
<b>Цырлин М. И., Семашко А. В., Савостьянов Л. В.</b> Исследование влияния неорганических микро- и нанодобавок на физико-механические и триботехнические свойства лакокрасочных покрытий.....	46
<b>Марущак П. О., Бицак Р. Т., Глиха В., Вухерер Т.</b> Оценка циклической прочности стали 25Х1М1Ф.....	47
<b>Грабовский А. П.</b> Изучение влияния упруго-пластической деформации на свойства конструкционных материалов.....	48
<b>Петров С. В.</b> Эксплуатация модифицированных РТИ.....	50
<b>Дашковский В. А., Врублевский В. Б., Невзорова А. Б.</b> Исследование натяга древесного вкладыша в подшипниках скольжения самосмазывающихся.....	51
<b>Макеев В. В.</b> Моделирование процесса самосмазывания в узлах трения с применением древесных вкладышей подшипников скольжения.....	52
<b>Невзорова А. Б., Врублевский В. Б., Врублевская В. И.</b> Древесина в подшипниках: технологические особенности подготовки, изготовления и эксплуатации.....	53
<b>Остриков О. М.</b> Энергетика двойникования кристаллов, деформируемых сосредоточенной нагрузкой.....	54
<b>Остриков О. М.</b> Мезоскопическая дислокационная динамическая модель клиновидного двойника.....	55
<b>Пучков А. А., Соколов В. Ф.</b> Принципиальный подход к расчету наладок для многошпиндельных токарных автоматов.....	56
<b>Злотников И. И., Хило П. А.</b> Экспресс-метод оценки расклинивающего действия жидкостей для резки стекла.....	58

<i>Александрова Т. И., Русов В. П., Кенько Л. А., Корецкая Л. С. Метод оценки эффективности действия стабилизаторов</i> .....	59
<i>Александрова Т. И., Корецкая Л. С. Физические аспекты механики взаимодействия полимерных материалов с УФ-излучением</i> .....	59
<i>Вечер Р. И., Шейбак М. Р. Качество поверхности и эксплуатационные свойства шлифовальных деталей</i> .....	60
<i>Стрикель Н. И., Лискович М. И. Изготовление вытяжной деталей радиальных и радиально-упорных подшипников скольжения</i> .....	61
<i>Кульгейко М. П., Колесников Д. Г. Повышение эффективности процесса огранки алмазов путем расширения технологических возможностей оборудования</i> .....	62
<i>Верещагин М. Н., Запускалов Н. М., Агунович И. В. Особенности формирования структуры сплава Fe-Si-Al при двухвалковой быстрой закалке-прокатке расплава</i> .....	63
<i>Иноземцева Н. В. Исследование условия схватывания между металлической основой и порошковым покрытием на стадии их совместной пластической деформации в технологиях плакирования металлов</i> .....	64
<i>Карпенко В. М., Филипенко Е. В. Разработка автоматизированной системы управления свойствами формовочной смеси на основе регулирования ее состава</i> ....	65
<i>Царенко И. В., Пинчук Л. С. Новое поколение ингибированных пластиков</i> .....	66
<i>Банний В. А., Царенко И. В. Радиопоглощающие материалы на основе наполненного полиэтилена</i> .....	67
<i>Рыженко М. М. Соединение с помощью ультразвуковых колебаний армирующих материалов с полимерной матрицей</i> .....	68
<i>Рыженко М. М. Об изменении температуры у поверхности раздела полимер-армирующий материал в ультразвуковом поле</i> .....	69
<i>Кенько В. М., Степанкин И. Н. Механизм разрушения диффузионно-упрочненных карбидных слоев высоколегированных сталей ледобуритного класса</i> .....	70
<i>Пантелеенко Ф. И., Пантелеенко Е. Ф., Петришин Г. В. Технологические режимы нанесения магнитно-электрических покрытий из самофлюсующихся порошков на основе чугунной дроби</i> .....	71
<i>Петрашенко П. Д., Кравченко А. И., Мельников С. Ф., Дубровская Г. И. О причине возникновения неоднородности структуры экструзионных полимерных листов</i> .....	72
<i>Сергиенко В. П., Купреев А. В., Бухаров С. Н. Полимерные композиты для маслоохлаждаемых фрикционных устройств мобильных машин</i> .....	73
<i>Пискунов С. В., Иноземцева Е. В. Влияние микродугового оксидирования на адгезию низкоплавкого полиэфира к алюминию</i> .....	74
<i>Верещагин М. Н., Кирилюк С. И., Горанский Г. Г. Термодеформационная активация быстрозакаленных сплавов на железной основе при их атриторной обработке</i> .....	76
<i>Буренков В. Ф., Бобарикин Ю. Л. Определение давления плакирования прошивкой</i> .....	77

**Секция В. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, АВТОМАТИЗАЦИЯ  
КОНСТРУИРОВАНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАШИН**

<i>Мэн Цин-сун</i> Метод упрощения моделей для тренажерных систем управления.....	78
<i>Хвисевич В. М., Вермейчик А. И., Томашев И. Г.</i> Гранично-элементное решение задачи нестационарной термоупругости для плоской многосвязной области при температурном нагружении.....	79
<i>Вермейчик А. И., Сазонов М. И., Хвисевич В. М., Юркевич К. С.</i> Нестационарный конечно-элементный термостатический анализ стальной прямоугольной пластинки при закалке.....	80
<i>Сенько В. И., Гурский Е. П.</i> Моделирование процесса формирования потребного вагонного парка.....	81
<i>Локтионов А. В., Лысова А. С.</i> Расчет кинематических параметров режущего инструмента исполнительных механизмов.....	82
<i>Локтионов А. В., Лысова А. С.</i> Расчет кинематических и динамических параметров исполнительных механизмов.....	83
<i>Михайлов М. И., Короткевич А. М.</i> Анализ точности сборных резцов с шестигранными СМП.....	84
<i>Михайлов М. И., Мрочек Ж. А., Шейбак М. Р.</i> Исследование напряженно-деформированного состояния расточного резца с пластиной из твердого сплава.....	85
<i>Хейфец М. Л., Лысов А. А., Премент Г. Б.</i> Методология анализа технологического и эксплуатационного наследования показателей качества деталей машин.....	86
<i>Бровко С. В., Матвеев А. К., Пятов В. В.</i> Моделирование влияния степени диспергирования отходов на конструктивные параметры экструзионного оборудования.....	87
<i>Шевченко А. В.</i> Повышение виброустойчивости токарной обработки на станке с потенциально неустойчивой упругой системой резец–суппорт.....	88
<i>Литвин А. В.</i> Конструкторско-технологическое обеспечение точности зажима деталей при токарной обработке.....	88
<i>Астахов П. В., Свиридова В. В.</i> Фототермическая спектроскопия композитных объектов.....	89
<i>Курочка К. С., Воробьев В. В.</i> Исследование численных методов решения упругопластических задач.....	90
<i>Егоренков Н. И., Стародубцева М. Н.</i> Моделирование случайных процессов.....	91
<i>Асенчик О. Д., Мурашко В. С.</i> Модель взаимодействия объектов, имеющих внутренние состояния, с коллективом обслуживающих агентов.....	92
<i>Андрианов Д. Н., Новиков М. Н., Столяров А. И.</i> Управление потоками стали в кристаллизаторе с помощью аргонной продувки.....	93
<i>Шабловский О. Н., Кроль Д. Г., Кучин А. С.</i> Пространственно-периодические свойства тепловых полей при взрывной кристаллизации аморфных пленок.....	94
<i>Шабловский О. Н., Концевой И. А.</i> Гистерезисные свойства вынужденных колебаний теплового резонатора.....	95
<i>Попов В. Б.</i> Снижение диссипативных потерь в механизмах навески мобильных энергетических средств.....	96

<i>Попов В. Б., Голушко П. Е. Математическое моделирование параметров движения измельченной растительной массы в кормоуборочном комбайне.....</i>	97
<i>Трохова Т. А., Шишаков М. Л. Применение систем компьютерной математики для моделирования обратных задач динамики.....</i>	99

---

### Секция Г. ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

---

<i>Колешко В. М., Фурунжиев Р. И. Интеллектуальная система управления шумами машин.....</i>	100
<i>Колешко В. М., Воробей Е. А. Интеллектуальная система распознавания функциональности мозговых волн при управлении машинами.....</i>	101
<i>Мизгайлов В. Н. Исследование отражательных свойств плоских щелевых радиолокационных антенн.....</i>	102
<i>Довгяло В. А., Таибаев В. А. Применение электромеханического привода скоростемера при эксплуатации специального самоходного подвижного состава.....</i>	103
<i>Сычев А. В., Ивинский Л. К., Нестеров А. А. Автоматизация управления термопечью на базе промышленного контроллера.....</i>	104
<i>Широков Г. О. Несоответствие требований нормативно-технических документов к электроприводам качеству питающей электрической сети.....</i>	105
<i>Зализный Д. И., Широков О. Г. Математическое моделирование тепловых процессов в проводах с пластмассовой изоляцией.....</i>	106
<i>Пухальская О. Ю. Расчет количества отключений потребителей сельскохозяйственного назначения.....</i>	107
<i>Погуляев М. Н. Сравнительный анализ и перспективы применения современных электромеханических преобразователей в высокочастотных автономных электрогидравлических вибраторах.....</i>	108
<i>Логвин В. В., Сухотская О. Д. Электропривод механизмов с колебательной нагрузкой на основе активных выпрямителей.....</i>	109
<i>Захаренко В. С., Дорощенко И. В., Погуляев М. Н. Исследование гармонического состава потребляемого тока автоматизированного электромеханического испытательного стенда на основе асинхронно-вентильного каскада.....</i>	110
<i>Евминов Л. И., Гуминский А. Н. Устройство управления режимом подстанции.....</i>	111
<i>Луковников В. И., Козлов А. В. Реализации многомерно-временного операторного метода анализа элементов систем автоматического управления с нелинейностями типа «произведение».....</i>	112
<i>Виноградов Э. М. Модернизация внутритрубного снаряда-герметизатора.....</i>	113
<i>Луковников В. И., Самовендюк Н. В. Пуск трехфазного асинхронного электродвигателя в автоколебательный режим.....</i>	114
<i>Изотов П. П. Расчет преобразователя напряжение–частота.....</i>	115
<i>Лось Д. М. Структурная схема тепловых процессов в незащищенном силовом сухом трансформаторе.....</i>	117
<i>Щуплов В. В., Никеев А. И. Секторное масштабирование телевизионного изображения.....</i>	118
<i>Вяхирев Н. И., Захаренко Л. А., Храмов А. С. Разработка метода определения мест повреждения изоляции трубопровода.....</i>	119

<i>Гарбуз В. Н. Способ подстройки порога срабатывания корреляционного приемника под соотношение сигнал–шум в канале связи.....</i>	120
<i>Карпов В. А., Соболев Д. В. Способ повышения чувствительности металлодетектора кормоуборочной техники путем использования датчиков Холла.....</i>	121
<i>Никеенков А. И., Щуплов В. В. Преобразователь выходного сигнала дифференциально-трансформаторного датчика.....</i>	122
<i>Луковников В. И., Рудченко Ю. А. Анализ работы электропривода на базе автоколебательной системы «Асинхронный двигатель – колокол».....</i>	123
<i>Широков О. Г., Прохорчик М. А. Непрерывный контроль технического состояния устройства регулирования поднагрузкой.....</i>	124
<i>Вяхирев Н. И., Гизенко В. В., Захаренко Л. А. Магнитное поле в трубопроводе с неоднородным током.....</i>	125

---

#### Секция Д. АЭРОГИДРОДИНАМИКА; ПНЕВМО- И ГИДРОСИСТЕМЫ МАШИН И АППАРАТОВ

---

<i>Бужинский А. Д. Снижение энергозатрат при эксплуатации гидрофицированных мобильных машин.....</i>	126
<i>Кашин Ю. А., Жадан М. И., Кашина Р. Е. Аэродинамическое качество ветроэлектрических установок с постоянной частотой вращения ветротурбины.....</i>	127
<i>Михневич Н. Н., Михневич А. В. Исследование утечек жидкости в поршневых парах гидромашин.....</i>	128
<i>Михневич А. В., Михневич Н. Н. Исследование динамики гидростатических опор при высоких давлениях.....</i>	129

---

#### Секция Е. ВИБРОДИАГНОСТИКА, ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

---

<i>Грунтович Н. В. Вентильно-индукторные двигатели – будущее регулируемого электропривода.....</i>	131
<i>Бахмутская В. В. Оценка потенциала энергосбережения и экономии энергоресурсов объектов социальной сферы.....</i>	132
<i>Праховник А. В., Иншеков Е. Н., Попов В. А. Концепция построения энергетики устойчивого развития.....</i>	133
<i>Василевский Ю. Л. Особенности электропотребления при строительстве жилых зданий, промышленных объектов и сооружений.....</i>	134
<i>Шенец Е. Л., Колесников П. М. Построение структурных моделей удельного расхода электрической энергии.....</i>	135
<i>Токочакова Н. В. Развитие методической базы для оценки экономии электрической энергии промышленных потребителей.....</i>	136
<i>Судиловский В. К., Судиловская В. В. Когенерация – техническая основа социально-экономического прогресса страны.....</i>	137
<i>Иншеков Е. Н. Построение систем энергетического менеджмента – институциональные предпосылки энергетики устойчивого развития.....</i>	138
<i>Бубнов В. П., Субботин С. П. Магнитная муфта как эффективный способ уменьшения энергопотребления герметичных насосных агрегатов.....</i>	139

---

<b>Бубнов В. П., Зеленухо Е. В.</b> Эколого-экономические особенности работы энергоустановок в режимах пуска и останова.....	140
<b>Мороз Д. Р.</b> Формирование информационной базы данных для моделирования электропотребления предприятия химических волокон.....	141
<b>Фиков А. С., Мороз Д. Р.</b> Методы моделирования электропотребления для решения задач управления электропотреблением сложных технологических комплексов.....	143
<b>Логвинова Т. В.</b> Использование совмещения диспетчерской системы управления добычей руды и программы учета потребления электроэнергии для контроля за электропотреблением.....	144
<b>Мурашова Н. А., Федоров О. В.</b> Инновационные энергосберегающие технологии в металлургии.....	145
<b>Шенец Е. Л., Колесников П. М.</b> Разработка алгоритма построения регрессионной модели электропотребления для потребителей, выпускающих однородную продукцию.....	147
<b>Воробьев В. В., Козик А. Н.</b> Снижение энергетической составляющей затрат на транспорт нефти за счет оптимизации стационарной технологии.....	148
<b>Бранцевич П. Ю., Костюк С. Ф., Носко Д. В.</b> Применение измерительно-вычислительных комплексов для решения задач вибрационного контроля и диагностики.....	149
<b>Сницаренко И. П.</b> Эффективное использование тепловой изоляции – одно из важных решений проблемы энергосбережения.....	150
<b>Дорожко В. С., Дорожко С. В.</b> Возможности использования биомассы и ее отходов для производства энергии в Республике Беларусь.....	151
<b>Фиков А. С.</b> Номографическая оценка потенциала энергосбережения и экономии электрической энергии в системе транспорта нефти.....	152
<b>Кузнецов М. Н., Савочкина В. В.</b> Программа по оценке эффективности долгосрочных энергосберегающих мероприятий.....	153
<b>Ус А. Г., Колесник Ю. Н., Иванейчик А. В., Кузеро А. М.</b> Оптимизация электропотребления индукционных тигельных печей РУП ГЛЗ «Центролит».....	154
<b>Колесник Ю. Н., Ус А. Г., Иванейчик А. В., Кузеро А. М.</b> Графические модели оптимальной электрической нагрузки потребителей с кусочно-непрерывными расходными характеристиками.....	155

## ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

УДК 621.311

### СТРУКТУРА И ЗАДАЧИ КОМПЬЮТЕРНОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО УЧЕТА И УПРАВЛЕНИЯ ПОТРЕБЛЕНИЕМ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

Н. В. Грунтович, Н. В. Токочакова

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

В Директиве Президента Республики Беларусь от 14 июня 2007 г. изложены требования к организации жесткого контроля и снижения удельных материальных затрат на единицу выпускаемой продукции на основе модернизации, реконструкции производств, совершенствования системы подготовки и повышения квалификации специалистов в области энерго- и ресурсосбережения при обязательном энергетическом обследовании организаций для выявления резервов экономии ТЭР. Опыт проведения энергетического обследования промышленных потребителей РБ показывает, что потенциал экономии ТЭР составляет 15–20 %. Необходимо только научиться управлять потреблением ТЭР. Для этих целей на предприятиях необходимо создание компьютерной интеллектуальной системы технического учета и управления потреблением топливно-энергетических ресурсов (рис. 1).

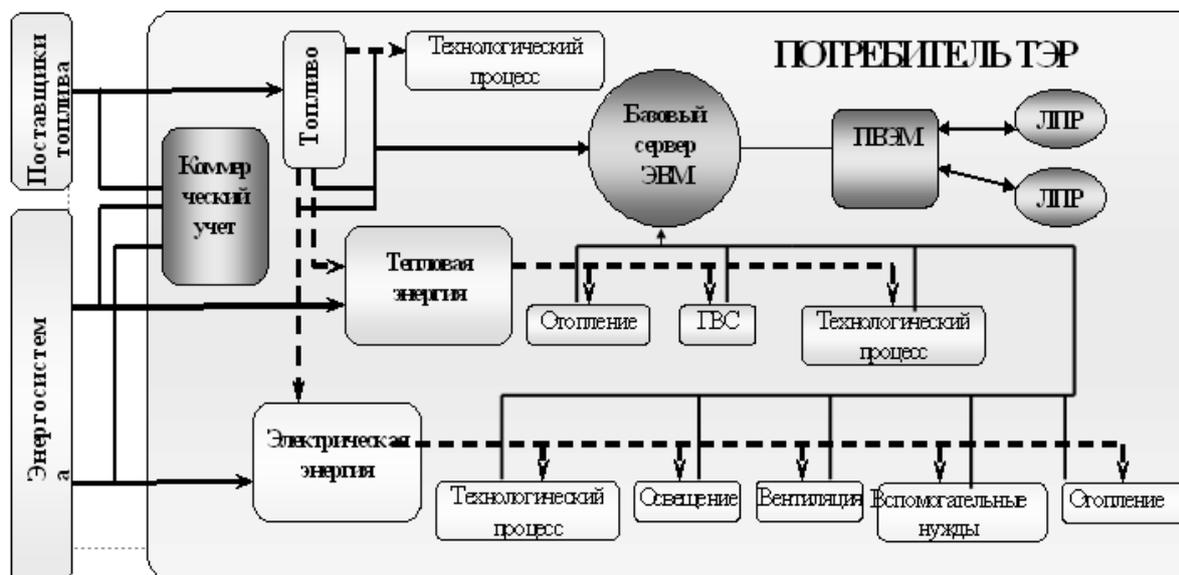


Рис. 1. Функциональная схема интеллектуальной системы технического учета и управления потреблением ТЭР

Основными задачами интеллектуальной системы технического учета являются:

- прогнозирование удельного расхода ТЭР в зависимости от планируемого выпуска продукции;
- регламентный контроль энергоэффективности ежеквартально или по усмотрению предприятия;
- контроль и оптимизация режимов работы оборудования с помощью математических моделей;
- определение потенциала энергосбережения на основе дифференциального показателя энергоэффективности;
- оперативное диагностирование энергопотоков;
- оптимизация режимов работы энергоустановок.

Общие принципы создания интеллектуальной системы технического учета (ИСТУ) приведены на рис. 2. ИСТУ должна включать набор базовых элементов системы: база знаний (БЗ), решатель, система советов и объяснений и блок накопления знаний. Ядром ИСТУ является база знаний, которая может содержать любую формализованную информацию. База знаний может иметь распределенную структуру и храниться в разных частях всей системы. Управление такой базой осуществляется при помощи системы управления базы знаний (СУБЗ).

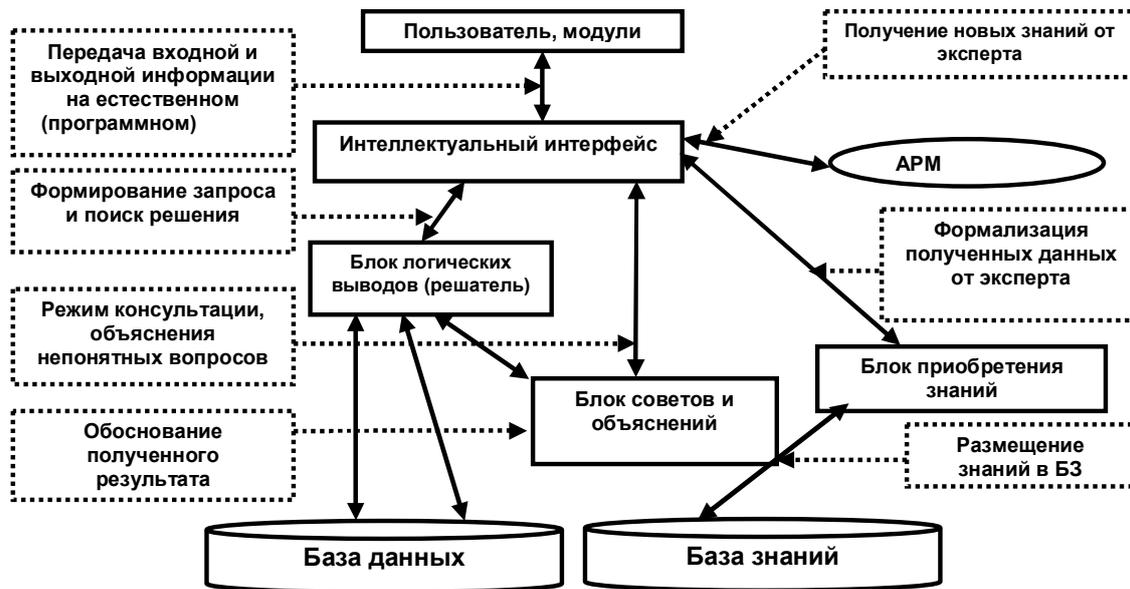


Рис. 2. Структурная схема интеллектуальной системы технического учета

Информация базы знаний представляется в соответствии с выбранной моделью описания предметной области на основе полученных данных. Блок вывода решений и блок советов и объяснений использует эти знания для ответа на вопросы пользователя, реагирования на ситуацию и принятия решения в автоматическом режиме. АРМ представляет собой совокупность аппаратных, программных средств и средств интеллектуализации (адаптивный пользовательский интерфейс).

Эффективная работа ИСТУ определяется уровнем организации движений информации по предприятию в виде информационных потоков. Создаваемая интеллек-

туальная система технического учета должна соответствовать предъявляемым требованиям: скорости обработки и доставки информации, скорости и качеству принятия решений и возможности принятия их в автоматическом режиме, возможности адаптации в любой ситуации, легкости получения и выделения новых знаний.

ИСТУ должна обладать надежностью, использовать передовые и интеллектуальные технологии, а также должна быть простой в эксплуатации и принятии решений.

Для иллюстрации работы ИСТУ рассмотрим информацию, представленную на рис. 3, где каждая точка характеризует работу технологического оборудования по суткам, т. е. суточному количеству выпускаемой продукции соответствует удельный расход электрической энергии. Большие колебания удельного расхода при одном и том же объеме выпуска продукции могут быть объяснены ретроспективным анализом при изучении суточных карт режимов работы технологического оборудования во время энергетического обследования. Анализ можно выполнять также ежедневно при помощи интеллектуальной системы технического учета. Следуя рекомендациям Департамента по энергоэффективности, представленные статистические данные технологического оборудования разделены на область «текущих», «перспективных» и «прогрессивных» норм. В случае возникновения значительного перерасхода ТЭР, предлагается ввести область недопустимого удельного расхода. Это предполагает проведение административного расследования с целью совершенствования организации работы или улучшения работы технологического оборудования. Построение указанных областей удельного расхода осуществляется при помощи соответствующей компьютерной программы интеллектуальной системы технического учета (рис. 4).



Рис. 3. Зависимость удельного потребления электроэнергии от объема добычи руды на предприятии горнодобывающей промышленности

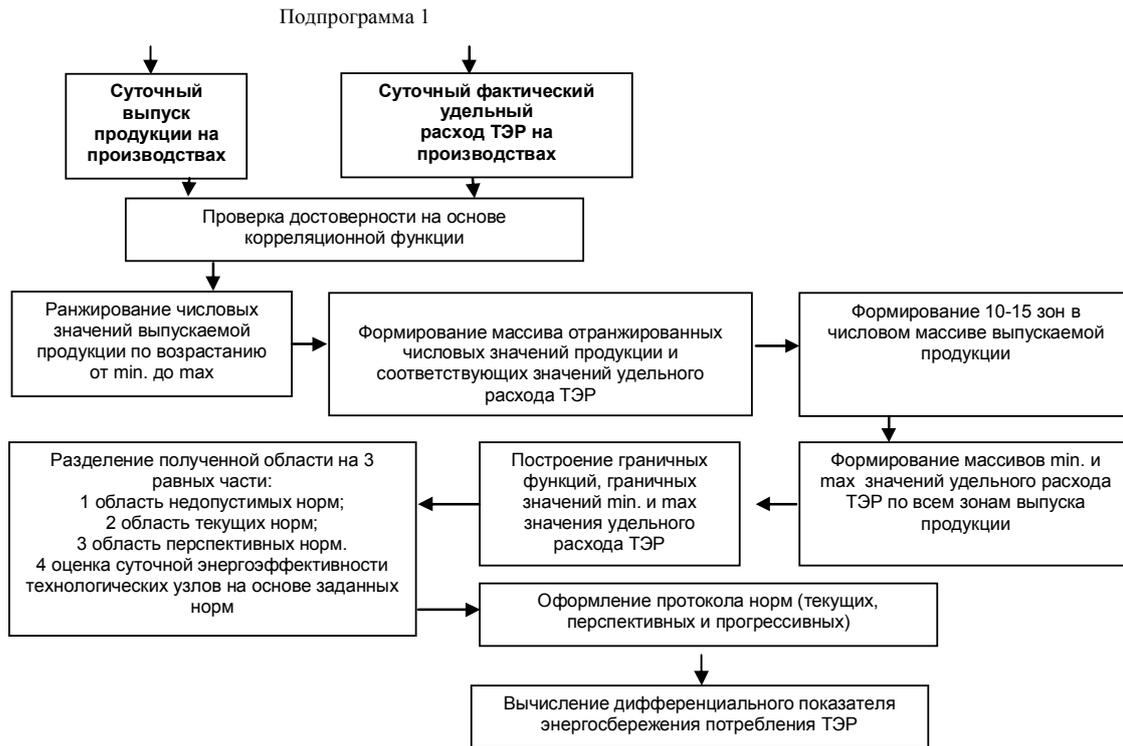


Рис. 4. Блок-схема алгоритма вычисления дифференциального показателя энергетической эффективности

Интеллектуальная система технического учета строится по модульному принципу: модуль целевых функций управления; модуль достоверности; модуль технико-экономических показателей котельных и компрессорных станций; модуль регистрации отказов, поломок и аварий; модуль потерь ТЭР; модуль диагностирования энергопотоков; модуль прогнозирования технического состояния энергетического и технологического оборудования; модуль контроля вторичных энергоресурсов; модуль энергетических балансов; справочный модуль (нормативные документы, схемы); модуль отчетной документации; модуль начисления премий за экономию ТЭР; модуль регламентного контроля энергетической эффективности.

Регламентный контроль энергетической эффективности проводится при помощи модулей на основе математических моделей, алгоритмов и компьютерных программ.

По предварительному анализу работы отдельных предприятий, применение интеллектуальных систем технического учета и управления потреблением ТЭР позволит: во-первых, снизить потребление ТЭР на 15–20 %; во-вторых, на строгой научной основе осуществлять формирование программ по энергосбережению на промышленных предприятиях; в-третьих, формировать перспективный план модернизации технологического оборудования.

### Выводы

1. Для повышения энергетической эффективности промышленных предприятий необходимо скорейшее внедрение современных компьютерных систем технического учета.

2. При создании интеллектуальных систем технического учета необходима установка современных счетчиков с учетом глубокой декомпозиции технологического процесса.

3. Для обеспечения высокой эффективности интеллектуальной системы технического учета необходима разработка соответствующих пакетов прикладных проблем с использованием математических моделей работы технологического оборудования и технологического процесса в целом.

УДК 621

## ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ВОССТАНОВИТЕЛЬНО-УПРОЧНИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Ф. И. Пантелеенко

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

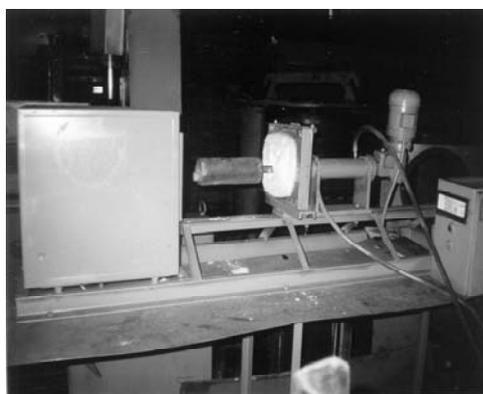
Известен целый ряд восстановительно-упрочнительных технологий: наплавка, напыление, химические, электрохимические и др.

Наиболее распространены наплавка и напыление. При этом могут быть использованы различные тепловые источники, наносимые материалы, являющиеся ведущими факторами, от которых зависят в итоге эксплуатационные свойства восстановленного или упрочненного изделия.

Принципиально важна, например, при наплавке или напылении природа наносимого материала. Для случая порошков это могут быть материалы на металлической, неорганической и полимерной основах. Одним из активно разрабатываемых направлений является создание диффузионно-легированных порошков.



а)



б)

Рис. 1. Промышленные установки диффузионного легирования наплавочного порошка: а – РУП «Минский завод шестерен»; б – ОАО «Минский подшипниковый завод»

В работе приведены результаты исследования особенностей получения диффузионно-легированных порошков на основе железа, в том числе и из отходов. Легирование таких порошков бором и кремнием позволяет придать им весьма важное свойство – самофлюсуемость. Использование различных порошков на основе железа (чугуна и сталей различных структурных классов – ферритного, перлитного, аустенитного, карбидного) позволяет получать в последующем разного типа (до-, за- и эвтектические) покрытия с дифференцированными свойствами.

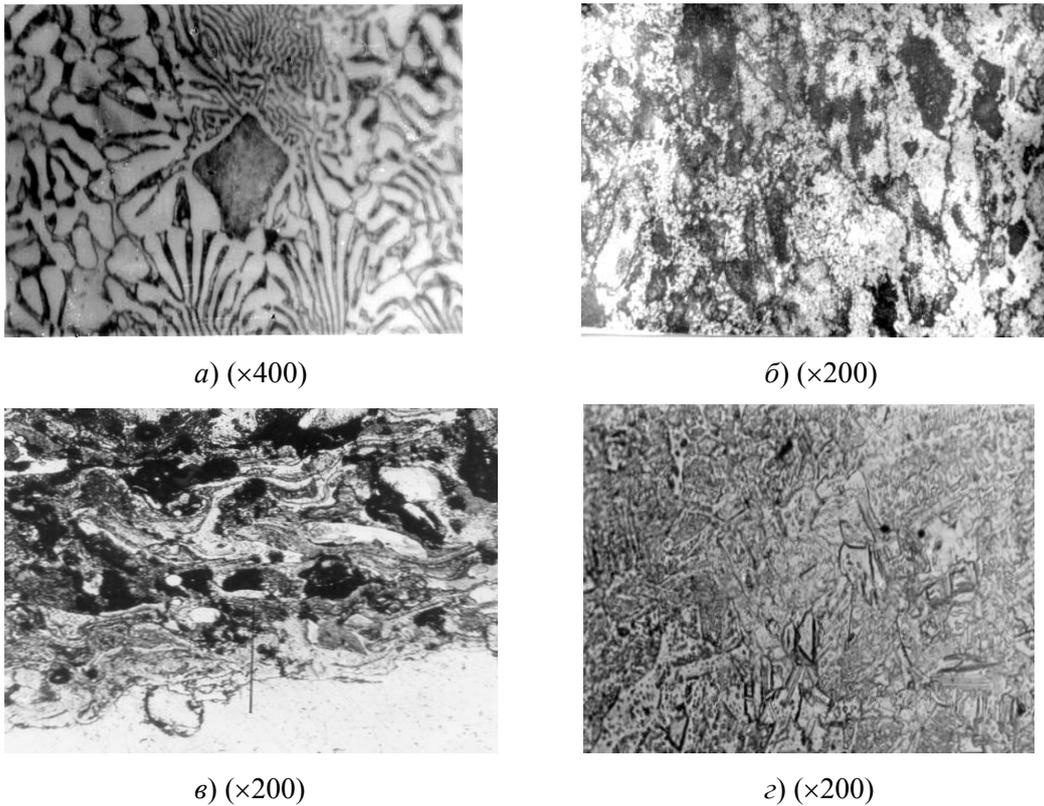


Рис. 2. Гетерогенные структуры износостойких слоев и покрытий из ДЛ-сплавов: *a* – наплавленный слой из борированной стружки серого чугуна; *б* – покрытие, полученное электроконтактной приваркой борированного порошка железа; *в* – газотермическое антифрикционное покрытие из диффузионно-легированного бором и медью порошка стружки серого чугуна; *г* – наплавленный слой из диффузионно-легированной хромом и бором медной проволоки после закалки и отпуска

В работе подробно приведены результаты исследования исходных и диффузионно-легированных порошков, их свойств.

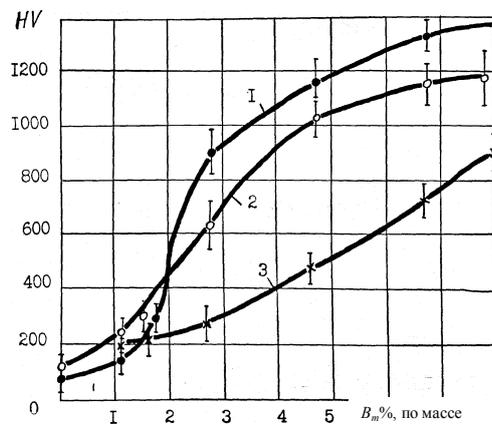
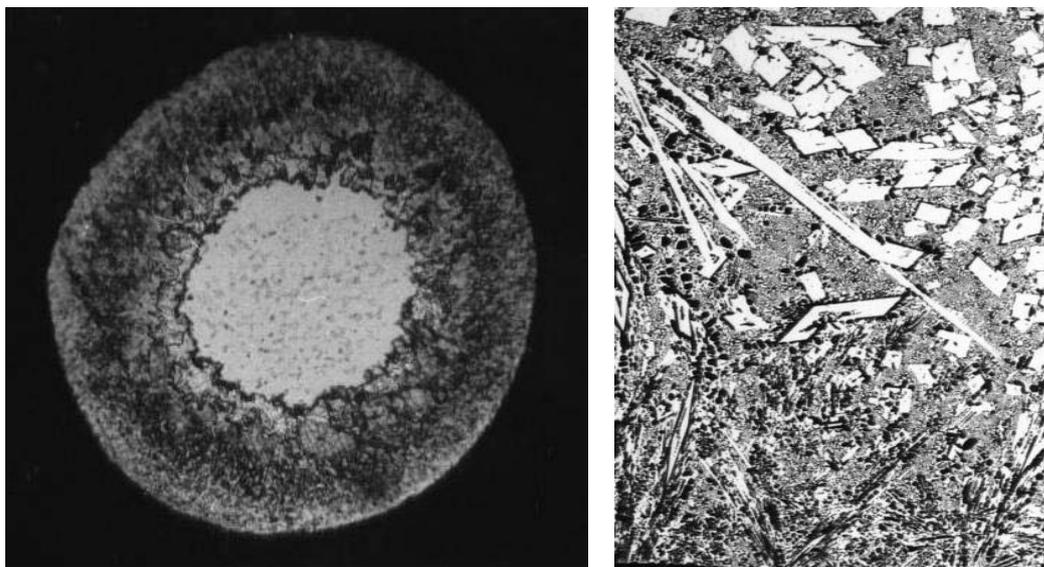


Рис. 3. Влияние содержания бора в диффузионно-легированном порошке железа на твердость наплавленных покрытий: *1* – лазерная наплавка; *2* – электроконтактная наварка; *3* – газопламенная наплавка

Весьма перспективно создание для напыления оксидокерамических порошков. Специальная плазмохимическая обработка позволяет формировать порошки с регулируемым соотношением кристаллической и аморфной составляющих. В итоге при высоких микротвердости и триботехнических характеристиках напыленные покрытия более пластичны.

Применение различных тепловых источников (плазменных, лазерных, магнито-электрических и др.) позволяет значительно влиять на степень неравновесности и дисперсности, а следовательно, и свойства получаемых покрытий. Подробно изложены результаты получения и исследования плазменных, лазерных и магнито-электрических восстановительных покрытий, их свойств.



а)

б)

Рис. 4. Микроструктура борированного самофлюсующегося стального порошка (а) и наплавленного из него износостойкого слоя (б)

## СЕКЦИЯ А. ДИНАМИКА, ПРОЧНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

УДК 629.463.004.67

### ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ И ВЫБОР ПРОТЯЖЕННОСТИ ГАРАНТИЙНОГО УЧАСТКА

**Е. П. Гурский, Р. Р. Курыло**

*Белорусский государственный университет транспорта,  
г. Гомель*

**Д. П. Сорокин**

*Вагонное депо, г. Жлобин, Беларусь*

Одной из главных стратегических задач, стоящих перед вагонным хозяйством, является поддержание работоспособности парка грузовых вагонов за счет повышения качества их ремонта и содержания. На Белорусской железной дороге достаточно успешно выполняется программа восстановления работоспособности подвижного состава. Вместе с тем анализ работы дороги показал, что надежность вагонного парка снижается, а размеры социально-экономических потерь от опасных отказов вагонов на гарантийных участках существенные. В первую очередь это связано с тем, что парк грузовых вагонов стареет. Пополнение парка вагонов за счет новых вагонов в условиях ограниченности финансовых средств является весьма проблематичным. Поэтому в настоящее время особое внимание должно быть уделено организации эффективного обслуживания грузовых вагонов.

Одним из главных мероприятий, направленных на повышение эксплуатационной надежности грузовых вагонов, является установление обоснованной протяженности гарантийных участков. Сегодня данный показатель на Белорусской железной дороге колеблется в достаточно больших границах. Обоснованная протяженность гарантийных участков снижает вероятность создания на транспорте опасных, аварийных ситуаций.

Для установления показателей эксплуатационной надежности на гарантийном участке Жлобин–Могилев собрана статистика работы ПТО этих двух станций за 2007–2008 гг. Проанализированы данные о количестве поездов, проследовавших по участку, среднем количестве вагонов в составах, длине гарантийного участка, а также о количестве отцепок грузовых вагонов по родам и узлам неисправностей.

Установлено, что наиболее отказоопасным, а значит, самым затратным по содержанию и первостепенным по вниманию относительно безопасности движения и сохранности груза является полувагон – 58 % от всех отказов, далее минераловозы, зерновозы, цементовозы – 14 %. По интенсивности отцепок в текущий непланный ремонт наиболее отказоопасным узлом является «кузов» – 41 %.

Для расчета оптимальной протяженности гарантийного участка реализован вероятностный подход, с учетом расчета квантилей случайной величины «наработки на отказ» для заданного уровня доверительной вероятности. Статистический анализ результатов эксперимента в части исследования закона распределения случайной величины «наработка на отказ» по узлам неисправностей позволил получить квантили для доверительной вероятности от 0,05 до 0,95 с шагом 0,05. Полученные результаты позволили получить значения оптимальной длины гарантийного участка Жло-

бин–Могилев по условию надежности следующих узлов: кузов, тормоза, тележка, автосцепное устройство, колесные пары.

Определено, что наибольшей неопределенностью будет обладать протяженность гарантийного участка ( $I_{\text{опт}} = 81$  км), полученная по эксплуатационной надежности «кузова», а наименьшей – по надежности «колесных пар» ( $I_{\text{опт}} = 98$  км). Проведение исследований по каждому гарантийному участку полигона Белорусской железной дороги позволит классифицировать участки с учетом возможных экономических потерь от отказов вагонов на них, а также усовершенствовать территориальную схему размещения пунктов технического обслуживания. Реализация этих мероприятий на практике позволит повысить безопасность движения на 6–9 %.

УДК 621.821

## **АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**С. В. Короткевич**

*РУП «Гомельэнерго», Беларусь*

**О. В. Холодилов**

*Белорусский государственный университет транспорта,  
г. Гомель*

**Н. Ф. Соловей**

*РКУП «ГСКБ по кормо- и зерноуборочной технике»,  
г. Гомель, Беларусь*

В Республике Беларусь оценка эксплуатационных свойств пластичных смазочных материалов (ПСМ) не производится.

Известно, что эксплуатационные свойства ПСМ в радиально нагруженных подшипниках качения буксовых узлов, ступиц колес, бортовых редукторов и т. д.) определяются физико-химическими свойствами и триботехническими характеристиками граничных смазочных слоев (ГСС). Существующие лабораторные (ГОСТ 9490–75) и стендовые испытания ПСМ, проводимые на подшипниках качения в различных научных центрах, энерго- и трудоемкие.

Триботехнические характеристики ПСМ, определяемые в лабораторных условиях, такие как индекс задира, нагрузка сваривания, показатель износа при осевой нагрузке и стендовые нагрузочно-скоростные параметры (критериями разрушения смазочного слоя служат резкое повышение температуры и возрастание шума в подшипнике) определяются после деструкции ГСС и начала разрушения поверхностного слоя материала подшипника, что не позволяет осуществлять диагностику подшипника до наступления питтинга, задира и схватывания.

В этой связи разработка методов и средств, позволяющих осуществлять диагностику подшипников качения по состоянию ГСС, в том числе и непосредственно на натурном узле трения, является актуальной задачей.

Для оценки эксплуатационных свойств ПСМ на базе машины трения СМТ-1 нами были разработаны стенд, моделирующий работу подшипника качения, и электрическая схема для измерения контактного сопротивления, значительно упрощающая и расширяющая функциональные возможности метода электрофизического зондирования, используемого для диагностики узлов трения по состоянию ГСС.

Триботехнические свойства ГСС оценивались по зависимостям момента трения, контактного сопротивления и температуры от нагрузки.

Радиальная нагрузка на подшипник качения изменялась в диапазоне 50–1050 Н, относительная скорость перемещения составляла 0,5 м/с. Были исследованы следующие ПСМ: ЛЗ-ЦНИИ (ТУ 38-101-320-77); Буксол (ТУ 0254-107-01124328-01); SKF (производство фирмы SKF).

Было установлено, что разработанная методика позволяет изучать кинетику формирования и изнашивания ГСС непосредственно в подшипнике качения без его разборки.

По повышению эксплуатационных свойств исследуемые ПСМ можно расположить в ряд: ЛЗ-ЦНИИ, Буксол, SKF. Молекулы SKF образуют на дорожке качения внутренней стороны внешней обкладки подшипника прочный хемосорбированный защитный слой, обладающий высокими антифрикционными и противоизносными свойствами.

Исследования показали, что анализ состояния ГСС в натуральных узлах трения позволяет на ранних стадиях прогнозировать их поведение, контролировать и управлять режимами эксплуатации.

УДК 620.179.16

## **ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОЛЕСНЫХ ПАР ВАГОНОВ**

**Н. Ю. Белоногий, О. В. Холодилов**

*Белорусский государственный университет транспорта,  
г. Гомель*

Цель исследований – совершенствование технологии ультразвукового (УЗ) контроля колесных пар вагонов.

Колесные пары относятся к наиболее ответственным элементам конструкций подвижного состава. От их состояния во многом зависит безопасность движения поездов, т. к. отказы конструктивных элементов колесных пар (колеса, оси, буксовые подшипники, корпуса букс и т. п.) могут привести к тяжелым последствиям.

Сложные технологии изготовления и восстановления, а также условия и сверхнормативные сроки эксплуатации колесных пар обуславливают возникновение дефектов и усталостных повреждений.

Действующая система НК деталей и узлов вагонов при их эксплуатации и ремонте основана на применении различных физических методов контроля. Широкое развитие в последние годы получила УЗ-дефектоскопия, позволяющая в ряде случаев выявлять дефекты, которые не могут быть обнаружены другими методами (внутренние трещины, поверхностные трещины под внутренними кольцами подшипников на шейке оси или под ступицей колеса и т. п.).

Нами предлагается способ УЗ-контроля осей колесных пар без снятия напрессованных деталей.

В отличие от известных, в предлагаемом нами способе преобразователи устанавливаются на цилиндрической поверхности предподступичной части оси и разворачиваются относительно геометрической оси таким образом, что излучение первого преобразователя направляют в часть шейки оси, расположенную в зоне между двумя подшипниками; излучение второго преобразователя направляют в область галтели между предподступичной частью и шейкой оси, а отраженный сигнал принимают третьим преобразователем; излучение четвертого преобразователя направляют в часть оси, расположенную в зоне расположения внешней кромки ступицы; излучение пятого преобразователя – в часть оси, расположенную в зоне расположения внутренней кромки ступицы; излучение шестого направляют перпендикулярно геометрической оси. Первый и четвертый–шестой преобразователи выполняются в виде

приемоизлучающих преобразователей, углы ввода преобразователей изменяются в диапазоне  $0 \div 65^\circ$ , а углы разворота – в диапазоне  $0 \div 60^\circ$ .

При такой схеме расположения датчиков прозвучивание оси происходит во всех направлениях с поверхности, образующая которой параллельна геометрической оси.

В предлагаемом способе для установки преобразователей используется поверхность предподступичной части, которая всегда открыта для доступа. Контроль указанных участков оси возможен только при одновременном использовании определенных углов ввода преобразователей и их разворота. При этом контролируются все участки, в которых в процессе эксплуатации в материале возникают неравновесные напряжения, приводящие к возникновению дефектов. Ввиду того, что поверхность ввода не требует специальной обработки, время контроля одной оси сокращается.

Данная схема прозвучивания предусматривает возможность УЗ-контроля колесных пар, когда колебания вводят во все части оси одновременно, что позволяет произвести контроль всей оси за один ее оборот что приводит к сокращению времени контроля.

УДК 621.852.44

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЗУБЧАТО-РЕМЕННЫХ ПЕРЕДАЧ

А. Г. Баханович

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

Зубчато-ременные передачи благодаря своим достоинствам (передача значительной мощности на большое расстояние с высокой скоростью, высокий КПД, демпфирующая способность, низкий уровень вибраций и шумоизлучения, низкая материалоемкость и масса ремня, отсутствие необходимости обслуживания и ремонта, высокая антикоррозионная стойкость и др.) стремительно развиваются, вытесняя обычные ременные и цепные передачи практически из всех областей применения.

Мировой уровень производства приводных зубчатых ремней превысил 3 млрд штук в год, ежегодный прирост их потребления составляет 8–10 %.

Вместе с тем опыт промышленной эксплуатации зубчато-ременных передач свидетельствует о недостаточном соответствии их возможностей высоким требованиям, предъявляемым к механическим приводам на современном этапе развития техники.

Это вызвано тем, что проблема комплексная, а решается отдельными разобщенными подходами. Первый – разработка и освоение новых высокоэффективных материалов, используемых для производства приводных зубчатых ремней. Второй – разработка усовершенствованных технологических способов производства ремней. Третий – совершенствование конструкций и методов проектного расчета передачи.

Таким образом, дальнейшее развитие научных основ повышения технических характеристик зубчато-ременных передач должно базироваться на системном подходе к исследованию принципов их функционирования, включающем комплексную разработку современных методов расчета и выбора рациональных параметров передачи, конструкций и прогрессивной технологии производства ремней.

Для решения поставленной задачи в научно-исследовательской инновационной лаборатории ременных передач и систем приводов БНТУ разработаны и апробированы:

– математические модели кинематики, динамики, напряженно-деформированного состояния зубчато-ременных передач, позволившие определить наиболее нагруженные элементы передачи и обосновать методы снижения контактного давления в зацеплении;

– методика определения рациональных параметров передачи (модуль, передаваемая окружная сила, число зубьев в зацеплении) и физико-механических свойств ремня (статическая жесткость, вязкость упругого последействия, вязкоэластическая жесткость зубьев и несущего слоя), обеспечивающих заданный эксплуатационный ресурс передачи по критериям износа рабочего профиля и усталостного разрушения зубьев и несущего слоя;

– новые конструкции технологической оснастки для изготовления зубчатых ремней, обеспечивающие снижение отклонения натяжения несущего слоя от заданного уровня в 2,5–3 раза, равномерность нагружения нитей корда и заданные допуски на длину и ширину ремней;

– рациональные параметры технологического процесса производства зубчатых ремней (давление, температура и продолжительность вулканизации) и материалы компонентов ремней (рецептуры резиновых смесей, типы и марки несущего слоя и износостойкого тканевого покрытия рабочей поверхности зубьев).

В совокупности это позволило создать и внедрить на предприятиях Республики Беларусь и Российской Федерации высокоэффективную импортозамещающую технологию и соответствующее оборудование для производства приводных зубчатых ремней, повысить их несущую способность на 45–55 %, снизить трудозатраты технологического процесса на 10–15 % и обеспечить значительный экономический эффект.

УДК 629.4.027.27

## **О НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ НАДРЕССОРНЫХ БАЛОК ТЕЛЕЖЕК ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ**

**В. И. Сенько, И. Ф. Пастухов, С. В. Макеев, М. И. Пастухов**

*Белорусский государственный университет транспорта,  
г. Гомель*

Тележка модели 18-100 (ЦНИИ-ХЗ), работающая под 4-осными грузовыми вагонами свыше 60 лет (с 1956 г.), не отвечает современным требованиям по своим ходовым качествам и межремонтному пробегу, который должен быть сегодня от постройки до деповского ремонта не менее 500 тыс. км, а в последующие междеповские ремонты – 200 тыс. км.

Особенностью конструкции тележки модели 18-100 является ее трехэлементное исполнение, состоящее из двух литых боковых рам и надрессорной балки, несущая способность которых определяет срок службы тележки. Разрабатываемая на перспективу тележка сохраняет свою конструкционную схему. Однако поиск конструкторского решения надрессорной балки еще не закончен.

Авторами исследовано напряженно-деформированное состояние трех конструкций надрессорных балок: колоночной с жесткими скользунами (черт. 100.00.001-0, серийная, выпуск до 1980 г., тележка модели 18-100), бесколоночной с жесткими скользунами (черт. 100.00.001-5, серийная, выпуск с 1980 г., тележка 18-100), а также бесколоночной с упругими скользунами (черт. 578.00.001-0), опытная, выпуск с 2003 г., тележка 18-578). Расчет выполнен на статическую нагрузку 420 кН с использованием объемных конечноэлементных моделей в программном комплексе Nastran. Разбивка произведена на 17233 конечных элементов и 26376 узлов.

Анализ полученных напряжений показывает, что от указанной нагрузки во всех трех балках напряжения ниже допускаемых 250 МПа (для конструкционно-легированной стали 20ГЛ) и что наибольшие напряжения в них возникают по ниж-

нему поясу и колеблются в зависимости от конструкции балки от 50 до 75 МПа. Переход от колоночной конструкции (1980 г.) в подпятниковой зоне балки к бесколоночной привело к снижению напряжений (в зоне наиболее вероятных эксплуатационных повреждений) соответственно на 26 и 39 % (с 75 до 55 МПа по середине балки и с 87 до 53 МПа в зоне технологических отверстий). В зоне скользунов напряжения остались неизменными на уровне 62–65 МПа.

Чтобы оценить изменения напряженного состояния надрессорных балок в состоянии динамики найдены величины амплитудных напряжений в бесколоночных балках с жесткими скользунами (тележка 18-100) и с упругими скользунами (тележка 18-578).

Исследованиями установлено, что величины амплитудных напряжений в надрессорных балках тележек модели 18-100 при движении со скоростями от 20 до 120 км/ч изменяются: в среднем сечении – от 2,2 до 13,3 МПа, а в сечении по скользунам – от 2,6 до 15,7 МПа. Тогда как в балках тележек модели 18-578 они соответственно распределяются в пределах 2,1–10,3 МПа и 2,5–12,7 МПа. То есть в опытных надрессорных балках амплитудные напряжения как по средней зоне, так и по скользунам снижаются на 22,5 %.

По спектрам амплитуд динамических напряжений найдены эквивалентные напряжения и коэффициенты запаса сопротивления усталости, которые в наиболее опасном сечении надрессорных балок (по скользунам) равны: в балках с жесткими скользунами – 1,22 и в балках с упругими скользунами – 1,59 (при допускаемых – 1,4).

УДК 652.225.073:665.61.7(476)

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ РАЗБОРКИ СОЕДИНЕНИЙ С НАТЯГОМ КОЛЕСНЫХ ПАР**

**С. Ф. Гориченко, Р. И. Чернин**

*Белорусский государственный университет транспорта,  
г. Гомель*

Вопросы улучшения технологии сборки (разборки) прессовых соединений и снижения ее энергоемкости являются актуальными. Можно выделить два основных направления по демонтажу соединений с натягом: тепловой с применением индукционного нагрева токами высокой частоты и так называемый «холодный», где для распрессовки используется только механический стенд.

Анализ вышеперечисленных способов демонтажа соединений с натягом показывает, что в первом случае энергоемкость процесса остается достаточно, а во втором – детали расформированного соединения часто приходят в негодность или требуют дополнительной механической обработки.

Наиболее целесообразным является применение гидропрессовой сборки с использованием высокого давления масла. При гидропрессовом способе сборки и разборки напряженных посадок реализуется расклинивающий эффект масляной прослойки между контактирующими поверхностями деталей соединений. Давление нагнетаемого в сопряжение масла должно превышать величину среднего контактного давления в сопряжении с натягом. В этом случае между поверхностями контакта образуется расклинивающая прослойка масла, которая снижает коэффициент трения и степень переформирования микропрофиля деталей. Обеспечивается возможность многократного монтажа и демонтажа соединений без повреждения поверхностей деталей (задиры, риски и пр.) и снижение необходимого запрессовочного – распрессовочного усилия; исключается необходимость применения крупногабаритных механических прессов большой мощности. Указанная возможность многократного мон-

тажа и демонтажа соединений без повреждения деталей, замена мощных прессов малогабаритными нагружающими устройствами (модулями), реализация новой безрамной технологии сборки-разборки позволяет относить гидропрессовые соединения к категории легкоразъемных.

Задачу рациональной распрессовки колец буксовых роликовых подшипников с шейки оси колесной пары позволяет решить разработанное устройство (патент Республики Беларусь на изобретение ВУ 7609 С1), содержащее гидроцилиндр высокого давления, выполненный в виде стакана с центральным отверстием в днище и снабженный торцовым уплотнением на открытом конце стакана и кольцевым уплотнением по отверстию днища, в котором установлен поршень-шток (в виде направляющего фальшвала), соединенный соосно с шейкой оси. Корпус гидроцилиндра снабжен средством крепления его к наружной поверхности демонтируемого кольца подшипника, выполненным в виде фрикционных захватов. Наружный диаметр фальшвала меньше диаметра шейки оси колесной пары на величину, обеспечивающую монтажный зазор со снятым с шейки оси кольцом подшипника. Фальшвал наворачивают на резьбовую часть шейки оси. Корпус гидроцилиндра перемещают силовым винтом по фальшвалу до упора в торец кольца подшипника и закрепляют захватами по поверхности кольца. В замкнутую внутреннюю полость корпуса нагнетают масло под давлением, превышающем величину контактного сжатия деталей посадки, вызываемого упругим деформированием кольца при наличии натяга в сопряжении его с шейкой. Жидкая смазка проникает в глубь сопряжения в виде клиновой масляной прослойки. При достижении расчетного давления масла в полости гидроцилиндра производят аксиальное перемещение его корпуса вместе с кольцом относительно шейки оси при помощи силового винта. Оставшееся кольцо снимается аналогично.

УДК 629.4.027.116

### **КОНТРОЛЬ ПРОЧНОСТИ НАПРЕССОВКИ КОЛЕЦ БУКСОВЫХ ПОДШИПНИКОВ НА ШЕЙКИ ОСЕЙ КОЛЕСНЫХ ПАР**

**И. Л. Чернин, С. Ф. Гориченко, Р. И. Чернин**

*Белорусский государственный университет транспорта,  
г. Гомель*

Оценка прочности напрессовки внутренних колец роликовых буксовых подшипников заслуживает особого внимания при решении задачи повышения эксплуатационной надежности железнодорожного подвижного состава. Анализ причин нарушения безопасности движения показывает, что опасные неисправности, из-за которых вагоны отцепляются в текущий ремонт по неудовлетворительному техническому состоянию буксовых узлов (грение букс, аксиальный сдвиг корпуса буксы), выявляются в первые шесть месяцев после ремонта (примерно 30 % всех отцепок вагонов, связанных с состоянием буксового узла). Это свидетельствует о недостатках формирования и выходного контроля соединений с гарантируемым натягом. Ослабление натяга посадки внутренних колец подшипников составляет по данным ВНИИЖТа для букс пассажирских вагонов около 4 % и для грузовых вагонов примерно 18 %. Изменение натяга в большую сторону (более 0,07 мм) приводит к повышению напряжений, излому и разрыву внутреннего кольца подшипника. Этот вид отказов в работе составляет около 20 %.

В ОНИЛ «ТТОРЕПС» БелГУТа разработан новый способ и устройство неразрушающего контроля соединений с гарантированным натягом теплового формирования (патент ВУ 7377 С1) при изготовлении и ремонте колесных пар вагонов, обеспечи-

вающий возможность осуществления выходного контроля прочности сопряжения тепловых поперечно-прессовых посадок по фактическому напряженно-деформированному состоянию (НДС) охватывающих деталей соединений при их формировании. Используется расчетно-экспериментальный метод определения контактного давления в зоне сопряжения по данным тензометрирования. По разности измеренных величин нормальных растягивающих напряжений на поверхности чувствительного элемента измерительного устройства по зависимостям Ляме-Гадолина рассчитывают величину контактного давления в полученной тепловой напрессовке деталей.

В Гомельском вагонном депо проведены установленные НТПА замеры деталей формируемых тепловых соединений колец подшипников с шейками осей и выполнены контрольные напрессовки по проверке предложенного способа диагностики по прочности сопряжения деталей по фактическому натягу посадки. Полученные экспериментальные данные значительно отличаются от замеряемых по установленной в производстве методике, регламентированной технической документацией.

Новизна, полезность и востребованность разработанных технических решений для осуществления выходного контроля посадки колец по их фактическому НДС подтверждаются патентами РФ и РБ: ВУ 7271 С1, ВУ 7377 С1, ВУ 9347 С1, ВУ 10353 С1; RU 2228830 С2, RU 2279647 С2; ВУ 1587 U, ВУ 1656 U, ВУ 2431 U.

Для оценки прочности сопряжения с шейкой оси ранее напрессованных колец наружного и внутреннего подшипников разработаны новый способ контроля прочности тепловой напрессовки колец подшипников и устройство для его осуществления, признанные изобретениями (решение от 25.12.07 г.). При контроле бывших в эксплуатации сопряжений колец подшипников с шейками осей НДС деталей создается при помощи гидрораспора в зоне контакта последних от высокого давления рабочей жидкости (минерального масла), нагнетаемого со стороны торцев контролируемых колец. Указанный новый способ может быть использован и при новом формировании тепловых соединений с шейками осей внутренних подшипниковых колец, после остывания последних до температуры производственного помещения по месту посадки.

УДК 629.463.32:001.891.54

## **КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЖЕННОСТИ ОБЛАСТИ ЛЮКА-ЛАЗА ВАГОНА-ЦИСТЕРНЫ**

**А. В. Путято**

*Белорусский государственный университет транспорта,  
г. Гомель*

Целью работы является оценка гидродинамической нагруженности области сочленения люка-лаза с обечайкой котла железнодорожного вагона-цистерны при перевозке нефтепродуктов с учетом возможного частичного заполнения жидким грузом.

Для решения поставленной задачи разработана конечно-элементная модель срединной продольной плоскости котла с жидкостью в программном комплексе ANSYS, учитывающая наличие люка-лаза с его обечайкой и позволяющая выполнять численные расчеты значений давлений жидкости на металлоконструкцию кузова с учетом возможности имитации частичного заполнения котла, свойств перевозимого жидкого груза и кинематических параметров движения вагона. Для упрощения расчетов механики жидкости приняты следующие допущения: жидкость несжимаема; оболочка котла абсолютно твердое тело. Для решения поставленной задачи применена наиболее распространенная ( $k - \varepsilon$ )-модель турбулентного течения жидкости,

основанная на двух уравнениях: для турбулентной кинетической энергии  $k$  и скорости диссипации турбулентной энергии  $\varepsilon$ .

Принималось, что в начальный момент жидкость находилась в состоянии относительного покоя, и ее свободная поверхность была плоской. В качестве кинематического граничного условия использовалось условие Неймана, т. е. отсутствие скорости жидкости на стенках котла цистерны. Шаг по времени был принят равным 0,003 с.

Выполнены расчеты перетекания жидкости внутри котла железнодорожной цистерны при ее ударе о неподвижное препятствие при различных уровнях налива котла. В качестве перевозимой жидкости принят бензин, с плотностью  $870 \text{ кг/м}^3$  и динамической вязкостью  $0,0006031 \text{ кг/(м} \cdot \text{с)}$ .

В результате выполнения серии расчетов получены временные зависимости давления жидкости на внутреннюю поверхность котла для различных уровней его заполнения жидким грузом. Анализ результатов расчетов при заполнении котла вагона-цистерны на 80 и 90 % показал, что максимальные значения давлений в области соединения обечайки котла и люка-лаза значительно превышают испытательное давление  $P \approx 0,6 \text{ МПа}$ , а при нормативном наливе превышение зафиксировано для всех областей. В то же время величина внутреннего давления при испытаниях котлов на заводе-изготовителе должна быть не ниже наибольшего расчетного давления. В работе выполнено также исследование нагруженности узла при изменении высоты части обечайки люка-лаза, расположенной внутри котла. Определены рациональные размеры вышеуказанного параметра для различных уровней заполнения котла, с позиции минимального гидродинамического нагружения при соударении вагонов.

Наличие давлений такого порядка в области люка-лаза может являться причиной нарушения плотности прилегания крышки загрузочного люка, что в свою очередь может привести к потере перевозимого груза и загрязнению окружающей среды. Кроме того, практика обследования технического состояния кузовов вагонов-цистерн после длительной эксплуатации показала, что в областях приварки горловины люка-лаза встречаются трещины, одной из причин возникновения и развития которых могут быть периодические локальные воздействия жидкости, сопровождающиеся достаточно большими значениями давлений

УДК 621.91-529:62-19

## **ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТОЧНОСТИ МНОГОЦЕЛЕВОГО СТАНКА НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКУЮ НАДЕЖНОСТЬ**

**В. П. Горбунов, В. Ф. Григорьев**

*Брестский государственный технический университет,  
Беларусь*

При эксплуатации высокоточных многоцелевых станков (МС) необходимо обеспечивать не только высокую начальную точность обработки, но и ее сохранение в период эксплуатации. Это свойство МС характеризуется параметрической (точностной) надежностью. Причем выход параметра заданной точности за допустимые пределы относится к параметрическим отказам станка и считается технологическим отказом системы.

Существует несколько подходов при выборе показателей для выходных параметров станка: оцениваются только те параметры траекторий формообразующих движений станков, которые влияют на точность обработки; наряду с параметрами траекторий используется векторное задание положений установочных баз станка; оценивается суммарное влияние параметров траекторий рабочих органов станка на

формирование так называемого «геометрического образа» обрабатываемой детали. Геометрический образ формируется технологическим назначением станка, параметрами обрабатываемого изделия, типом и формой применяемого инструмента.

Конструкция станка, точность его изготовления и сборки формируют начальную погрешность для траектории формообразующего движения, а также начальную погрешность взаимного положения траекторий единичных движений рабочего органа. Последовательность расчета параметров технологической надежности рассматривается на примере 4-координатного многоцелевого станка мод. МС12-250. Выходные параметры формируются одновременными относительно связанными перемещениями вдоль координат  $X, Y, Z$  при контурной обработке либо установочными перемещениями вдоль тех же координат при позиционировании. Слагаемых погрешности геометрического образа приводятся к единой системе координат, связанной пространственным положением с формируемыми движениями, согласно правилам перехода от одной системы координат к другой. Их можно представить в виде:  $\Delta = A_{mn} \times A(\varphi) \times \delta_{ij}$ , где  $A_{mn}$  – матрица состояния рассматриваемого параметра в виде физической матрицы состояния размером  $3 \times 3$ ;  $A(\varphi)$  – матрица поворота вокруг осей координат  $X, Y, Z$ ;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера, характеризующий влияние погрешности направления  $i$  при движении в направлении  $j$ .

Оценка параметров точности для данного станка в плоскости стола (рабочем объеме) проводилась для конкретных условий работы: вводились числовые значения геометрических параметров базовых деталей, вылета шпинделя, значения положения ползуна, вылет оправки и инструмента. Расчет показателей параметрической надежности при допуске на лимитирующий размер  $\delta = 32$  мкм и вероятности безотказной работе  $P(t) \rightarrow 0$  сводился к определению коэффициента запаса надежности  $K_T = \delta/\delta_\phi$ , где  $\delta_\phi$  – отклонение выходного параметра станка и  $\gamma_n$  – скорость изменения запаса надежности. Если при первоначальном состоянии  $K_T = 0,7$ , то при учете процессов средней скорости (влияния тепловых деформаций на положение шпиндельного узла) значение его изменится за смену до 0,9.

Использование данной методики расчетов технологической надежности позволяет прогнозировать надежность станка и обеспечивать высокую точность обработки в течение эксплуатационного цикла оборудования.

УДК 656.224.072

## ТОРМОЗНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПАССАЖИРСКИХ ПОЕЗДОВ

Э. И. Галай, П. К. Рудов

*Белорусский государственный университет транспорта,  
г. Гомель*

Эффективность тормозных средств является важнейшим условием безопасного следования поездов. Однако в эксплуатации при экстренных торможениях пассажирских поездов часты случаи превышения нормативных значений тормозного пути. С целью установления фактических значений тормозной эффективности и выявления причин ее снижения были проведены натурные испытания поездов и теоретические исследования. Испытания подтвердили низкую тормозную эффективность пассажирских поездов, оснащенных как чугунными, так и композиционными колодками. В частности, при чугунных колодках тормозной коэффициент поезда находился в пределах 0,45–0,57, а при композиционных – от 0,31 до 0,50 при норме единого наименьшего нажатия 0,60, когда поезд может двигаться со скоростью 120 км/ч.

Расчеты показали, что характеристики рычажной передачи и регламентированные фрикционные свойства тормозных колодок не всегда позволяют обеспечить нормативную тормозную эффективность. Расчетные силы нажатия чугунных и композиционных тормозных колодок на ось различных типов вагонов, приведенные в инструкциях и правилах, являются завышенными. В частности, они не учитывают влияние пружин автоматических регуляторов тормозных рычажных передач на силу нажатия. При расчете обеспеченности тормозами пассажирского поезда, оборудованного композиционными колодками, не учитывается уменьшение тормозной эффективности из-за постановки чугунных колодок на редукторных осях и снижения коэффициента трения применяемых в настоящее время колодок ТИИР-303 по сравнению с ранее применяемыми.

Для повышения эффективности тормозов и совершенствования методики расчета обеспеченности пассажирского поезда тормозами следует:

1. Более четко определить нажатие тормозных колодок по развеске вагонов с учетом влияния пружины авторегулятора, установить большее число градаций тормозной рычажной передачи по длине горизонтальных рычагов и массе тары вагона.

2. Провести исследования коэффициента сцепления колес с рельсами на различных участках железных дорог, уточнить расчетные формулы коэффициента сцепления и нормы проектирования автотормозов.

3. Ограничить применение композиционных тормозных колодок на пассажирских вагонах при скоростях движения до 120 км/ч, хотя их износостойкость значительно выше, чем у чугунных.

4. При использовании композиционных колодок на вагонах редукторные оси также оборудовать композиционными тормозными колодками независимо от максимальных скоростей движения поезда.

5. Ввести нормы расчетных сил нажатия композиционных колодок на ось вагонов без пересчета на чугунные колодки как для пассажирских, так и для грузовых вагонов.

6. Разработать номограммы или таблицы тормозных путей для поездов, оборудованных композиционными колодками, по расчетному тормозному коэффициенту.

7. После капитального ремонта данные о массе тары наносить на кузов вагона после взвешивания на весах.

8. Провести исследования и разработать мероприятия (конструктивные, технологические и организационные) по повышению тормозной эффективности пассажирских поездов.

9. Ужесточить контроль за качеством изготовления колодок.

УДК 62-229.312.2.001.24

## О РАСЧЕТЕ СИЛ ДЛЯ Г-ОБРАЗНЫХ ПРИХВАТОВ

С. А. Щербаков

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

При анализе известных формул (1)–(3), связывающих силу закрепления ( $W$ ) и усилие на приводе ( $P$ ), для Г-образных прихватов:

$$W = P \left( 1 - 3 \frac{L \cdot f}{H} \right); \quad (1)$$

$$W = (P - P_n) \cdot \left( 1 - 3 \frac{L \cdot f}{H} \right), \quad (2)$$

где  $L$  – длина плеча прихвата (расстояние между силами  $P$  и  $W$ );  $H$  – высота направляющей части прихвата;  $f$  – коэффициент трения;  $P_n$  – сила возвратной пружины.

Было установлено:

1) при выводе формул (1), (2) рассматривалась упрощенная схема действия сил, без учета сил трения прихвата о заготовку и возвратной пружины (при ее наличии) о прихват;

2) на процесс закрепления и удержания заготовки значительное влияние оказывает направление действия силы трения между Г-образным прихватом и корпусом. Поэтому при анализе условия равновесия следует рассматривать две расчетные схемы, соответствующие двум стадиям закрепления:

– схема 1: процесс приложения силы привода для закрепления заготовки, когда сила трения направлена против действия усилия привода;

– схема 2: процесс удержания прихватом заготовки от действия внешних сил, когда сила трения и усилие привода совпадают по направлениям;

3) при выводе этих формул ошибочно принята схема 2. Поэтому рассчитанные силы ( $P$  и  $W$ ) пригодны только для удержания заготовки (значение  $P$  будет недостаточным);

4) на некотором этапе силы  $P$  и  $W$  ошибочно поменялись местами. Эта ошибка несколько компенсировала первую, но все равно в результате рассчитанные значения сил будут неверными (на 30 % для прихватов с размерами по ГОСТ14733–69).

В результате выполненных исследований с учетом вышеизложенного получены следующие формулы для силовых расчетов Г-образных прихватов:

$$P = W \left( 1 + \frac{3 \cdot L \cdot f}{H} \right) \quad (3)$$

$$P = P_n + W \left( 1 + \frac{3 \cdot L \cdot f}{H} \right). \quad (4)$$

Практическое применение результатов исследований повысит точность расчетов.

#### Л и т е р а т у р а

1. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. / под ред. А. Н. Малова. – 3-е изд., перераб. – Москва : Машиностроение, 1972. – Т. 2. – 568 с.
2. Горошкин, А. К. Приспособления для металлорежущих станков : справочник / А. К. Горошкин. – 7-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1979. – 303 с.
3. Станочные приспособления : справочник : в 2 т. / ред. совет: Б. Н. Вардашкин (пред.) [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1984. – Т. 1 / под ред. Б. Н. Вардашкина, А. А. Шатилова. – 1984. – 592 с.

УДК 621.83.061.1

### УВЕЛИЧЕНИЕ РЕСУРСА РАБОТЫ РЕДУКТОРА ГЛАВНОГО ПРИВОДА ПРЕССА ФОРМОВКИ КАМНЕЙ СИЛИКАТНЫХ

**М. П. Кульгейко, В. П. Петровский, Е. Э. Дмитриченко**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Применение зарубежной техники, прежде всего, стран дальнего зарубежья, вызывает определенные проблемы на предприятиях Республики Беларусь, решение которых усложняется по мере износа машин и механизмов. Это связано с такими вопросами, как слож-

ность ремонта из-за неполной конструкторской документации на изношенные механизмы, узлы и детали; проблемы изготовления отдельных сборочных единиц в связи с несоответствием стандартов, принятых в стране-изготовителе и отечественных; относительно высокая стоимость комплектующих, поставляемых предприятием-изготовителем техники.

На предприятиях строительных материалов Республики Беларусь и других стран СНГ, специализирующихся на выпуске камней силикатных, эксплуатируется оборудование фирмы «Makrum» (Польша). Главный привод пресс-автомата формовки камней силикатных содержит червячный редуктор типа RSK-315/10, который в эксплуатации оказался недостаточно надежным из-за отказов в червячной паре.

Целью исследований является повышение надежности работы редуктора главного привода и снижение затрат на эксплуатацию пресса формовки камней силикатных.

Для достижения поставленной цели рассмотрена возможность восстановления и повышения работоспособности пресса путем модернизации редуктора главного привода с применением технических решений в рамках действующих стандартов Республики Беларусь. Эффективность применения таких решений объясняется тем фактором, что в редукторах фирмы «Makrum» червячная пара выполнена с параметрами, отличающимися от стандартизированных в отечественной промышленности. Следовательно, восстановление работоспособности такого оборудования требует принятия нестандартных конструкторских и технологических решений, что, в свою очередь, требует дополнительных затрат времени и средств.

Выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований, при этом решены следующие задачи:

- на основе анализа условий работы редуктора главного привода теоретически обоснованы и определены оптимальные кинематические и геометрические параметры червячной пары редуктора по условиям прочности, жесткости и реализации зацепления при сохранении исходного межосевого расстояния передачи;
- разработана конструкторская документация для изготовления деталей опытного образца модернизированного редуктора;
- спроектирована и изготовлена специальная червячная фреза для нарезания зубьев червячного колеса;
- изготовлены рабочие образцы деталей червячной пары, выполнен монтаж редуктора и проведены эксплуатационные испытания;
- разработаны технические рекомендации по эксплуатации редуктора.

В результате испытаний установлено повышение надежности работы пресса, снижение затрат на эксплуатацию и возможность импортозамещения технической продукции. Выполненные исследования позволили решить важную техническую проблему предприятий строительных материалов с экономическим эффектом 9,6 млн р. в год при модернизации одного пресса.

УДК 539.3

## **К РАСЧЕТУ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗАМКНУТОЙ ОБОЛОЧКИ**

**С. Ф. Андреев**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Рассматривается задача численного расчета переменных коэффициентов первой и второй форм квадратичной поверхности замкнутых оболочек, представляющих по форме обширный класс тонкостенных конструкций.

В качестве геометрической модели предлагается пакет пластин  $D_S$  одинаковой толщины, срединные поверхности которых – сканируемые параллельные сечения области, ограниченной исследуемой поверхностью оболочки ( $S = 1, 2, \dots, n$ ,  $n$  – число пластин).

Границы  $\Gamma_S$  сечений задаем координатами  $X_{t,S}$  и  $Y_{t,S}$  узловых точек  $A_{t,S}$  ( $t = 1, 2, \dots, m$ ,  $m$  – число точек).

Рассматривая область с границей  $\Gamma_S$  в комплексной плоскости  $W_S = X_S + i Y_S$  и применяя тригонометрическую интерполяцию, вычислим комплексные коэффициенты полинома, конформно отображающего единичный круг на область  $D_S$ :

$$C_{K,S} = \alpha_{K,S} + i \cdot \beta_{K,S} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{t=0}^{m-1} W_{t,S} \cdot \xi_t^{-K}.$$

Здесь  $\xi_t = \exp(i \cdot \theta_t)$  – образы узловых точек на единичной окружности,  $\theta_t = (t-1) \frac{2\pi}{m}$ .

Применяя интерполяционный алгоритм, дискретные коэффициенты (1) представляем функциями параметра  $Z$ :

$$\alpha I_K(Z) = \alpha I_{K,0} + \alpha I_{K,1} Z + \alpha I_{K,2} Z^2 + \dots + \alpha I_{K,n} Z^n,$$

$$\beta I_K(Z) = \beta I_{K,0} + \beta I_{K,1} Z + \beta I_{K,2} Z^2 + \dots + \beta I_{K,n} Z^n.$$

Уравнения границ сечений представляем двухпараметрическими функциями:

$$X(Z, \vartheta) = \sum_{K=1}^m \{ \alpha I_K(Z) \cdot \cos(K\vartheta) - \beta I_K(Z) \cdot \sin(K\vartheta) \};$$

$$Y(Z, \vartheta) = \sum_{K=1}^m \{ \alpha I_K(Z) \cdot \sin(K\vartheta) + \beta I_K(Z) \cdot \cos(K\vartheta) \}.$$

По параметрам  $Z$  и  $\vartheta$  вычисляем коэффициенты первой квадратичных форм:

$$\left[ A^*(Z, \vartheta) \right]^2 = 1 + \left\{ \sum_{K=1}^m \left[ (\alpha I_K)'_z \cos(K\vartheta) - (\beta I_K)'_z \sin(K\vartheta) \right] \right\} + \left\{ \sum_{K=1}^m \left[ (\alpha I_K)'_z \sin(K\vartheta) + (\beta I_K)'_z \cos(K\vartheta) \right] \right\}^2,$$

$$\left[ B^*(Z, \vartheta) \right]^2 = \left\{ \sum_{K=1}^m \left\{ K \cdot \left[ \alpha I_K \sin(K\vartheta) + \beta I_K \cos(K\vartheta) \right] \right\} \right\}^2 + \left\{ \sum_{K=1}^m \left\{ K \cdot \left[ \alpha I_K \cos(K\vartheta) - \beta I_K \sin(K\vartheta) \right] \right\} \right\}^2.$$

$$L_{ZZ}^*(Z, \vartheta) = \vec{N} \cdot \vec{R}_{ZZ}'' = N_X X_{ZZ}'' + N_Y Y_{ZZ}'', \quad L_{\vartheta\vartheta}^*(Z, \vartheta) = \vec{N} \cdot \vec{R}_{\vartheta\vartheta}'' = N_X X_{\vartheta\vartheta}'' + N_Y Y_{\vartheta\vartheta}'',$$

$$L_{Z\vartheta}^*(Z, \vartheta) = \vec{N} \cdot \vec{R}_{Z\vartheta}'' = N_X X_{Z\vartheta}'' + N_Y Y_{Z\vartheta}''.$$

Таблицу значений коэффициентов используем в численном интегрировании уравнений равновесия тонкостенных конструкций.

## СЕКЦИЯ Б. МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

УДК 621.923.04:621.921

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОБРАБОТКИ АЛМАЗОВ КРУГАМИ С АЛМАЗОАБРАЗИВНЫМИ КОМПОЗИЦИЯМИ

**А. Н. Кулакевич, С. А. Щербаков**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Целью исследования является изучение качества обработки поверхности кристаллов алмазов (сырья) диаметром 1–3 мм, производительности, скорости износа, стоимости инструмента при шлифовании кругами с алмазоабразивными композициями на органической связке и сравнение с аналогичными показателями, получаемыми при обработке кругами с металлической связкой (М1, М2-01, М3-10).

Исследование проводилось на станке ШП-6 при частоте вращения кругов с органическими связками 200 об/мин, а кристалла 700 об/мин. Обработка алмаза кругами на металлической связке осуществлялась по режимам, принятым на бриллиантовом производстве РАУП ГПО «Кристалл». Качество поверхности кристалла после обработки кругами с разными композициями определялось в соответствии с требованиями ТУ 25.07.1319–77 (ТУ).

Связка должна обеспечивать режущую способность композиции путем удаления изношенных зерен с обнажением новых и одновременно с удержанием работающих абразивных зерен. Удаление разрушенных зерен в композициях со связками М1, М2-01, М3-10 обеспечивает электрохимическое растворение связки, происходящее с вредными выделениями. Режущую способность в органических связках может поддерживать компонент, придающий связке твердость и разрушающий ее рабочую поверхность при контакте с водой. Таким компонентом выбран тетраборнокислый натрий ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ), который может существовать в кристаллическом, аморфном и стеклообразном состояниях.

В качестве основы использовалась композиция с фенолформальдегидным (СФП-012А) связующим. Исследованию подверглись процессы обработки поверхности алмаза алмазоабразивными композициями следующего состава (в % объема):

- 1) СФП-012А – 50 %, АС6 80-63 – 25 %,  $\text{B}_2\text{C}$  – 25 %;
- 2) СФП-012А – 70 %, АС6 80-63 – 30 %;
- 3) СФП-012А – 50 %, АС6 80-63 – 30 %,  $\text{TiO}_2$  – 20 %;
- 4) СФП-012А – 50 %, АС6 80-63 – 30 %,  $\text{CaCO}_3$  – 20 %;
- 5) СФП-012А – 50 %, АС6 80-63 – 30 %,  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  – 20 %;
- 6) СФП-012А – 30–50 %, АС6 80-63 – 50–30 %,  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  (растворимый) –

остальное.

Результаты исследования показали, что при обработке сырья композицией состава 1 на обработанной поверхности алмаза остаются продольные царапины, при обработке кругами композиции состава 2 отмечается образование угловатости на заготовках размерами более 0,3 карат, состав 3 обеспечивает шероховатость обработанной поверхности, удовлетворяющую требованиям ТУ, состав 4 дает подобные же

стабильные результаты. В составах 5 и 6 использовался  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  в аморфном, микроромкристиаллическом, кристаллическом, стеклообразном состояниях. Обработка показала, что полученные образцы отвечают требованиям ТУ по шероховатости поверхности и отклонениям от округлости. Связки (1, 2, 3, 4, 5), в состав которых не входит компонент, обеспечивающий растворение связки, работоспособны не более 0,5–1 час. Наиболее работоспособным оказался состав 6, содержащий компонент, разрушающийся водой, в аморфном и кристаллическом состояниях. Режущие свойства и удельный расход состава 6 лучше, чем у металлических связок М2-01, М3-10. Стоимость инструмента с органической связкой режущей части ниже, чем кругов с металлической связкой.

УДК 621.74:669.714

### **СТРУКТУРНО-ВЫСОКОДИСПЕРСНЫЙ СИЛУМИНОВЫЙ МОДИФИКАТОР ДЛЯ ЧУГУНОВ И МЕДНЫХ СПЛАВОВ**

**В. Ю. Стеценко, А. И. Ривкин, А. П. Гутев, А. М. Певнев**

*Институт технологии металлов Национальной академии  
наук Беларуси, г. Могилев*

В настоящее время для каждого сплава разрабатываются собственные модификаторы. Это увеличивает их стоимость и усложняет процесс получения отливок. В этой связи была поставлена следующая задача: разработать универсальный, экологически безопасный модификатор структуры чугуна и медных сплавов. Для этого на установке литья закалочным затвердеванием был изготовлен структурно-высокодисперсный силуминовый модификатор (СВСМ). Полученный сплав использовали для модифицирования чугуна следующего состава в %: углерод – 3,0; кремний – 2,0; марганец – 0,8; хром – 0,4. Расплав готовили в индукционной печи марки ИСТ-016 с кислой футеровкой. Кусковой модификатор СВСМ фракцией 10–15 мм помещали на дно разливочного ковша и присыпали чугунной стружкой. Температура модифицирования составляла 1350 °С. Образование шлаков и вредных выбросов при этом не наблюдалось. Модифицированный чугун заливали в формы из ХТС диаметром 30 мм и высотой 70 мм. Из полученных отливок были вырезаны поперечные шлифы. После их шлифовки, полировки и химического травления водным раствором кислот (2 %HCl + 3 %HNO<sub>3</sub> + 1 %HF) микроструктуру образцов анализировали с помощью аппаратно-программного комплекса на базе микроскопа Carl Zeiss «AxioTech vario». Методом металлографического анализа было установлено, что модифицирование позволяет получать перлитные отливки из чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом дисперсностью 25 мкм.

Структурно-высокодисперсный силуминовый модификатор использовали для модифицирования бронз БрАЖ9-4 и БрОЦС5-5-5, при температуре 1100 °С. При этом шлаков и вредных выбросов не наблюдалось. После механического перемешивания расплава его разливали в металлическую форму, предварительно прогретую до температуры 200 °С. Из полученных образцов диаметром 30 мм были вырезаны поперечные шлифы. Методом металлографического анализа было установлено, что отливки из БрАЖ9-4, обработанные СВСМ, имели мелкокристаллическую инвертированную микроструктуру. Аналогичные заготовки, полученные по обычной заводской технологии, имели транскристаллизацию. Модифицирование бронзы БрОЦС5-5-5 позволило повысить дисперсность ее структуры не менее чем в 2 раза,

а твердость – на 20 %. При проведении эксперимента на ЧУП «Випра» (г. Гомель) модифицированию подвергался сплав ЛЦ40СД. Структурно-высокодисперсный силуминовый модификатор вводился в индукционную печь емкостью 200 кг в кусковом виде фракцией 5–10 мм путем механического замешивания, при температуре 900 °С. После этого на машине литья под давлением модели 711А08 изготавливались отливки «Кран-ВБ». Из них для анализа вырезались шлифы. Методом металлографического анализа было установлено, что после модифицирования дисперсность микроструктуры отливок увеличивается в 2 раза. Испытания образцов из медных сплавов на твердомере ТШ2М показали, что твердость отливок из медных сплавов после модифицирования СВСМ увеличивается в среднем на 25 %.

Таким образом, разработанный структурно-высокодисперсный силуминовый модификатор позволяет: получать перлитные отливки из чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом; измельчать структуру и повышать твердость медных сплавов БрАЖ9-4, БрОЦС5-5-5, ЛЦ40Сд; повысить экологическую безопасность в литейном цехе.

УДК 621.74:669.714

### **МОДИФИЦИРОВАНИЕ СИЛУМИНОВ МЕЛКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ АЛЮМИНИЕВЫМИ СПЛАВАМИ**

**В. Ю. Стеценко, А. И. Ривкин, А. П. Гутев, Р. В. Коновалов**

*Институт технологии металлов Национальной академии  
наук Беларуси, г. Могилев*

В настоящее время самым распространенным модификатором доэвтектических и эвтектических силуминов является натрийсодержащий флюс, позволяющий наиболее эффективно измельчить алюминиево-кремневую эвтектику. Для модифицирования первичного кремния заэвтектических силуминов в основном используют фосфорсодержащие лигатуры. Оба вида модификаторов являются экологически небезопасными веществами и не позволяют одновременно измельчить основные фазовые составляющие алюминиево-кремниевых сплавов. В связи с этим в ИТМ НАН Беларуси разработаны более эффективные универсальные мелкокристаллические модификаторы на основе алюминия, содержащие Ti и Sb. Мелкокристаллические алюминиевые сплавы (МАС) с ультрадисперсной микроструктурой получали на установке литья закалочным затвердеванием [1]. Данные модификаторы были опробованы при литье в кокиль заготовок диаметром 30 мм из сплавов АК9, АК12 и АК18. МАС вводили в расплав механическим замешиванием в кусковом виде фракцией 5–10 мм. При растворении модификаторов не наблюдалось образования шлака и выделений вредных газообразных веществ. Структуру микрошлифов исследовали методом металлографического анализа с помощью аппаратно-программного комплекса на базе микроскопа «Carl Zeiss AxioTech 100 vario».

Установлено, что обработка доэвтектического силумина АК9 МАС в количестве 0,5 % от массы расплава, позволяет измельчить размер первичного зерна  $\alpha$ -фазы в 4 раза, а размер эвтектики в 2 раза (рис. 1, а, б). Аналогичные результаты, при прочих равных условиях, получены при модифицировании МАС эвтектического сплава АК12. Обработка заэвтектического силумина АК18 МАС в количестве 1 % от массы расплава позволяет измельчить включения первичного кремния в 4 раза, а алюминиево-кремневую эвтектику в 2 раза (рис. 1, в, г).

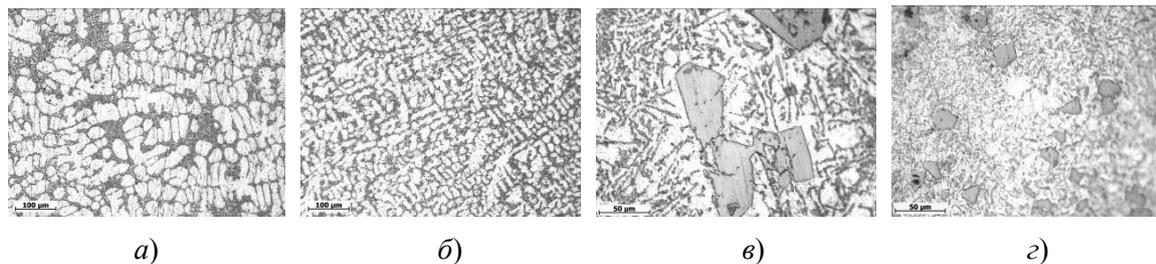


Рис. 1. Микроструктура отливок диаметром 30 мм из силуминов, при литье в кокиль: *а* – сплав АК9; *б* – сплав АК9, модифицированный МАС; *в* – сплав АК18; *г* – сплав АК18, модифицированный МАС

Таким образом, установлено, что обработка силуминов мелкокристаллическими алюминиевыми сплавами, содержащими Si, Ti и Sb, позволяют одновременно диспергировать основные фазовые составляющие отливок и повысить экологическую безопасность процесса литья.

#### Литература

1. Повышение эффективности охлаждения отливок из силуминов при литье закалочным затвердеванием / В. Ю. Стеценко [и др.] // Литье и металлургия. – 2006. – № 2. – С. 128–129.

УДК 621

### САМООРГАНИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА ПРИ ТРЕНИИ

С. В. Короткевич, С. О. Бобович

*РУП «Гомельэнерго», Беларусь*

В. Г. Пинчук

*Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины, Беларусь*

Исследование возможных механизмов разрушения металлических поверхностей при трении позволяет разрабатывать технологию обработки материалов для повышения долговечности и износостойкости при их эксплуатации в узлах трибосопряжений. Поэтому исследование самоорганизации поверхности металла при трении является актуальной проблемой машиноведения.

Изучена кинетика момента трения, контактного сопротивления, температуры в паре сталь-сталь (Ст. 45) при контактном давлении  $0,2 \div 2$  МПа и относительной скорости скольжения  $0,05 \div 0,25$  м/с. Испытания проводились на базе машины СМТ-1 с регистрированием на ЭВМ четырех параметров: нагрузка, момент трения, температура на сопряженных поверхностях, контактное сопротивление. Программное обеспечение использовалось для обработки сигналов в режиме реального времени. В качестве среды, в которой осуществлялось изучение кинетики изнашивания поверхности стали, использовалась дистиллированная вода.

Установлено, что после определенных инкубационных периодов фрикционного нагружения имеют место локально-временные скачкообразные изменения этих параметров. В соответствии с локальным лепестково-послойным характером изнашивания определяли период накопления скрытой энергии деформации по кинетическим зависимостям момента трения. В соответствии с законом сохранения энергии определяли энергетический баланс между энергией, аккумулированной в поверхностном слое, энергией, затраченной на приработку поверхностей, и энергией, закачи-

ваемой в трибосистему. Предложена математическая модель определения энергии, затраченной на формирование оптимальной для трения конфигурации поверхности. Начальные условия в модели определялись исходя из экспериментальных данных кинетики момента трения. Рассчитано, что для заданного в эксперименте режима трения, значение полной энергии, накопленной трибосистемой, до скачкообразного локально-временного изменения момента трения составило  $E = 41$  кДж. Для приработки поверхностей затрачивается энергия 32,5 кДж. Значение энергии аккумулированной в приповерхностном слое составило 7 кДж. Из сохранения энергетического баланса видно, что часть энергии затрачивается на тепловыделение.

Пропорциональное соотношение между энергиями сохраняется при испытаниях в заданном диапазоне изменения нагрузочно-скоростных параметров. Стабильность пропорциональных соотношений энергий утверждает о протекании процессов самоорганизации трибосистемы при выработке оптимальных параметров долговечности. Самоорганизация трибосистемы проявляется в том, что сопряженные поверхности увеличивают свою долговечность за счет определения оптимальных энергетических соотношений при лепестково-послойном характере их изнашивания.

УДК 678.1:541.64

## **ВЛИЯНИЕ НЕОРГАНИЧЕСКИХ СОЛЕЙ НА КИСЛОТНОСТЬ ВОДОРАСТВОРИМЫХ ПОЛИМЕРОВ**

**В. В. Копытков, В. П. Селькин, Л. М. Гуринович**

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

Широкое развитие полимерных составов на основе водорастворимых полимеров (ВП) и их применение в народном хозяйстве обусловлено их ценными физико-механическими свойствами. В последнее время ВП широко используются в лесном и сельском хозяйствах, где они защищают корневые системы растений от иссушения, увеличивают время до посадки, сохраняют первоначальные физиологические качества при хранении и транспортировке.

Ассоциация гидрофобных групп разных макромолекул ВП может приводить к сшиванию полимерных цепей между собой с образованием физического геля и мицелл. В присутствии низкомолекулярной соли мицеллы укрупняются, что приводит к увеличению степени блочности полимера, и, как следствие, изменению его свойств.

Целью работы является определение интервала изменения рН растворов на основе ВП – производных акриламида и солей карбоксиметилцеллюлозы при введении небольшого количества (до 0,1 мас. %) солей многовалентных металлов.

В качестве солей, влияющих на изменение рН среды, были выбраны  $ZnSO_4$ ,  $CoSO_4$  и  $CuSO_4$ . Концентрацию ионов водорода определяли по ГОСТ 8.134–98. Поверхность покрытий исследовали с помощью оптического микроскопа Intel Play с увеличением  $\times 200$ . Полученные результаты обрабатывали методами математической статистики с надежностью 0,95. Повторность опытов – пятикратная.

Вследствие химического строения и особенности процесса получения водные растворы производных акриламида имеют слабокислую реакцию ( $pH \approx 6,5$ ), а раствор солей карбоксиметилцеллюлозы – щелочную ( $pH \approx 9,6$ ). Температурная зависимость тангенса угла механических потерь свидетельствует о совместимости вы-

бранных ВП. Гидроксиды металлов, входящих в состав исследуемых солей, являются слабыми основаниями. При растворении данных солей в воде происходит гидролиз по катиону, и раствор приобретает кислую среду.

Анализ полученных зависимостей свидетельствует, что концентрации выбранных солей 0,10 мас. % способны изменить рН составов на 2 единицы. Согласно проведенным исследованиям, наибольшее изменения рН наблюдается при введении соли  $\text{CuSO}_4$  в растворы, содержащие только соль карбоксиметилцеллюлозы. Это связано со степенью гидролиза ионов меди.

Совмещение двух ВП различной природы в водной среде приводит к изменению рН до значения 8,5. Как известно, в такой среде образуются макромолекулы сополимеров акриламида с солями акриловой кислоты. В то же время в связи с совместимостью выбранных ВП и благодаря значительной полярности молекул солей карбоксиметилцеллюлозы в ряде случаев возможно проявление электростатической адсорбции. Сравнительный анализ свидетельствует, что с помощью выбранных солей и водорастворимых полимеров возможно варьирование рН среды от 5,0 до 9,5 с шагом 0,5. Сравнительный анализ морфологии свидетельствует, что покрытия, полученные из водных растворов неорганических солей с солями карбоксиметилцеллюлозы, имеют единичные глобулы, а уже на основе двух ВП размеры и количество глобул соизмеримы с покрытиями, полученными на основе производных акриламидов. Это свидетельствует о том, что в конформационные изменения жесткоцепного полимера – соли карбоксиметилцеллюлозы – вносит вклад его взаимодействие как с солями, так и с гибкоцепным полимером – производным акриламида.

УДК 621.92

## **РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ ИЗ КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА НА КЕРАМИЧЕСКОЙ СВЯЗКЕ**

**М. П. Купреев, Е. Н. Леонович**

*Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины, Беларусь*

Оптимальные результаты при шлифовании высоколегированных, конструкционных и инструментальных сталей получают, применяя абразивный инструмент на основе кубического нитрида бора – эльбора.

Приобретаемый предприятиями Республики Беларусь шлифовальный инструмент из кубического нитрида бора на керамической связке выпускается в основном в России. Вместе с тем в Объединенном институте физики твердого тела и полупроводников НАН Беларуси отработана технология изготовления порошков кубического нитрида бора, не уступающих по качеству российским. В связи с этим разработка и исследование абразивного инструмента из освоенных в Республике Беларусь порошков кубического нитрида бора является актуальной задачей.

Режущие свойства абразивного инструмента на основе эльбора во многом определяются качеством примененной керамической связки. Эта связка должна обеспечить высокую прочность инструмента при температуре его обжига в пределах 1000 °С.

Изготовлены и изучены керамические связки, содержащие в шихте (по массе): оксид кремния (60–70 %) и оксид алюминия (20–30 %) в виде порошков различной дисперсности, а также борную кислоту – 15–20 %, фтористый натрий – 3–10 %

и соли натрия, калия, лития – в количестве 3–8 % каждой. Борная кислота, фтористый натрий и соли натрия, калия, лития вводились в состав связок как в порошкообразном виде, так и в виде водных растворов.

Для определения вязкости связок при высоких температурах был использован метод растекания расплава по горизонтальной плоскости, разработанный для плавящихся связок Л. Ф. Рентелем. Указанным методом непосредственно определяется не вязкость расплава связки  $\mu$ , а растекаемость (текучесть) – величина, обратная вязкости –  $1/\mu$ . Для этого из связок разного состава были спрессованы цилиндрические образцы диаметром 15 мм и высотой 15 мм, которые высушивались и устанавливались на плитку из огнеупорного материала и в строго вертикальном положении помещались в электрическую печь. Повышение температуры в печи равно 3 °С в минуту, конечная температура – температура обжига изделий.

Установлено, что при изготовлении связок из ультрадисперсных порошков, их температура плавления снижается на 10–15 %, а текучесть увеличивается на 10–40 %. Введение в состав связки модификаторов и плавней в виде водных растворов солей способствует уменьшению на 20–40° температуры плавления и увеличению на 10–15 % ее текучести.

Определен оптимальный состав связки на основе ультрадисперсных порошков оксидов кремния и алюминия.

Из микрозернистого порошка кубического нитрида бора (зерно 50/40 мкм) на разработанной связке изготовлены экспериментальные шлифовальные головки, которые испытаны на ПО «МТЗ». При шлифовании на станке модели 6GA отверстий деталей, изготовленных из сталей У8А, 65Г, поставленные на испытание головки показали высокую стойкость и обеспечили шероховатость поверхности Ra 0,32.

УДК 620.178:621.898

## **КИНЕТИКА ДЕСТРУКЦИОННЫХ СТРУКТУР В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ МЕТАЛЛОВ ПРИ ФРИКЦИОННОМ НАГРУЖЕНИИ**

**В. Г. Пинчук, В. В. Свиридова**

*Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины, Беларусь*

**С. В. Короткевич**

*РУП «Гомельэнерго», Беларусь*

Проведены исследования кинетики дислокационной структуры и процессов разрушения поверхностного слоя металлов (никель, железо и его сплавы) при фрикционном нагружении поверхностей. Дислокационная структура деформированных образцов изучалась методом ферромагнитного резонанса (ФМР) и электронной микроскопии. Микроструктурные исследования определили формирование нанокристаллической структуры с размерами блоков ~10 нм, квазиравномерно распределенных по объему поверхностного слоя. Для этих структур характерна высокая степень упрочнения, что обеспечивает высокий предел выносливости и долговечности материала.

Установлен осцилляционный характер изменения прочностных характеристик. Изучено развитие фрагментированных структур и проанализированы наблюдаемые дислокационные механизмы разрушения. Определена взаимосвязь микроструктурных изменений с кинетикой интенсивности изнашивания поверхностного слоя металла. Показано, что каждому циклу изменения плотности дислокаций соответствует цикл послынного микроразрушения, причем периодически повторяющиеся выбросы интенсивности изнашивания совпадают по времени с участками минимума плотно-

сти дислокаций. Эти результаты дают основание утверждать о локализации во времени процесса массового образования частиц разрушения, обусловленного спецификой упругопластического деформирования поверхностных слоев твердых тел при фрикционном нагружении.

Электронномикроскопические данные осветили основные микроструктурные элементы диспергирования: 1) зоны с высокой плотностью дислокаций со временем нагружения приобретают форму тонких жгутов и ориентируются вдоль направления скольжения, обуславливая деформационную текстуру; 2) формирование полос скольжения и наличие многочисленных тонких двойников по их границам, являющихся источниками мелких трещин вдоль их поверхности раздела с матрицей; 3) наличие многочисленных микропор внутри деформированной решетки и по границам зерен; 4) формирование в устойчивых полосах скольжения микротрещин с соотношением характерных размеров 0,01–0,10 мкм. По мере диспергирования структуры наблюдается увеличение количества и размеров трещин и их коагуляция. На стадии максимального диспергирования длина большинства трещин выростала до размеров блоков, а их ориентация была вдоль и поперек полос скольжения. Со временем фрикционного нагружения происходит прогрессирующее разрыхление поверхностного слоя металла, связанное с возрастающим количеством очагов разрушения. На стадии максимального диспергирования это разрыхление, охватывающее более глубокие слои, в сочетании с развитой хрупкостью обуславливает резкое возрастание отслаивающейся массы материала. Этот процесс приобретает лавинный локализованный во времени характер и приводит к селективным выбросам продуктов разрушения из зоны фрикционного контакта и образованию квазиовенильных поверхностей с пониженной плотностью дислокаций. Этим объясняется циклический характер их кинетики. Аналогичный характер разрушения и изнашивания наблюдался в железе и его сплавах.

УДК 621.79:669.6:678

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕНОСА МЕТАЛЛА ПОДЛОЖКИ В ПОЛИМЕР ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ И РАДИАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

**Д. Г. Лин, Е. В. Воробьева, Н. В. Марченко**

*Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины, Беларусь*

**Ю. М. Плескачевский**

*ИТМО НАН Беларуси, г. Минск*

**В. П. Селькин**

*ИММС НАН Беларуси, г. Гомель*

Известно, что при контактировании металла и полимера при повышенных температурах и свободном доступе кислорода протекает процесс переноса ионов металла в объем полимера [1]. Перенос металла тесно взаимосвязан с процессом окисления полимера [2] и поэтому его влияние на эксплуатационные характеристики металлополимерного материала неоспоримо. В настоящее время с целью получения материала с заданными эксплуатационными свойствами широко распространены технологии радиационного модифицирования полимеров и композитов на их основе [3]. В связи с этим практический интерес представляет возможность переноса металла при радиационном окислении полимера, каковы его особенности по сравнению с термоинициируемым процессом.

Для исследований были выбраны пленки ПЭНД (ГОСТ 16338–85, марка 20308-005) толщиной 100 мкм, которые приводили в контакт с активными металлическими подложками (медь, цинк) путем их наплавления при 150 °С на плоскую поверхность подложки. Далее одну партию образцов подвергали термообработке при 150 °С в термошкафах, а другую – радиационной обработке на изотопной ( $^{60}\text{Co}$ ) установке РХМ- $\gamma$ -20 (мощность поглощенной дозы 0,2 Гр/с). Испытания обеих партий образцов проводили при свободном доступе кислорода на воздухе. После обработки полимерные пленки отделяли от металлических подложек и определяли степень их окисления (ИК-спектроскопия) и содержание металлов (атомно-абсорбционный анализ).

Экспериментально показано, что процесс переноса металлов подложки в объем полимера осуществляется как при термическом, так и при радиационном окислении полиэтилена в контакте с металлами. В обоих случаях в полимере цинк накапливается в больших количествах, чем медь. При облучении металлополимерных образцов поглощенной дозой 500 кГр перенесенного цинка оказалось больше, чем меди примерно в 20 раз, а после пятичасового окисления при температуре 150 °С аналогичных образцов концентрация цинка в полимере только в 2,5 раза превысила концентрацию меди. При обоих видах воздействия образцы к окончанию испытаний были глубоко окислены – оптическая плотность полосы 1720  $\text{cm}^{-1}$  для пленок на цинке составляла 1,1. Таким образом, при радиационном окислении полиэтилена в контакте с активными металлами (медь, цинк), как и при термическом окислении, происходит перенос металла в объем полимера. Установлено, что относительная скорость переноса металлов для обоих видов окисления различна. В случае радиационного окисления цинк переносится значительно быстрее.

#### Литература

1. Белый, В. А. Адгезия полимеров к металлам / В. А. Белый, Н. И. Егоренков, Ю. М. Плескачевский. – Минск : Наука и техника, 1971. – 286 с.
2. Лин, Д. Г. Перенос металла в полиэтиленовых пленках, окисляемых на медных подложках / Д. Г. Лин, Е. В. Воробьева // Журн. приклад. химии. – 2001. – Т. 74, № 6. – С. 998–1002.
3. Пикаев, А. К. Радиационная химия и технология на рубеже веков. Современное состояние и перспективы развития / А. К. Пикаев // Химия высоких энергий. – 2001. – № 6. – С. 403–426.

УДК 537.312.6:669.5

### СТАБИЛЬНОСТЬ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ ZN–PB ПРИ ОТЖИГЕ

**В. В. Лозенко, В. Г. Шепелевич**

*Белорусский государственный университет, г. Минск*

*Белорусский государственный аграрный технический университет, г. Минск*

В течение последних трех десятилетий огромные возможности в создании новых материалов с уникальными свойствами открыли методы скоростного затвердевания из расплава. Особый интерес представляет применение сверхбыстрой закалки из расплава к цинковым сплавам, обусловленный их широчайшим использованием

в различных областях техники и промышленности. В связи с этим целью настоящей работы является исследование изменений структуры и микротвердости сплавов системы Zn–Pb при отжиге.

Фольги используемых материалов, содержащих до 5 ат. % Pb, получены кристаллизацией капли расплава на внутренней поверхности вращающегося медного цилиндра с частотой 25 об/с. Скорость охлаждения расплава была не менее  $10^6$  К/с. Толщина используемых фольг составляла 30–80 мкм. Для металлографических исследований поверхность фольг подготавливалась травлением в растворе 10 г хромового ангидрида и 1 мл соляной кислоты на 100 мл воды. Структура поверхности изучалась с помощью инверсионного микроскопа OLYMPUS IX70. Микротвердость измерялась с помощью прибора ПМТ-3 с относительной погрешностью измерения не более 5 %. Изохронный отжиг исследуемых фольг проводился последовательно от комнатной температуры и до температуры плавления с интервалом в 30 °С и выдержкой 20 мин при каждой температуре.

Проведенные исследования показали, что быстрозатвердевшие фольги цинка и его сплавов со свинцом имеют микрокристаллическую структуру и четко выраженную текстуру (0001). Средний размер зерна в них при повышении концентрации свинца уменьшается с 11 мкм для фольг чистого цинка до 4 мкм в фольгах сплава Zn–2,5 ат. % Pb. Для исследования стабильности фольг они были подвержены изохронному и изотермическому отжигам.

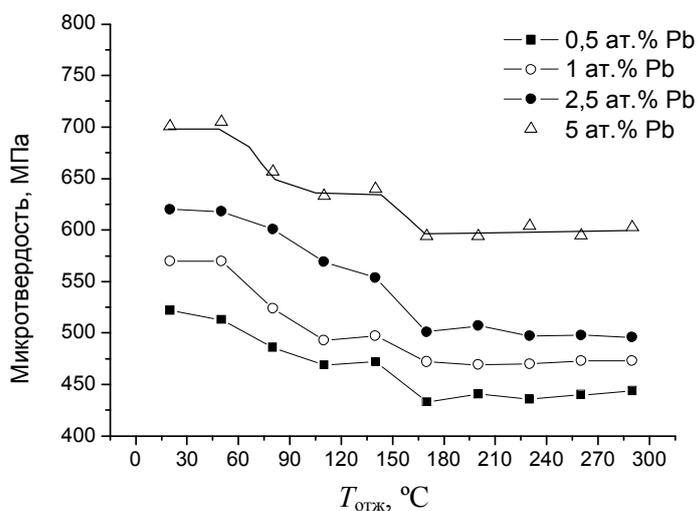


Рис. 1. Изменение микротвердости фольг сплавов системы Zn–Pb при изохронном отжиге

Кривые изменения микротвердости  $H_u$  при изохронном отжиге для фольг сплавов цинка со свинцом подобны. Так, отжиг фольг до температуры 60 °С не оказывает влияния на микротвердость. При нагреве выше указанной температуры уменьшение  $H_u$  происходит в два этапа.

Металлографические исследования показали, что отжиг фольг сплавов цинка со свинцом при температуре 170 °С в течение 1 часа вызывает укрупнение зеренной структуры. Наблюдаемое явление указывает на протекание собирательной рекристаллизации при отжиге фольг.

УДК 678.664

## ВЛИЯНИЕ МАКРОСТРУКТУРЫ ОТХОДОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПОЛИУРЕТАНОВ НА ТЕХНОЛОГИЮ ПЕРЕРАБОТКИ

О. Л. Мазенкова, К. С. Матвеев, Г. Н. Солтовец

*Витебский государственный технологический университет, Беларусь*

На сегодняшний день технологии получения изделий из материалов, включающих интегральные пенополиуретаны (ИПУ), являются наиболее используемыми в обувной промышленности. Существующие технологии переработки отходов позволяют получать изделия, которые используются для изготовления внутренних деталей обуви, с пониженными прочностными требованиями. Проблемы получения высококачественной продукции связаны с весьма широким спектром образующихся отходов.

Цель данной работы заключалась в изучении влияния макроструктуры образующихся отходов ИПУ и выработке рекомендаций по технологическим режимам и применяемому для переработки шнековому экструдированному оборудованию.

Исследования структуры материалов, переработанных из отходов ИПУ, проводились посредством изучения увеличенных растровых изображений, полученных в результате фотографирования срезов материала, при помощи цифрового окуляра, подключаемого к компьютеру. При этом было определено, что, несмотря на различные виды образующихся отходов, все их можно условно разделить на два основных типа.

К первому типу относятся литники и облой, которые имеют достаточно большую плотность. Второй тип образующихся отходов – это куски ИПУ материала низкой плотности (отходы, брак, наплывы). На рис. 1 показан поперечный разрез материала, полученного в результате переработки из двух видов отходов: ИПУ (материал черный) и литников (материал белый).

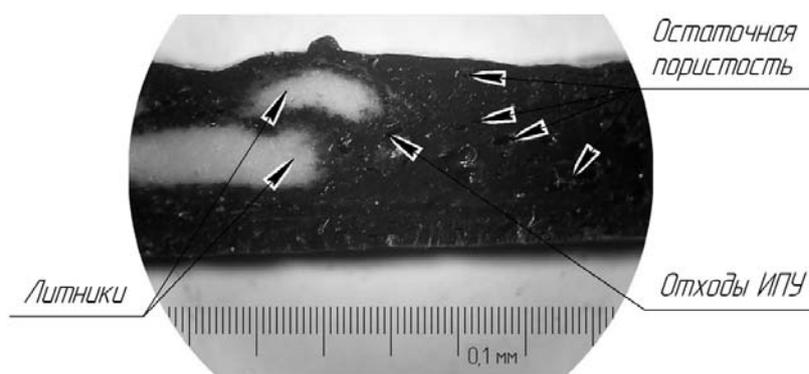


Рис. 1. Макроструктура материала из отходов ИПУ

Различная цветовая гамма исходных отходов определялась необходимостью визуализации процесса перемешивания и взаимопроникновения компонентов, которого на практике добиться не удалось. Хорошо видно, что при достаточно равномерной структуре получаемого термопластичного материала из отходов УПУ, внутри него располагаются непроплавленные частицы материала литников. Именно подобные особенности строения материала приводят к неравномерной плотности и соответственно к различным физико-механическим свойствам.

В результате выполнения данной работы было определено, что при переработке отходов ИПУ на шнековых экструдерах, они должны разделяться по их плот-

ности. Только в этом случае возможно достижение необходимого равномерного состояния и гомогенности по всему объему получаемого материала. В результате возможно получение качественных стелечных и подошвенных композиционных материалов.

УДК (539.26+539.533):669.71

## **СТРУКТУРА И МИКРОТВЕРДОСТЬ БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ ФОЛЬГ ПРОМЫШЛЕННОГО СПЛАВА АМЦ**

**П. А. Сивцова**

*Белорусский государственный технологический университет, г. Минск*

**В. Г. Шепелевич**

*Белорусский государственный университет, г. Минск*

Сплав АМц – единственный деформируемый сплав бинарной системы Al–Mn. Он обладает высокой коррозионной стойкостью, хорошо деформируется в холодном состоянии и в горячем, но термической обработкой не упрочняется. Получение сплавов на основе алюминия методами сверхбыстрой закалки из расплава позволяет улучшить их технические качества за счет формирования в процессе получения микрокристаллической структуры, пересыщенного твердого раствора, измельчения включений и внесения микродеформаций кристаллической решетки.

Целью исследований является изучение структуры и микротвердости фольг сплава АМц, полученных методом центробежной закалки расплава.

Капля расплава массой ~0,2 г инжигировалась на внутреннюю полированную поверхность быстровращающегося медного барабана диаметром 20 см, частота вращения которого составляла 1500 об/мин. Скорость охлаждения, как показал расчет, достигала единиц  $10^6$  К/с. Проведены исследования структуры и микротвердости в исходном состоянии и после термической обработки. Рентгеноструктурный анализ проводился на дифрактометре ДРОН-3М в геометрии Брегга-Брентано в монохроматизированном медном излучении. Микротвердость фольги исследовалась с помощью ПМТ-3 с нагрузкой 20 г на 30 с. Изохронный отжиг быстрозатвердевшей фольги проводился от комнатной температуры до 500 °С через 30 °С с выдержкой по 20 мин при каждой температуре. Последовательный изотермический отжиг проводился в течение нескольких часов при различных температурах.

Значения полюсных плотностей дифракционных линий твердого раствора на основе алюминия показывают, что преобладающей является текстура (111), на долю которой приходится более 50 % объема фольги. Отжиг фольг не приводит к смене доминирующей текстуры. Преобладающей текстурой в алюминиевых сплавах, полученных традиционными методами кристаллизации, является текстура (100). Предпочтительность формирования текстуры (111) при сверхбыстрой закалке следует из термодинамических расчетов, согласно с которыми для плоскостей {111}, совпадающих с межфазной границей, дополнительная энергия для перемещения в нормальном направлении является минимальной.

Микротвердость исследованной фольги в исходном состоянии в 2 раза превышает микротвердость фольг чистого алюминия, что связано с формированием пересыщенного твердого раствора на основе алюминия и микродеформациями кристаллической решетки, внесенными на этапе получения фольги. Изохронный отжиг фольг выявил сложный процесс старения, в частности, было обнаружено увеличение микротвердости фольг в интервале 260–440 °С (в максимуме на 25 %), что не на-

блюдается для этого сплава при получении традиционными методами. Для проверки результатов изохронного отжига был проведен изотермический отжиг, который подтвердил наличие максимума микротвердости в интервале температур 260–440 °С. Полученные результаты показали, что выявленные в процессе изохронного отжига особенности старения не являются специфическими именно для этого вида отжига и выбранных режимов старения, а характерны для быстрозатвердевшей фольги сплава АМц в целом.

УДК 678.027

## **СОЗДАНИЕ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КОМПОЗИЦИЙ ИЗ ТЕКСТИЛЬНЫХ И ПОЛИМЕРНЫХ ОТХОДОВ И ТЕХНОЛОГИИ ИХ ПЕРЕРАБОТКИ**

**А. А. Колос**

*Белорусский государственный технологический университет, г. Минск*

Согласно мировой статистике от 5 до 10 % массы твердых бытовых отходов (ТБО) составляют изделия из текстиля. Основными методами переработки ТБО являются: захоронение, сжигание, получение биогаза, удобрений и биотоплива. Однако в этих случаях не происходит полная переработка отходов во вторично используемое сырье.

Целью исследований является получение конкурентоспособных изделий из композиций, содержащих текстильные отходы в качестве наполнителя и отходы термопластичных полимеров в качестве матричного материала.

На основе требований к стоимости, составу, технологии совмещения и формообразования изделий из текстильных и полимерных отходов в качестве матричного полимера выбраны отходы полипропиленовой мешковины. Стоимость полипропиленовой мешковины не превышает 500 р./кг, а для ее измельчения и разволокнения возможно применение текстильных технологий, при этом на стадии разволокнения возможно дозированное совмещение отходов полипропиленовой мешковины со смешанными текстильными отходами.

Для определения параметров технологического процесса переработки материалов на основе текстильных и полимерных отходов, способов совмещения и дозирования компонентов, для оценки прочностных характеристик исследованы технологические и физико-механические свойства композиций. Композиции получены методами пластформования и прямого прессования. Массовое содержание тканых отходов в композициях составило 30, 40, 50 и 70 %. Подача материала в экструдер при получении композиций методом пласт-формования осуществлялась двумя способами: загрузкой рыхлой смеси текстильных отходов и отходов полипропиленовой мешковины плотностью до 0,1 г/см<sup>3</sup> и загрузкой предварительно уплотненных в пресс-форме заготовок в виде гранул при температурах 20, 80 и 110 °С плотностью от 0,6 до 1,1 г/см<sup>3</sup>.

Показатели механических свойств исследованных композиций находятся в целом в диапазоне, типичном для высоконаполненных вторичных термопластов. Модули упругости материалов находятся в пределах 1,7–2,2 ГПа, прочность при изгибе – 35–39 МПа, прочность при срезе – 21–27 МПа, прочность при растяжении – 13–24 МПа в зависимости от степени наполнения.

Исследованы технологические свойства материалов. Показатель текучести расплава матричного полимера составляет 2,2 и 3,9 г/10 мин при температурах 200

и 230 °С соответственно. Коэффициент консистенции композиций при температурах формования 180–200 °С составляет от 100 до 200 кПа · с<sup>n</sup>. Коэффициент температуропроводности для композиций с плотностью ~ 1 г/см<sup>3</sup> составляет 0,11 мм<sup>2</sup>/с и мало отличается от коэффициента температуропроводности матричного полипропилена – 0,12 мм<sup>2</sup>/с.

Возможные области применения изделий, формируемых с использованием текстильных и полимерных отходов, – промышленная и сельскохозяйственная технологическая тара, мебельное производство, гражданское и дорожное строительство, коммунальное хозяйство, обустройство дворовых территорий, транспортные средства и др.

УДК 678.073

## ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ВЯЗКОУПРУГИХ СВОЙСТВ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ ПОЛИМЕРОВ

О. И. Карпович

*Белорусский государственный технологический университет, г. Минск*

Анализ областей применения изделий из армированных термопластов показывает, что большинство из них в условиях эксплуатации испытывает неоднородное напряженное и деформированное состояние. Наиболее эффективна для таких изделий соответствующая напряженному состоянию и прочности материала неоднородная (гибридная) структура, характеризующаяся зависящими от координат параметрами состава материала и ориентации армирующих волокон. Неоднородная структура и различающиеся вследствие этого температурные коэффициенты линейного расширения (ТКЛР) материала в разных частях изделия, а также неоднородное поле температуры при охлаждении изделия служат причиной усадочных (термоструктурных) деформаций и напряжений. Ввиду связи между частями изделия возникающие при этом напряжения частично релаксируют. Для оценки усадочных деформаций и напряжений необходимы значения показателей вязкоупругих свойств и усадки матричного полимера как функции температуры. Экспериментальное определение этих показателей доставляет определенные трудности вследствие неоднородного по сечению и нестационарного поля температуры в образце, анизотропии и температурной зависимости свойств матричных полимеров и композитов.

Целью данной работы является определение усадочных деформаций и температурной зависимости параметров вязкоупругости для некоторых термопластичных полимеров и армированных термопластов.

Дифференциальное уравнение, задающее процесс деформирования образца при изменяющейся температуре и переменных (зависящих от температуры) параметрах вязкоупругости, имеет вид:

$$\sigma + \varepsilon(t) + \tau(t) \cdot \dot{\varepsilon}(t) = E(t) + \varepsilon'(t) + H(t) \cdot \tau(t) \cdot \dot{\varepsilon}'(t),$$

где  $\sigma$  – напряжение от заданной нагрузки;  $\varepsilon(t)$  – полная деформация;  $\varepsilon'(t) = \varepsilon(t) - \varepsilon_r(t)$ ;  $\varepsilon_r(t)$  – термоструктурная (усадочная) деформация;  $H$ ,  $E$  и  $\tau$  – мгновенные и длительный модули и время релаксации как функции времени (зависящие от температуры  $T(t)$ ); точка означает производную по времени.

Для получения зависимостей  $E(T)$ ,  $H(T)$ ,  $\tau(T)$  определяли значения данных параметров вязкоупругости при 20, 40, 60 и 80 °С. Получены температурные зависимо-

сти параметров вязкоупругости для полипропилена экструзионной марки 01030А ТУ 2211-015-00203521-99, вторичного АБС-пластика марки 2020-32-903, смеси АБС-пластика и полипропилена (продавки), вторичного полипропилена (мешковина), стеклонаполненного полибутилентерефталата. Подобраны уравнения регрессии.

Для определения термоструктурной деформации  $\varepsilon_t(t)$  образцы нагревали до 90 °С и охлаждали на воздухе. Измеряли температуру в центре образца как функцию времени  $T(t)$  и одновременно деформации, обусловленные усадкой. По измеренной температурной деформации рассчитывали температурный коэффициент линейного расширения  $\alpha_T$ .

Полученные зависимости могут быть использованы для расчета остаточных напряжений в изделиях гибридной структуры после изготовления и для оптимизации технологических режимов.

УДК 621.91.02:621.81

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УПРОЧНЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАПРАВЛЯЮЩИХ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ**

**М. И. Цырлин, О. А. Сивак**

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Износ направляющих является самым распространенным видом эксплуатационных повреждений станин. Снижение износа направляющих станин может быть достигнуто различными методами с использованием различных технологий, применяемых как при изготовлении, так и в процессе эксплуатации станков.

Применение поверхностной обработки позволяет, не изменяя механических свойств изделий в целом, существенно увеличить их срок службы. Это обусловлено тем, что обработке подвергается локальная область изделия, испытывающая наибольшие контактные напряжения.

Для поверхностной обработки применяют пластическое деформирование и термическую обработку. Термическая обработка может быть осуществлена токами высокой частоты, лазером, пламенем, плазменной струей.

Целью работы было определение триботехнических свойств плазменно-упрочненных поверхностей чугуновых направляющих металлорежущих станков.

Объектом исследования являлись образцы из серого чугуна СЧ 20, упрочненные с помощью электродуговой плазменной установки УПУ-3Д. Генерация плазменной струи осуществлялась модернизированным плазмотроном с удлиненным соплом-анодом и охлаждаемым катодом. В качестве плазмообразующего газа использовался азот.

Триботехнические испытания по определению интенсивности износа проводились в режиме граничного трения на машине трения СМТ-1 при нагрузке 50 Н и скорости 0,25 м/с по схеме ролик-плоскость со смазкой ИС-20.

Твердость неупрочненных образцов составляла 170...225 НВ, упрочненных – 270...470 НВ.

В процессе истирания изменяется микрогеометрия поверхностей трения. В начальный момент число контактирующих неровностей сопрягаемых тел ограничено при значительной их высоте. Большие давления на пятна контакта обуславливают высокую пластическую деформацию, смятие и разрушение контактирующих неровностей. В итоге, высота наиболее выступающих неровностей

уменьшается, в контакт вступают новые неровности, увеличивается количество контактов и их фактическая площадь, снижается давление и тепловая напряженность на пятнах контакта. В процессе приработки шероховатость поверхности трения уменьшается, снижается коэффициент трения и интенсивность изнашивания. С течением времени эти параметры стабилизируются.

При увеличении твердости сопрягаемых тел уменьшаются глубина относительного внедрения и число контактирующих неровностей. Это приводит к одновременному уменьшению молекулярной и механической составляющих трения. Коэффициент трения и интенсивность изнашивания с увеличением твердости образцов уменьшается. Определено, что плазменное упрочнение повышает износостойкость направляющих в 3–3,5 раза.

Таким образом, плазменное упрочнение является эффективным методом повышения износостойкости направляющих металлорежущих станков.

УДК 667.6

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕОРГАНИЧЕСКИХ МИКРО- И НАНОДОБАВОК НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ**

**М. И. Цырлин, А. В. Семашко, Л. В. Савостьянов**

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Эффективным методом улучшения эксплуатационных свойств лакокрасочных материалов и покрытий является наполнение их неорганическими добавками. Это приводит к следующим эффектам и результатам:

- повышение упругопрочностных свойств материалов и покрытий, их ударной прочности, теплостойкости, размерной стабильности;
- придание лакокрасочным полимерным покрытиям высокой твердости и износостойкости;
- создание материалов с требуемыми магнитными, электрическими, оптическими свойствами, длительно стабильными в условиях эксплуатации;
- получение лаков, обеспечивающих высокую атмосферостойкость, оптическую прозрачность, возможность самоочищения;
- создание металлополимерных композиций с регулируемой скоростью диффузии газов и жидкостей и др.

В исследованиях, проводимых в лаборатории защитных материалов и покрытий Белорусского государственного университета транспорта, оценивали влияние неорганических наполнителей на физико-механические и триботехнические свойства лакокрасочных покрытий.

В качестве исходных материалов использовались жидкие краски: пентафталева эмаль ПФ-115 и алкидно-уретановая эмаль «АграЛид», а также порошковые краски: эпоксидная ЭК-201 и полиэфирная Фапроксид 7008 с добавками волластонита и аэросила в количественном диапазоне 2,5–10 %. Средний диаметр частиц волластонита – 13 мкм аэросила – 0,02 мкм.

Покрытия из жидких красок наносили на стальные пластины кистью, из порошковых – электростатическим распылением.

Твердость покрытий определяли по объемной микротвердости на приборе ПМТ-3, адгезионную прочность соединений – методом нормального отрыва цилиндрических образцов, соединенных в стык. Триботехнические испытания заключались в опреде-

лении потери массы лакокрасочных покрытий в результате истирания поверхности покрытия движущимся индентером с прикрепленной шлифовальной шкуркой при заданной нагрузке на образец.

Испытания покрытий свидетельствуют, что введение наполнителей положительно сказывается на физико-механических и триботехнических свойствах покрытий. Отмечается рост твердости и адгезионной прочности лакокрасочных покрытий при введении в них наполнителя. Большой твердостью и адгезионной прочностью обладают покрытия из порошковых красок. Прослеживается более значительное положительное влияние наночастиц аэросила, чем микрочастиц волластонита на свойства покрытий. Со значительным увеличением содержания наполнителя адгезионная прочность снижается из-за образования неоднородной структуры. Особенно это проявляется при наполнении системы частицами большего диаметра.

В покрытиях с нанодобавками после приработки интенсивность изнашивания значительно ниже. Это характерно для жидких и порошковых красок. По результатам экспериментов определены оптимальные составы.

Таким образом, добавление неорганических частиц в небольших количествах приводит к существенному повышению твердости, адгезионной прочности и износостойкости покрытий.

УДК 539.37

## ОЦЕНКА ЦИКЛИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ СТАЛИ 25X1M1Ф

**П. О. Марущак, Р. Т. Бищак**

*Тернопольский государственный технический университет  
имени Ивана Пулюя, Украина*

**В. Глиха, Т. Вухерер**

*Мариборский университет, Словения*

Анализировали закономерности упругопластического деформирования стали 25X1M1Ф при осевом растяжении-сжатии гладких цилиндрических образцов с диаметром рабочей части 5 мм, при «мягком» режиме нагружения, коэффициент асимметрии цикла  $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = 1$ . Температура испытаний – комнатная.

Скорость возрастания нагружения составляла 1200, 1400, 1800 Н/с соответственно, при постоянной частоте  $f = 0,1$  Гц. Усталостные испытания стали 25X1M1Ф проводили на автоматизированной сервогидравлической установке СТМ-100.

Для анализа упругопластического деформирования материала, в качестве исходной информации, использовали результаты записи значений продольной деформации образца в виде диаграмм циклического деформирования. Обработка диаграмм позволила определить циклический предел текучести в полумоциклах растяжения и сжатия, предельную деформацию разрушения, ширину петли пластической деформации, оценить изменение значения пластической деформации при разной нагрузке, а также проанализировать характер процесса накопления пластических деформаций и изменение ширины петли пластической деформации.

В исходном состоянии в стали 25X1M1Ф наблюдали неразориентированную сетчатую дислокационную субструктуру, а также выделения вторичных фаз. Они способствуют зарождению и накоплению микродефектов при малоцикловом нагружении. В результате циклического деформирования материала увеличивается плотность дислокаций по границам зерен в перлите и вокруг включений, возникает попе-

речное скольжение с начальным формированием сетчатой разориентированной дислокационной структуры.

Окончание стадии циклической микротекучести и переход к стадии циклической текучести связаны с массовым размножением дислокаций по всему объему металла. Это заметно по возрастанию площади петли гистерезисную и появлением на полированной поверхности образца металла следов макроскопической деформации. Появление локальных зон пластической деформации, в которых наблюдается повышенная плотность дислокаций, приводит к увеличению локальной анизотропии материала на мезо- и микроуровне. На этой стадии может происходить также разрушение цементитных пластинок в перлитных колониях и по границам зерен. С увеличением числа циклов скалярная плотность дислокаций в материале устойчиво возрастает. Увеличение плотности дислокаций в зернах феррита более существенно, чем в ферритной составляющей перлитных зерен. В поверхностных слоях металла на стадии циклической текучести образуются прямолинейные скопления дислокаций, которые способствуют образованию усталостных полос скольжения, росту плотности дислокаций и приводит к зарождению усталостных микротрещин.

При разрушении в области материала, примыкающей к поверхности разрушения, формируются ячеистая и фрагментированная субструктуры. Высокий уровень упругих полей напряжений, фиксируемых во фрагментированной субструктуре, хорошо коррелирует с высокой плотностью дислокаций.

УДК 539.4+620.1

## ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. П. Грабовский

*Киевский политехнический институт, Украина*

В современных условиях механика поврежденности составляет один из разделов механики твердого деформируемого тела и находится в стадии интенсивного развития. Она является одним из эффективных инструментов вычисления многих задач деформирования и разрушения конструкций, механические свойства материала которых под нагружением ухудшаются. На сегодня экспериментальные исследования поврежденности в конструкционных материалах при упруго-пластическом деформировании мало изучены.

В физическом аспекте при деформировании развитие повреждений связано с образованием пор, микротрещин, увеличением их количества (плотности) и размеров. В механическом аспекте накопление повреждений при упруго-пластическом деформировании сопровождается уменьшением величин пороговых напряжений, модулей упругости материала  $E$  и  $G$ , изменением коэффициента поперечной деформации, разрушением структуры, изменением электрических и магнитных свойств и т. д., что в конечном итоге приводит к уменьшению ресурса работы деталей и оборудования.

Поврежденность материала –  $D$  через величину разрыхления структуры при упругопластическом деформировании разная:

$$D = \frac{V_i - V_0}{V_i} = 1 - \frac{V_0}{V_i} = 1 - \frac{V_0}{V_i + \Delta V} = 1 - \frac{V_0}{1 + \frac{\Delta V}{V_0}}, \quad (1)$$

где  $V_i$  – текущее изменение объема материала при упругопластическом деформировании;  $V_0$  – начальный объем материала до деформирования;  $\Delta V$  – изменение объема материала, вызванное разрыхлением.

Из соотношения (1) изменение объема материала, вызванное разрыхлением –  $\Delta V$ , равно:

$$\Delta V = V_0 \frac{D}{1 - D}. \quad (2)$$

Учитывая изменения объема при деформировании, из соотношения (2) в работе получены следующие величины поврежденности:

– поврежденность при осевом нагружении и кручении

$$D_\sigma = \sqrt{\frac{\tilde{E}}{E_0}} \sqrt{\frac{N_0 l_0}{N_i l_i}} \quad \text{и} \quad D_\tau = \sqrt{\frac{\tilde{G}}{G_0}} \sqrt{\frac{M_{кр0} \cdot l_0^2 \cdot d_0 \cdot \gamma_0}{M_{крi} \cdot l_i^2 \cdot d_i \cdot \gamma_i}},$$

– поврежденность из-за величины удельного электрического сопротивления

$$D_\sigma = 1 - \frac{\rho_0}{\rho_{иц}} \cdot \left( \frac{l_{0и}^2 \cdot U_{иц}}{l_{иц}^2 \cdot U_0} \right) - \frac{\rho_{икц}}{\rho_{иш}} \cdot \left( \frac{l_{икц}^2 \cdot U_{иш}}{l_{иш}^2 \cdot U_{икц}} \right) \quad \text{и} \quad D_\tau = 1 - \frac{\rho_0}{\rho_{иц}} \cdot \left( \frac{l_{0и}^2 \cdot U_{иц}}{l_{иц}^2 \cdot U_0} \right),$$

где  $\tilde{E}$  и  $\tilde{G}$  – текущие модули упругости при растяжении и кручении;  $E_0$  и  $G_0$  – модули упругости при растяжении и кручении на начальных участках;  $N_0$  и  $N_i$  – начальное и текущее нагружение при упругопластическом деформировании;  $l_0$  и  $l_i$  – начальная и текущая длина образцов при упругопластическом деформировании;  $M_{кр0}$  и  $M_{крi}$  – начальный и текущий крутящие моменты;  $d_0$  и  $d_i$  – начальный и текущий диаметры образцов;  $\gamma_0 = \frac{d_0 \cdot \varphi_0}{2 \cdot l_0}$  и  $\gamma_i = \frac{d_i \cdot \varphi_i}{2 \cdot l_i}$  – начальный и текущий относительные углы сдвига образца;  $\varphi_0$  и  $\varphi_i$  – начальный и текущий углы закручивания образца;  $\rho_0$  и  $\rho_{иц}$  – удельные электрические сопротивления, начальное и текущее, цилиндрической части образца;  $\rho_{икц}$  и  $\rho_{иш}$  – начальное и текущее удельное сопротивление в шейке при осевом растяжении;  $l_{0и}$  и  $l_{иц}$  – начальные и текущие длины образца в цилиндрической части;  $l_{икц}$  и  $l_{иш}$  – начальные и текущие длины образца в шейке;  $U_0$  и  $U_{иц}$  – начальное и текущее напряжение в образце при его деформировании;  $U_{икц}$  и  $U_{иш}$  – начальное и текущее напряжение в шейке растягиваемого образца.

В работе рассматриваются методики непрерывного исследования кинетики накопления повреждений в конструкционных материалах при осевом упругопластическом нагружении и кручении из-за изменения модулей упругости в материале  $E$  и  $G$ , вследствие изменения удельного электросопротивления материала до разрушения и изменения объема в процессе деформирования путем измерения геометрических размеров образцов при соответствующем деформировании до разрушения. Экспериментальные и теоретические величины поврежденности приведены для конструкционных сплавов Д16Т, 12Х18Н10Т, титанового сплава ВТ22 и конструкционной стали 35ХГСА.

УДК 62-2-036.4

**ЭКСПЛУАТАЦИЯ МОДИФИЦИРОВАННЫХ РТИ****С. В. Петров***Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

К одним из технологических методов повышения ресурса резиновых уплотнений относится метод электронно-лучевого диспергирования полимеров в вакууме. Однако процессы, протекающие на поверхности модифицированных данным методом уплотнений при трении, их физико-механические свойства изучены недостаточно.

Целью работы являлось определение различных нагрузочно-скоростных режимов эксплуатации модифицированных резинотехнических изделий (уплотнений) с разным составом покрытий. Для этого были проведены триботехнические испытания на машине трения СМТ-1 по схеме вал–вкладыш. Индентором являлись резиновые вкладыши из маслостойкой резины 3826. Модифицирование осуществлялось методом электронно-лучевого диспергирования исходного полимера в вакууме. На поверхности резиновых вкладышей были получены комбинированные покрытия из ПУ, ПЭ и ПТФЭ толщиной 0,5 мкм. В качестве контртела использовался ролик из стали 40Х с шероховатостью  $R_a = 0,8$  мкм и твердостью поверхности 52...55 НРС. Давление в зоне трения 0,175–0,5 МПа. Скорость скольжения 0,25–0,75 м/с. Для каждого покрытия определялась поверхностная энергия по Фоуксу.

Было установлено, что все покрытия значительно изменяют поверхностную энергию РТИ. Так покрытия ПЭ + ПТФЭ и (ПУ + ПТФЭ) + ПТФЭ уменьшают ее в 2 раза, покрытие (ПУ + ПТФЭ) + ПТФЭ – почти в 5 раз, однако покрытие ПУ+ПТФЭ увеличивает поверхностную энергию на 50 % по сравнению с исходной. Полученный эффект сказывается на характере смазывания резинометаллических пар при испытании, при этом изменяется количество смазки в зоне трения.

Триботехнические испытания показали, что комбинированное покрытие из ПУ+ПТФЭ наиболее эффективно при скоростях скольжения 0,5–0,75 м/с и давлении в зоне трения 0,5 МПа. При данных режимах коэффициент трения резинометаллической пары снижался с 0,25 у исходных резин до 0,15 у модифицированных. Это можно объяснить высокой прочностью и устойчивостью к действию высоких температур полиуретана. В зону трения попадает больше смазочного материала из-за более высокой поверхностной энергии данного комбинированного покрытия, что благоприятно сказывается на процессе трения. Одновременно с этим входящий в состав комбинированного покрытия ПТФЭ оказывает смазочное действие, снижая тем самым коэффициент трения пары при данных режимах.

Для резин с покрытием, содержащим ПЭ и ПТФЭ, лучшие триботехнические характеристики были получены при скоростях скольжения до 0,5 м/с и давлениях в зоне трения до 0,3 МПа, при этом происходило уменьшение коэффициента трения в 3 раза. Эта композиция имеет низкий коэффициент трения и значительно снижает коэффициент трения модифицированной пары, несмотря на меньшее количество смазочной жидкости в зоне трения из-за низкой поверхностной энергии данного покрытия. При скоростях более 0,5 м/с покрытие ПЭ + ПТФЭ малоэффективно из-за низкой температуры деструкции полиэтилена.

ПТФЭ, дополнительно нанесенный на поверхность комбинированных покрытий, не оказал значительного влияния на коэффициент трения. Это происходит, по-видимому, из-за того, что ПТФЭ в несвязанном состоянии материал достаточно мягкий и малопрочный, и даже при малых скоростях и нагрузках быстро удаляется из зоны трения.

УДК 621.82.5

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАТЯГА ДРЕВЕСНОГО ВКЛАДЫША В ПОДШИПНИКАХ СКОЛЬЖЕНИЯ САМОСМАЗЫВАЮЩИХСЯ

В. А. Дашковский, В. Б. Врублевский, А. Б. Невзорова

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Надежность работы подшипников с вкладышами из прессованной древесины в значительной степени определяется правильным выбором натяга.

При работе узла трения в системе «металлическая обойма – древесный вкладыш» повышается температура, изменяются теплотехнические характеристики и влажность древесины. Под влиянием этих процессов в составных частях данной системы образуются деформации разной величины и, как следствие, появляется давление  $p$  между обоймой и древесным вкладышем (рис. 1).

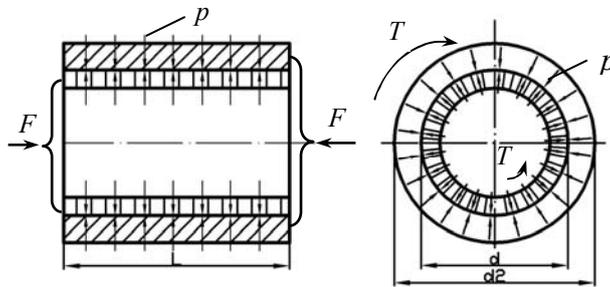


Рис. 1. Схема соединения древесного вкладыша и металлической обоймы ПСС

По теории расчета толстостенных цилиндров удельное давление на поверхности контакта связано с натягом зависимостью (формула Ляме)

$$p = N/[d(c_1/E_1 + c_2/E_2)],$$

где  $d$  – посадочный диаметр;  $c_1 = (d^2 + d_1^2)/(d^2 - d_1^2) - \mu_1$ ;  $c_2 = (d_2^2 + d^2)/(d_2^2 - d^2) - \mu_2$ ;  $E_1, E_2, \mu_1, \mu_2$  – модули упругости и коэффициенты Пуассона материалов, соответственно охватываемой и охватывающей деталей.

При расчете прочности соединения расчетный натяг  $N$  определяют по минимальному табличному или вероятностному натягу  $N_{\min}$  с поправкой на срезание и сглаживание шероховатости поверхности при запрессовке

$$N = N_{\min} - u; u = 1,12 (Rz_1 + Rz_2),$$

где  $Rz_1, Rz_2$  – высоты шероховатостей посадочных поверхностей.

Экспериментальные исследования показали, что коэффициент трения в контакте вкладыша с обоймой (рис. 1) зависит от ряда факторов: способа сборки, удельного давления  $p$ , шероховатости и рода смазки поверхностей, применяемой при запрессовке деталей, и пр. Поэтому точное значение коэффициента трения может быть определено только испытаниями на выпрессовку древесного вкладыша из металлической обоймы при заданных конкретных условиях.

Была установлена возрастающая линейная зависимость усилия выпрессовки из металлической обоймы древесного вкладыша  $d = 37$  мм, выполненного из заготовок различной длины (рис. 2), которая позволила прогнозировать надежность работы

подшипников скольжения самосмазывающихся в зависимости от возникающего натяга между вкладышем и металлической обоймой.

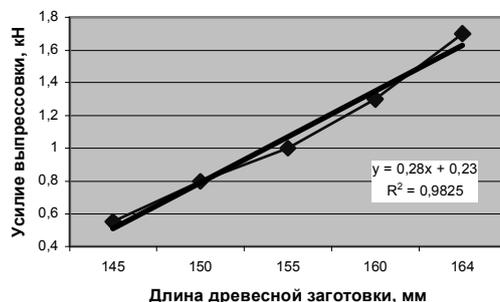


Рис. 2. Зависимость усилия выпрессовки древесного вкладыша из металлической втулки от длины древесной заготовки

Работа выполнена в рамках аспирантского гранта МО № 5378.

УДК 62-233.211.22.001.57

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА САМОСМАЗЫВАНИЯ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДРЕВЕСНЫХ ВКЛАДЫШЕЙ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ

В. В. Макеев

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Пропитка древесины реализуется на основе капиллярных явлений. При погружении ее в пропиточную ванну на границе раздела «смазочный материал (СМ) – воздух в капилляре» возникают силы поверхностного натяжения, благодаря которым СМ проникает в глубь древесины (капиллярное впитывание).

После пропитки масло не может выделяться из материала под действием капиллярных сил. Однако в процессе трения наблюдается вынос СМ из капиллярно-сосудистой системы древесины, что обеспечивает ее самосмазываемость.

В настоящее время рассматриваются несколько механизмов самосмазывания. Для древесных вкладышей подшипников скольжения, эксплуатирующихся при невысоких скоростях скольжения ( $v \leq 2$  м/с), реализуются капиллярный и тепловой.

После формирования смазочной пленки, стабилизации температуры, скорости изнашивания, силы трения смазочный материал будет выделяться в зону трения лишь тогда, когда сумма возникающих при трении давлений в СМ  $\sum p_1$ , благоприятствующих «вытягиванию» масла из капилляров в зазор, будет превышать сумму давлений  $\sum p_2$ , направляющих СМ обратно в капилляры древесины:

$$\sum p_1 \geq \sum p_2 \quad (1)$$

В сумму  $\sum p_1$  входит только капиллярное давление зазора  $p_{\Delta\text{кап}}$ , появляющееся за счет поверхностного натяжения мениска в зазоре.

$$\sum p_1 = p_{\Delta\text{кап}} \quad (2)$$

В сумму  $\Sigma p_2$  входят гравитационное давление столба жидкости  $p_{\text{грав}}$  в капилляре, а также давление  $p_{\Delta t}$ , возникающее вследствие разности сил поверхностного натяжения у более и менее нагретых менисков капилляров древесины.

$$\Sigma p_2 = p_{\text{грав}} + p_{\Delta t} \quad (3)$$

Раскрывая параметры выражения (1) и уравнивая его, получаем

$$\Delta = \frac{2\sigma_{t_2} \cos \theta_2}{\rho_{\text{ж}} g l + \left( \frac{2 \cos \theta_1}{d_1} + \frac{2 \cos \theta_2}{d_2} \right) (\sigma_{t_1} - \sigma_{t_2})} \quad (4)$$

Таким образом, зная поверхностные натяжения  $\sigma_{t_1}$ ,  $\sigma_{t_2}$  и краевые углы смачивания древесины СМ  $\cos \theta_1$ ,  $\cos \theta_2$  при комнатной температуре  $t_1$  и температуре контакта  $t_2$ , плотность СМ  $\rho_{\text{ж}}$ , длину  $l$  и диаметры  $d_1$ ,  $d_2$  капилляра можно определить величину зазора  $\Delta$ , при котором СМ будет из него выделяться в зону трения.

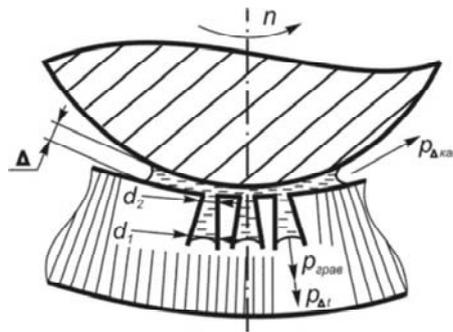


Рис. 2. Выделение СМ в зону трения

Расчеты, проведенные для масла МС-20, показывают, что величина зазора должна быть  $\Delta \geq 0,0249$  мм. Расчетные данные подтверждаются практикой. Зазор в подшипниках ПСС-503 составляет  $\Delta = 0,06-0,09$  мм.

УДК 674.812

### ДРЕВЕСИНА В ПОДШИПНИКАХ: ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОДГОТОВКИ, ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ

А. Б. Невзорова, В. Б. Врублевский, В. И. Врублевская

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Для придания древесине, как композиционному природному машиностроительному материалу, ценных эксплуатационных свойств (высоких прочностных характеристик, износостойкости и формоустойчивости) применяются различные методы модифицирования.

Целью работы является установление общих закономерностей деформирования древесных заготовок в цилиндрические оболочки различного диаметра и изучение влияния модифицирования и механической обработки на изменение структуры,

физико-механических и фрикционных свойств контактной поверхности вкладыша подшипника скольжения.

Материалы и оборудование. Для изготовления вкладышей использовалась древесина лиственных пород с нормализованной влажностью 12 %. Деформирование древесных заготовок проводили гибкой дискретной системой (ГДС) с изменяющимися геометрическими параметрами, пропитку вкладышей – минеральным маслом, модифицированным высокомолекулярными присадками, механическую обработку поверхности трения – специальной составной фрезой.

В ходе выполнения исследований получены следующие результаты:

- на базе теории гнутья и прессования древесины разработаны математические модели и предложена расчетная программа для компьютерного моделирования силовых и физико-геометрических параметров объемного торцово-прессового деформирования древесины (ТПД);
- усовершенствован технологический инструмент для деформирования, в основе которого лежит ГДС, отличающаяся возможностью механотрансформации прямоугольных древесных заготовок установленного размера в цилиндрическую оболочку с заданными внутренним и внешним диаметрами за один технологический прием без предварительной подготовки материала;
- исключение из технологического процесса предварительной сушки древесины, ее влаготермообработки, многопроходное растачивание поверхностей позволило снизить трудоемкость изготовления подшипника в 3–5 раз и уменьшить энергозатраты в 5 раз;
- установлено, что в процессе трения повышается микротвердость контактной поверхности и прилегающих к ней слоев в 3–3,5 раза и на ней формируется граничный смазочный слой, обеспечивающий работу узла трения в режиме самосмазки;
- показано, что в зависимости от модификатора повышаются износостойкость, температура эксплуатации и долговечность подшипников скольжения;
- в режиме самосмазывания подшипник скольжения на основе древесины ТПД стабильно может работать в интервале нагрузок порядка до 5–12 МПа в зависимости от скорости скольжения.

УДК 539.4

## **ЭНЕРГЕТИКА ДВОЙНИКОВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ, ДЕФОРМИРУЕМЫХ СОСРЕДОТОЧЕННОЙ НАГРУЗКОЙ**

**О. М. Остриков**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Развитие теории двойникования кристаллов является актуальным научным направлением. В первую очередь это связано с фундаментальностью явления двойникования, проявляющегося в определенных условиях деформирования у большого класса применяемых в технике материалов. В настоящее время проведен большой объем экспериментальных исследований по изучению двойникования кристаллов и влиянию на характер его развития различных энергетических воздействий. Однако существующая теория тонкого двойника из-за принятых в ней ограничений не позволяет в полной мере описать явление двойникования для широкого класса двойников. Поэтому расчеты энергетики деформирования двойникующихся материалов представляют научный и практический интерес.

Целью данной работы стал анализ энергетики развития клиновидного двойника в кристалле, деформируемом сосредоточенной нагрузкой.

Рассчитывалась энергия клиновидного двойника, находящегося у поверхности кристалла. Полная энергия двойника рассматривалась как суперпозиция упругой энергии двойникующих дислокаций, энергии взаимодействия между двойникующими дислокациями и энергии дефектов упаковки, так как двойникующие дислокации являются частичными дислокациями Шокли. Было установлено, что упругая энергия и энергия дефектов упаковки играют важную роль лишь на начальных стадиях развития двойника. Дальнейший рост двойника в значительной степени определяется процессами взаимодействия двойникующих дислокаций друг с другом.

При учете энергетического вклада деформирования внешней сосредоточенной нагрузки была получена связь между величиной сосредоточенной нагрузки и геометрическими параметрами двойников, которые могут быть определены экспериментально. В случае нормальной нагрузки  $P$  эта связь имеет вид:

$$P = \sqrt{\frac{\pi^2 H}{4aJ_p} \left( - \frac{W}{\sum L_d} (L, H) \right)}, \quad (1)$$

где

$$J_p = \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \left[ \frac{1}{2E} \frac{x^2(x^4 + y^4)}{(x^2 + y^2)^4} + \left( \frac{1}{\mu} - \frac{\nu}{E} \right) \frac{x^4 y^2}{(x^2 + y^2)^4} \right] dx dy. \quad (2)$$

В данных соотношениях  $L$  – длина клиновидного двойника;  $H$  – ширина двойника у устья;  $a$  – межзатомное расстояние в плоскости, перпендикулярной плоскости двойникования;  $E$  – модуль Юнга;  $\mu$  – модуль сдвига;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $\frac{W}{\sum L_d} (L, H)$  – полная энергия двойника.

Расчеты показали, что с ростом величины сосредоточенной нагрузки при фиксированной ширине двойника его длина растет. При значениях длин двойника, близких к 100 мкм, зависимость  $L$  от  $P$  можно считать линейной, что соответствует известным экспериментальным данным.

Работа поддержана БР ФФИ (грант Ф08-106).

УДК 539.4

## МЕЗОСКОПИЧЕСКАЯ ДИСЛОКАЦИОННАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КЛИНОВИДНОГО ДВОЙНИКА

О. М. Остриков

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

В настоящее время важную роль приобретают задачи, решение которых позволяет прогнозировать развитие двойникования, так как двойниковые границы являются концентраторами больших внутренних напряжений, способствующих зарождению трещин тогда, когда резерв прочности материала еще не исчерпан.

Целью данной работы стал анализ эволюции напряженного состояния у развивающегося клиновидного двойника.

В качестве исходных данных для решения задачи по расчету напряжений у развивающегося клиновидного двойника, в рамках дислокационной мезоскопической модели двойника, использовались известные соотношения для расчета полей напряжений у движущейся дислокации. При этом учитывалось, что двойникообразующие дислокации являются частичными дислокациями Шокли.

Рассматривалась ситуация, когда рост двойника сопровождается генерацией двойникообразующих дислокаций, что проявляется в увеличении ширины двойника. За время  $t_r$  генерации двух двойникообразующих дислокаций (по одной на каждой из двойниковых границ) длина двойника возрастет на величину  $s$ . В этом случае очевидно

$$s = vt_r, \quad (1)$$

где  $v$  – скорость движения двойникообразующих дислокаций.

Изменение числа двойникообразующих дислокаций может быть задано соотношением:

$$N(t) = \left( N_0 + D\left(\frac{t}{t_r}\right) \right), \quad (2)$$

где  $N_0$  – число двойникообразующих дислокаций на двойниковых границах до начала повторного развития двойника;  $D\left(\frac{t}{t_r}\right)$  – так называемая возрастающая функция антье, имеющая ступенчатый вид.

Так как в большинстве случаев процесс развития двойников является высокоскоростным, то зависимость  $N(t)$  можно задать непрерывной в виде:

$$N(t) = v_r t, \quad (3)$$

где  $v_r$  – скорость генерации двойникообразующих дислокаций, определяющая количество двойникообразующих дислокаций, генерируемых в единицу времени.

В результате было установлено, что в случае отсутствия генерации дополнительных двойникообразующих дислокаций фронт напряжений мигрирует за движущимся скоплением двойникообразующих дислокаций. При развитии двойника, сопровождающемся одновременной генерацией двойникообразующих дислокаций высокий уровень напряжений сохраняется и у устья двойника.

Работа поддержана БР ФФИ (грант Ф08-106).

УДК 621.971.23

## ПРИНЦИПИАЛЬНЫЙ ПОДХОД К РАСЧЕТУ НАЛАДОК ДЛЯ МНОГОШПИНДЕЛЬНЫХ ТОКАРНЫХ АВТОМАТОВ

А. А. Пучков, В. Ф. Соболев

Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь

При заданной экономической стойкости режущих инструментов конкретной наладки минимальная себестоимость изготовления деталей получается при минимальном значении цикла изготовления, который определяется следующей зависимостью:

$$t_m = \frac{n_p}{n_{ст}} = t_{x.x}.$$

Продолжительность холостого хода цикла ( $t_{x.x}$ ) конкретной модели станка является постоянной величиной. Поэтому для получения минимума  $t_m$  необходимо при проектировании наладки обеспечить минимально возможное значение количества оборотов за цикл работы станка ( $n_p$ ) и максимальное – частоты вращения шпинделя станка ( $n_{ст}$ ).

Исходя из кинематических и технологических возможностей данного оборудования, увеличение значения  $n_{ст}$  возможно за счет использования более производительного режущего инструмента, а также использования в наладке инструментального шпинделя для определенных типов режущего инструмента. Уменьшение значения  $n_p$  возможно за счет:

- применения скользящей державки на позиции продольного суппорта, что может позволить снизить лимитирующую длину рабочего хода ( $l_{р.х. прод}$ ) и увеличить лимитирующую подачу ( $S_{прод}$ );

- использования инструментального шпинделя, который позволит увеличить  $S_{прод}$ ;

- «деления» длин рабочих ходов как продольного, так и поперечных суппортов, что приводит к корректировке предварительно намеченной наладки станка.

Для реализации вышеизложенного целесообразно предварительно наметить наладку с использованием менее производительного (но и более дешевого) режущего инструмента, меньшего его количества и работающего с зависимой подачей продольного суппорта без использования инструментального шпинделя, т. е. простейшую наладку для всех режущих инструментов кроме резбонарезных, для которых без использования скользящей державки и инструментального шпинделя работа на данном типе оборудования невозможна.

В общем расчет режимов резания начинается с задания необходимых данных по всем режущим инструментам, установленным на позициях продольного суппорта и поперечных суппортах. Затем определяются длины рабочих ходов всех режущих инструментов с кинематической увязкой их значений и аналогично – подач. Определив по каждому инструменту потребное количество оборотов за цикл автомата

( $n_{pi} = \frac{l_{р.х.i}}{S_i}$ ), выявляется лимитирующий (имеющий большее значение) инструмент,

для которого делается попытка «перевода» его в нелимитирующий инструмент с учетом возможностей этого для данного конкретного инструмента и, конечно, с учетом конкретной производственной обстановки. Обеспечив максимально возможное и целесообразное снижение  $n_p$  необходимо определить допустимые частоты вращения режущих инструментов и для лимитирующего инструмента (имеющего меньшее значение  $n_{сти}$ ) необходимо рассмотреть «перевод» его в нелимитирующий за счет использования инструментального шпинделя и (или) более производительного инструментального материала. При этом определяются необходимые сменные шестерни для осуществления в наладке рассчитанных величин  $n_{ст}$ ,  $n_p$  и дополнительного вращения инструментальных шпинделей.

УДК 666.151:666.1.053.2

## ЭКСПРЕСС-МЕТОД ОЦЕНКИ РАСКЛИНИВАЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ ЖИДКОСТЕЙ ДЛЯ РЕЗКИ СТЕКЛА

И. И. Злотников, П. А. Хило

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Основным способом раскроя стекла является нанесение на его поверхность линии реза с последующим разделением листа по этой линии. Для ускорения процесса резки и повышения качества разлома применяют специальные жидкости, которые, проникая в магистральную трещину, создают в ней расклинивающее давление. Создание новых поколений расклинивающих жидкостей для резки стекла является актуальной научно-технической проблемой. Обычно эффективность расклинивающей жидкости оценивают по усилию разлома стекла по линии реза при поперечном изгибе. Этот процесс длителен и трудоемок, так как требует изготовления большого количества образцов и использования сложного оборудования.

В связи с этим была поставлена задача – разработать простой экспресс-метод оценки расклинивающего действия различных жидкостей.

Эффективность расклинивающего действия оценивали по степени растворения (перехода в стабильный органозоль) аморфного диоксида кремния в исследуемой жидкости. Диспергирование аморфного кремнезема, как и расклинивающее действие жидкости при резке стекла, основано на одном физико-химическом явлении – возникновении расклинивающего давления вследствие стремления жидкости с низкой поверхностной энергией смочить поверхность с более высокой энергией. При резке стекла жидкость стремится расклинить магистральную трещину для дальнейшего продвижения, а в случае кремнезема проникнуть между первичными частицами размером 2–3 нм, из которых сформирован аморфный кремнезем. Оценку эффективности расклинивающего действия осуществляли следующим образом. Аморфный диоксид кремния с удельной поверхностью 175–300 м<sup>2</sup>/г растворяли в исследуемых жидкостях и определяли его растворимость (г SiO<sub>2</sub>, на 100 г растворителя). Стабильные золи диоксида кремния представляли собой прозрачные опалесцирующие жидкости, нерастворенный диоксид кремния осаждался на дне. В качестве эталона сравнения была испытана жидкость для резки стекла Ацекат 5503 (Германия). Сравнительные результаты растворимости аморфного диоксида кремния и усилия разлома стекла приведены ниже:

### Растворимость аморфного диоксида кремния и усилие разлома стекла

Жидкость	Растворимость SiO <sub>2</sub>	Усилие разлома стекла, Н
Керосин	0,8–0,9	26
Сольвент	не менее 0,9	24
Скипидар	0,4–0,5	31
Изопропиловый спирт	0,2–0,3	35
Ацекат 5503	практически полная	18

Из сравнения полученных данных следует, что между степенью растворимости диоксида кремния в данной жидкости и эффективностью ее расклинивающего действия существует корреляция – чем лучше растворимость, тем эффективнее данная жидкость. Разработанный экспресс-метод был использован при разработке составов новых технологических жидкостей для резки стекла.

УДК 678.019

## МЕТОД ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕЙСТВИЯ СТАБИЛИЗАТОРОВ

**Т. И. Александрова, В. П. Русов, Л. А. Кенько**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

**Л. С. Корецкая**

*Белорусский торгово-экономический университет  
потребительской кооперации, г. Гомель*

Основной недостаток многих полимерных материалов – малая стойкость их к действию атмосферных факторов (влаги, перепада температур, солнечного света). Наиболее разрушающее действие оказывает УФ составляющая солнечного излучения.

Как известно, для повышения стойкости полимеров к действию солнечного света и погодных факторов в них вводят стабилизаторы. Определение эффективности действия стабилизаторов – длительный процесс, связанный с проведением натуральных или лабораторных испытаний в камерах погоды.

Проведенные ранее исследования показали, что при старении полимерных материалов под действием атмосферных факторов происходят сложные физико- и механо-химические процессы: структурная перестройка и изменение конформаций макромолекул, дополнительная кристаллизация, усадка, сжатие, изменение напряжений.

Наиболее чувствительной при старении макрохарактеристикой является относительная деформация или величина относительного удлинения материала при растяжении.

Разработанный метод фотодеформаций, основанный на выявленном несоответствии тепловых деформаций при взаимодействии полимера с УФ- и ИК-излучением, был нами применен для оценки эффективности действия стабилизаторов.

Проведены исследования величин фотодеформаций полиэтиленовых пленок, стабилизированных различными фото- и термостабилизаторами. Установлена зависимость разности  $\Delta l_{ИК}$  и  $\Delta l_{уд}(\delta)$  от состава стабилизатора и процентного содержания его в полимере.

Показано, что чем меньше величина  $\delta$ , тем материал более стоек к действию солнечного света.

Данный метод может быть использован в качестве экспресс-метода оценки эффективности действия стабилизаторов.

УДК 678.019

## ФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МЕХАНИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ С УФ-ИЗЛУЧЕНИЕМ

**Т. И. Александрова**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

**Л. С. Корецкая**

*Белорусский торгово-экономический университет  
потребительской кооперации, г. Гомель*

В докладе обсуждается новая кинетическая модель разрушения полимеров в атмосферных условиях, основанная на выявленном эффекте несоответствия величин тепловых деформаций при взаимодействии твердого тела с УФ- и ИК-излучением.

В рамках этой модели рассматривается коррекция между молекулярной и надмолекулярной структурой полимерной матрицы, ее энергетической стабильностью и долговечностью полимерных материалов. Теоретически и экспериментально показано, что долговечность полимерных материалов определяется величиной упругой фотодеформации, зависящей от регулируемых параметров матрицы: молекулярной структуры (ее подвижности и конформаций) и надмолекулярной организаций (степени кристалличности, сферолитной агрегативности), дефектности.

Показано, что чем больше величина фотодеформаций при облучении полимера, тем ниже его стойкость к УФ-излучению.

Исходя из научно-обоснованных предпосылок трансформации надмолекулярных структур полимеров в процессе старения при УФ-облучении, предложена концепция разрушения, методы прогнозирования и основные пути регулирования долговечности полимерных материалов, базирующихся на создании стабильной физической структуры, имеющих минимальные величины фотодеформаций.

УДК 621.921

## **КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ШЛИФОВАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ**

**Р. И. Вечер, М. Р. Шейбак**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Усталостное выкрашивание, трещины, прижоги и высокая напряженность поверхностного слоя снижают до 30 %, как установлено авторами, контактную прочность рабочих поверхностей рассматриваемых деталей. Степень влияния прижогов на долговечность колес, накатанных роликов и подшипников зависит от структурного состояния поверхностного слоя деталей, т. е. от твердости и знака остаточных напряжений.

Прижоги, распространяющиеся на глубину 90–100 мкм уменьшают HRC поверхности цементированного слоя, например, стали 14X2H3MA, с 60–62 до 50–51, снижают долговечность изделий примерно в 6 раз, предел контактной, усталостной, и изгибной прочности – на 20–30 %.

В зоне контакта поверхности абразивного круга и шлифуемого изделия температура достигает 800–1600 °С. При шлифовании закаленных сталей в поверхностных слоях изделия протекает кратковременный (0,01–0,02 с), термический процесс, отличающийся высокими скоростями нагрева (45000 град/сек) и охлаждения (5000 град/сек). Самая высокая температура шлифования наблюдается в тонком поверхностном слое до глубины 20–30 мкм.

При исследовании остаточных напряжений деталей, изготовленных из стали 14X2H3MA и предварительно отшлифованных обычным кругом ЭБ25СТ1К, установлено, что на поверхности (в контрастно выраженном белом слое) величина остаточных растягивающих напряжений равна 100–150 МПа, а в слое на глубине 200–300 мкм, где по данным измерения микротвердости установлена максимальная степень понижения твердости, остаточные растягивающие напряжения достигают 580–600 МПа.

Кроме прижогов на поверхностях деталей после шлифования в результате действия суммарных остаточных внутренних напряжений, возникающих вследствие неоднородного слоя, появляются дефекты другого вида – трещины. Неоднородность деформации металла зависит как от теплового расширения и сжатия при быстром и неравномерном нагреве и охлаждении отдельных объемов металла, так и от неравномерных изменений, обусловленных структурными превращениями.

Авторами установлено, что в результате закалки деталей из цементируемых сталей 14Х2НЗМА, 16ХГТЛ, 20ХНЗА, 14ХГСН2М2 в поверхностных слоях возникают сжимающие остаточные напряжения 500–600 МПа, которые после шлифования перераспределяются. В зависимости от режимов остаточные напряжения могут быть сжимающими (50–100 МПа) и растягивающими (200–750 МПа). Максимальная величина остаточных напряжений возникает на поверхности деталей или на некоторой глубине от нее.

При шлифовании металла в зоне пластической деформации единичных зерен происходит процесс врезания зерен. В результате напряжение возрастает до тех пор, пока растягивающие напряжения не достигнут предела прочности металла. Зерна круга при этом вызывают пластическую деформацию.

В сталях и сплавах гетерогенной структуры содержится множество опасных дефектов. В некоторых случаях нагружения любой из этих дефектов может служить источником концентрации напряжений и явиться местом зарождения трещин.

Таким образом, тепловые явления, сопровождающие процесс шлифования, могут существенно влиять на состояние поверхностного слоя: вызывать фазовые и структурные превращения, прижоги, трещины, коробление и т. д.

УДК 621.762

## **ИЗГОТОВЛЕНИЕ ВЫТЯЖКОЙ ДЕТАЛЕЙ РАДИАЛЬНЫХ И РАДИАЛЬНО-УПОРНЫХ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ**

**Н. И. Стрикель, М. И. Лискович**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Изготовление втулок подшипников скольжения из металлофторопластовой ленты отрезкой и гибкой в штампе приводит к образованию стыка согнутых краев полосы неблагоприятно влияющего на работу подшипникового узла при значительных вибрациях и ударах если втулка подшипника неподвижна, а ось вращается. При вращении втулки отрицательное влияние стыка согнутых краев полосы становится ещё более существенным. Лишены этого недостатка не содержащие стыка согнутых краев цельнотянутые втулки, изготавливаемые совместной вытяжкой стального и антифрикционного слоев в соответствии с разработанным в ГГТУ им. П. О. Сухого способом [1], [2].

Проведенные опыты доказали возможность нанесения антифрикционного слоя не только на боковую, но и на донную часть вытянутого стального стакана, а это в свою очередь позволяет использовать вытяжку для изготовления не только радиальных втулок, но и радиально-упорных подшипников скольжения.

На рис. 1 дана схема втулки радиально-упорного подшипника скольжения.

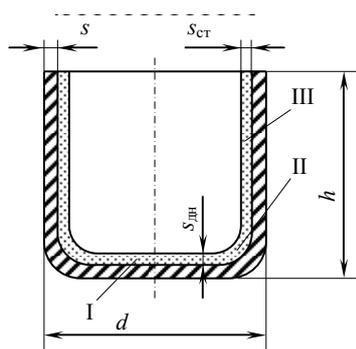


Рис. 1. Схема втулки радиально-упорного подшипника

Рассматривая процесс нанесения антифрикционного покрытия, можно выделить три основные зоны: I – донная часть; II – радиусный переход от донной части к боковым стенкам; III – боковые стенки.

Толщина  $S_{дн}$  покрытия донной части, ее пористость и основные свойства будут существенно зависеть от величины давления, приложенного к этой части при нанесении покрытия. Подбирая требуемую начальную высоту засыпки металлопорошка и величину давления на донную часть, можно добиться требуемых значений толщины  $S_{дн}$  и пористости покрытия донной части.

Толщина  $S_{ст}$  покрытия боковых стенок, а также толщина  $S_p$  покрытия в зоне радиусного перехода от донной части к боковым стенкам, их пористость и основные свойства существенно зависят от соотношения диаметров стальной заготовки, пуансона и матрицы, определяющих степень деформации покрытия при вытяжке, которая в свою очередь обуславливает величину давления и пористость покрытия.

Таким образом, определены основные технологические параметры, влияющие на процесс изготовления вытяжкой втулок радиальных и радиально-упорных подшипников скольжения.

#### Литература

1. Патент ВУ3933.
2. Уведомление ЦИС от 08.05.2008 о регистрации изобретения под № 10955.

УДК 671-152

### ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ОГРАНКИ АЛМАЗОВ ПУТЕМ РАСШИРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОБОРУДОВАНИЯ

**М. П. Кульгейко**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого*

**Д. Г. Колесников**

*ЗАО «БЕЛГРАН», г. Гомель, Беларусь*

В технологическом процессе обработки алмазов операция огранки является наиболее трудоемкой и требует значительных затрат времени и средств. Поэтому очевидна целесообразность и необходимость повышения эффективности данной операции.

Целью настоящей работы является повышение производительности труда и качества выпускаемой продукции путем модернизации станка для обработки алмазов с применением полуавтоматического робота-манипулятора и расширения технологических возможностей оборудования.

При обработке нижней части бриллианта используется полуавтоматический робот-манипулятор. Его применение позволяет в автоматическом режиме перенастраиваться с грани на грань кристалла алмаза согласно особенностям его кристаллической решетки и направлению «мягкого» шлифования. Аналогичный эффективный способ снятия массы припуска с верхней части бриллианта также предлагается осуществлять с применением манипулятора. Для этого выполнено конструктивное изменение установочного элемента цангового зажима, что позволяет использовать его при шлифовании граней верхней части бриллианта с помощью робота-манипулятора, используя его контактное устройство, срабатывающее посредством замыкания электрической цепи при снятии припуска до контрольной точки, которой является верхняя кромка цанги.

Качество бриллианта в значительной степени зависит от режимов обработки алмаза. Однако рабочие (огранщики) в стремлении повысить производительность нередко заведомо нарушают режимы обработки, которые устанавливаются самостоятельно, исходя из результатов исследования камня в соответствии со своей квалификацией. Нарушение режимов обработки отследить технологу практически не представляется возможным, так как работа огранщика в основном ручная индивидуальная. В то же время ужесточение режимов обработки приводит к увеличению силового воздействия на бриллиант и его перегреву. В некоторых случаях перегрев оправки и чрезмерный прижим заготовки приводит к смятию стенок оправки, что, в свою очередь, приводит к нарушению геометрических параметров бриллианта. Изготовление такого бриллианта характеризуется как брак, на исправление которого затрачивается полезная масса будущего бриллианта.

Следовательно, внедрение способа автоматизированной обработки алмаза в значительной мере снижает роль субъективного фактора в достижении качества продукции бриллиантового производства.

Таким образом, предлагаемая технология обработки алмазов в бриллианты с использованием полуавтоматического робота-манипулятора и применением модернизированного цангового зажима в значительной степени решает поставленные задачи, способствует снижению трудоемкости, повышению производительности процесса и качества продукции. Разумеется, что при этой степени автоматизации процесса не снижается роль участия человека (рабочего) в художественном оформлении бриллианта, которое является ключевым показателем при оценке бриллианта как части ювелирных украшений и высоко ценится на мировом рынке.

УДК 621.7.014

### **ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ СПЛАВА FE-SI-AL ПРИ ДВУХВАЛКОВОЙ БЫСТРОЙ ЗАКАЛКЕ-ПРОКАТКЕ РАСПЛАВА**

**М. Н. Верещагин, Н. М. Запускалов, И. В. Агунович**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Новая технология металлургического производства – непрерывная закалка-прокатка расплава – позволяет избежать многоступенчатость, трудоемкость и энергоемкость технологического цикла производства прецизионных сплавов, при этом улучшает структуру, качество и физико-химические свойства металлов и сплавов за счет увеличения растворимости твердых растворов, появления новых метастабильных фаз и более совершенной микроструктуры – аморфной или микрокристалличе-

ской. Чтобы гарантировать необходимое качество получаемой ленты, необходимо понять механизм формирования структуры быстрозакаленного металла.

Целью данной работы является исследование механизма формирования структуры быстрозакаленного сплава Fe-Si-Al.

Методика исследований. Быстрозакаленные ленты сплава Fe-Si-Al получали методом двухвалковой закалки-прокатки расплава. Скорость прокатки  $V = 3-4$  м/с. Микроструктуру и кристаллическое строение изучали в продольном и перпендикулярном к оси направлении на сканирующем электронном микроскопе «Nanolab-7» и световом микроскопе «Унимет». Параметры шероховатости валков и ленты определялись при помощи профилографа-профилометра завода «Калибр» модели 250.

Результаты исследований. Высокая скорость поверхности вращающихся валков при заливке расплава, присутствие окислов и примесей на контакте поверхностей валок-расплав, наличие некоторой начальной шероховатости валков приводят к неодинаковому смачиванию валка расплавом и формированию в зоне отвода тепла перегрева различных микрообъемов прямого и косвенного контакта расплава с микровыступами поверхности валка. Микронеровности на поверхности валка приводят к неодинаковым зазорам между поверхностью валка и корочкой намороженного металла. Имеющее место различие в теплоотводе создает разницу скоростей роста кристаллов. Поверхностная зона, которая непосредственно прилегает к поверхности валка, состоит из столбчатых кристаллов тонкого строения и расположенных перпендикулярно к поверхности ленты. Средняя зона поперечного сечения ленты состоит из неориентированных кристаллов, которая при изменении режимов быстрой закалки сужается, а в отдельных местах может совсем исчезать. В местах отрыва корочки от поверхности валка кристаллы растут от поверхности ленты к ее середине в виде «пучков», причем угол наклона продольных осей последних относительно нормали к поверхности ленты может изменяться в пределах  $0-90^\circ$ . Кристаллы, растущие с большими отклонениями от нормали, значительно толще и короче по сравнению с кристаллами, главная ось которых имеет меньшее отклонение от главного направления роста.

В процессе увеличения толщины намораживаемой корочки при кристаллизации расплава возникают термические напряжения, вызывающие отрыв последней от поверхности валка и появлению термических трещин. Причиной напряжения являются охлаждение и температурное сжатие корочки по мере ее роста при одновременном нагреве и тепловом расширении поверхности валка. Глубина трещин на поверхности ленты в среднем составляет 10 мкм, и они имеют преимущественно продольную ориентировку, так как ширина образующейся корочки на несколько порядков больше ее длины.

УДК 621.762

## **ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЯ СХВАТЫВАНИЯ МЕЖДУ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОСНОВОЙ И ПОРОШКОВЫМ ПОКРЫТИЕМ НА СТАДИИ ИХ СОВМЕСТНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ТЕХНОЛОГИЯХ ПЛАКИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ**

**Н. В. Иноземцева**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Технология плакирования металлов состоит из подготовки поверхности основы и порошкового покрытия, совместной пластической деформации металлической основы и порошкового покрытия, а также дополнительной обработки полученного

соединения. Одной из проблем является достижение качественного соединения слоев на этапе совместной пластической деформации. На прочность соединения оказывают влияние свойства соединяемых металлов и параметры плакирования.

Целью данной работы являлось выявление закономерностей образования соединения между металлической основой и порошковым покрытием на стадии их совместной пластической деформации в технологиях плакирования металлов, выраженных через технологические параметры.

Было выявлено, что условием образования соединения между слоями является превышение продолжительности совместной деформации порошка и основы над продолжительностью активации контактной поверхности основы с покрытием, которое должно быть больше продолжительности релаксации остаточных напряжений в порошковом покрытии. Графический и экспериментальный анализ свойств применяемых материалов и технологических параметров процесса совместной пластической деформации порошка и основы, используемых для расчета длительности активации контактной поверхности основы и длительности релаксации остаточных напряжений в покрытии, определил наиболее значимые параметры процесса: скорость процесса деформирования, степень деформации, геометрия очага деформации, начальная температура в зоне деформации.

В качестве практических рекомендаций предлагается, с учетом свойств используемых материалов, обеспечивать условие образования соединения изменением технологических параметров: скорости процесса деформирования, начальной температуры нагрева, степени деформации и геометрического параметра очага деформации.

УДК 621.74

## **РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СВОЙСТВАМИ ФОРМОВОЧНОЙ СМЕСИ НА ОСНОВЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЕЕ СОСТАВА**

**В. М. Карпенко, Е. В. Филипенко**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Наиболее трудный и до сих пор практически не решенный – вопрос расчета изменения дозы исходных компонентов формовочной смеси в зависимости от численного значения реологических свойств. Иначе, какое дать количество свежих добавок, чтобы получить желаемые свойства смеси.

Целью исследования является разработка теоретических закономерностей, отражающих взаимосвязь рецептурного состава формовочной смеси и ее реологических свойств. А также, на базе полученных закономерностей, разработать рекомендации по корректировке состава формовочной смеси.

В экспериментах использовалась смесь, близкая по составу к единой смеси, применяемой на РУП «Гомельский завод литья и нормалей». Такая смесь содержит 93,38–90 % отработанной смеси; 6,1–7,8 % кварцевого песка; 0,33–1,33 % глины бентонитовой; 0,047–0,12 % связующего КО; 0,01–0,026 % крахмалита; 0,13–0,67 % угля каменного молотого; воду техническую. Влажность готовой смеси 3,3–3,6 %, содержание активного бентонита 6–11 %.

В опытах применяли оборотную смесь и свежий песок, один раз взятые из потока формовочных материалов, поэтому управляемыми оставались две независимые переменные: бентонит – от 4,8 до 6,2 % и влажность – от 3,0 до 3,7 %.

Для исследуемой смеси эмпирическая зависимость имеет вид:

1) при сжатии  $\varepsilon = 21,96W^{0,961}B^{-0,714}$ ;

2) при сдвиге  $\tau = 0,206W^{0,107}B^{0,646}$ .

Значимость коэффициентов уравнений регрессии подтверждается значением  $t_{\text{набл}} > t_{\text{крит}}$ , при  $p < 0,05$ , а также значением  $F_{\text{набл}} > F_{\text{крит}}$  при  $p$ -уровне  $p < 0,05$ .

Данная зависимость может быть непосредственно использована для формирования корректирующего воздействия в процессе смесеприготовления, так как она отражает связь с компонентами формовочной смеси.

На базе эмпирических зависимостей разработан алгоритм корректировки состава формовочной смеси. Основываясь на данном алгоритме для осуществления схемы АСУ ТП смесеприготовления для современных смесеприготовительных систем, использующих ЭВМ, разработана программа в системе программирования Delphi. Программа работает следующим образом. В окне формы программы отображаются диапазоны требуемых свойств смеси. Имеются три метки для ввода массы, прочности и деформации смеси. После ввода всех данных нажимается кнопка «Расчет», и по известным свойствам смеси ( $\tau$ ,  $\varepsilon$ ) и массе выдает процентное содержание в ней бентонита и ее влажность, а также выводится сообщение о свойствах смеси. В соответствии с требуемыми свойствами смеси выдаются рекомендации для корректировки состава.

Использование данной программы в совокупности с установкой непрерывного автоматизированного контроля реологических свойств формовочных смесей позволит корректировать состав смеси в процессе смесеприготовления для обеспечения требуемых свойств.

УДК 678.046:620.197

## НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ ИНГИБИРОВАННЫХ ПЛАСТИКОВ

**И. В. Царенко**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

**Л. С. Пинчук**

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

Применение полимерных материалов, модифицированных ингибиторами коррозии (ИПМ), является одним из самых эффективных направлений защиты машин в XXI в. Сегодня разработаны методология «конструирования» ИПМ [1] и концепции ИПМ как «умных» материалов, структура которых приспособляется к условиям эксплуатации посредством обратной связи [2]. Современное поколение ИПМ имеет следующие особенности: 1) рациональное расходование ингибиторов коррозии (ИнК); 2) появление специфических технологий формирования изделий из ИПМ; 3) расширение номенклатуры используемых ИнК.

Эти тенденции реализуются в средствах защиты машин таким образом, что:

- ИнК локализованы в поверхностном слое изделий, сопряженном с поверхностью защищаемой металлической детали;
- разработаны технологии [2] модифицирования изделий из пластиков ИнК в газовой, жидкой и твердой фазах; переработки ИПМ в волокнистые материалы,

применяемые для защиты каналов, отверстий и полостей; замены многослойных полимерных пленок однослойными, сочетающими механизмы ингибиторной и барьерной защиты;

- сформировалась группа ИПМ со структурой кластерного типа, где роль соединения – «хозяина» выполняет ИнК, молекулы которого образуют пространственный каркас, а соединения – «гостя» - низкомолекулярные фракции полимера [3].

Технология изготовления пленок из ИПМ передана ЗАО «Бигвест» (г. Минск) и «Казаньоргсинтез». Интерес к таким пленкам проявили ОАО «Полимир» (г. Новополоцк), «Амипак» (г. Буда-Кошелево), завод пластмассовых изделий (г. Борисов). Потребителями консервационно-упаковочных пленок из ИПМ являются все подшипниковые заводы, инструментальные заводы в г. Орша и г. Кобрин («СИТОМО»), заводы НПО «Интеграл», ОАО «Белкард». В ингибированные пленки целесообразно упаковывать запчасти и инструменты, выпускаемые ОАО МАЗ, БелАЗ, МТЗ, «Гомсельмаш», «Лифтмаш» (г. Могилев) и др.

ИПМ нового поколения завоевывают рынки в Беларуси и других странах СНГ, вытесняя аналогичные импортные материалы.

#### Литература

1. Царенко, И. В. Модифицированные полиазотистыми гетероциклами полимерные материалы и механизм их защитного действия : дис. ... канд. техн. наук / И. В. Царенко. – Гомель, 1996.
2. Goldade, V. A. Plastics for Corrosion Inhibition / V. A. Goldade, L. S. Pinchuk, A. V. Makarevich, V. N. Kestelman.. – Berlin : Springer Verlag, 2005. – 383 p.
3. Самусева, Л. В. Исследование антикоррозионной активности пленок на основе полиэтилена и карбамида / Л. В. Самусева, А. С. Неверов, Д. С. Житников // Материалы, технологии, инструменты. – 2007. – Т. 6, № 2. – С. 45–49.

УДК 537.874:678.742.2

## РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ НАПОЛНЕННОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

**В. А. Банный**

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

**И. В. Царенко**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Массовая эксплуатация радиотехнических устройств СВЧ породила в XXI веке глобальную проблему электромагнитной безопасности, а также технические проблемы электромагнитной совместимости радиоэлектронной техники и систем защиты информации. Радиопоглощающие материалы (РПМ) и электромагнитные экраны на их основе являются одним из эффективных средств решения этих проблем. Среди многообразия РПМ свою нишу занимают материалы на основе наполненного полиэтилена.

Цель работы – исследование радиопоглощающей способности термопластичных композиционных материалов, содержащих различные функциональные наполнители.

Экспериментальные образцы РПМ изготавливали методом термического пресования из порошкообразных смесей полиэтилена высокого давления (ПЭ, ГОСТ 16803-070) и наполнителей – магнитно-мягкого феррита (ММФ, ТУ 6-09-5111-84, марка 2500 НМС, размер частиц 100–200 мкм), карбонильного железа, никеля, электролитической меди, технического углерода, ультрадисперсных алмазов (УДА, марка УДДДСФ, диаметр частиц 40–80 мкм), металлизированных стеклосфер (диаметр 200–500 мкм). Диаметр частиц Fe, Ni и Cu составлял 3–10 мкм. Степень наполнения варьировали от 25 до 75 % масс.

Радиофизические параметры полимерных наполненных РПМ оценивали рефлектометрическим методом, используя измерители панорамные Р2. Коэффициент отражения и ослабление энергии СВЧ-излучения регистрировали в диапазоне частот 2,0–27,0 ГГц при нормальном падении на образец электромагнитной волны.

Физико-химическое взаимодействие ПЭ и наполнителей исследовали с помощью ИК-спектрометра Nicolet 5700. Степень окисления связующего регистрировали по появлению в спектрах полосы поглощения карбонильной группы.

Структуру композитных РПМ изучали с применением оптической и растровой электронной микроскопии (микроскопы МПСУ-1 и LEO 982). Кроме того, изучены физико-механические и теплофизические характеристики композиционных РПМ.

Для композитных РПМ на основе полиэтилена, наполненного различными частицами, установлены оптимальные значения толщины образцов, степени наполнения, размера и соотношения концентраций мелких и крупных частиц наполнителя, при которых ослабление энергии электромагнитного излучения максимально. При рецептурной и структурной оптимизации экранов по критерию ослабления энергии электромагнитного излучения наряду с высокими диэлектрическими и магнитными потерями следует обеспечивать согласование волновых сопротивлений РПМ и «свободного пространства», а также усиление эффекта рассеяния электромагнитных волн на межфазных границах внутри РПМ.

По технологическим и технико-экономическим критериям наиболее перспективными средствами радиозащиты являются РПМ на основе функционально наполненных термопластов. РПМ относятся к материалам двойного назначения и могут быть использованы при создании малозаметных объектов, в том числе летательных аппаратов.

УДК 621.034.4:534.6

## **СОЕДИНЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ АРМИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ С ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЕЙ**

**М. М. Рыженко**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Объектами исследований в данной работе служили антикоррозионные покрытия из эпоксидного композита, армированного стекловолокном. Критерием качества соединения полимер–волокно выбрана величина разрушающего напряжения на сдвиг ( $\sigma_{сдв}$ ). Прочность соединения полимер–волокно является функцией многих переменных и зависит от амплитуды колебаний, давления на полимер в литевой форме, времени воздействия ультразвука, физического состояния связующего и химиче-

ской природы волокна. Для улучшения соединения стекловолокна с эпоксидным композитом применялась ультразвуковая очистка.

Полимерное эпоксидное покрытие наносили на армирующее стекловолокно в литьевой форме под давлением. Ультразвук подводили к литьевой форме при помощи магнитострикционного преобразователя ПМС-15А-18. Питание магнитостриктора осуществлялось от генератора УЗГ-4 м, который позволял изменять амплитуду колебаний концентратора от 13 до 24 мкм на частоте 19,5 кГц. Измерение амплитуды колебаний концентратора проводилось с помощью оптического микроскопа МБИ-1 при увеличении  $\times 320$ .

Перед нанесением защитного покрытия из эпоксидного композита в литьевую форму помещали стекловолокно  $\varnothing 10$  мкм длиной 100 мм, концы которого зажимались прижимными кольцами. Литьевая форма герметично закрывалась и подавался эпоксидный композит под давлением, фиксируемым манометром и подводили ультразвук. Ультразвуковое воздействие приводило к внутреннему разогреву на поверхности раздела полимер–волокно из-за различия их акустического сопротивления. Кроме того, ультразвук вызывает колебания дисперсных частиц наполнителей, что приводит к удалению загрязнений и пластификаторов с поверхности стекловолокна. После отверждения покрытия образцы подвергались испытаниям на сдвиговую прочность. Исследования показали, что изменение амплитуды от 15 до 25 мкм в течение 1–5 с и давлении связующего  $P = 0,5$  МПа приводит к повышению сдвиговой прочности в 2 раза. При больших давлениях порядка 1 МПа происходит снижение сдвиговой прочности в результате подавления амплитуды колебаний, что делает невозможным очистку поверхности волокна, а также в силу незначительного прогрева. Увеличение продолжительности воздействия ультразвука приводит к уменьшению сдвиговой прочности за счет разрушения связи связующее–волокно.

Таким образом, при указанных параметрах ультразвуковых колебаний и давлении полимера прочность соединения полимерной матрицы и армирующего материала увеличивается в 2 раза.

УДК 534.29:532.528

### ОБ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ У ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА ПОЛИМЕР-АРМИРУЮЩИЙ МАТЕРИАЛ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ

М. М. Рыженко

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Качество теплоты, полученного объемом полимерного композита в единицу времени при диссипации энергии ультразвука в пучности знакопеременных напряжений на поверхности раздела полимер-армирующий материал можно записать:

$$Q = \frac{\Delta N}{V} = \frac{IS}{V} = \frac{I_0(1 - e^{-2\Delta al})}{l}, \quad (1)$$

где  $\Delta N = IS$  – мощность ультразвука, поглощенная объемом эпоксидного композита;  $S$  – площадь озвучиваемого композита;  $I = I_0(1 - e^{-2\Delta al})$  – интенсивность ультразвука;  $V$  – объем озвучиваемого композита;  $l$  – длина стекловолокна;  $\Delta l$  – разность коэффициентов поглощения ультразвука эпоксидным композитом и стекловолокном;  $I_0$  – интенсивность источника ультразвука.

Для определения приращения температуры в объеме эпоксидного композита пренебрегали распространением тепла поперек стекловолокон и использовали уравнение теплопроводности для линейного потока тепла вдоль оси  $z$ :

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} = -\frac{1}{\chi} \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial t} = -\frac{Q(z_1 t)}{\Delta K} \quad (2)$$

при граничных условиях:  $v = v_0; t = 0; v = v_{01}; z = l; t > 0; \frac{\partial \vartheta}{\partial z} = 0; z = 0; t > 0.$  (3)

Применяя преобразования Лапласа, получаем уравнение для распределения температуры в области  $0 \leq z \leq l$ :

$$\vartheta(z_1 t) = \vartheta_0 + \frac{Q}{(\gamma + \gamma_1)(c + c_1)} \cdot t + \frac{2\vartheta_{01}\sqrt{\chi^t}}{\Delta K} \cdot \sum \left\{ I\Phi * \left[ \frac{(2n+1)l-z}{2\sqrt{\Delta\chi t}} \right] + I\Phi * \left[ \frac{(2n+1)l-z}{2\sqrt{\Delta\chi t_z}} \right] \right\}, \quad (4)$$

где  $v_0$  и  $v_{01}$  – распределение температуры в объёме образца композита, соответственно, при  $t = 0$  и  $t = t_1$ ;  $\gamma$  – плотность эпоксидного композита;  $\gamma_1$  – плотность стекло-волокна;  $c$  – удельная теплоемкость эпоксидного композита;  $c_1$  – удельная теплоёмкость стекловолокна;  $t$  – время воздействия ультразвука;  $\Delta\chi$  – разность коэффициентов температуропроводности эпоксидного композита и стекловолокна;  $\Delta K$  – разность теплопроводности эпоксидного композита и стекловолокна;  $n$  – целое число,  $n = 1, 2, 3, \dots$ ;  $\Phi^*$  – функция ошибок;  $l$  – длина волокна.

Как показали результаты исследования, температура эпоксидной композиции и армирующего материала, вычисленная по формуле (4) и полученная экспериментально, в зависимости от времени озвучивания, при оптимальных параметрах ( $f = 19,5$  кГц,  $I = 3,14$  Вт/см<sup>2</sup>,  $2\Delta\alpha = 0,78$ ) удовлетворительно согласуются.

Проведённые исследования свидетельствуют о возможности осуществления снижения вязкости полимера от температуры и улучшения смачивания поверхности им волокна и улучшения прочности соединения в 2 раза.

УДК 621.7.07

## МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ДИФфуЗИОННО-УПРОЧНЕННЫХ КАРБИДНЫХ СЛОЕВ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ЛЕДЕБУРИТНОГО КЛАССА

В. М. Кенько, И. Н. Степанкин

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

В работе исследованы особенности разрушения диффузионно-упрочненных карбидных и карбонитридных слоев, сформированных на быстрорежущей стали Р6М5. Для испытаний использовали образцы, нагружаемые по схеме трехточечного изгиба. Это позволило создать в нижней стенке образца – упрочненном слое, равномерное одноосное растяжение. Толщина разрушаемой стенки образца составляла

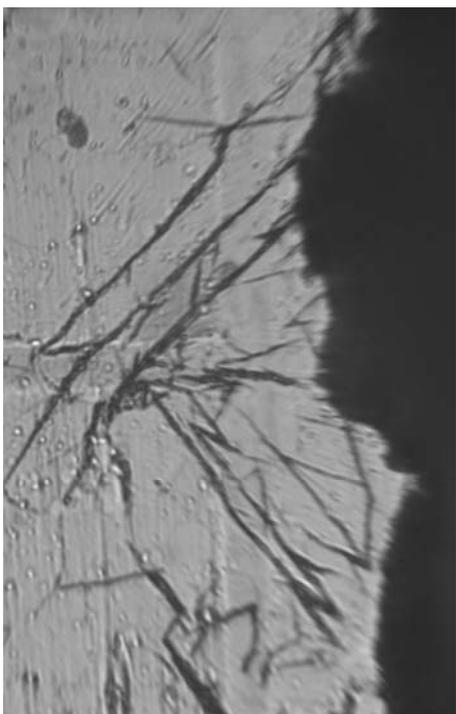


Рис. 1. Характер зарождения трещин в упрочненном слое в случае перпендикулярного расположения карбидных строчек по отношению к линии действия внешнего растягивающего напряжения ( $\times 1600$ )

0,5–0,6 мм, что соответствует глубине насыщения. В связи с чем, примененная схема испытания позволила исследовать механизм разрушения именно упрочненного слоя.

Результаты исследований показали, что при испытании упрочненного материала в условиях растягивающих напряжений упругая энергия деформации карбидных и карбонитридных слоев на высоколегированных сталях трансформируется в пластическую деформацию матричного материала, располагающегося в окрестности карбидных включений. Линии скольжения, свидетельствующие о протекании пластической деформации материала упрочненного слоя, располагаются под углом порядка  $45^\circ$  к линии приложения внешней нагрузки (рис. 1).

Наименьшую прочность имеют диффузионно-упрочненные слои, сформированные на материале, расположение карбидных строчек в котором находится под углом  $45^\circ$  к линии приложения внешнего растягивающего напряжения. В этом случае максимальная внутрикристаллическая пластичность наблюдается в окрестности скопления карбидных включений.

УДК 621.923

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ НАНЕСЕНИЯ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ИЗ САМОФЛЮСУЮЩИХСЯ ПОРОШКОВ НА ОСНОВЕ ЧУГУННОЙ ДРОБИ

Ф. И. Пантелеенко, Е. Ф. Пантелеенко

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

Г. В. Петришин

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Износостойкие покрытия, нанесенные магнитно-электрическим методом, обладают такими достоинствами, как высокая износостойкость в тяжелых условиях изнашивания, в том числе при наличии ударных нагрузок, в присутствии абразивных и агрессивных сред, хорошая адгезия наплавленного слоя к подложке, невысокая стоимость покрытий и простота технологии нанесения и применяемого в ней технологического оборудования и оснастки. В настоящее время известно успешное применение в данной технологии самофлюсующихся диффузионно-легированных порошков на основе дроби из стали 40Л [1], [2]. Исследования [1], [2] показали, что применение самофлюсующихся порошков на железной основе позволило существенно повысить как качество наносимых покрытий, так и их физико-механические свойства. Однако стальная дробь, являющаяся сырьем для производства самофлюсующихся порошков, в отличие от чугуна-

ной, не столь широко распространена на машиностроительных предприятиях Республики Беларусь и, в частности, Гомельского региона, где и расположены основные предприятия, заинтересованные во внедрении в производство рассматриваемой технологии. Ввиду этого представляет интерес разработка самофлюсующихся диффузионно-легированных порошков на основе чугунной дроби и исследование физико-механических свойств покрытий из таких материалов, которые до сих пор в технологии МЭУ не применялись.

В работе [1] приведены рекомендуемые технологические режимы нанесения магнитно-электрических покрытий из самофлюсующихся порошков на основе стальной дроби. Однако предварительные испытания покрытий из борированных порошков на основе чугунной дроби показали, что они обладают худшими триботехническими свойствами по сравнению с покрытиями из самофлюсующихся порошков на основе 40Л. В докладе приведены результаты исследований физико-механических свойств покрытий из борированных самофлюсующихся порошков на основе стальной и чугунной дроби. Установлено, что при использовании в технологии порошков на основе чугуна, плотность мощности необходимо снижать до значения  $17,0 \dots 17,5 \cdot 10^3$  Вт/см<sup>2</sup>. В этом случае покрытия имеют гетерогенную структуру и обеспечивают значительное повышение износостойкости. Испытания показали, что скорость изнашивания таких покрытий в 4–5 раз ниже скорости стали твердостью 45...47 HRCэ.

Таким образом, на основе экспериментальных данных разработаны технологические режимы нанесения магнитно-электрических покрытий из новых самофлюсующихся наплавочных материалов на основе чугуна.

#### Литература

1. Петришин, Г. В. Диффузионно-легированные порошки для магнитно-электрического упрочнения / Г. В. Петришин, А. Ф. Пантелеенко, Е. Ф. Пантелеенко // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – № 4. – С. 26–31.
2. Пантелеенко, Ф. И. Технологические режимы магнитно-электрического упрочнения с использованием диффузионно-легированного стального порошка / Ф. И. Пантелеенко, Г. В. Петришин, Е. Ф. Пантелеенко // Вестн. Брест. гос. техн. универ. Машиностроение. – 2006. – № 1. – С. 37–45.

УДК 621

### О ПРИЧИНЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ НЕОДНОРОДНОСТИ СТРУКТУРЫ ЭКСТРУЗИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ЛИСТОВ

**П. Д. Петрашенко, А. И. Кравченко**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

**С. Ф. Мельников**

*Белорусский торгово-экономический университет  
потребительской кооперации, г. Гомель*

**Г. И. Дубровская**

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

Довольно часто при экструзии тонких полимерных листов наблюдается неоднородность плотности материала по ширине листа. В серийном производстве этот эффект нежелателен, поскольку сказывается на свойствах материала, которые особенно негативно проявляются при вакуумной формовке из листа изделия.

Эта неоднородность является следствием несовершенства технологии производства листа и оборудования, на котором он изготовлен. При этом различная плотность полимерного листа получается в основном из высоковязких марок полиэтилена (ПЭНД) и полипропилена (ПП).

Рентгеноструктурный анализ образцов полимерного листа показал, что различная плотность обусловлена структурой «укладки» макромолекул полимера. Неоднородность укладки является следствием широкого молекулярно-массового распределения, которое характерно для высоковязких полимеров и заметно возрастает при прохождении полимера через экструдер, имеющий два шнека со смесительными элементами. Образующиеся при этом короткие макромолекулы, благодаря высокой текучести, устремляются на выход из щелевой головки по кратчайшему пути – в центр. Длинные макромолекулы, ввиду своей малоподвижности, оттесняются на края щели. Из щелевой головки они выходят в скрученном, либо сложенном виде и сохраняют эту форму в готовом листе. Об этом свидетельствуют образование «шейки» при разрыве образцов из края листа и меньшая плотность полимера. В центральной части листа короткие макромолекулы ориентируются в направлении экструзии и «пакуются» более плотно, а при растяжении образцов разрыв материала листа происходит без образования «шейки».

Наши эксперименты подтвердили, что степень ориентации макромолекул в листовом полимере можно регулировать не только вытяжкой расплава, но и временем его нахождения в релаксированном состоянии (время движения расплава из щели головки до приемного каландра). По мере увеличения этого времени или расстояния между головкой и каландром плотность ПЭНД марки 273-79 изменялась от 0,936–0,962 г/см<sup>3</sup> в центре листа до 0,923–0,955 г/см<sup>3</sup> по краям листа.

Установлено, что при одинаковой высоте зазора между валками приемного каландра толщина готового листа шириной 1 м по его сечению оказывается неодинаковой. Разбежка достигала 11 % с максимальным значением в центре листа, которому соответствовала максимальная плотность полимера.

Показано, что с уменьшением времени нахождения расплава полимера в релаксированном состоянии неоднородность свойств полимерных листов заметно снижается, хотя фракционирование макромолекул по ширине щелевой головки сохраняется. Поэтому приближение головки к валкам приемного каландра является достаточно эффективным способом снижения неоднородности свойств экструзионного полимерного листа.

При изготовлении полимерного листа на линии с двумя одношнековыми экструдерами, работающими на одну щелевую головку, описанных выше эффектов не наблюдалось.

УДК 621

## **ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ ДЛЯ МАСЛООХЛАЖДАЕМЫХ ФРИКЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ МОБИЛЬНЫХ МАШИН**

**В. П. Сергиенко, А. В. Купреев, С. Н. Бухаров**

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

Увеличение мощности и надежности фрикционных систем современных мобильных машин, в первую очередь, тормозов и трансмиссий привело к созданию новых конструкций фрикционных узлов, в которых диссипационные процессы происходят в жидкостной среде, преимущественно в масле. Основные требования к фрикционным материалам, работающим в среде масла, заключаются в снижении теплонагруженности фрикционных узлов трения и, как следствие, интенсивности износа и коробления тру-

щихся элементов, а также в предотвращении возникновения ударных нагрузок в агрегатах трансмиссии и тормозах.

Принудительный отвод тепла из зоны трения позволяет существенно повысить мощность, долговечность и надежность работы фрикционных узлов машин. Требования по плавности включения трансмиссий и тормозов реализуются за счет уменьшения разницы между коэффициентами статического ( $\mu_{\text{стат}}$ ) и динамического ( $\mu_{\text{дин}}$ ) трения материалов, а также путем создания структуры фрикционного материала, снижающей вероятность перехода от жидкостного режима трения к трению без смазочного материала. Несмотря на постоянное совершенствование компонентного состава и свойств фрикционных материалов, задача увеличения мощности трения фрикционных устройств и снижения ударных нагрузок в узлах трения машин при переходных процессах не нашла своего решения до настоящего времени. В связи с этим разработка новых фрикционных материалов, предназначенных для работы в среде масла, и исследование триботехнических явлений на маслоохлаждаемом фрикционном контакте вызывает постоянный интерес исследователей.

Целью настоящей работы является исследование некоторых закономерностей фрикционного взаимодействия композиционных материалов с металлическим контртелом в режиме трения со смазочным материалом, преимущественно на примере данных, полученных для гидромеханических передач и многодисковых маслоохлаждаемых тормозов мобильных машин.

Установлено, что в многодисковых маслоохлаждаемых фрикционных устройствах уровень фрикционного тепловыделения в парах трения, несмотря на уменьшение величины средней удельной силы трения, существенно зависит от наличия гарантированной масляной пленки и интенсивности теплообмена на фрикционном контакте. Термические деформации в металлических дисках и химические изменения в матричном полимере и смазочном материале, являющиеся следствием повышенного теплообразования при срыве масляной пленки, приводят к снижению момента трения, а, следовательно, к потере эффективности маслоохлаждаемых фрикционных устройств. При наличии смазки в зоне контакта, структура фрикционного материала и геометрия поверхности трения являются определяющими факторами обеспечения эффективности маслоохлаждаемых фрикционных устройств. Механизмы изнашивания фрикционно-взаимодействующих твердых тел в случае трения без смазочного материала и в среде смазки существенно различаются.

Выполненные исследования в данном направлении имеют большие практические приложения. На их основе созданы, испытаны и внедрены на ведущих машиностроительных предприятиях Беларуси (ПО «МТЗ», РУПП «БелАЗ» и др.) фрикционные материалы для узлов трансмиссий и тормозов, взамен закупаемых по импорту в Германии, Италии и Австрии.

УДК 541.138.2

## **ВЛИЯНИЕ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ НА АДГЕЗИЮ НИЗКОПЛАВКОГО ПОЛИЭФИРА К АЛЮМИНИЮ**

**С. В. Пискунов, Е. В. Иноземцева**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Адгезионные свойства полимеров к металлам определяются физико-химическими и топографическими характеристиками поверхностей раздела.

В связи с этим целью работы является изучение возможности повышения адгезии на границе полимер-металл путем предварительной обработки поверхности

алюминия методом микродугового оксидирования (МДО). В качестве полимера был выбран низкоплавкий полиэфир, имеющий температуру размягчения 88–136 °С. Полимерные покрытия формировали методом свободного спекания на алюминиевой фольге марки А-99, обработанной МДО при различном времени формования. Покрытия термостатировали в печи 10 и 30 минут при температуре 180 °С. Охлаждение покрытий проводили естественным путем на воздухе. Процесс МДО алюминия проводили в симметричном анодно-катодном режиме с использованием переменного тока частотой 50 Гц. Плотность тока поддерживалась 2 А/дм<sup>2</sup>, напряжение изменяли в пределах 0÷400 В. В качестве рабочего электролита использовали силикатно-щелочной раствор. Адгезионную прочность покрытий определяли методом отслаивания металлической фольги от полимерного слоя под углом 180° на разрывной машине марки Instron 5567 (США) при скорости движения зажимов 50 мм/мин. Анализ полученных данных показал, что наибольшее значение адгезионной прочности достигается при времени термостатирования в печи 10 минут и МДО 60 минут. Адгезионная прочность при таком режиме составляет 6,2 кН/м, что примерно в 10,7 раза превышает адгезию полимера к чистому алюминию. Свойства МДО-покрытий и значения адгезии приведены ниже:

**Свойства МДО-покрытий и значения адгезионной прочности**

Характеристика	Время обработки МДО, мин						
	0	10	20	30	40	50	60
Адгезия ( $t_{\text{термо}} = 10$ мин), кН/м	0,58	2,75	3,61	4,30	5,39	5,91	6,20
Адгезия ( $t_{\text{термо}} = 30$ мин), кН/м	0,40	2,50	3,02	3,71	4,42	5,58	5,60
Шероховатость Ra, мкм	0,083	0,091	0,106	0,142	0,173	0,286	0,301

Установлено, что определяющим фактором, влияющим на повышение адгезии на границе полимер–металл, является шероховатость, а также пористость МДО-покрытий. Микрофотографии МДО-покрытий приведены на рис. 1.

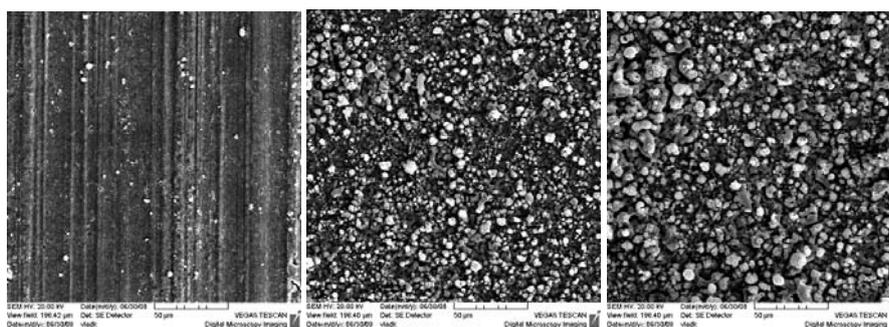


Рис. 1. Поверхность алюминия после МДО:  $t = 10, 30, 50$  мин (x 1000)

Таким образом, МДО является перспективным методом предварительной обработки алюминиевой подложки для последующего нанесения полимерных покрытий на основе низкоплавких полиэфиров.

**ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННАЯ АКТИВАЦИЯ  
БЫСТРОЗАКАЛЕННЫХ СПЛАВОВ НА ЖЕЛЕЗНОЙ ОСНОВЕ  
ПРИ ИХ АТТРИТОРНОЙ ОБРАБОТКЕ****М. Н. Верещагин, С. И. Кирилук***Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь***Г. Г. Горанский***Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

Аттриторную обработку (АО) порошковых и волокнистых дисперсий можно рассматривать как одну из наиболее эффективных форм интенсивного термомодеформационного воздействия на материал. При АО наряду с чисто внешним эффектом изменения удельной поверхности порошка происходит существенное изменение строения обрабатываемого материала: интенсивный рост дефектов кристаллической структуры материала; реализация различного типа механохимических реакций, сопровождающихся образованием новых фаз; развитие релаксационных процессов.

В качестве исходных материалов для получения порошка использовались быстрозакаленные ленты, полученные методом спиннингования, из сплава системы Fe–Cr–Ni–Co–Mo–Si, которые в дальнейшем подвергались АО.

Аттриторная обработка материалов осуществлялась на лабораторном аттриторе с вертикальной осью вращения импеллера. Исследования аттриторной обработки производились без активирующих диспергирующих добавок. В качестве определяющего процесс параметра рассматривалось время АО, которое для различных проб материала изменялось до 60 мин.

Исследованию подвергались два типа быстрозакаленных лент: ленты, полученные спиннингованием при скорости закалки  $10^5$ – $10^6$  °К/с; ленты, полученные спиннингованием с последующим охрупчивающим отжигом, произведенным при температуре 550° в течение 1-го часа без применения защитной атмосферы.

В процессе исследований был оценен характер изменения микротвердости аморфной составляющей при аккумуляции им энергии АО. Отмеченный максимум  $H_u$  имеет место в интервале значений  $E_q = 10$ – $20$  кДж/г. Рост  $H_u$  сплава связан с фазовым расслоением его аморфной составляющей.

Процесс получения металлических порошков, их качество и геометрические размеры находятся в непосредственной зависимости от технологических характеристик процесса размолла и свойств размалываемого материала. Исследования показали, что удельная поверхность порошка в процессе АО достигает максимума при содержании в шихте жидкости (ацетона) в пределах 14–18 мас. %, т. к. последний способствует развитию трещин в частицах порошка. При содержании в шихте жидкости до 10 % она оказывает смазывающее действие, и процесс размолла становится менее эффективным, чем при сухом размолле. Увеличение содержания жидкости более 20 % также понижает эффективность размолла. Отличительной особенностью размолла в среде жидкости является меньшее окисление порошка и меньшее содержание продуктов износа размольных тел. Процесс измельчения ленты, подвергнутой охрупчивающему отжигу, отличается большей эффективностью по сравнению с нетермообработанной. Это объясняется повышенной хрупкостью отожженной ленты. Вместе с тем данный порошок имеет повышенное содержание кислорода и оксидов.

УДК 621.777:621.79

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ПЛАКИРОВАНИЯ ПРОШИВКОЙ****В. Ф. Буренков, Ю. Л. Бобарикин***Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Процесс получения металлических покрытий на внутренних цилиндрических поверхностях металлических заготовок с помощью плакирования прошивкой отличается высокой производительностью, хорошей адгезией покрытия к заготовке, повышенной чистотой поверхности покрытия. Под плакированием понимается нанесение металлических покрытий на металлическую заготовку методом их совместной пластической деформации. Совместная пластическая деформация может осуществляться с помощью различных способов обработки металлов давлением, в том числе обратным выдавливанием или прошивкой. Многие особенности и закономерности плакирования прошивкой остаются не достаточно изученным. Так, отсутствуют зависимости для определения давления плакирования, которые необходимы при выборе технологического оборудования для осуществления исследуемого процесса.

Целью представляемого исследования является анализ основных стадий процесса плакирования прошивкой для определения давления плакирования.

Методика исследований состояла в аналитическом выводе зависимостей, определяющих величину давления прошивки и в последующей экспериментальной проверке адекватности этих зависимостей.

В результате выполненных исследований весь процесс плакирования разделен на три последовательные стадии, для которых получены следующие аналитические зависимости:

$$p_1 = 2,57 \cdot \beta \sigma_S, \quad p_2 = \sigma_{СП} \cdot \left( 1 + \frac{\mu}{3} \frac{d_B}{h_B} \right), \quad p_3 = \beta \sigma_S \left( \ln \frac{R}{r} + \frac{r}{3h} + 3 \right), \text{ МПа,}$$

где  $\beta$  – коэффициент Лоде;  $\sigma_S$  – сопротивление пластической деформации металлической заготовки;  $\sigma_{СП}$  – сопротивление пластической деформации плакирующей металлической вставки;  $\mu$  – коэффициент контактного трения между прошивным инструментом и плакирующей металлической вставкой;  $d_B$  – диаметр плакирующей металлической вставки;  $h_B$  – высота плакирующей металлической вставки;  $R$  – радиус металлической заготовки;  $r$  – радиус внутренней цилиндрической плакированной полости.

Экспериментальные исследования проводились на экспериментальном устройстве для плакирования прошивкой. В цилиндрических образцах алюминиевого сплава АДО формировалось центральное отверстие с одновременным нанесением оловянного покрытия из порошкового олова ПО2, используемого как припойный слой. Практическое назначение этого процесса – получение алюминиевых радиаторов с внутренним припойным слоем. В результате измерения усилия прошивки и последующего расчета давления прошивки доказана адекватность приведенных формул.

## СЕКЦИЯ В. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНСТРУИРОВАНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАШИН

УДК 81.5:519.711.3

### МЕТОД УПРОЩЕНИЯ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ТРЕНАЖЕРНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Мэн Цин-сун (КНР)

*Белорусский государственный университет, г. Минск*

Системы управления технических тренажеров сложны и многомерны. Упрощение моделей таких систем представляет собой актуальную задачу для разработчиков тренажерных комплексов и занятых их имитацией специалистов. Благодаря тому что упрощение моделей тренажерных систем может облегчить нагрузки проектирования, имитации и регулирования без нарушения точности и устойчивости управляющих систем и ускорить реакцию систем на действия органов управления и изменения окружающей среды, оно стало важным научным направлением в области автоматического управления.

Основная мысль работы автора заключается в том, что на основании вещественного разложения Шура, упрощены с использованием аппроксимации данных математические модели для линейных и поливариантных систем с асимптотической устойчивостью и полностью управляемостью и наблюдаемостью. Сначала преобразовываем матрицу исходной системы в блочно-диагональную посредством линейного оператора при помощи вещественного разложения Шура и разделяем исходную систему на две независимые части. Затем после отбрасывания слабых состояний системы, мало воздействующих на выходные величины, получаем промежуточную модель системы. Наконец, чтобы получить равные первоначальные значения и приближенные устанавливающиеся значения для упрощенной модели по сравнению с моделью исходной системы, необходимо проводить аппроксимацию данных по матрицам передаточной функции между упрощенной и исходной моделями систем. Такого типа упрощение проводится в результате сохранения главных полюсов исходных систем.

Используя данный метод упрощения моделей систем, повышена точность приближения упрощенной модели к исходной модели по переходным и устанавливающимся значениям, устойчивость упрощенной системы поддерживается в согласовании с исходной системой. Суммарные затраты в проектировании, имитации и регулировании систем стали меньше в значительной мере.

С помощью программы MATLAB эффективность и применимость данного метода упрощения доказаны путем имитации динамической модели линеаризованной системы одного из типов технического тренажера по продольному движению (рис. 1).

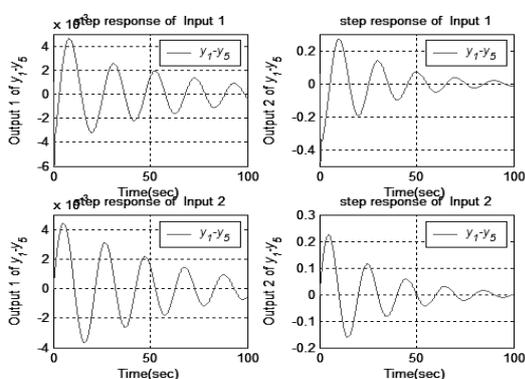


Рис. 1. Графики разностей переходных функций между исходной и упрощенной моделями

УДК 539.3

**ГРАНИЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ  
НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕРМОУПРУГОСТИ ДЛЯ ПЛОСКОЙ  
МНОГОСВЯЗНОЙ ОБЛАСТИ ПРИ ТЕМПЕРАТУРНОМ НАГРУЖЕНИИ****В. М. Хвисевич, А. И. Веремейчик, И. Г. Томашев***Брестский государственный технический университет, Беларусь*

В данной работе изучается плоское напряженно-деформированное состояние прямоугольной пластинки с отверстием. Используется температурное воздействие конвективного типа. В качестве математического аппарата для решения задачи термоупругости в такой постановке использован метод граничных интегральных уравнений (ГИУ), имеющий ряд преимуществ по сравнению с другими численными методами [1].

При исследовании напряженно-деформированного состояния ставились следующие граничные условия: на внутреннем и внешнем контурах пластинки отсутствуют поверхностные силы, две внешние грани, а также нижняя и верхняя плоскости теплоизолированы, на двух других гранях происходит теплообмен с воздухом. В качестве исходных данных задавались также температуры на нетеплоизолированных гранях, характеристики материала (коэффициенты теплопроводности, температуропроводности, температурного расширения, модуль упругости, коэффициент Пуассона), а также интервал времени нагружения. Симметрия рассматриваемой области позволяет ввести в рассмотрение  $\frac{1}{4}$  часть пластинки, которая аппроксимировалась граничными элементами.

Проведена численная реализация построенных интегральных уравнений [2] задачи нестационарной термоупругости с помощью ПЭВМ.

Построены графики распределения температуры по контуру пластинки для различных моментов времени. Получены графики распределения компонентов напряжения и перемещения на контуре пластинки, из которых следует, что максимальные значения напряжений возникают на окружности. Графики изменения температуры, напряжений и перемещений от времени позволяют исследовать характер изменения напряженно-деформированного состояния в процессе температурного воздействия. Кроме того, проведено исследование изменения во времени температуры и напряжений в произвольной точке окружности в зависимости от размеров пластинки, из которых очевидно, что напряжения и температуры в произвольной точке внутреннего контура растут при уменьшении размеров пластинки.

Результаты определения перемещений, напряжений и температурных полей сравнивались с результатами расчетов, полученных с помощью программного комплекса ANSYS Workbench, построенного на базе метода конечных элементов. Небольшие затраты машинного времени для решения поставленной задачи методом ГИУ подтверждают эффективность метода по сравнению с другими численными методами.

**Литература**

1. Риццо, Ф. Метод граничных интегральных уравнений – современный вычислительный метод прикладной механики / Ф. Риццо // Метод граничных интегральных уравнений. – Москва : Мир, 1978. – С.11–17.
2. Веремейчик, А. И. Граничные интегральные уравнения двумерных нестационарных краевых задач несвязанной термоупругости / А. И. Веремейчик // Актуальные проблемы динамики и прочности в теоретической механике: сб. науч. тр. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: Ю. В. Василевич [и др.]. – Минск : Технопринт, 2001. – С. 99–103.

УДК 539.3

## НЕСТАЦИОНАРНЫЙ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ ТЕРМОСТАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СТАЛЬНОЙ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПЛАСТИНКИ ПРИ ЗАКАЛКЕ

**А. И. Веремейчик, М. И. Сазонов, В. М. Хвисевич**

*Брестский государственный технический университет, Беларусь*

**К. С. Юркевич**

*Белорусский государственный университет, г. Минск*

Закалка является наиболее распространенным способом обработки стали, благодаря которому материал обретает наивысшую твердость. Процесс закалки состоит из двух этапов: нагрев до высокой температуры, а затем быстрое охлаждение. Быстрое охлаждение позволяет избежать изменений в металле, которые происходят при медленном охлаждении. В зависимости от марки стали выбирают способ ее охлаждения и параметры процесса. Быстрее всего сталь охлаждается в холодной воде, медленнее – в масле, а самую умеренную скорость охлаждения обеспечивает воздух. Главным недостатком закалки, особенно плоских тел, является возникновение опасности коробления при быстром охлаждении. Поэтому в этом аспекте актуальной является задача определения оптимальных параметров процесса закалки и, в частности температуры, скорости и времени нагрева и охлаждения тела. В данной работе для определения таких параметров используется известный конечно-элементный вычислительный комплекс ANSYS.

В ходе проведения вычислительного эксперимента по определению полей температуры и напряженно-деформированного состояния пластинки, возникающего при охлаждении стальной пластинки, нагретой до температуры 800 °С, в результате погружения торцевой поверхностью в емкость с водой, находящейся при комнатной температуре, разработана трехмерная модель пластинки с геометрическими размерами 100 × 100 × 7 мм. При решении поставленной нестационарной температурной задачи использовался предназначенный для анализа переходных процессов восьмиузловой термический элемент SOLID70, который имеет одну степень свободы (температура в каждой точке). Теплопроводность стали принималась равной 25 Вт/(К · м).

Проведение вычислительного эксперимента заключалось в выполнении двух этапов. На первом этапе осуществлялся нестационарный тепловой анализ, при котором определялось распределение температуры в пластинке, затем на основании результатов, полученных при температурном анализе, проводился расчет перемещений в узлах модели. В ходе выполнения температурного анализа в программном комплексе ANSYS пластинка разбивалась по оси  $Ox$  (в направлении погружения) на 5 равных частей. К узлам каждой из частей последовательно, через определенные промежутки времени, для имитации погружения пластинки в воду прикладывалась тепловая нагрузка в виде таблицы зависимости температуры от времени.

В результате получены зависимости изменения абсолютной температуры от времени для точек, принадлежащих различным частям пластинки. Помимо определения полей температур, найдены деформации и напряжения, возникающие в пластинке при охлаждении. Найдены значения перемещений в пластине и исследованы зависимости напряжений от координат для различных моментов времени. Получены распределения полей перемещений для различных направлений, соответствующие произвольным моментам времени охлаждения пластинки.

Полученные результаты нестационарного термостатического анализа могут быть непосредственно использованы для установления оптимальных режимов процесса закалки и последующего охлаждения.

УДК 629.463.001.18

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ПОТРЕБНОГО ВАГОННОГО ПАРКА

В. И. Сенько, Е. П. Гурский

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

В настоящее время на Белорусской железной дороге активно разрабатываются мероприятия по оздоровлению и обновлению подвижного состава. Связано это в первую очередь с тем, что парк вагонов Республики Беларусь стареет. Средний срок службы грузовых вагонов составил 24 года, количество вагонов инвентарного парка дороги с истекшим нормативным сроком службы увеличилось до 41 %. Устаивающийся в техническом отношении вагонный парк, износ которого на сегодняшний день уже достиг 78 %, не позволяет перейти на современные перевозочные технологии, устойчиво обеспечивать потребности промышленных отраслей страны в перевозках.

По заказу Белорусской железной дороги начались исследовательские работы по разработке стратегии обеспечения перевозочного процесса подвижным составом и, в частности, по обоснованию прогнозных значений потребного парка грузовых вагонов, для устойчивой и эффективной работы железнодорожной отрасли.

Решение такой задачи возможно на основе применения современных методов прогнозирования. Техничко-экономическая значимость теории прогнозирования вытекает из необходимости обоснованно расходовать средства на закупку и проведение оздоровительных мероприятий подвижного состава, уменьшить степень риска от принятия неоптимальных решений. Поэтому разработка математической модели долгосрочного прогноза потребного вагонного парка является целью данных исследований.

Для достижения указанной цели выполнены:

- оценка состояния вагонного парка на Белорусской железной дороге;
- анализ существующих подходов к расчету потребного вагонного парка;
- определение, сбор и исследование параметров, влияющих на формирование потребного вагонного парка;
- сравнительная оценка применения различных математических моделей для прогнозирования потребного вагонного парка и определяющих его параметров;
- разработка и исследование математической модели долгосрочного прогноза потребного парка грузовых вагонов.

В ходе исследований получены следующие основные результаты в области обеспечения перевозочного процесса подвижным составом, включающие:

- математическую модель долгосрочного прогноза количественных характеристик парка грузовых вагонов на основе анализа выборочной совокупности статистических данных о работе железной дороги, что впервые позволило учесть многопараметрический характер перевозочного процесса и повысить точность вычислений;
- определения численности парка грузовых вагонов на заданный горизонт прогнозирования и закономерности ее изменения с учетом количественных и качественных характеристик перевозочного процесса;
- эмпирические зависимости для формирования массива значений системообразующих параметров, которые являются исходными данными при расчетах по разработанной математической модели.

Полученные результаты исследований позволяют планомерно-финансовым службам Белорусской железной дороги определить приоритеты в распределении финансов, направляемых на повышение эффективности использования грузового подвижного состава в перевозочном процессе, а также на развитие собственной базы ремонта и производства новых вагонов.

## РАСЧЕТ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ

А. В. Локтионов, А. С. Лысова

*Витебский государственный технологический университет, Беларусь*

В процессе резания расчет задних углов, выражающих реальную величину зазора между поверхностью инструмента и поверхностью резания, непосредственно связан с изучением перемещения инструмента и обрабатываемого объекта. Задний угол движения измеряется между вектором относительной скорости резания и касательной к траектории сложного пространственного движения инструмента в заданной точке [1].

Для использования закономерностей движения резцов при разработке исполнительных механизмов определяются следующие расчетные зависимости: скорость движения инструмента, его ориентация относительно траектории движения и вытекающие из требований кинематики углы заточки (или установки) инструмента.

Разработанные на основе аналитической геометрии указанные выше расчетные зависимости и пространственные схемы громоздки и трудоемки для составления применительно к сложному движению разрушающего исполнительного механизма. Его поступательная подача не учитывается, т. к. математическое описание перемещающихся плоскостей и определение угла между ними значительно усложняют расчетную схему и кинематический расчет в целом. Кинематические углы в процессе резания не соответствуют геометрическим углам режущего инструмента. Для сравнения геометрии резца с его кинематическими углами необходим дополнительный перерасчет полученных зависимостей.

Существующие методики и расчетные зависимости применимы только для одной конструкции исполнительного механизма, их нельзя использовать для совокупности органов. Исходные данные при расчетах различны и представлены в виде соотношений, не выделены основные конструктивные и кинематические параметры. Отсутствуют и расчетные формулы для общего случая движения исполнительных механизмов. При постановке задач следует использовать теорию кинематики точки и твердого тела. Пространственные расчетные схемы должны быть компактны, достаточно просты и при сложном движении режущего инструмента.

Получены расчетные формулы для определения скорости и ускорения точки М исполнительного механизма с тремя степенями подвижности матричным методом [2]. Для численного расчета можно использовать стандартные программы вычисления произведения матриц на ЭВМ.

Предлагаемая методика расчета кинематики исполнительных механизмов изложена в учебном пособии по теоретической механике [2], где представлены расчет кинематических параметров трехзвенного исполнительного механизма с тремя степенями подвижности при координатном способе задания движения, в цилиндрических и сферических координатах матричным методом и дана оценка методов расчета кинематических параметров исполнительных механизмов.

### Л и т е р а т у р а

1. Грановский, Г. И. Резание металлов : учеб. для студентов машиностроит. и приборостроит. вузов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. – Москва : Высш. шк., 1985. – 304 с.
2. Локтионов, А. В. Теоретическая механика, статика и кинематика : учеб. пособие / А. В. Локтионов, Л. Г. Крыгина. – Витебск : ВГТУ, 2005. – 171 с.

УДК 517:531.112

**РАСЧЕТ КИНЕМАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ****А. В. Локтионов, А. С. Лысова***Витебский государственный технологический университет, Беларусь*

Существуют различные методы расчетов геометрических и кинематических параметров исполнительных механизмов роботов-манипуляторов, поэтому необходимо разработать методики расчета их кинематических параметров. Установлено, что наиболее простые методы расчета следует использовать для роботов, работающих в плоских системах координат. Векторный метод расчета кинематических параметров исполнительных механизмов следует использовать для роботов, звенья которых расположены в одной плоскости. Установлено, что применительно к двухзвенному исполнительному механизму с тремя степенями подвижности векторный метод достаточно сложен и неприменим для пространственных схем размещения звеньев роботов-манипуляторов. При таком методе расчета определяются проекции звеньев на неподвижные оси координат и векторов скорости и ускорения на эти оси. При матричном методе расчета движение твердого тела рассматривается как движение подвижного трехмерного пространства в неподвижном. Геометрические и кинематические параметры робота можно представить в виде параллельного переноса и поворота. Матрица поворота в случае, например, сферического движения твердого тела равна произведению трех матриц. В случае поступательного движения твердого тела матрица поворота является единичной. Скорости точек находятся в результате дифференцирования текущих координат центра схвата. При этом векторы угловой скорости и мгновенной угловой скорости вводятся как действие кососимметричной матрицы. Преимущества матричного способа заключаются в следующем: все виды движений изучаются с единой точки зрения; вектор угловой скорости вводится не формальным способом, а как соответствие пространства кососимметричных матриц подвижному пространству; легко выполняется переход от движения твердого тела к движению системы с конечным числом степеней свободы. С помощью транспонированных матриц перехода определяются матричным методом скорость и ускорение центра схвата робота-манипулятора в подвижной системе координат. Установлено, что целесообразно разработать теоретические основы расчета кинематических параметров в подвижной системе координат, связанных с центром схвата исполнительных механизмов.

При силовом расчете манипуляторов рассматриваются задачи по расчету внешних силовых управляющих воздействий, обеспечивающих требуемый закон движения механизма, и расчету реакций в кинематических парах. Первую часть расчета часто называют задачей синтеза управления. При этом обычно применяется основанный на принципе Даламбера метод кинестатики. По этому методу к внешним силам и моментам, приложенным к звеньям механизма, добавляются расчетные силы инерции, которые обеспечивают силовую уравновешенность системы и позволяют рассматривать подвижную систему в квазистатическом равновесии, т. е. как условно неподвижную.

Целесообразно, с использованием компьютерных технологий классифицировать кинематические схемы роботов, разработать теоретические основы расчета кинематических и динамических параметров различных по конструктивному исполнению пространственных исполнительных механизмов и методику расчета их кинематических параметров матричным методом.

## АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ СБОРНЫХ РЕЗЦОВ С ШЕСТИГРАННЫМИ СМП

М. И. Михайлов, А. М. Короткевич

Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь

Точность обработки криволинейных участков зависит от характера образующей, точности позиционирования СМП в корпусе сборного инструмента, а также от статической точности системы крепления СМП. Наибольшее влияние оказывает статическая точность, при моделировании которой из базовой системы координат путем последовательных переходов находили такую систему координат, в которой хотя бы одна ось была сонаправлена с силой реакции в базовой точке.

Исходными данными для расчета являются геометрические параметры резца и пластины, а также силы резания.

Для расчета вводили глобальную систему координат  $OXYZ$ . При расчете статической точности необходимо знать величины сил  $R1, R2, R3, R4, R5, R6$  реакций в точках контакта между режущей пластиной и державкой резца, возникающие в результате сил резания. Для нахождения сил реакций составили систему уравнения равновесия сил и моментов.

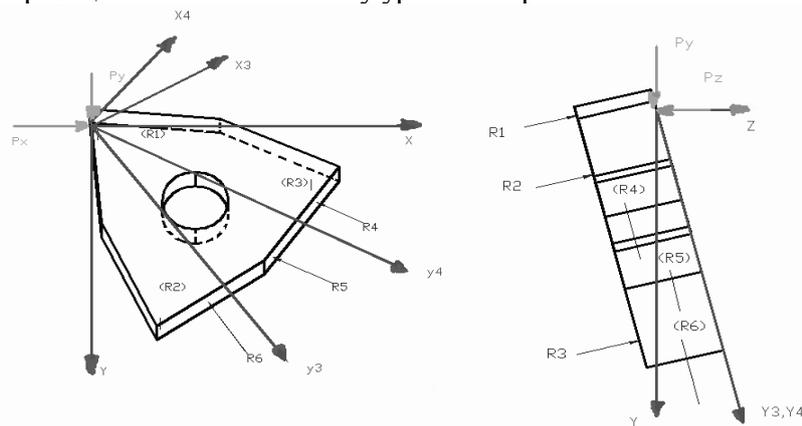


Рис. 1. Расчетная схема

Для нахождения коэффициентов реакций путем последовательных переходов найдем такую систему координат, в которой хотя бы одна ось была сонаправлена с силой реакции.

Выражения для проекций на оси глобальной системы координат будут соответствовать выражениям при координатах  $x2, y2, z2$ :

$$\begin{array}{lll}
 K1x = -\sin(\psi1) \cdot \sin(a) & K2x = -\sin(\psi1) \cdot \sin(a) & K3x = -\sin(\psi1) \cdot \sin(a) \\
 K1y = -\cos(\psi1) \cdot \sin(a) & K2y = -\cos(\psi1) \cdot \sin(a) & K3y = -\cos(\psi1) \cdot \sin(a) \\
 K1z = \cos(a) & K1z = \cos(a) & K3z = \cos(a) .
 \end{array}$$

Аналогично, коэффициенты реакций для точек направляющей точек 4, 5 и 6.

Зная координаты базовых точек и перемещения в них, плоскостным методом смоделировали общее перемещение пластины. Рассматривали 2 случая: пластина в первоначальном положении и пластина, смещенная под действием сил резания.

Зная координаты точки до перемещения и после перемещения, определим величину смещения пластины:

$$\delta = \sqrt{(Xp - Xs)^2 + (Yp - Xs)^2 + (Zp - Zs)^2}.$$

УДК 621.91

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО  
СОСТОЯНИЯ РАСТОЧНОГО РЕЗЦА С ПЛАСТИНОЙ  
ИЗ ТВЕРДОГО СПЛАВА****М. И. Михайлов, Ж. А. Мрочек, М. Р. Шейбак***Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Исследовался резец токарный расточной отогнутый для обработки и растачивания отверстий (ГОСТ 2379-77) с углами  $\gamma = 12^\circ$  и  $\alpha = 10^\circ$ . Резец оснащен пластиной из твердого сплава ВК 10, которая присоединяется при помощи припоя Л68.

Для исследований использовался пакет прикладных программ ИСПА. Был создан ряд конечно-элементных моделей, представляющих собой набор объемных конечных элементов, жестко связанных в узлах между собой. По торцу корпуса резца накладывались внешние связи по шести степеням свободы, обеспечивающие геометрическую неизменяемость модели.

Сила резания определена для черновой обработки чугуна СЧ20. Составляющая  $P_z$  прикладывалась на переднюю поверхность резца, а составляющие  $P_x$  и  $P_y$  – на главную заднюю поверхность. Кроме того, составляющие сил резания представлялись в виде давлений  $p^{P_z} = 240$  МПа и  $p^{P_{xy}} = 270$  МПа. Размеры площадок, на которых действует давление, определены с учетом толщины снимаемого слоя, при  $t = 2$  мм.

В результате расчетов были построены поля эквивалентных напряжений в опасной зоне режущей пластины и в зоне соединения пластины с державкой. Максимальные напряжения возникали в вершине пластины и составляли  $\sigma_{\max} = 471$  МПа.

Максимальные эквивалентные напряжения в зоне пайки пластины достигали значений  $\sigma_{\max} = 88,5$  МПа. Максимальные напряжения в корпусе резца в зоне заделки составили  $\sigma_{\max} = 73,8$  МПа.

Увеличив величину вылета резца до  $L = 120$  мм, вместо  $L = 70$  мм, сравнивали уровень напряжений в опасной зоне державки резца.

Максимальные эквивалентные напряжения в корпусе резца в зоне заделки составили  $\sigma_{\max} = 139$  МПа.

Так как  $L_{120}/L_{70} = 1,71$ , а отношение эквивалентных напряжений  $\sigma_{\max}^{L120}/\sigma_{\max}^{L70} = 1,88$ , имеем нелинейную зависимость напряжений от величины вылета  $L$ .

Кроме того, были построены поля перемещений элементов резца в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Максимальные перемещения вершины режущей пластины составили: в вертикальной плоскости  $\Delta_z = -0,0434$  мм; в горизонтальной плоскости  $\Delta_y = 0,0135$  мм; суммарные перемещения  $\Delta_\Sigma = 0,0455$  мм.

На основании анализа характера деформирования резца можно сделать выводы:

1. Изменение эквивалентных напряжений при изменении толщины пластины происходит в зоне пайки, причем чем толще пластина, тем меньше напряжения. По горизонтальной грани пайки пластины напряжения уменьшились с  $\sigma_{\max} = 44,3$  МПа для  $S = 6$  мм до  $\sigma_{\max} = 28,6$  МПа для  $S = 10$  мм. Однако по вертикальной грани, являющейся более нагруженной и определяющей прочность напайки пластины, изменения напряжений незначительные (при изменении толщины пластины в диапазоне  $S = (6-10)$  мм напряжения меняются  $\sigma_{\max} = (85,5-88,7)$  МПа).

2. Изменение эквивалентных напряжений в опасном сечении корпуса резца в связи с изменением величины вылета  $L$  имеет нелинейный характер, причем напряжения увеличиваются более интенсивно, чем вылет.

**МЕТОДОЛОГИЯ АНАЛИЗА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО  
И ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО НАСЛЕДОВАНИЯ  
ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

**М. Л. Хейфец, А. А. Лысов, Г. Б. Премент**

*Полоцкий государственный университет, г. Новополоцк, Беларусь*

Под наследственностью в технологии машиностроения подразумевают явление переноса свойств обрабатываемого объекта от предшествующих операций и переходов к последующим, которое в дальнейшем сказывается на эксплуатационных свойствах деталей машин. До недавнего времени в математическом описании технологического и эксплуатационного наследования использовались различные аналитические модели, т. к. считали, что управление процессами обработки детерминировано технологическими воздействиями на конкретных операциях технологического процесса, а управление при эксплуатации зависит от внешних стохастических факторов, влияние которых существенно изменяется в процессе изнашивания деталей машин. В последнее время на основании анализа самоорганизации поверхностных явлений в технологических и эксплуатационных процессах показано, что их следует описывать с единых синергетических позиций. При таком описании определяется ограниченное число сценариев поведения технологических и эксплуатационных систем, которыми можно управлять в устойчивых диапазонах выходных параметров качества.

Технологический процесс изготовления детали и ее эксплуатации в узле машины может быть представлен в виде графа, выделяющего заготовительные, черновые, чистовые и отделочные операции, а также обкатку, приработку и изнашивание на стадиях эксплуатации. Граф, как правило, является ориентированным, а показатели качества взаимосвязаны между собой. Передача ребра описывается коэффициентом наследования  $K$ , показывающим количественное изменение свойства и равным отношению предыдущих  $S_{i-1}$  и последующих  $S_i$  значений свойства:  $K = S_{i-1}/S_i$ .

Для показателя качества  $S_i$  с учетом предыдущей обработки или эксплуатации  $S_i = a_i S_{i-1}^{b_i}$ . Количественные связи технологической и эксплуатационной наследственности, зависящие от выбора методов обработки и условий эксплуатации, определяются коэффициентами  $b$ , а основные режимы обработки и эксплуатации внутри этих методов или условий – коэффициентами  $a$ .

Выполнив преобразование для показателей качества, получаем описание коэффициента наследования:  $K = a_i^{b_i} / S_i^{b_i+1}$ .

Упрощение структурной модели наследования показателей качества путем минимизации количества ребер графа для сокращения объема исходных данных при статистическом анализе, возможно посредством выделения основных параметров качества и определяющих связей при наследовании свойств.

Для выявления основных наследуемых в эксплуатации показателей качества, посредством контроля которых целесообразно управлять технологическим процессом, следует проводить АВС-анализ изменения в процессе эксплуатации начальных геометрических параметров поверхности и физико-механических характеристик материала.

Таким образом, предложена методология анализа технологического и эксплуатационного наследования показателей качества деталей машин. Использование методологии при анализе жизненного цикла ремонтируемых машин показало, что технологический процесс восстановления деталей по коэффициентам передачи эксплуатационных свойств коренным образом отличается от рационального процесса их механической обработки.

УДК 678.5

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТЕПЕНИ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ОТХОДОВ НА КОНСТРУКТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЭКСТРУЗИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

С. В. Бровко, А. К. Матвеев, В. В. Пятов

*Витебский государственный технологический университет, Беларусь*

В результате переработки отходов обувных предприятий посредством разработанной технологии термомеханического рециклинга возможно получение композиционного материала, в котором наполнителем являются сами отходы, а функцию матрицы выполняют полимерные компоненты этих отходов. Технология осуществляется по универсальной схеме: измельчение композиции, термомеханическое воздействие и формование. При этом окончательные эксплуатационные свойства в значительной степени зависят от степени диспергирования компонентов. Термомеханическое воздействие реализуется на оборудовании шнекового типа, которому присущи диспергирующие свойства. Это приводит к тому, что предварительно измельченные компоненты подвергаются дополнительному диспергированию, что вызывает ухудшение физико-механических свойств и появление брака.

Цель данной работы заключалась в моделировании влияния конструктивных параметров экструзионного оборудования на степень диспергирования компонентов полимерсодержащих отходов.

Поскольку устранить диспергирование в результате переработки на шнековом экструдере невозможно, то необходимо заранее определить, каков должен быть размер частиц на входе в экструдер, т. е. после измельчения.

Исследования осуществлялись по следующей схеме. Полимерсодержащие отходы подвергались измельчению на роторно-ножевых дробилках и экструдировались в профильное изделие. Далее образцы подвергались воздействию растворителя, который позволяет удалить полимерный компонент. Получившиеся частицы рассыпались по стеклу сканера, и осуществлялось сканирование. Полученное изображение импортируется в специально разработанную программу, которая позволяет получить распределение степени дисперсности с заранее заданными границами диапазонов размеров частиц. Внешний вид интерфейса программы с импортированным изображением представлен на рис. 1. Диаграмма распределения дисперсных частиц наполнителя приводится на рис. 2.

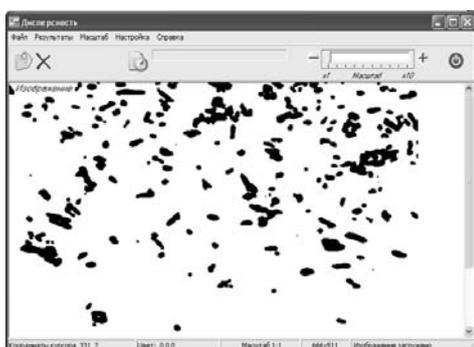


Рис. 1. Интерфейс программы

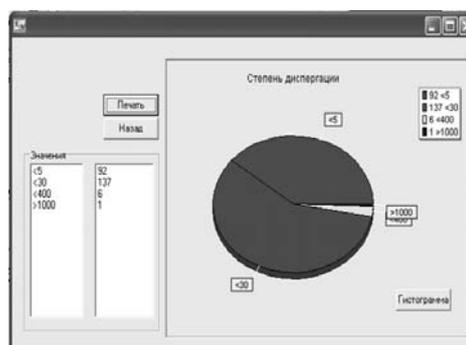


Рис. 2. Результаты обработки

Сравнение результатов обработки до и после процесса термомеханической переработки позволяет определить, насколько существенно воздействие шнекового экструдера на степень диспергирования.

Работа выполняется в соответствии с грантом Министерства образования.

УДК 621.91.01:543.1

**ПОВЫШЕНИЕ ВИБРОУСТОЙЧИВОСТИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ  
НА СТАНКЕ С ПОТЕНЦИАЛЬНО НЕУСТОЙЧИВОЙ УПРУГОЙ  
СИСТЕМОЙ РЕЗЕЦ–СУППОРТ**

**А. В. Шевченко**

*Киевский политехнический институт, Украина*

Одной из причин возникновения автоколебаний при резании является изменение площади срезаемого слоя и силы резания вследствие наличия координатной связи между процессом резания и движением по разным координатам упругой системы станка. Если на резцедержатель суппорта токарного станка воздействовать силой  $P_1$ , изменяя угол ее приложения, то можно найти такой угол  $\alpha_1$ , при котором будут отсутствовать угловые смещения резцедержателя. При воздействии на резцедержатель в другой точке силой  $P_2$  аналогичное условие можно получить при угле  $\alpha_2$ . Точка пересечения линий действия сил  $P_1$  и  $P_2$  определяет положение центра жесткости (ЦЖ) суппорта. Направление от вершины резца к ЦЖ определяет положение оси максимальной жесткости  $c_1$ , а перпендикулярное ему направление определяет положение оси минимальной жесткости  $c_2$ .

Известно, что наибольшей виброустойчивости при точении можно достичь приближением направления действия силы резания к оси наибольшей жесткости упругой системы резец–суппорт токарного станка. Как следствие причиной увеличения влияния координатной связи на уровень относительных колебаний инструмента и детали может стать увеличение угла  $\beta$  между направлениями действия силы резания и оси максимальной жесткости, а одним из эффективных путей повышения виброустойчивости токарной обработки является его минимизация.

При разработке конструкции суппорта токарного станка достаточно сложно предусмотреть или рассчитать будущее положение ЦЖ суппорта. В реальной конструкции станка положение ЦЖ определяют экспериментально. Если определенное экспериментально положение ЦЖ суппорта и угла разворота главных осей жесткости не отвечает приведенным выше условиям, то упругая система станка будет потенциально неустойчивой, требующей дополнительных конструктивных и технологических мероприятий для обеспечения условий виброустойчивой обработки.

Повышение виброустойчивости процесса резания на станке с потенциально неустойчивой упругой системой резец–суппорт можно достичь изменением ориентации главных осей жесткости путем использования специальной инструментальной оснастки с ориентированным ЦЖ.

При проектировании такой инструментальной оснастки возникает вопрос выбора ее упругих параметров, которые бы позволили переориентировать ЦЖ и угол разворота главных осей жесткости упругой системы резец–суппорт.

УДК 621.9

**КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
ТОЧНОСТИ ЗАЖИМА ДЕТАЛЕЙ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ**

**А. В. Литвин**

*Киевский политехнический институт, Украина*

Повышение производительности на операциях точения и фрезерования достигается за счет высокоскоростной обработки (High Speed Cutting), которая все шире внедряется в промышленности и связана с многократным (в 5–10 раз) повышением скоростей резания и подач. Силы резания могут достигать 5–7 кН. Точность изготовления

деталей, которая обеспечивается при чистовых операциях, также является одной из важнейших характеристик качества и характеризуется стабильностью размеров, отклонениями геометрической формы, волнистостью и шероховатостью поверхности. Для повышения технико-экономических показателей станков на чистовых операциях необходимо увеличивать скорость резания  $V$  и уменьшать подачу  $S$ , повышая при этом производительность обработки и качество обработанной поверхности, и использовать совершенную оснастку, в том числе высокоточные зажимные патроны, стационарные зажимные системы, обеспечивающие соединение между столом станка и заготовкой с точностью до микрометра, системы для прецизионного зажима и балансирования осевого инструмента ( $16\,000\text{--}20\,000\text{ мин}^{-1}$ ) с радиальным биением до  $3\text{ мкм}$ . При разработке зажимных патронов такого типа перед проектантом стоит задача нахождения распределенных нагрузок в его элементах. Кроме того, необходимо знать также величины перемещений отдельных точек конструкции как при статическом характере внешней нагрузки, так и в условиях действия динамических нагрузок. Объектом исследования данной работы является шестикулачковый самоцентрирующий зажимной патрон. С помощью подпрограммы COSMOSWorks пакета программ SolidWorks 2007 была определена объемная деформация кулачка, рассчитаны элементы патрона, а также получены теоретические профили кулачков. Сравнительная оценка перемещений точек контакта кулачка патрона и его корпуса в результате объемной деформации кулачка проведено двумя методами – аналитическим и методом конечных элементов. Аналитический метод основан на теореме Кастильяно.

В результате исследований получены: трехмерная модель зажимного кулачка; величины нагрузок, которые действуют на кулачок во время зажима заготовки; картины напряжений и деформаций кулачка. Характер объемной деформации кулачка показывает, что максимальное перемещение его элементов не превышает  $0,0103\text{ мм}$ , а максимальные напряжения –  $11,57\text{ МПа}$ . Результаты проведенных численных экспериментов показали, что жесткость кулачков в процессе закрепления заготовки изменяется не только от величины приложения силы зажима, но и в результате изменения контактной податливости.

УДК 621

## ФОТОТЕРМИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ КОМПОЗИТНЫХ ОБЪЕКТОВ

П. В. Астахов, В. В. Свиридова

*Гомельский инженерный институт МЧС Республики Беларусь*

Композиционные материалы характеризуются обширным комплексом свойств, зависящих от режимов и параметров технологических процессов, в которых композиционные материалы участвуют. Взаимосвязанное влияние характеристик исходных порошков и волокон и параметров технологических процессов на свойства формируемых материалов композитов, а также изменение этих свойств в эксплуатации изделий из них привело к необходимости введения всесторонней диагностики теплофизических, механических, акустических свойств. Комплексная диагностика композиционных материалов позволит прогнозировать возможные области применения и диапазоны режимов их работы в различных условиях эксплуатации. Целью данной работы является разработка методики измерения амплитудно-фазовых характеристик фототермического сигнала [1] в напряженных областях композитных образцов.

Носителем информации при фототермических измерениях являются тепловые волны, возбуждение которых осуществляется модулированным оптическим излуече-

нием. Энергия излучения, поглощаясь образцом, периодически нагревает его, возбуждая тепловые волны. Амплитудные и фазовые характеристики тепловых волн являются функциями оптических, тепловых и диссипативных параметров образца. Средний поток тепла в направлении оси возбуждающего пучка, генерируемый переменным полем, является осциллирующей и знакопеременной функцией. Регистрируя тем или иным способом переменную составляющую температурного поля, можно получить информацию о физических свойствах образца.

Наиболее существенным условием в фототермической спектроскопии является зависимость получаемой информации от метода регистрации температуры. Благодаря использованию для возбуждения образца лазерного излучения возможно получение начального сильнофокусированного источника тепловых волн. Изображение получается при сканировании объекта относительно положения возбуждающего лазерного луча. Возникший фототермический сигнал регистрируется фоточувствительным позиционным датчиком. Фототермический метод позволяет получить информацию о тепловых, упругих и термоупругих свойствах образца с микронным разрешением. По экспериментально измеренной величине фототермического отклонения можно определить малые коэффициенты поглощения оптического излучения в оптических композитных материалах и тонких пленках, изготовленных на основе таких материалов.

Таким образом, система для фототермического неразрушающего контроля может быть применена в таких задачах фундаментального и прикладного характера, как дефектоскопия образцов и изделий из композитных материалов (определение характера дефектов и глубины их залегания в материале); диагностика пористости структуры композитов; диагностика качества адгезии и толщины склейки слоистых композитных структур.

#### Литература

1. Fournier, D. Photothermal deflection Fourier transform spectroscopy: a tool for high sensitivity absorption and dichroism measurements / D. Fournier, A. C. Voccara, J. Badoz // Appl. Opt. – 1982. – Vol. 21. – P. 74–76.

УДК 519.6:539.3

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ**

**К. С. Курочка, В. В. Воробьев**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

При работе с современными конструкционными материалами необходим точный расчет их нелинейных деформаций при действии различных нагрузок. Эффективно решить эту проблему возможно средствами компьютерного моделирования [1], [2].

В данной работе проведено исследование численных методов решения упругопластических задач. Рассмотрены следующие методы: метод переменной жесткости; метод Ньютона-Рафсона [1]; метод упругих решений [3]; метод энергетической линеризации [4].

В результате проведения исследований разработана технология, алгоритмы и программное обеспечение по компьютерному моделированию нелинейных систем МДТД. Проведена верификация разработанного программного обеспечения на решении задачи об определении прогибов квадратной свободно опертой пластины со сторонами 2 м и толщиной 0,08 м из упругопластического материала со следующими характеристика-

ми: модуль упругости  $0,72 \times 10^5$  МПа, предел текучести 0,735 %, соответствующий пределу текучести сплава Д16Т, коэффициент Пуассона 0,35 [2].

В результате проведенного исследования получено (рис. 1):

1. Решение различными методами отличается не более чем 20 %.
2. Большинство методов являются итерационными и требуют не более 10 итераций.
3. Наиболее эффективными оказались следующие методы: энергетической ли-неаризации [4], Ньютона-Рафсона [1], упругих решений [3].

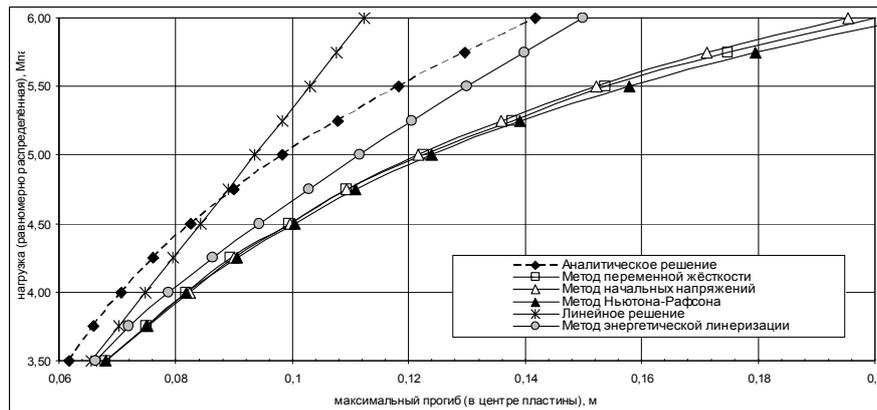


Рис. 1. Результаты моделирования

#### Литература

1. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич ; пер. с англ. – Москва : Мир, 1975. – 544 с.
2. Старовойтов, Э. И. Основы теории упругости, пластичности и вязкоупругости : учеб. для вузов / Э. И. Старовойтов. – Гомель : БелГУТ, 2001. – 344 с.
3. Ильюшин, А. А. Пластичность / А. А. Ильюшин. – Москва : Гостехиздат, 1948. – 346 с.
4. Быховцев, В. Е. Компьютерное моделирование систем нелинейной механики грунтов / В. Е. Быховцев, А. В. Быховцев, В. В. Бондарева. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2002. – 215 с.

УДК 311.1

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

Н. И. Егоренков, М. Н. Стародубцева

Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь

Долгое время ученые-статистики довольствовались математическими стохастическими (вероятностными, удовлетворяющими статистическим законам) моделями, в основе которых лежит допущение о независимости событий (каждое событие вносит вклад в общую сумму, но ни одно из них не определяет статистический результат), а вероятность их распределения описывается кривой К. Гаусса (классическая статистика, пример – «броуновское» движение). Анализ показывает, что это характерно для однородных систем, достигших равновесия (линейные системы). В этом случае независимо от природы и размера элементов, а также от природы ресурса систем их переменные состояния подчиняются экспоненциальному распределению  $f(x) = ae^{-bx}$ , где постоянные  $a$  и  $b$  положительны. В настоящее время классическая статистика господствует в прикладной науке. Известна и другая статистика, в которой переменные состояния подчиняются гиперболиче-

скому закону (статистика О. Коши  $f(x) = 1/\pi(1+x^2)$ ; статистика неоднородных, нелинейных систем; зависимых событий).

Системы, подчиняющиеся гиперболическому закону  $f(x) \approx ax^{-b}$ , широко распространены в природе, технике, обществе (распределение доходов В. Парето, населенных пунктов по численности Г. Саймона, встречаемости слов в языках Дж. К. Ципфа, научных работников по количеству публикаций А. Лотки и др.). Основоположник фрактальной геометрии Б. Мандельброт показал, что такого рода распределения статистически самоподобны (масштабно-инвариантны) и назвал такую статистику фрактальной. Им введено понятие фрактальной (дробной) размерности пространства вероятностей. Фрактальными свойствами обладают системы с обратной связью, с выраженным вектором изменений («стрелой времени»). В таких условиях малые события приводят к качественным (скачкообразным) изменениям. Он пришел к выводу, что имеют место минимум три состояния «случайности» и попытался отождествить их с тремя состояниями вещества (газообразным, твердым и жидким).

Анализ «состояний случая» и фазовой теории систем многих частиц позволяет, по нашему мнению, сделать вывод о том, что принципиально разных форм случайности (стохастических моделей) может быть две, а не три. Одна соответствует состоянию устойчивого равновесия системы – «фазе» (классическая статистика, экспоненциальное распределение), а другая – неустойчивого равновесия, «фазовому переходу 1-го рода» (фрактальная статистика, гиперболическое распределение). Внутри этих форм имеются их разновидности, аналогичные тем, какие есть между отдельными «фазами» или «переходными состояниями» (как статической, так и потоковой систем). Именно для фаз характерен эффект возврата в исходное состояние при небольших отклонениях от него, вызванных внешними факторами, который в химии называется принципом Ле Шателье-Брауна, а в экономике – «невидимой руки рынка» А. Смита. «Броуновское движение» как случайное блуждание микрочастиц обнаружено именно в жидкости как одной из фаз (однородных состояний) вещества. Экспоненциальное распределение характерно именно для равновесного состояния (фазы) вещества, а гиперболическое – для переходного, неоднородного состояния (нелинейное поведение). Как состояние устойчивого равновесия является частным случаем состояний системы, так и функция распределения Гаусса является частным случаем эволюционирующей в соответствии с кинетическим уравнением больцмановского типа более общей функции распределения.

УДК 519.95:519.872

**МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОБЪЕКТОВ,  
ИМЕЮЩИХ ВНУТРЕННИЕ СОСТОЯНИЯ, С КОЛЛЕКТИВОМ  
ОБСЛУЖИВАЮЩИХ АГЕНТОВ**

**О. Д. Асенчик, В. С. Мурашко**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Создание адекватных и имеющих приемлемую вычислительную сложность математических моделей стохастического движения агентов по системе центров с внутренней структурой актуально для многих прикладных областей науки и техники. Обслуживание стационарных объектов (нефтяных скважин, энергетических объектов и т. п.) передвижными бригадами, когерентный и некогерентный перенос электронов, электронных возбуждений или квазичастиц в системе многоуров-

невых центров различной физической, химической или биологической природы – некоторые примеры подобных областей.

В работе рассмотрена система, состоящая в некоторый момент времени из  $N$  обслуживаемых центров и  $M$  обслуживающих агентов ( $N \geq M$ ). Обслуживаемый объект может находиться в одном из трех состояний: в состоянии ожидания обслуживания; в состоянии, когда объект не требует обслуживания; в состоянии, когда на центре находится агент и он обслуживается. Агенты перемещаются от центра к центру, при этом они могут переходить только на центры, находящиеся в основном состоянии. В общем случае количество агентов непостоянно: агенты могут выводиться из системы и появляться вновь.

В качестве математической модели такой системы предложена система линейных дифференциальных уравнений (уравнений Колмогорова) для вероятностей реализации возможных состояний в заданный момент времени. Параметрами этой модели являются: средние скорости переходов между внутренними состояниями заданного центра, матрица, задающая вероятности переходов агентов между соседними центрами, вероятность ухода агента из системы после обслуживания центра, средняя скорость появления нового агента на заданном центре.

Показано, что количество различных состояний системы и, соответственно, количество уравнений равно  $\sum_{M=0}^N N_M$ , где  $N_M = 2^{(N-M)} C_N^{(N-M)}$  – число уравнений в системе

при фиксированном количестве агентов  $M$ . Очевидно, что при достаточно большом  $N$  численное решение такой системы будет являться вычислительно-сложной задачей.

Для случая, когда можно пренебречь временными корреляциями между нахождением агентов на различных центрах, предложена система самосогласованных нелинейных дифференциальных уравнений существенно меньшей размерности –  $3(N+1)$ . Эта модель подразумевает эффективное «взаимодействие» различных центров между собой посредством взаимодействия с единым «полем» агентов. Здесь прослеживается аналогия с моделью взаимодействия квантовых частиц с квантованным электромагнитным полем.

В работе получены решения предложенных систем уравнений в частных случаях и выражения для вероятностей нахождения заданного центра в заданном состоянии, через которые могут быть выражены характеристики надежности системы.

УДК 621.746.588

## УПРАВЛЕНИЕ ПОТОКАМИ СТАЛИ В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ С ПОМОЩЬЮ АРГОННОЙ ПРОДУВКИ

Д. Н. Андрианов, М. Н. Новиков, А. И. Столяров

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Одним из эффективных способов влияния на гидродинамические процессы в кристаллизаторе, а следовательно, и на качество непрерывнолитых заготовок является продувка стали аргоном. Наряду с перемешивающим эффектом продувка аргоном обеспечивает также защиту металла от вторичного окисления при разливке и создает положительные условия для удаления неметаллических включений.

Для описания структуры турбулентного движения расплава в промковше применяли уравнения неразрывности и Навье-Стокса, для определения среднего давления и компоненты вектора средней скорости. Использовали двухпараметрическую  $k$ - $\varepsilon$  модель турбулентности.

Методом численного моделирования исследовали влияние интенсивности продувки аргоном расплава на гидродинамические характеристики потоков расплава в кристаллизаторе и жидкой лунке слитка. Варьировали скоростью и расходом аргона.

В результате расчетов установлено, что при разливке металла через прямоточный стакан без продувки аргоном вся масса жидкого металла разделяется на две основные зоны. Первая, вихревая, зона расположена в верхней части кристаллизатора. Направление потоков в этой зоне преимущественно вверх. Ниже выходного отверстия стакана наблюдается вторая зона – со сложной структурой восходящих и нисходящих потоков. В горизонтальной плоскости кристаллизатора направление движения потоков происходит от центра к стенкам.

С увеличением расхода металла наблюдался рост протяженности циркуляционной зоны и увеличение скорости циркуляции потока металла, что отрицательно влияет на рост корочки слитка из-за ее размывания.

Вдув аргона с определенными скоростями полностью изменяет гидродинамику потоков в кристаллизаторе. Ниже выходного отверстия циркуляция потока меняется на равномерный характер течения расплава в лунке; выше – создается вихреобразная зона с восходящими потоками вдоль стакана и нисходящими потоками по периметру кристаллизатора. Такая организация потока создает условия всплытия неметаллических включений в защитный шлак. Продувка аргоном также при определенных условиях значительно уменьшает глубину проникновения струи.

В результате исследований были сделаны следующие выводы: с увеличением скорости продувки аргоном наблюдается изменение направления движения расплава в жидкой лунке кристаллизующейся заготовки с одновременным уменьшением скорости; для формирования направленных принудительных потоков, способствующих выносу примесей и включений в верхние слои металла необходимо, чтобы скорость вдуваемого аргона была в 1,5–2 раза выше скорости вытекающего из погружного стакана металла, что приведет к вероятному снижению количества внутренних дефектов в непрерывнолитой заготовке, таких как, осевая пористость и осевая ликвация.

УДК 536.2.01

### **ПРОСТРАНСТВЕННО-ПЕРИОДИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ВЗРЫВНОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ АМОРФНЫХ ПЛЕНОК**

**О. Н. Шабловский, Д. Г. Кроль, А. С. Кучин**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

При экспериментальном изучении взрывной кристаллизации аморфных пленок обнаружены две характерные особенности: 1) высокая скорость и периодичность распространения фронта кристаллизации (ФК); 2) формирование пространственно-периодических структур в закристаллизовавшейся области. В работе [1] построена тепловая модель, позволяющая объяснить условия развития периодических процессов при взрывной кристаллизации аморфных пленок с учетом распределенных в области аморфной фазы зародышевых центров кристаллизации. Принципиальным аспектом развитой теории является учет явлений локально-неравновесного теплопереноса [2]. В данном докладе приводятся результаты дальнейших исследований в этом направлении. Цель работы: определить основные типы двумерных периодических тепловых структур, формирующихся за ФК; изучить главные параметры влияния на эволюционные свойства неравновесных состояний твердой фазы. При описании

теплопереноса применяем в уравнении баланса энергии знакопеременный объемный источник энергии, который учитывает интенсивное выделение тепла в окрестности ФК, а также теплоотвод в пленку и в подложку (в окружающую среду). Были изучены следующие явления: 1) «медленный» и «быстрый» (по отношению к времени тепловой релаксации) процессы формирования структур; 2) колебательно-релаксационные режимы с периодическими и аperiodическими по времени свойствами; 3) «дозвуковой» ( $0 < M_i < 1$ ) и «сверхзвуковой» ( $M_i > 1$ ) процессы. Здесь  $M_i = N_i / w$  – тепловое число Маха;  $i = 1, 2$ ;  $w$  – скорость распространения тепловых возмущений;  $N_i = \omega / k_i$  – характерная скорость, равная отношению эффективных частот колебаний по времени ( $\omega$ ) и по координате ( $k_i$ ). Параметр  $k_i$  соответствует декартовым координатам  $x_i, i = 1, 2$ . Свойства периодических тепловых полей иллюстрируются построением семейств изотерм на плоскости  $(x_1, x_2)$ . Обнаружены три типа структур: а) полоса изотерм, включающая в себя замкнутые изотермы («кошачьи глаза»); б) ячеистая структура, состоящая только из замкнутых изотерм; в) решетчатая структура, состоящая из сомкнувшихся друг с другом ячеек и/или цепочек изотерм. Проведены детальные многовариантные серии расчетов. Дано подробное описание качественных и количественных закономерностей процесса.

#### Литература

1. Shablovsky, O. N. A Thermal Model of Periodic Crystallization / O. N. Shablovsky // Crystallography Reports. – 2005. – Vol. 50. – Suppl. 1. – P. 62–67.
2. Шабловский, О. Н. Релаксационный теплоперенос в нелинейных средах / О. Н. Шабловский. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2003. – 382 с.

УДК 534.1:536.2.01

## ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ СВОЙСТВА ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ТЕПЛОВОГО РЕЗОНАТОРА

О. Н. Шабловский, И. А. Концевой

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Проблемы термической генерации нелинейных колебаний в материалах представляют значительный интерес для физики волн и ее приложений. В настоящее время накоплен большой опыт исследований акустических резонаторов. В условиях хорошо выраженной тепловой неравновесности некоторые сверхпроводники могут служить основой теплового резонатора [1]: при слабом источнике тепловых возмущений в нем происходит формирование нелинейных структур. В работе [2] изучены собственные колебания большой амплитуды в тепловых резонаторах трех типов: открытом, полуоткрытом и закрытом. Расчеты проведены для высокотемпературной сверхпроводящей керамики на основе иттрия в двух температурных областях с сильно выраженными нелинейностями теплофизических свойств материала. В данном докладе изложены результаты исследования вынужденных колебаний полуоткрытого теплового резонатора. Решение задачи получено на основе прямого численного моделирования. Применяется обобщенный метод интегральных соотношений А. А. Дородницына. Сглаживание сильных разрывов, которые могут появляться в ходе эволюции теплового поля, осуществляется с помощью коэффициента искусственной диссипации. Для локально-неравновесной среды с нелинейными теплофизическими свойствами возможны три варианта: функция состояния

$V = V(u)$  может иметь положительную выпуклость ( $d^2V/du^2 > 0$ ), отрицательную выпуклость ( $d^2V/du^2 < 0$ ) либо зависимость  $w^2(u)$  – немонотонная, и тогда  $d^2V/du^2$  – знакопеременная функция. Выполнен подробный анализ резонансных, гистерезисных и энтропийных свойств тепловых колебаний в ВТСП  $Y_{0,8} - Sm_{0,2} - Ba_2 - Cu_3 - O_{7-x}$ . Сформулируем основные результаты.

1. Важнейшим фактором импульсно-периодического теплового воздействия на резонатор является длительность паузы между импульсами излучения. Наличие пауз дает принципиальные изменения в поведении резонансной кривой: появляются одна либо две пары дополнительных резонансных частот.

2. При вынужденных колебаниях теплового резонатора в каждом сечении образца происходит чередование во времени классической ( $q \cdot \text{grad}T < 0$ ) и неклассической ( $q \cdot \text{grad}T > 0$ ) ситуаций.

3. Гистерезис, обусловленный направлением изменения частоты возбуждающих колебаний («рост–убывание» и «убывание–рост») обладает сильной чувствительностью по двум параметрам: а) модуль величины отклонения частоты от ее стационарного значения; б) длительность всплеска частоты – чем меньше эта длительность, тем резче выражен гистерезис.

На рис. 1 представлен пример такого гистерезиса на плоскости «частота–амплитуда».

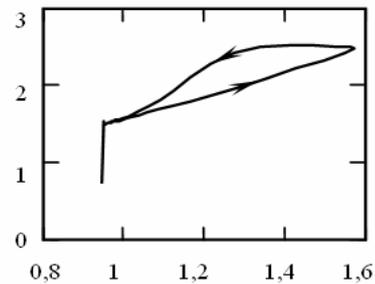


Рис. 1. Пример гистерезиса на плоскости «частота–амплитуда»

#### Литература

1. Шабловский, О. Н. Релаксационный теплоперенос в нелинейных средах / О. Н. Шабловский. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2003. – 382 с.
2. Шабловский, О. Н. Большие собственные колебания теплового резонатора / О. Н. Шабловский, И. А. Концевой // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2006. – Т. 11. – № 2. – С. 9–14.

УДК 629.114.2

## СНИЖЕНИЕ ДИССИПАТИВНЫХ ПОТЕРЬ В МЕХАНИЗМАХ НАВЕСКИ МОБИЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

В. Б. Попов

Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь

В настоящее время среди ведущих производителей мобильных сельскохозяйственных машин наметилась тенденция к переходу от производства самоходных специализированных уборочных машин к уборочным комплексам, в том числе на базе универсального энергосредства «Полесье». Появление в шлейфе навесных машин тяжелых адаптеров – навесных кормоуборочных, свеклоуборочных, зерноуборочных и картофелеуборочных комбайнов массой от 3600 до 4600 кг – повышает требования к их агрегатированию с энергосредством. Так, например, возрастают требования к грузоподъемности подъемно-навесного устройства (ПНУ) и, в частности, к основному компоненту ПНУ – механизму навески (МН). Фактически его структурная модель сложилась (на плоскости – одноподвижный восьмизвенный

шарнирно-рычажный механизм) и длительное время остается неизменной, а изыскание резерва грузоподъемности должно обеспечиваться в первую очередь за счет оптимизации параметров МН. Одним из способов обеспечения грузоподъемности на требуемом уровне является повышение коэффициента полезного действия (КПД) МН. Потери энергии на трение в шарнирах при переводе навесной уборочной машины из рабочего положения в транспортное в среднем составляет 16–21 % от ее общей величины. Коэффициент полезного действия в процессе подъема навесной машины не остается постоянным, причем переменными оказываются как его средняя величина, так и экстремальные значения. Поэтому снижение величины диссипативных потерь напрямую способствует повышению грузоподъемности ПНУ.

Величина силы трения в шарнире зависит от условий эксплуатации кинематических пар, материала и скорости относительного перемещения, трущихся поверхностей, нагрузки в трущейся паре, геометрии шарнира и некоторых других параметров. Для аналитического определения сил трения в кинематических парах были использованы математические модели геометрического, кинематического и силового анализа МН.

С помощью программных модулей (Turbo-Pascal), разработанных на ПЭВМ типа IBM PC, был поставлен вычислительный эксперимент и выполнено исследование изменения КПД в зависимости от вышеупомянутых параметров в процессе перевода навесной уборочной машины из рабочего в транспортное положение. Функциональные математические модели анализа, параметрические и функциональные ограничения, а также целевая функция составили основу математической модели оптимизационного параметрического синтеза внутренних параметров МН. Целевая функция представляла собой интегральную характеристику энергетических потерь на трение, сформированную из показателей качества (части выходных параметров) функционирования МН. Сформированная оптимизационная модель нелинейного программирования решалась по методу штрафных функций.

Достигнутое в результате проведенного исследования 4–5 % сокращение диссипативных потерь для тяжело нагруженного МН (3600–4600 кг) создало внутренний резерв увеличения грузоподъемности ПНУ. Алгоритм решения поставленной задачи снижения потерь на трение может быть использован в механизмах навески колесных тракторов «Беларус» модели «Беларус 2522» и выше.

УДК 631.352.2

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ИЗМЕЛЬЧЕННОЙ РАСТИТЕЛЬНОЙ МАССЫ В КОРМОУБОРОЧНОМ КОМБАЙНЕ**

**В. Б. Попов, П. Е. Голушко**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Одна из специфических особенностей кормоуборочных комбайнов состоит в перемещении измельченной растительной массы (РМ) при помощи швырковопневматического транспортирования. Процесс транспортирования РМ измельчающим барабаном (ИБ), выполняющим функции измельчения и транспортирования, разделяется на несколько этапов: движение материала по поверхности ножа ИБ; движение РМ по стенке поддона; выброс измельченной РМ из поддона в горловину силосопровода. При рассмотрении движения РМ по поверхности ножа ИБ принима-

## 98 Секция В. Моделирование процессов, автоматизация конструирования...

ются следующие допущения: транспортируемая РМ не обладает свойством упругости, ее скорость в момент начала движения по поверхности ножа равна нулю; кроме того, не учитывается действие воздуха на частицу РМ.

Движение частицы РМ происходит под действием центробежной силы  $P$ , кориолисовой  $K$  и силы трения  $F$  частицы РМ о поверхность ножа.

Сходя с ножа, частица приобретает результирующую скорость  $V_p$ , являющуюся результатом геометрического сложения максимальной окружной скорости  $V_0$  и максимальной скорости  $V_{л}$  движения вдоль ножа, которые определяются как:

$$V_0 = \pi \cdot R \cdot \omega, \quad V_{л} = \dot{x},$$

где  $R$ ,  $\omega$  – радиус и частота вращения ножей ИБ;  $x$  – координата.

Уравнение движения частицы массой  $m$  по поверхности ножа имеет вид:

$$m \cdot \ddot{x} = P_1 - F,$$

где  $P_1$  – составляющая центробежной силы  $P = m \cdot R_K \cdot \omega^2$ , действующая вдоль ножа, отклоненного от радиального направления на угол  $\beta$  – угол передней грани ножа, перемещающая частицу по его плоскости; кориолисова сила  $K = 2 \cdot m \cdot \omega \cdot \dot{x}$  и другая компонента центробежной силы  $P_2$  направлены перпендикулярно плоскости ножа и формируют силу трения:

$$F = f \cdot (K + P_2) = f \cdot (2 \cdot m \cdot \omega \cdot \dot{x} + m \cdot R_K \cdot \omega^2 \cdot \sin \beta),$$

где  $f$  – коэффициент трения частицы РМ о поверхность ножа;  $R_K$  – радиус-вектор положения частицы на плоскости ножа.

Подставляя значения  $P_1$  и  $F$  в уравнение движения частицы, получим:

$$m \cdot \ddot{x} = m \cdot R_K \cdot \omega^2 \cdot \cos \beta - f \cdot (2 \cdot m \cdot \omega \cdot \dot{x} + m \cdot R_K \cdot \omega^2 \cdot \sin \beta).$$

Введем новые обозначения  $R_K \cdot \cos \beta = x$ ,  $R_K \cdot \sin \beta = R_1$ . Подставив эти значения в последнее уравнение, после некоторых преобразований получим:

$$\ddot{x} + 2 \cdot f \cdot \omega \cdot \dot{x} - \omega^2 \cdot x = -f \cdot \omega^2 \cdot R_1.$$

Решение этого уравнения имеет вид:

$$x = \lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1) \cdot (x_0 - f \cdot R_1) \cdot e^{\lambda_1 t} + \lambda_1 / (\lambda_1 - \lambda_2) \cdot (x_0 - f \cdot R_1) \cdot e^{\lambda_2 t} + f \cdot R_1,$$

где  $x_0$  – начальное положение частицы на ноже;  $\lambda_1 = (-f + \sqrt{1 + f^2}) \cdot \omega > 0$ ;  $\lambda_2 = (-f - \sqrt{1 + f^2}) \cdot \omega < 0$ ;  $e$  – основание натурального логарифма.

УДК 621.374:681.511

## **ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ КОМПЬЮТЕРНОЙ МАТЕМАТИКИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ДИНАМИКИ**

**Т. А. Трохова**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

**М. Л. Шишаков**

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Активное внедрение микропроцессорных систем управления позволяет модели и методы обратных задач динамики трансформировать из области теории в прикладную плоскость и получать эффективное алгоритмическое обеспечение для указанных систем. Следует отметить при этом, что получаемые алгоритмы приводят к получению качественно новых адаптивных свойств, в ряде случаев недостижимых для классических систем управления.

Как известно, прямой задаче отыскания траектории движения технической системы (ТС) по заданному входному воздействию соответствует обратная задача отыскания входного воздействия, которое приведет к движению ТС по заданной траектории. Наличие вычислительного устройства в контуре управления позволяет формировать входные воздействия с необходимой алгоритмической сложностью и достаточной для большинства систем управления скоростью обработки данных.

Следующим фактором, способствующим активизации интереса к применению методов обратных задач, можно назвать развитие такого прикладного научного и инженерного инструмента как системы компьютерной математики (СКМ), которые способны эффективно решать аналитические задачи математики.

Задача отыскания управляющей функции авторами решается в СКМ Maple. В первой версии разработанного программного обеспечения в качестве объекта исследования использовались линейные системы, движение которых осуществляется по лекальным траекториям. Входное воздействие, подаваемое на объект управления на каждом дискретном шаге регулирования, ищется в виде полиномиальной функции. Таким образом, входные данные для разработанной программы – модель объекта управления в виде системы линейных дифференциальных уравнений, а также степени полиномов, которыми описывается выходное движение и входное воздействие. Программа выдает аналитические зависимости для расчета коэффициентов полинома, по которым микроконтроллерная система управления рассчитывает входное воздействие, подаваемое на объект управления. Именно это обстоятельство позволяет достаточно просто использовать результаты математических вычислений в микропроцессорных системах управления ТС. Здесь необходимо подчеркнуть, что формируемое входное воздействие является функцией координат местоположения системы в момент расчета и координат точки, в которую система должна прийти через заданный промежуток времени по лекальной траектории движения.

Следует признать, что выражения для расчета коэффициентов полиномов получаются громоздкими, тем не менее наличие компиляторов с языка С для современных контроллеров позволяет считать подобную проблему не столь существенной. Вычислительный эксперимент с результатами расчетов был выполнен в пакете Simulink СКМ MatLab и показал высокую эффективность систем управления, построенных в соответствии с теорией и методами обратных задач динамики. Для точных количественных оценок предстоит выполнить существенно больший объем экспериментов. Одним из предварительных выводов является необходимость внесения ограничений на параметры входного воздействия и, соответственно, решения оптимизационной задачи при отыскании коэффициентов входной функции.

## СЕКЦИЯ Г. ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.374.39

### ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ШУМАМИ МАШИН

**В. М. Колешко, Р. И. Фурунжиев**

*Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск*

Подавление или понижение уровня шумов является актуальной проблемой в машиностроении. Так, шумы в салонах машин (наземных колесных и гусеничных машин, воздушных и подводных аппаратов), в технологических целях и другое оказывают вредное воздействие на мозг человека, и вследствие этого существенно снижается эффективность и безопасность работы операторов этих машин.

Международные требования непрерывно ужесточаются с целью защиты населения от шумотерроризма в окружающей среде. В основу изобретения (Интеллектуальная система управления шумами : пат. 9814 Респ. Беларусь / В. М. Колешко, Р. И. Фурунжиев ; опубл. в бюл. № 5, от 30.10.07) положено открытие акустоэлектронного явления в головном мозге (Открытие № 395 от 18.02.88 / В. М. Колешко [и др.]), заключающееся в том, что головной мозг совершает гармонические затухающие колебания, максимальная амплитуда которых образуется на резонансной частоте головного мозга в инфразвуковом диапазоне.

В общем случае спектр шумов в зашумленном пространстве изменяется во времени, и требуется решение нестационарной задачи управления спектром шумов. Поскольку ситуация, как правило, изменяется быстро, то применяют алгоритмы интеллектуального управления, сочетающие высокую точность и быстроедействие без перерегулирования (Способ и регулятор для управления системами : пат. Рос. Федерации 2153697 / Р. И. Фурунжиев ; заявл. 24.04.97). Формируемый сигнал управления усиливается и используется в качестве входного сигнала конечного управляющего элемента, генерирующего звуковое воздействие в рассматриваемых направлениях зашумленного пространства. В системе управления используются средства сенсорных измерений и фильтрации спектров шумового сигнала, и/или их производных и преобразования их в соответствующие сигналы; измерений и фильтрации выходной переменной конечного управляющего элемента системы (исполнительного устройства), и/или ее производной и преобразования их в соответствующие сигналы; формирования уравнений эталонного движения на основе командной и фактической величины спектра шума и его производной; формирования управления и преобразования его в соответствующие сигналы; идентификации/прогнозирования состояний системы (присутствия/отсутствия человека), а также усилители мощности и исполнительные акустические устройства.

Алгоритм работы интегрированной системы в реальном времени определяется программой, «защитой» в ППЗУ микроконтроллера путем кросс-компиляции после завершения интерактивного диалога по инсталляции системы под конкретные приложения. В интерактивном режиме, прежде всего, задается конфигурация интегрированной системы и параметры, определяющие нечеткие свойства критерия качества управления, параметров сенсоров, усилителей мощности и исполнительных устройств. Таким образом, желаемые конфигурация, схема реализации, порядок производных наблюдаемых выходных сигналов задаются в режиме диалога.

УДК 621.001:612.821

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА РАСПОЗНАВАНИЯ  
ФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ МОЗГОВЫХ ВОЛН  
ПРИ УПРАВЛЕНИИ МАШИНАМИ****В. М. Колешко, Е. А. Воробей***Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск*

Распознавание мысленных мозговых команд является актуальной проблемой биоинформатики и нейрокомпьютерных устройств управления объектом, поскольку создание подобных интеллектуальных систем направлено на улучшение и обеспечение безопасности жизни как здоровых людей, так и тех, кто лишен способности нормального существования. При этом нейрокомпьютерные системы приобретают также важнейшую научную ценность, т. к. открывают широкие практические возможности применения в технике, экономике, медицине и во многих других областях. Поэтому основное внимание при разработке интеллектуального программного обеспечения сосредоточено на оптимизационном анализе процессов обработки и классификации мыслительных процессов головного мозга. На сегодняшний день нет достаточно достоверных методов регистрации функциональности нейронной активности и математических приемов распознавания мозговых волн, поэтому авторами была разработана интеллектуальная программа «НЕЙРО-ДФС», которая проводит комплексную обработку любых биоэлектрических сигналов и включает эффективные оптимизационные алгоритмы классификации с улучшенными методами поиска глобальной ошибки прогнозирования.

Для анализа были использованы данные электроэнцефалограммы (ЭЭГ), предоставленные Берлинским университетом, при мысленном управлении курсором «мышь». Проведенные методы усреднения и декорреляции каналов ЭЭГ позволили обнаружить электрический артефакт на частоте 50 Гц, который был обусловлен частотой переменного тока в сети и поэтому был исключен методами пространственной и режекторной фильтрации. Кроме того, подавлялось и любое сенсорное восприятие, например, визуального характера на частоте 10 Гц, что позволило в дальнейшем провести точную оценку формирования мозговых команд в различных участках мозга и при несинхронном взаимодействии нейронов. После оптимального сжатия данных вейвлет-анализом и использования анализа главных компонент была проведена классификация вероятностными, радиально-базисными нейронными сетями, нейронными сетями с обратным распространением ошибки, а также созданными специально их оптимизированными структурами с улучшенными методами группового учета аргументов для достижения максимальной точности прогнозирования. Полученные результаты со средней ошибкой распознавания 45 % подтвердили достоверность выдвинутых положений о формировании чистых мозговых команд без влияния артефактов и сенсорных систем организма. Включение сенсорных систем, например, зрения позволяет оценить функциональность работы головного мозга со средней ошибкой ~ 20 %.

Таким образом, интеллектуальная программа «НЕЙРО-ДФС», основанная на мощных методах обработки и оптимизационной классификации, существенно облегчает познание тайн функционирования работы головного мозга и приближает ученых к созданию эффективных систем управления машиной силой мысли.

УДК 621.396.67

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ ПЛОСКИХ ЩЕЛЕВЫХ РАДИОГЛОГРАФИЧЕСКИХ АНТЕНН

В. Н. Мизгайлов

Белорусский государственный университет транспорта,  
г. Гомель

Радиоголографическими антеннами (РГА) принято называть антенные устройства, построенные на основе радиоголографических принципов для сигналов радиочастотного диапазона. Основной физической идеей, положенной в основу, является предположение, что требуемая диаграмма направленности (ДН) подобной антенны представляет предметный пучок плоских волн, которые используются в записи радиоголограммы, а источник возбуждения (облучатель) 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 [1], [2].

Коэффициент направленного действия (КНД) плоских щелевых РГА оценивается величиной  $10 \lg 3,2N$ . Необходимо учесть, что РГА подобного типа являются плоскими аналогами параболических антенн и имеют ряд существенных преимуществ перед ними: меньшие габариты, меньшая ветровая нагрузка, выше коэффициент использования поверхности.

Исследовалась отражательная способность по нормали к раскрыву в полосе 8–13 ГГц двух плоских щелевых РГА линейной поляризации с глубиной резонатора 10 мм и апертурой  $220 \cdot 220$  и  $280 \cdot 280$  мм<sup>2</sup>. Результаты измерений представлены на графике (рис. 1). На этом же рисунке приведены для наглядности и изображения РГА с указанием привязанных к ним графиков отражений от антенн. Большая по габаритам РГА имеет лучшие условия согласования вблизи резонансной частоты 10,6 ГГц и лучшие характеристики по коэффициенту отражения в полосе частот по нормали к поверхности излучения.

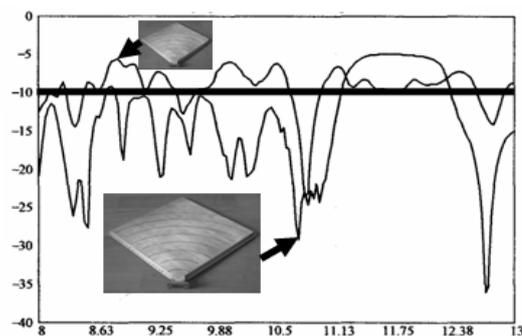


Рис. 1

### Литература

1. Способ построения радиоголографической антенны и плоская радиоголографическая антенна, полученная указанным способом : пат. 6748 Респ. Беларусь, МПК7 Н 01Q 3/00 19/06 / В. Н. Мизгайлов ; заявитель и патентообладатель В. Н. Мизгайлов. – а 20010282 ; заявл. 27.03.01 ; пат. зарегистр. 09.09.04, опубл. 30.12.04 // Афіцыйны бюл. № 4 / Дзярж. Пат. Кам. Рэсп. Беларусь.
2. Мизгайлов, В. Н. Способ построения радиоголографических антенн / В. Н. Мизгайлов // Междунар. науч. конф. по военно-техн. проблемам, проблемам обороны и безопасности, использования технологий двойного применения : тез. докл. – Минск : ГУ «БелИСА», 2005. – С. 3–4.

УДК 625.144.51.7

**ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА  
СКОРОСТЕМЕРА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СПЕЦИАЛЬНОГО  
САМОХОДНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА****В. А. Довгяло, В. А. Ташбаев***Белорусский государственный университет транспорта,  
г. Гомель*

На локомотивах в качестве привода скоростемера применяется механический привод. Вследствие того, что диаметр вала колесной пары у путевых машин меньше диаметра колесной пары локомотива, на которых применяется механический привод скоростемера, то для применения механического привода на путевых машинах необходима замена колесной пары, что конструктивно не допустимо. Кроме того, механический привод скоростемера имеет ряд недостатков. Механический привод скоростемера представляет собой червячный редуктор, входной вал которого кинематически связан с осью колесной пары, а выходной вал – с механической передачей, включающей промежуточный конический редуктор, телескопический, карданный или гибкий валы, вращающей через муфту приводной вал локомотивного скоростемера, непрерывно отображающего и регистрирующего скорость, пройденный путь и другие параметры движения подвижного состава. Недостатками данного устройства являются: необходимость изменения передаточного числа редукторного привода при изменении диаметра бандажа колесной пары, невысокая точность измерений, необходимость доработки буксы и(или) колесной пары железнодорожного подвижного состава при монтаже, трудоемкость технических обслуживаний и ремонтов.

Задачей разработки электромеханического привода вместо механического привода является повышение точности и надежности измерения, регистрации и индикации скорости, снижение трудоемкости технических обслуживаний и ремонтов, а также расширение функциональных возможностей данных устройств посредством установки на различные типы железнодорожного подвижного состава, в том числе несамоходного. Поставленная задача достигается тем, что устройство для измерения, регистрации и индикации скорости движения и пройденного пути железнодорожного подвижного состава содержащее последовательно соединенные датчик скорости, усилительно-управляющий блок и исполнительное устройство, связанное с регистратором показаний, в качестве датчика скорости использует датчик генераторного типа, а в качестве исполнительного устройства – электродвигатель, крутящий момент от вала которого передается валу скоростемера.

Сущность электромеханического привода заключается в следующем.

При вращении оси колесной пары машины в обмотке датчика скорости генераторного типа появляется электрический ток, частота и амплитуда которого пропорциональны ее угловой скорости. После усиления в усилительно-управляющем блоке и подачи в соответствующие обмотки электродвигателя напряжения, его ротор будет вращаться в нужном направлении с соответствующей скоростью, вращая вал скоростемера, обеспечивающего непрерывное измерение, регистрацию и индикацию скорости движения, пройденного пути и других параметров движения подвижного состава. При этом осуществляется практически безынерционная и независящая от внешних условий передача информационного сигнала, индикация и регистрация параметров движения подвижного состава.

Установка данного устройства возможна на всех существующих типах железнодорожного подвижного состава, а также другой, в частности дорожной, техники, поскольку не требует доработки и(или) изменения конструкции осей, букс и ступичных узлов.

УДК 621.783.2:681.518

**АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕРМОПЕЧЬЮ  
НА БАЗЕ ПРОМЫШЛЕННОГО КОНТРОЛЛЕРА****А. В. Сычев, Л. К. Ивинский, А. А. Нестеров***Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Одним из перспективных направлений снижения энергоемкости производства является внедрение автоматизированных систем управления, и прежде всего, энергоемким технологическим оборудованием. В работе рассматривается автоматизированная система управления термопечью на базе специализированного промышленного контроллера СПЕКОН СК5-01, позволяющая автоматически поддерживать температуру и оптимальный режим горения газа в печи.

Объектом управления контроллера является многогорелочная нагревательная камерная термопечь, расположенная в кузнечном цеху завода «Гомсельмаш».

Целью внедрения автоматизированной системы управления является экономия топлива за счет автоматизации управления подачи газа (в зависимости от температуры в термопечи и процентного содержания углекислого газа в продуктах горения), контроль герметичности запорной арматуры системы подачи газа и поддержание оптимальных режимов нагрева металла и горения газа.

На основании анализа технических характеристик и возможностей различных контроллеров, их стоимости, для построения автоматизированной системы был принят контроллер СПЕКОН СК5-01.

С учетом схемы энергоснабжения печи на базе выбранного контроллера разработана схема управления термопечью и составлены схемы подключения контроллера СК5 к питающей сети, его выходных сигналов к исполнительным механизмам, а также входных аналоговых и релейных сигналов к контроллеру.

Контроллер по заданной программе осуществляет прогрев печи (на 4-х участках режимной карты, скорость подъема температуры и продолжительность которых задаются оператором) и поддержание рабочего режима с оптимальными параметрами разряжения воздуха в дымососе (в зависимости от давления газа) и регулирования подачи воздуха с помощью заслонки на выходе уходящих газов (регулирует давление/разряжение уходящих газов) в зависимости от показаний газоанализатора СО. Во время рабочего режима контроллер формирует управляющие воздействия на регуляторы дымососа и подачи газа с целью обеспечения требуемых параметров: температуры в топке печи и соотношения «топливо-воздух» в топке. Кроме того, контроллер при каждом цикле пуска печи отслеживает состояние герметичности запорных клапанов.

Ожидаемая экономия топлива от внедрения автоматизации режима горения и устранения химической неполноты сгорания в нагревательных печах всех типов: 0,001–0,005 т у. т. на 1 т изделий (по данным инспекции Энергонадзора УП «Минск-энерго»). Для печи с расходами топлива 96 м<sup>3</sup>/ч эта экономия составит 0,0035 т у. т. на 1 т изделий. При производительности печи – 1000 кг/ч, времени работы печи за год 4554 ч экономия топлива составит  $\Delta \text{Э} = 2334$  у. е./год, а срок окупаемости при ориентировочных капитальных затратах  $K = 6330$  у. е. (на приобретение контроллера, исполнительных механизмов и датчиков) составит  $\text{Ток} = 2,71$  года.

Внедрение автоматизированной системы управления термопечью за счет точного регулирования температуры и выдержки времени, устранения химической неполноты сгорания топлива позволит снизить брак продукции и удельный расход топлива на 1 т обрабатываемого металла. Кроме того, применение контроллера позволит практически полностью исключить возможность ошибочных действий оператора и несанкционированный доступ к управлению техпроцессом.

УДК 62-831

**НЕСООТВЕТСТВИЕ ТРЕБОВАНИЙ НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ДОКУМЕНТОВ К ЭЛЕКТРОПРИВОДАМ КАЧЕСТВУ ПИТАЮЩЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ****Г. О. Широков***Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого, Беларусь*

Цель исследования: анализ соответствия требований нормативно технических документов к электроприводам фактическим параметрам сетевых помех.

В соответствии с ГОСТ 27803–91 «Электроприводы, регулируемые для металлообрабатывающего оборудования и промышленных роботов» и ГОСТ 30533–97 «Электроприводы постоянного тока общего назначения» предъявляются следующие требования к электроприводам.

Электроприводы должны обеспечивать номинальные параметры с учетом допустимых отклонений при следующих нормах качества электроэнергии на входе и сетей, питающих вспомогательные цепи:

- установившееся отклонение входного напряжения до 1000 В – от +10 % до –15 %;
- установившееся отклонение входного напряжения свыше 1000 В –  $\pm 10$  %;
- установившееся отклонение частоты входного напряжения –  $\pm 2$  %;
- установившееся отклонение напряжения сети собственных нужд – от +10 % до –15 %;
- кратковременные провалы мгновенных значений питающего напряжения площадью до 400 %, умноженных на электрический градус, причем максимальная длительность провала питающего напряжения не должна превышать 40 электрических градусов.

Электроприводы должны быть устойчивыми к воздействию помех, генерируемых как системой (сетью) питания, так и преобразователем или двигателем электропривода, в соответствии с требованиями ГОСТ 29254 и совместимыми с другими техническими средствами в соответствии с ГОСТ 29192.

Однако анализ зарегистрированных помех электрической сети с  $U_{ном} = 380$  В в цепи питания помехочувствительных электроприемников цеха металлокорда РУП БМЗ показал, что:

- глубина провалов напряжения несимметрична по фазам и длительность провалов напряжения разных фаз может не совпадать;
- длительность провалов напряжения и кратковременных исчезновений питания существенно превышает 40 электрических градусов;
- максимальная длительность зарегистрированных провалов напряжения составила 1525 мс;
- длительность зарегистрированных кратковременных исчезновений питания превышала 18 мин.

Сопоставляя требования нормативно-технических документов к электроприводам и фактические характеристики провалов напряжения, а также кратковременных исчезновений напряжения в электрических сетях, можно сделать вывод, что электропривод гарантированно перестанет работать при возникновении в цепи питания рассматриваемых кондуктивных помех. Тем не менее опыт эксплуатации электрических приводов показывает, что не каждая кондуктивная помеха приводит к их отключению. То есть электрические приводы обладают определенной устойчивостью к кондуктивным помехам.

УДК 681.518

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРОВОДАХ С ПЛАСТМАССОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ****Д. И. Зализный, О. Г. Широков***Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Цель исследований: разработать исходную математическую модель, позволяющую с достаточной точностью рассчитывать в режиме реального времени и прогнозировать температуру наиболее нагретых точек отдельных частей силовых проводов и кабелей.

В качестве базового образца для разработки математической модели взят двухжильный провод марки ПВ с сечением жилы  $0,85 \text{ мм}^2$ . Каждый элемент провода, а также окружающая среда рассмотрены как однородные тела. Таким образом, провод, находящийся в воздухе, представлен как система из шести однородных тел: двух жил, их изоляционных оболочек, защитной оболочки и окружающего воздуха. Составлена структурная схема тепловых процессов и на ее основе получена система дифференциальных уравнений тепловых процессов, по которой, в свою очередь, синтезирована тепловая схема замещения рассматриваемого провода. Сделан вывод о сложности расчетных соотношений для тепловых процессов этого провода. Предложено осуществить эквивалентный переход к одножильному проводу. Разработаны критерии перехода: равенство масс однородных тел и равенство потерь мощности в однородных телах. Составлены система дифференциальных уравнений и тепловая схема замещения эквивалентного одножильного провода. Получены расчетные соотношения для температур отдельных частей такого провода, требующие в качестве исходных данных справочные данные исходного провода, значения тока, протекающего по его жилам, и значения температуры воздуха на некотором расстоянии от провода.

Для подтверждения адекватности разработанной математической модели проведены экспериментальные исследования с базовым образцом провода, в процессе которых через жилы провода пропускался или отключался ток значением 30 А, и регистрировались переходные процессы нагрева и охлаждения для температуры поверхности жилы с помощью внедренного в изоляцию полупроводникового датчика. Исследования показали, что максимальная погрешность математической модели относительно эксперимента составляет  $2,5 \text{ }^\circ\text{C}$  или 5 %, что свидетельствует о достаточно высокой точности модели. Поскольку в модели заложены физические принципы тепловых процессов в двухжильном проводе, то совершенно очевидно, что их можно перенести и на многожильные провода и на силовые кабели при соответствующей теоретической доработке. Однако экспериментальные исследования тепловых процессов в проводах и кабелях с сечениями жил более  $10 \text{ мм}^2$  представляют значительные трудности из-за необходимости получения высоких значений токов (более 500 А), т. е. требуют определенных финансовых затрат. Авторы надеются, что эта проблема будет решена.

Разработанная математическая модель является начальным этапом для создания новых способов диагностирования силовых проводов и кабелей с целью повышения их надежности эксплуатации и раннего выявления аварийных ситуаций. На основе этой модели также может быть разработана методика тепловой защиты силовых проводов и кабелей. Экономический эффект от подобных разработок будет заключаться в снижении затрат, связанных с авариями проводниковых линий в системах электроснабжения различного уровня.

УДК 621.316:631.371

## РАСЧЕТ КОЛИЧЕСТВА ОТКЛЮЧЕНИЙ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

**О. Ю. Пухальская**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Проблема обеспечения надежного электроснабжения потребителей сельскохозяйственного назначения остается актуальной и на сегодняшний день. Поэтому необходима методика расчета основных показателей надежности электроснабжения потребителя – количества внезапных отключений и средней продолжительности отключения.

Методика расчета количества внезапных отключений потребителя за год была изложена в [1]. Цепь «источник – потребитель» разделяется на такие элементы, методы расчета надежности которых одинаковы. Расчет количества отключений каждого элемента цепи основан на учете их удельной повреждаемости. При этом учитываются: схема подстанции 110(35)/10; марка и сечение проводов, материал опор, тип изоляторов ВЛ 10 кВ; схема ТП 10/0,4 кВ; наличие устройств противоаварийной автоматики и т. д.

Количество внезапных отключений потребителя складывается из количества отключений из-за повреждений:

- на ЛЭП 110(35) кВ и в РУ 110(35) кВ присоединенных к ней подстанций;
- в трансформаторе питающей потребителя подстанции 110(35)/10 кВ;
- в РУ 10 кВ питающей потребителя подстанции 110(35)/10 кВ;
- на питающей потребителя ВЛ 10 кВ;
- в ТП 10/0,4 кВ, к которой подключен потребитель;
- на питающей потребителя линии 0,38 кВ.

Для существующих схем электроснабжения 33-х потребителей одного из сельских районов электрических сетей было рассчитано количество внезапных отключений за год.

Среднее количество отключений составило 2,471 шт./год, из них на долю отключений из-за повреждений на ЛЭП 110(35) кВ, в РУ 110(35) кВ, в трансформаторе питающей потребителя подстанции 110(35)/10 кВ и в РУ 10 кВ приходится 23 %, на питающей потребителя ВЛ 10 кВ – 56,2 % и в ТП 10/0,4 кВ, к которой подключен потребитель, а также на питающей потребителя линии 0,38 кВ – 20,8 % всех отключений.

Количество внезапных отключений для потребителей II категории надежности составило 2,143 шт.-год, для потребителей III категории – 2,779 шт./год.

Результаты расчета количества отключений потребителей АПК могут использоваться для анализа надежности элементов цепи «источник–потребитель» с последующей разработкой и обоснованием мероприятий по повышению надежности электроснабжения потребителей.

### Литература

1. Куценко, Г. Ф. Методика определения расчетного количества внезапных отключений потребителей сельскохозяйственного назначения по цепи «источник–потребитель» / Г. Ф. Куценко, О. Ю. Пухальская // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2005. – № 3. – С. 30–33.

УДК 621.527.2

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ АВТОНОМНЫХ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ВИБРАТОРАХ

М. Н. Погуляев

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Электрогидравлические вибратора (ЭГВ) широко применяются в сейсморазведке, испытательной технике, машиностроении и других отраслях промышленности. Дальнейшее развитие и совершенствование электрогидравлических вибраторов идет по пути расширения диапазона воспроизводимых рабочих частот [1]. Максимальная рабочая частота ЭГВ, применяемых в сейсморазведке, не превышает 150 Гц и для ее увеличения, в первую очередь, необходимо повысить быстродействие входящего в его состав электромеханического преобразователя (ЭМП).

Цель данной работы – провести сравнительный анализ современных ЭМП и оценить перспективу их применения при создании высокочастотных ЭГВ с максимальной рабочей частотой в два и более раз превышающую существующую. Для виброисточников, применяемых в сейсморазведке, это позволит существенно увеличить разрешающую способность и достоверность проводимых геологоразведочных работ. Таким образом, повышение быстродействия ЭМП является актуальной задачей, решение которой дополнительно усложняется тем, что в автономных электрогидровибраторах полная мощность электронного источника питания ограничена.

Для оценки быстродействия преобразователей ЭГВ использовалась система критериев, содержащая, кроме общеизвестных показателей – собственного ускорения  $\varepsilon_0$ , относительного электромагнитного момента  $M_{0s}$ , электрической постоянной времени  $\tau$  и новый критерий – резонансную (собственную) частоту колебаний нагруженного ЭМП  $f_{рез}$ . Определены численные значения этих и других параметров электромеханического преобразователя, позволяющие повысить верхний предел рабочей частоты гидравлического вибратора вдвое. Основные из них таковы:

- собственное угловое ускорение не менее  $1,3 \cdot 10^5 \text{ с}^{-2}$ ;
- относительный электромагнитный момент не ниже 0,07 Нм/ВА;
- резонансная частота колебаний нагруженного преобразователя не менее 750 Гц;
- полная потребляемая мощность не более 42 ВА;
- амплитуда линейных колебаний якоря в рабочем диапазоне частот не менее 0,1 мм.

С помощью предложенной системы критериев, по требуемым численным значениям, был проведен сравнительный анализ быстродействия более 50 отечественных и зарубежных ЭМП углового и линейного движения различных типов (магнитоэлектрических, электромагнитных, электродинамических, индукционных и др.), которые могут использоваться для работы в составе автономных высокочастотных ЭГВ.

Выявлено, что ни один из существующих ЭМП не отвечает всем требованиям в комплексе, хотя некоторые образцы имеют более высокие значения отдельных параметров. Проведенный анализ позволяет определить основные направления модернизации современных ЭМП с целью достижения заданных параметров.

### Литература

1. Повышение разрешающей способности вибрационной сейсморазведки: Разведочная геофизика / А. Н. Иноземцев [и др.]. – Москва : ВИЭМС, 1987. – 73 с.

УДК 62-83:621.313

**ЭЛЕКТРОПРИВОД МЕХАНИЗМОВ С КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКОЙ НА ОСНОВЕ АКТИВНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ****В. В. Логвин, О. Д. Сухотская***Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Колебательная периодическая или неравномерная нагрузка, характерная для широкого класса механизмов добывающей, перерабатывающей и машиностроительной отраслей, вызывает значительные колебания скорости приводных электродвигателей. Применяемые в настоящее время электроприводы таких механизмов не всегда удовлетворяют требуемым технико-экономическим показателям.

Для уменьшения колебаний скорости, следуя принципу Понселе (регулирование по возмущению), введем сигнал задания на управление асинхронным двигателем (АД), равный сумме заданной синхронной скорости  $\omega_1$  и скольжения  $\Delta\omega$ , которая содержит колебательную составляющую нагрузки.

Производится компенсация влияния момента нагрузки  $M_c(t)$  на частоту вращения ротора. Физический смысл этого эффекта заключается в том, что теперь в АД формируется магнитное поле, новая частота вращения которого имеет постоянную составляющую, равную частоте вращения ротора с учетом составляющей скольжения от постоянной составляющей момента нагрузки, и колебательную составляющую, синхронную с колебательной составляющей скольжения от колебательной составляющей нагрузочного момента.

В соответствии с изложенным синтезируем структурную схему САУ из двух контуров. Контур стабилизации  $\Psi_{rx}$  построим по принципу Ползунова-Уатта (регулирование по отклонению) с управлением по току статора  $I_{sx}$ , а контур компенсации влияния колебательного момента нагрузки по принципу Понселе (регулирование по возмущению), добавляя, как было показано выше, к управляющему сигналу  $\omega_{зад}$  составляющую скольжения  $\Delta\omega_c$  от статического момента.

Точность поддержания скорости обеспечивается благодаря тому, что система управления током реализует сигнал задания, практически повторяющий форму кривой колебательного момента. Составляющая тока  $i_{sy}$ , пропорциональная электромагнитному моменту АД, после переходного процесса пуска полностью повторяет колебательный характер нагрузочного момента, тем самым обеспечивая инвариантность к нему. При этом составляющая тока  $i_{sx}$ , пропорциональная потокосцеплению, остается неизменной, чем выполняется необходимое требование  $\Psi_{xr} = \text{const}$ .

В данной системе в качестве управляемого выпрямителя используется трехфазная схема активного выпрямителя тока. Отличия заключаются в применении полностью управляемых ключей и широтно-импульсного модулятора.

С помощью данной схемы можно осуществлять регулирование выходного тока активного выпрямителя двумя способами: изменением глубины модуляции и фазы модулирующего сигнала, регулируя тем самым фазу потребляемого из сети тока.

Система управления активного выпрямителя тока формирует управляющие сигналы на силовые ключи, которые за счет реализации режима ШИМ формируют мгновенные значения токов на силовом входе таких значений, формы, фазы, при которых потребляемые из сети токи являются практически синусоидальными.

В итоге получена система, нечувствительная к периодическим колебаниям нагрузочного момента и позволяющая повысить коэффициент мощности за счет использования активного выпрямителя.

УДК 621

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОТРЕБЛЯЕМОГО ТОКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА НА ОСНОВЕ АСИНХРОННО-ВЕНТИЛЬНОГО КАСКАДА

В. С. Захаренко, И. В. Дорощенко, М. Н. Погуляев

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Цель: исследовать влияние на сеть испытательного стенда на основе АВК.

Модель, в отличие от общеизвестных, получена при использовании 1-го и 2-го законов Кирхгофа, с учетом реальной схемы включения обмоток двигателя и трансформатора, а также с учетом дискретности вентиляей. Схема модели асинхронно-вентильного каскада представлена на рис. 1.

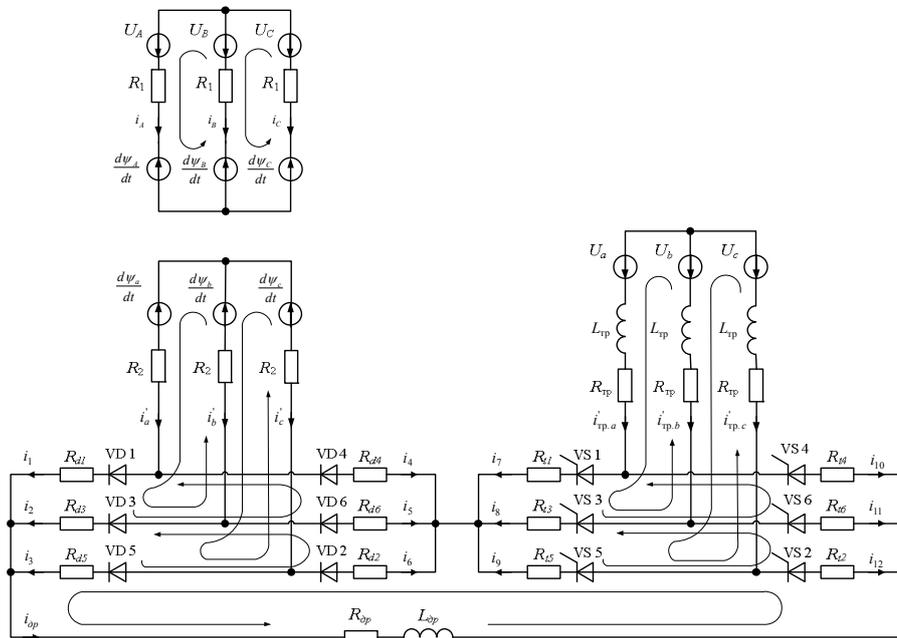


Рис.1. Схема замещения асинхронно-вентильного испытательного стенда

Производились расчеты генераторного режима работы на основе асинхронного электродвигателя 4АНК 250 М4. Вес гармоник по отношению к основной (при частоте сети 50 Гц, значении угла опережения  $\beta = 50^\circ$  и момента нагрузки равного 10 % от номинального момента электродвигателя) приведен на рис. 2.

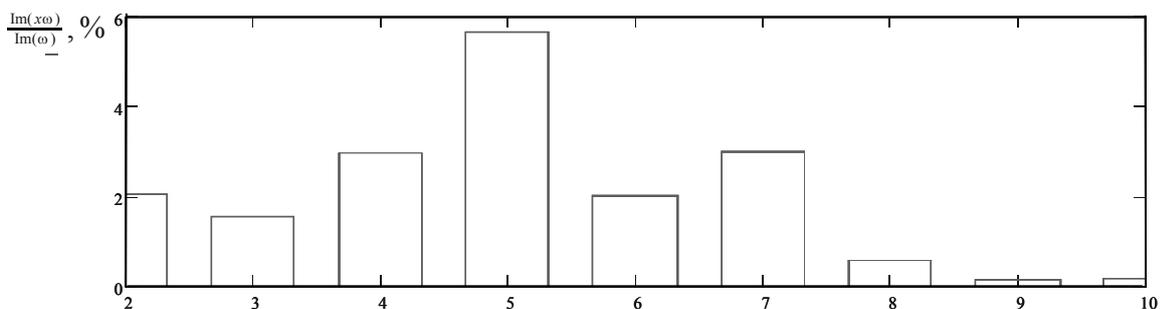


Рис. 2. Гармонический спектр тока

УДК 621

**УСТРОЙСТВО УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ ПОДСТАНЦИИ****Л. И. Евминов***Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь***А. Н. Гуминский***РУП «Витебскэнерго», Оршанская ТЭЦ, Беларусь*

Потери электроэнергии в трансформаторах состоят, как известно, из нагрузочных потерь и потерь холостого хода. Результаты исследования показывают, что большое количество понижающих подстанций в Белорусской энергосистеме работают с очень низким коэффициентом загрузки силовых трансформаторов, что обуславливает увеличение потерь холостого хода в соотношении с нагрузочными.

Разрабатываемое устройство управления режимом подстанции (УУРП) применяется для двухтрансформаторных понижающих подстанций с первичным напряжением до 110 кВ, имеющих выключатели со стороны высокого и низкого напряжения трансформаторов, и секционированную выключателем систему шин низкого напряжения.

Основное назначение УУРП – управление первичной схемой подстанции. Во время длительного снижения нагрузки один из трансформаторов выгодно держать отключенным. Основным критерием работы УУРП является суммарный ток нагрузки потребителей. В зависимости от типа трансформаторов определяется базовая нагрузка, при которой потери холостого хода равны нагрузочным потерям. Уставки по времени и току срабатывания определяются исходя из следующих факторов: базовой нагрузки, уставок РЗА подстанции, характера нагрузки потребителей.

При выборе элементной базы проектируемой схемы УУРП учитывался факт общепризнанного использования микропроцессорных устройств, преимущества которых очевидны. УУРП возможно выполнить на микропроцессорном блоке РЗА, имеющем достаточно гибкую внутреннюю логику. За основу взят терминал МР700 отечественного производителя РУП «Белэлектромонтажналадка». По заранее составленным алгоритмам работы УУРП произведен анализ необходимых аппаратно-программных функций в сопоставлении с имеющимися в МР700. Произведена проверка составленных алгоритмов на правильность логических операций с применением ПЭВМ и прикладного программного продукта Electronics Workbench.

По составленным и проверенным алгоритмам работы УУРП производится конфигурирование ступеней защит и внутренней логики блока МР700. Конфигурирование блока возможно производить: с лицевой панели функциональными клавишами; с использованием ПЭВМ и специализированного прикладного программного обеспечения «Уни-Кон» или «МР-Конфигуратор». Указанные программы имеют интуитивный дружественный интерфейс, свойственный Windows-совместимым приложениям, что позволяет сократить время и возможность допущения ошибки при конфигурировании блока.

Устройство позволяет определять пользователю очередность коммутации выключателей первичной схемы при срабатывании УУРП, тем самым разрешая или запрещая включение трансформаторов на параллельную работу в момент переключения. Логика работы предусматривает блокировку, как оперативную, так и от срабатывания защит и автоматики подстанции. Существует возможность осуществлять контроль качества напряжения на резервном вводе. Встроенная в терминал функция самодиагностики постоянно тестирует и отслеживает исправность модулей блока, что минимизирует ложное срабатывание. Предусмотрена возможность вывода информационных каналов в схему центральной сигнализации подстанции.

В зависимости от типа силовых трансформаторов и режима работы потребителей экономия электроэнергии при применении УУРП может достигать значения 2,8 млн кВт · ч в год.

УДК 681.511.4

## РЕАЛИЗАЦИИ МНОГОМЕРНО-ВРЕМЕННОГО ОПЕРАТОРНОГО МЕТОДА АНАЛИЗА ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С НЕЛИНЕЙНОСТЯМИ ТИПА «ПРОИЗВЕДЕНИЕ»

В. И. Луковников, А. В. Козлов

Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь

В системах автоматического управления на несущей переменного тока широко используются элементы, которые имеют в себе нелинейности в виде произведений сигналов. Это измерительные, усилительно-преобразовательные, исполнительные элементы.

Рассмотрим получение многомерных передаточных функций для таких элементов на примере датчиков измерения рассогласования. В данных измерителях используются два датчика обычно одинаковой конструкции (потенциометры, сельсины, поворотные трансформаторы и т. д.). Один из них (задающий датчик) преобразует в напряжение входную угловую (линейную) координату, второй (датчик обратной связи) – выходную. Разность напряжений определяет рассогласование (отклонение) между сравниваемыми координатами положения.

Выходной сигнал такой системы датчиков определяется из выражения

$$u_{\text{вых}}(t) = K_1 \cdot \alpha_{\text{вх}}(t) \cdot u_{01}(t) - K_2 \cdot \alpha_{\text{ос}}(t) \cdot u_{02}(t),$$

или в многомерной операторной области [1]:

$$U_{\text{вых}}(p_1, p_2, p_3, p_4) = K_1 \cdot \alpha_{\text{вх}}(p_1) \cdot U_{01}(p_2) - K_2 \cdot \alpha_{\text{ос}}(p_3) \cdot U_{02}(p_4),$$

где  $K_1, K_2$  – коэффициенты передачи датчиков задающего и обратной связи;  $\alpha_{\text{вх}}(t), \alpha_{\text{ос}}(t)$  – угловые (линейные) координаты подвижных частей датчиков;  $u_{01}(t), u_{02}(t)$  – переменные напряжения электропитания датчиков (опорные сигналы).

Структурные схемы такой системы датчиков во временной и в многомерной операторных областях приведены на рис. 1. На структурной схеме в многомерной операторной области (рис. 1, б) блоки перемножения сигналов были преобразованы в многомерные передаточные функции, что позволило уйти от нелинейности сигналов.

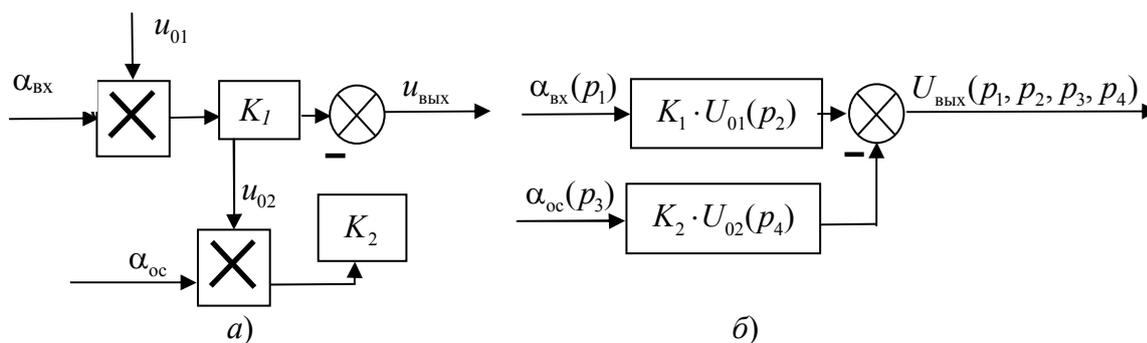


Рис. 1. Общие структурные схемы датчика угла рассогласования во временной (а) и многомерной операторной (б) областях

Такое многомерное операторное описание элементов САУ дает возможность производить преобразования структурных схем подобно передаточным функциям

и преобразованиям обычных линейных систем, что в конечном итоге упрощает анализ систем с нелинейностями типа «произведение».

Л и т е р а т у р а

1. Козлов, А. В. Многомерно-временной операторный метод анализа элементов систем автоматического управления с нелинейностями типа «произведение» : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.13.05 / А. В. Козлов ; Гомель, 2007. – 21 с.

УДК 681.58

**МОДЕРНИЗАЦИЯ ВНУТРИТРУБНОГО  
СНАРЯДА-ГЕРМЕТИЗАТОРА**

**Э. М. Виноградов**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Внутритрубный снаряд, оснащенный разжимающимся тампоном-герметизатором, применяется для фиксирования снаряда в трубопроводе при проведении ремонтных работ. Его часто называют для краткости просто герметизатором.

Последовательность выполнения операций при ремонтных работах с использованием герметизатора следующая.

1. При приближении герметизатора к месту ремонта его обнаруживают по радиосигналу маячка, установленного на снаряде и работающего на частоте 22 Гц.
2. Подается команда на остановку насосов, и герметизатор останавливается.
3. Закрывают задвижку трубопровода ниже положения герметизатора.
4. Поднимают давление в трубопроводе до тех пор, пока не будет разрушена входная мембрана гидроцилиндра, который разжимает тампоны герметизатора.
5. Давление удерживают до тех пор, пока не произойдет фиксация герметизатора. Процессы по п. 4 и 5 сопровождаются звуковыми эффектами вследствие разрушения мембраны и щелчками фиксаторов.
6. Насосы отключаются, давление в трубопроводе снижается, а герметизатор удерживает гидростатическое усилие столба нефти от него до закрытой вышестоящей задвижки.
7. Выполняются ремонтные работы на трубопроводе.
8. После завершения работ открываются задвижки, при включении насосов герметизатор сдвигается с места и уносится потоком нефти.

Опыт использования герметизатора на РУП «Гомельтранснефть Дружба» выявил его недостатки:

– при выполнении операции по п. 4 возможен сдвиг герметизатора вперед по ходу от места остановки при подъеме давления от минимального до величины, при которой разрушается мембрана;

– при удалении герметизатора с места остановки по п. 8 приходится значительно поднимать давление в трубопроводе, т. к. необходимо преодолевать силу трения манжет о стенки трубопровода, а фиксирующее устройство одностороннего действия и давление манжет на стенки остается на уровне максимально достигнутого по п. 5.

На кафедре «Промышленная электроника» УО ГГТУ предложена модернизация герметизатора, которая состоит в следующем: заменить мембрану гидроцилиндра на электроуправляемый кран или клапан; установить электромагнит для разблокирования фиксаторов; применить радиоуправление работой герметизатора.

Разработанная система радиуправления герметизатором состоит из двух блоков: передатчика, предназначенного для излучения частоты 75 Гц (команд), и приемника, расположенного в снаряде, который принимает команды и управляет краном и электромагнитом. Управление герметизатором производится тремя последовательно передаваемыми командами. После выполнения каждой команды приемник выдает звуковой сигнал длительностью около минуты. За это время необходимо выключить передатчик, чтобы обеспечить правильность чередования команд. Такая логика управления позволяет использовать для посылки команд сигналы одной частоты с произвольной длительностью. Разделение команд обеспечивается сигналами от концевых выключателей крана и электромагнита. Электронные блоки системы радиуправления были изготовлены и проверены в лабораторных условиях.

УДК 621

### **ПУСК ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ РЕЖИМ**

**В. И. Луковников, Н. В. Самовендюк**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Задачей исследования является обеспечение пуска и работы трехфазного асинхронного электродвигателя в автоколебательном режиме.

Применение автоколебательного режима обеспечивает значительное снижение ресурсозатрат, как с точки зрения материалоемкости, так и энергопотребления. Согласно проведенному анализу, незатухающий автоколебательный режим можно реализовать в электромеханической системе «однофазный асинхронный двигатель – упругий элемент».

Существуют различные способы подключения трехфазного асинхронного электродвигателя к однофазной электросети [1]. В результате проведенных исследований установлено, что наилучшим для автоколебательного режима является параллельное включение статорных обмоток электродвигателя, причем две обмотки включаются согласно друг другу и встречно третьей. При таком включении достигается наибольшее значение магнитодвижущей силы. В качестве упругого элемента может выступать пружина или маятник [2], [3]. В рассмотренных способах построения автоколебательной электромеханической системе отсутствует пуск. Пусковой момент можно создать включением конденсатора последовательно одной из статорных обмоток. При выходе автоколебательной системы в рабочий режим конденсатор должен отключаться. В данных исследованиях для отключения конденсатора использовались электромагнитное реле и концевой выключатель.

Таким образом, можно перечислить следующие необходимые условия пуска трехфазного асинхронного двигателя в автоколебательный режим:

- статорные обмотки электродвигателя должны быть подключены к источнику однофазного напряжения;
- последовательно одной из фазных обмоток включается конденсатор, который обеспечивает создание вращающегося магнитного поля и, следовательно, пуск электродвигателя; после выхода двигателя в режим автоколебаний конденсатор отключается;

– непосредственно к валу электродвигателя должен быть присоединен упругий элемент (пружина или маятник), который выступает в качестве позиционного элемента нагрузки.

Литература

1. Горопцев, Н. Д. Трехфазный асинхронный двигатель в схеме однофазного включения с конденсатором / Н. Д. Горопцев. – Москва : Энергия, 1979. – 80 с.
2. Автоколебательный электропривод : пат. С1 ВУ, МПК H02P 7/62 / В. В. Тодарев, Л. В. Вепер, В. И. Луковников. – № 4958 ; заявл. 01.06.99 ; опубл. 30.03.03 // Афіцыйны бюл. / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. – 2003. – № 1.
3. Стенд динамических испытаний пружин : пат. 1С1 ВУ, МПК G01B 1/00, G01M 13/00 / В. И. Луковников, Ю. А. Рудченко. – № 2156 ; заявл. 14.02.05 ; опубл. 30.09.05 // Афіцыйны бюл. / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. – 2005. – № 3.

УДК 621.398: 628.971

**РАСЧЕТ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЕ–ЧАСТОТА**

**П. П. Изотов**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П.О. Сухого, Беларусь*

В [1, с. 121] описана схема преобразователя напряжения–частота (ПНЧ), принципиальная схема которого представлена на рис. 1. Также в [1, с. 123] приведена приближенная методика расчета ПНЧ. Приближение заключается в том, что ширина импульса  $t_2$  выходного сигнала должна быть во много раз меньше ширины паузы  $t_1$  ( $t_2 \ll t_1$ ), и поэтому период выходного сигнала  $T$  принимается приближенно равным  $t_1$ .

В докладе представлена методика расчета ПНЧ без учета приближений, рассмотренных в [1]. Зависимость частоты  $f$  выходного сигнала от величины  $U_{вх}$  имеет вид

$$f = \frac{1}{2 \cdot R \cdot C \cdot U_{инт}} \cdot \left( U_{вх} - U_{вх}^2 \cdot \frac{R_3}{U_{R_3} \cdot R} \right),$$

где  $U_{R_3} = U_{нас} - U_{VD}$  – амплитуда сигнала на резисторе  $R_3$  (рис. 1);  $U_{нас}$  – амплитуда выходного сигнала  $U_{вхч}$ ;  $U_{VD}$  – напряжение на диоде  $VD$ ;  $U_{инт} = \frac{R_1}{R_2} \cdot U_{нас}$  – амплитуда выходного сигнала интегратора и ее связь с  $U_{нас}$ .

Для расчета параметров элементов ПНЧ (рис. 1):  $R$ ;  $C$ ;  $R_1$ ;  $R_2$ ;  $R_3$  необходимо знать величину входного сигнала  $U_{вх}$ , частоту выходного сигнала  $f$ , амплитуду сигнала на резисторе  $R_3$   $U_{R_3}$  и амплитуду выходного сигнала интегратора  $U_{инт}$ . Например,  $U_{вх} = 10$  В,  $f = 800$  Гц,  $U_{инт} = 5$  В,  $U_{R_3} = 15$  В. Значение резистора  $R$  определяется как

$$R = \frac{U_{вх} \pm U_{вх} \cdot \sqrt{1 - 8 \cdot f \cdot C \cdot R_3 \cdot \frac{U_{инт}}{U_{R_3}}}}{4 \cdot f \cdot C \cdot U_{инт}}.$$

При этом вначале выбираются значения величин емкости  $C$  и сопротивления резистора  $R_3$ , удовлетворяющих условию:  $8 \cdot f \cdot C \cdot R_3 \cdot \frac{U_{\text{инт}}}{U_{R_3}} < 1$ , а затем рассчитывается величина сопротивления  $R$ . Например,  $C = 0,1$  мкФ и  $R_3 = 3$  КОм удовлетворяют условию ( $0,64 < 1$ ) и  $R_+ = 10$  КОм, а  $R_- = 2,5$  КОм. При применении резистора  $R_+$  ширина импульса  $t_2$ , будет меньше ширины паузы  $t_1$  (рис. 2, а), а при применении  $R_-$  наоборот (рис. 2, б). При  $8 \cdot f \cdot C \cdot R_3 \cdot \frac{U_{\text{инт}}}{U_{\text{нас}}} = 1$  ширина импульса  $t_2$  равняется ширине паузы  $t_1$ .

Для определения величин сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  вначале определяются амплитуда выходного сигнала  $U_{\text{нас}} = U_{R_3} + U_{VD}$  и отношение между амплитудами интегратора и выходного сигнала  $\frac{U_{\text{инт}}}{U_{\text{нас}}} = \frac{R_1}{R_2}$ , а затем подбираются сопротивления  $R_1$  и  $R_2$ , удовлетворяющие величине этого отношения. Например, при  $U_{VD} = 0,7$  В,  $U_{\text{нас}} = 15 + 0,7 = 15,7$  В, а  $\frac{U_{\text{инт}}}{U_{\text{нас}}} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{1}{3,14}$ , поэтому выбираются резисторы  $R_1 = 10$  КОм, а  $R_2 = 31,4$  КОм.

При значениях элементов ПНЧ:  $R = 10$  КОм;  $C = 0,1$  мкФ;  $R_1 = 10$  КОм;  $R_2 = 31,4$  КОм;  $R_3 = 3$  КОм будут величины импульса  $t_2 = 2 \cdot C \cdot \frac{U_{\text{инт}}}{\frac{U_{R_3}}{R_3} - \frac{U_{\text{вх}}}{R}}$

$t_1 = 2 \cdot RC \cdot \frac{U_{\text{инт}}}{U_{\text{вх}}} = 1$  мс, частоты  $f = 800$  Гц. Если рассчитать значение частоты по методике, приведенной в [1], то получается частота  $f = 1000$  Гц. Как видно, использование приближенной методики [1] при  $t_1 \leq 4 \cdot t_2$  приводит к погрешности, большей или равной 25 %.

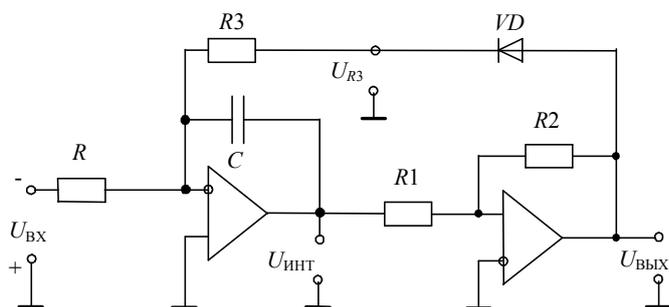


Рис. 1

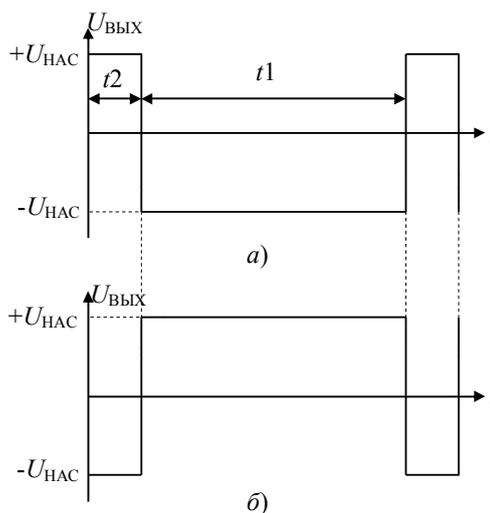


Рис. 2

### Литература

1. Чубриков, Л. Г. Основы промышленной электроники / Л. Г. Чубриков. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2003. – 255 с.

УДК 621.314.222.6

**СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ  
В НЕЗАЩИЩЕННОМ СИЛОВОМ СУХОМ ТРАНСФОРМАТОРЕ**

Д. М. Лось

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Существуют методы прямого и косвенного измерения температуры обмоток силового сухого трансформатора. Метод прямого измерения используется для контроля текущей и оценки последующей нагрузки трансформатора в реальном времени по результатам измерений температуры обмоток. Температура обмоток может быть определена и расчетным путем на основании измерений нагрузочного тока трансформатора. Пример такого расчета в упрощенном виде приведен в руководстве по нагрузке силовых сухих трансформаторов (ГОСТ 3221–97).

В целом, для расчета тепловых режимов сухого трансформатора необходимо иметь тепловую модель или тепловую схему замещения. Основными элементами этой схемы по аналогии с конструктивными элементами трансформатора должны являться: обмотка, изоляция, магнитопровод, внутренняя и внешняя охлаждающие среды.

Однако часто силовой трансформатор рассматривают упрощенно, пренебрегая одним или несколькими элементами. Так, в ГОСТ 3221–97 силовой сухой трансформатор в тепловом отношении представлен в виде одного однородного тела (обмотки). Представленная модель хоть и позволяет рассчитать температуру обмотки, но не дает возможности определить температуры других элементов трансформатора. Поэтому в данной работе представлена структурная схема тепловых процессов в незащищенном силовом сухом трансформаторе, на основании которой может быть разработана тепловая модель или тепловая схема замещения. Структурная схема тепловых процессов в незащищенном силовом сухом трансформаторе представлена на рис. 1.

В структурной схеме под внутренней охлаждающей средой понимается воздушная среда в непосредственной близости от трансформатора, через слой которой происходит теплообмен между обмоткой с изоляцией и магнитопроводом. Внешняя охлаждающая среда соответствует воздушной среде на достаточном расстоянии от трансформатора, где тепловым влиянием трансформатора на температуру воздушной среды можно пренебречь.

Перечисленные элементы схемы представим в тепловом отношении в виде однородных тел с определенными значениями тепловых сопротивлений и емкостей. Применение принудительного воздушного охлаждения (АФ) учтено в схеме путем зависимости тепловых сопротивлений однородных тел (обмотка, изоляция, магнитопровод, внутренняя охлаждающая среда) от эффективности охлаждения (скорости вращения вентилятора). При этом сам вентилятор в структурной схеме располагается во внешней охлаждающей среде.

Для незащищенного силового сухого трансформатора, расположенного в помещении подстанции, под внутренней охлаждающей средой понимается воздушная среда внутри помещения. Внешней охлаждающей среде соответствует воздушная среда снаружи помещения подстанции.

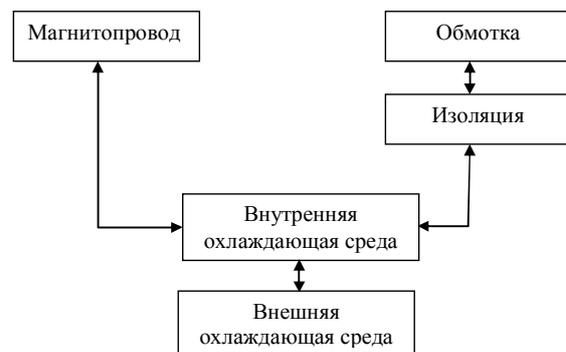


Рис. 1

## СЕКТОРНОЕ МАСШТАБИРОВАНИЕ ТЕЛЕВИЗИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

В. В. Щуплов, А. И. Никеев

Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь

В настоящее время широкое распространение получили системы крупномасштабного представления видеоинформации, в частности телевизионного (ТВ) изображения. Чаще всего это имеет место при трансляции зрелищных мероприятий. Основным недостатком существующих систем является недостаточная яркость проектируемого изображения, что ограничивает их применение при ярком внешнем освещении.

Предлагаемый способ основан на разбиении полного кадра ТВ изображения на четыре сектора (рис. 1, а), каждый из которых преобразуется в кадр стандартного ТВ изображения, который можно воспроизводить отдельным ТВ приемником (рис. 1, б).

На рис. 2 представлена упрощенная структурная схема устройства масштабирования ТВ изображения.

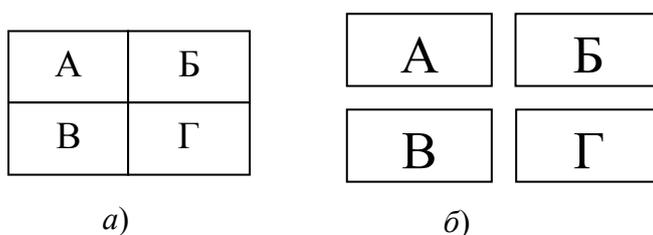


Рис. 1. Сектора ТВ изображения:  
а – изображения секторов на одном ТВ экране;  
б – изображения секторов на четырех ТВ экранах

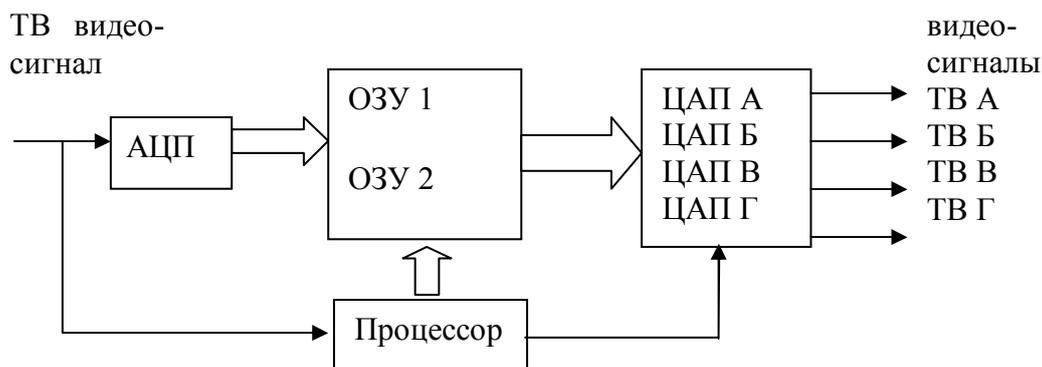


Рис. 2

Устройство содержит два ОЗУ, в которые записываются полукадры изображения. Каждое ОЗУ разбито на четыре зоны, соответствующие секторам изображения.

Во время записи одного из полукадров в ОЗУ происходит считывание информации из другого ОЗУ. Каждый элемент изображения и каждая строка воспроизводятся дважды за кадр. При этом учитывается сектор основного изображения. Из входного видеосигнала выделяются синхроимпульсы, которые используются при формировании видеосигналов секторов. Сигналы ТВ А–Г являются стандартными видеосигналами ТВ изображения и могут быть снова подвергнуты секторному масштабированию.

УДК 621.643.32

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТ ПОВРЕЖДЕНИЯ  
ИЗОЛЯЦИИ ТРУБОПРОВОДА****Н. И. Вяхирев, Л. А. Захаренко, А. С. Храмов***Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Общеизвестно, что контроль состояния трубопроводного транспорта, как и любого другого вида транспорта, является актуальной задачей.

Предлагается метод бесконтактного контроля изоляции трубопровода путем измерения магнитного поля, формируемого токами утечками и возникающим неоднородным током трубы в местах повреждения изоляции. Отличие данного метода от описанного в [1] заключается в использовании не постоянного тока катодной защиты, а переменного тока, генерируемого специальными генераторами, чем достигается ряд преимуществ. Во-первых, возможность использования в измерительной схеме частотно-избирательного усилителя позволяет получить достаточно большой коэффициент усиления, порядка  $10^6$ . Во-вторых, имеется возможность исключить влияние на результат измерений магнитного поля самой трубы, обусловленного остаточной намагниченностью, которое на несколько порядков больше магнитного поля от токов утечки. Таким образом, использование селективного усилителя позволяет значительно уменьшить влияние остаточной намагниченности трубы. К недостаткам метода следует отнести необходимость использования специальных генераторов.

Проведенные лабораторные эксперименты (рис. 1) подтвердили правильность предложенного метода определения мест повреждения изоляции и возможность его использования для диагностирования состояния трубопроводного транспорта.

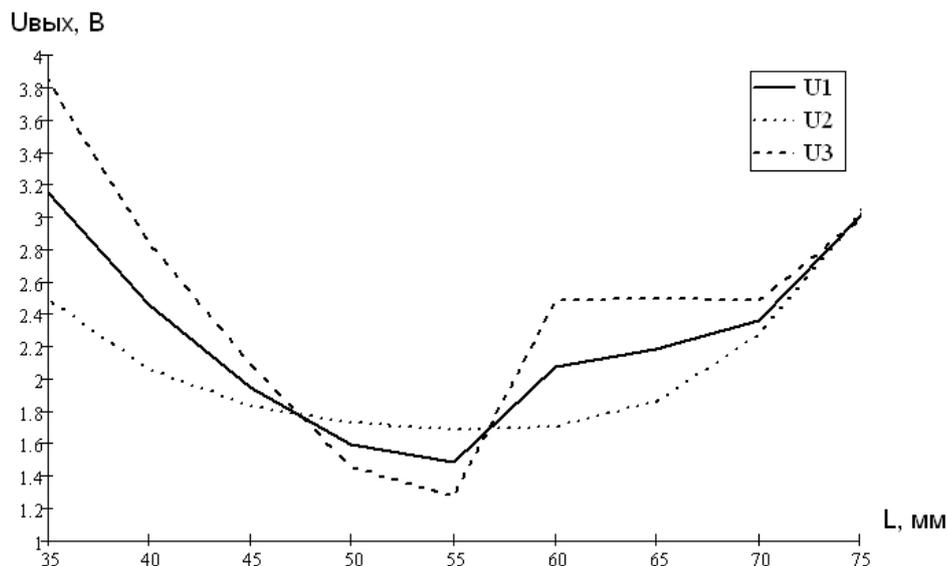


Рис. 1. Зависимость выходного напряжения от положения датчика для различных режимов:  $U_1$  – при токе утечки 0,1А;  $U_3$  – при токе утечки 0,2А;  $U_2$  – ток утечки отсутствует (место утечки – точка 57 мм)

**Литература**

1. Верига, Б. А. Контроль изоляции трубопровода по токам утечки / Б. А. Верига, Н. И. Кабаев // *Соврем. проблемы машиноведения : материалы Междунар. научно-техн. конф.* – Гомель, 2004. – С. 133.

УДК 621.391.82.016.35

## СПОСОБ ПОДСТРОЙКИ ПОРОГА СРАБАТЫВАНИЯ КОРРЕЛЯЦИОННОГО ПРИЕМНИКА ПОД СООТНОШЕНИЕ СИГНАЛ–ШУМ В КАНАЛЕ СВЯЗИ

В. Н. Гарбуз

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Применение M-последовательностей [1, с. 54] в системах связи, таких как GPS, CDMA, системы синхронизации сейсмических источников позволяет повысить надежность связи. Для приема M-последовательности эффективно применяют корреляционные приемники [1, с. 86]. Так как соотношение сигнал–шум в канале связи изменяется, то для повышения эффективности работы системы связи предпочтительно использовать корреляционный приемник с порогом срабатывания, изменяющимся в зависимости от условий приема.

Шум на входе корреляционного приемника может либо усилить принимаемый сигнал, либо исказить его, либо иметь уровень, недостаточный для искажения сигнала. Вероятность искажения шумом одного символа передаваемого сигнала в зависимости от соотношения  $x$  ( $x = \frac{P_S}{P_N}$ ) мощностей сигнала  $P_S$  и шума  $P_N$  определяется с помощью интеграла вероятностей ошибок:

$$p(x) = \frac{1}{2} \left[ 1 - \Phi \left( \sqrt{\frac{P_S}{P_N}} \right) \right], \quad (1)$$

где  $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{y^2}{2}} dy$  – интеграл вероятности Гаусса [2, с. 360].

Следовательно, количество  $k$  правильно принятых приемником символов передаваемой M-последовательности с разрядностью  $n$  является случайной величиной, значение которой зависит от  $x$ . Получено распределение этой случайной величины:

$$P_n(x, k) = C_n^k p(x)^k (1 - p(x))^{n-k}. \quad (2)$$

Вид полученного распределения совпадает с видом биномиального распределения с математическим ожиданием  $M = n \cdot p(x)$  и дисперсией  $D = n \cdot p(x) \cdot (1 - p(x))$  [2, с. 596].

По результатам анализа рассмотренной вероятностной модели искажения передаваемого сигнала шумом предложен способ подстройки порога срабатывания корреляционного приемника. Сначала следует «быстрая» подстройка порога срабатывания, которая заключается в том, что по результатам предыдущего приема количество правильно принятых символов  $k$  приравнивается к  $M$ , а за величину порога принимается значение  $k$ , соответствующее  $M-D$ . Затем в течение нескольких сеансов связи по полученным значениям  $k$  значение  $M$  и  $D$  уточняется статистическими методами, и порог устанавливается по новым найденным значениям  $M$  и  $D$ .

### Литература

1. Тепляков, И. М. Радиолинии космических систем передачи информации / И. М. Тепляков. – Москва : Совет. радио, 1975.
2. Анго, А. Математика для электро- и радиоинженеров / А. Анго ; пер. с франц. под общ. ред. К. С. Шифрина. – Москва : Наука, 1965.

УДК 621.375

**СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ  
МЕТАЛОДЕТЕКТОРА КОРМОУБОРОЧНОЙ ТЕХНИКИ  
ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАТЧИКОВ ХОЛЛА****В. А. Карпов, Д. В. Соболев***Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

В настоящее время имеющиеся средства защиты кормоуборочной техники, реализованные на основе датчиков магнитного поля, не удовлетворяют требованиям современной техники, отличающейся повышенной производительностью.

Работа практически всех существующих в настоящее время металлодетекторов для защиты режущего аппарата кормоуборочной техники основана на использовании в качестве чувствительных элементов индукционных катушек, расположенных на системе постоянных магнитов. Основная проблема, с которой сталкиваются разработчики при использовании таких датчиков – неравномерность чувствительности по ширине (провалы по бокам и в середине), а также недостаточная помехоустойчивость как к ферромагнитным включениям в формующих вальцах, так и к взаимному перемещению основного силового средства и сменных адаптеров во время работы.

Улучшить параметры работы металлодетектора можно путем использования в качестве чувствительных элементов датчиков Холла.

Большинство формующих вальцев имеют в своей конструкции ферромагнитные включения (области деформации немагнитной стали, сварные швы и т. д.), что приводит к возникновению заметных помех и затрудняет детектирование посторонних предметов, поступающих вместе с кормомассой в измельчитель.

При вращении вальцев с частотой  $\omega$  частота появления помех, вызванных сварными швами формующих лопастей, будет в 9 (валец с 9 лопастями) или 12 раз (валец с 12 лопастями) выше (по вальцам, используемым на ПО «Гомсельмаш»), т. е. скорость изменения магнитного потока увеличится в 9 и 12 раз соответственно.

В случае использования в качестве чувствительных элементов металлодетектора индукционных катушек ЭДС помехи ( $E_{\Pi}$ ), наводимая в них, будет в силу закона электромагнитной индукции увеличена в 9–12 раз:

$$E_{\Pi} \sim \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d\Phi(n\omega)}{dt},$$

где  $n$  – количество формующих лопастей.

Таким образом, на выходе металлодетектора наряду с полезным сигналом будет присутствовать в  $n$  раз увеличенный сигнал помехи, затрудняющий задачу корректного детектирования.

Использование датчиков Холла в качестве чувствительных элементов металлодетектора приводит к значительному снижению уровня помех, вызванных сварными швами и неоднородностями материала, из которого изготовлены вальцы. Обусловлено это в первую очередь линейными характеристиками датчиков Холла, т. е. ЭДС на выходе пропорциональна магнитному потоку ( $E \sim \Phi$ ), пронизывающему датчик Холла, а не скорости его изменения как в случае с индукционной катушкой. Соответственно, ЭДС помехи при использовании датчиков Холла будет в  $n$  раз меньше, чем при использовании индукционных катушек.

Кроме того, симметричное распределение элементов Холла по всему сердечнику металлодетектора приводит к равномерной чувствительности устройства по всей области контроля, чего достаточно сложно добиться, используя индукционные катушки.

## ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ТРАНСФОРМАТОРНОГО ДАТЧИКА

А. И. Никеевков, В. В. Щуплов

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Необходимость измерения комплексной взаимной индуктивности возникает при построении первичных датчиков преобразующих перемещения плунжера в электрический сигнал. При этом на точность влияют квадратурная трансформаторная помеха и угол потерь от тока возбуждения в первичной обмотке дифференциально-трансформаторного датчика (ДТД). Для повышения точности в преобразователе необходимо повернуть оси системы измерений на угол потерь  $\varepsilon$ , провести фазочувствительное выпрямление и осуществить деление на величину тока возбуждения.

На рис. 1 представлена структурная схема преобразователя выходного сигнала ДТД, свободная от влияния рассмотренных факторов.

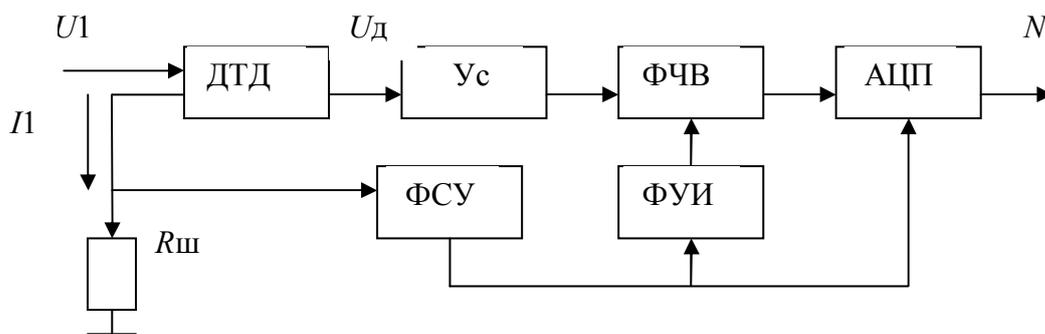


Рис. 1. Структурная схема устройства:

$U_1$  – сетевое напряжение;  $I_1$  – ток первичной обмотки;  $R_{ш}$  – сопротивление шунта; ДТД – дифференциально-трансформаторный датчик;  $U_d$  – напряжение на выходе датчика;  $U_c$  – усилитель; ФЧВ – фазочувствительный выпрямитель; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ФСУ – фазосдвигающее устройство на угол потерь  $\varepsilon$ ; ФУИ – формирователь управляющих импульсов

Выходное напряжение датчика описывается выражением [1]:

$$U_d = I_1 \cdot \omega \cdot \{ M_\varepsilon \cdot \cos(\varepsilon) \cdot \exp[j \cdot (\pi/2 - \varepsilon)] + M_0 \cdot \exp(-j \cdot \varepsilon) \},$$

где  $M_\varepsilon$  – эквивалентное значение взаимной индуктивности, определяемое положением плунжера;  $M_0$  – остаточная взаимная индуктивность, соответствующая положению плунжера на магнитной нейтрали;  $\omega$  – угловая частота питающего напряжения.

Выходной сигнал  $N$  АЦП преобразователя пропорционален величине  $M_\varepsilon$  и соответственно положению плунжера ДТД.

### Литература

1. Мелик-Шахназаров, А. М. Компенсационные измерительные устройства систем автоконтроля на переменном токе / А. М. Мелик-Шахназаров, И. Л. Шейн, Е. Г. Абаринков. – Москва : Энергия, 1971.

УДК 62-83:621.313.333

**АНАЛИЗ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА  
НА БАЗЕ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ  
«АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ – КОЛОКОЛ»**

**В. И. Луковников, Ю. А. Рудченко**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

В ряде областей науки, техники и производства, где требуется осуществлять колебательное движение рабочего органа машины без повышенных требований к качеству колебаний, более перспективным оказывается применение автоколебательных режимов работы электродвигателей. Это, например, испытательные стенды пружинных подвесок и других упругих элементов, станки-качалки, аппараты спортивной вибростимуляции, игрушки, рекламные качающиеся устройства, колокола и т. д.

Для получения звучания в колоколах используют три основных способа. Первый осуществляется путем раскачивания языка и соударения его с неподвижной чашей колокола, при втором способе производят раскачивание чаши и соударение ее со свободно подвешенным языком колокола, третий способ получения звучания заключается в ударах молотом по внешней стороне чаши. В настоящее время в мире наиболее распространенным является второй способ, не смотря на большие затраты энергии, так как улучшает силу и качество звучания благодаря пространственному колебанию чаши.

Для раскачивания колоколов в настоящее время используется электрический привод, который выполняется на основе электромагнитов, электродвигателей вращательного движения и линейных асинхронных двигателей дугового типа [1]. Чаше всего применяется электродвигатель вращательного движения с механическим преобразователем (редуктором), что усложняет кинематическую схему привода, приводит к увеличению потерь энергии в редукторе и уменьшению надежности. К недостаткам привода с линейным двигателем, прежде всего, следует отнести низкие энергетические показатели из-за наличия краевых эффектов.

Есть еще одна возможность построения электропривода колокола – на основе асинхронного двигателя (АД), работающего в автоколебательном режиме. Такой способ построения исключает необходимость использовать редуктор, т. к. ротор двигателя в автоколебательном режиме совершает возвратно-вращательное движение, частота которого определяется массогабаритными характеристиками двигателя и колокола, а амплитуда колебаний зависит от параметров электропитания двигателя [2].

В результате проделанной работы:

- разработана схема соединения обмоток асинхронного двигателя для его работы в автоколебательном режиме;
- создана математическая модель электропривода чаши колокола;
- проведено аналитическое исследование математической модели, построены временные диаграммы движения чаши и языка колокола, которые можно использовать для проектирования подобных электроприводов.

Литература

1. Шымчак, П. Применение линейных двигателей для установок колебательного движения / П. Шымчак // Электротехника. – 2006. – № 6. – С. 10–14.
2. Луковников, В. И. Анализ электромеханической автоколебательной системы «асинхронный электродвигатель – упругий элемент» / В. И. Луковников, Ю. А. Рудченко // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2003. – № 1. – С. 61–66.

УДК 621.311

**НЕПРЕРЫВНЫЙ КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ  
УСТРОЙСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОДНАГРУЗКОЙ****О. Г. Широков, М. А. Прохорчик***Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Устройство регулирования поднагрузкой (РПН) предназначено для автоматического регулирования напряжения на вторичной обмотке силового трансформатора под нагрузкой. Отказы устройства РПН являются причинами аварийных процессов в силовом трансформаторе (СТ), вызывающих тяжелые повреждения обмоток СТ.

Для определения технического состояния устройства РПН силового трансформатора в настоящее время необходимо выполнить следующие приемы: отключить СТ от сети, слить масло из бака СТ, вскрыть бак СТ, вынуть устройство РПН, произвести осциллографирование и визуальный осмотр контактора РПН. Износ контактов определяется визуально, а также по данным осциллографирования, а именно по длительности фаз переключения контактора.

Основной задачей данной работы является разработка методов контроля, необходимых для определения технического состояния РПН, для реализации которых не требуется вывод СТ из работы.

Система контроля в реальном времени должна указать на необходимость проведения профилактического ремонта. Для этого необходима информация о длительности фаз переключения контактора РПН. Чтобы расширить возможности системы, а также повысить достоверность решения, в данной работе предлагается дополнить номенклатуру контролируемых параметров следующими: контроль разрыва тока, контроль синхронности переключения в фазах, контроль сопротивления токоограничивающих сопротивлений.

Суть предлагаемых методов заключается в следующем. Во вторичные цепи релейной защиты и автоматики СТ, без изменения существующей принципиальной схемы, подключается аналого-цифровой преобразователь и персональный компьютер. Исходными данными для диагностирования являются мгновенные значения токов и напряжений в обмотках СТ и двигателя привода РПН. Исходные данные после аналого-цифрового преобразователя поступают в персональный компьютер, где подвергаются математической обработке, которая позволяет идентифицировать мгновенную топологию электрической схемы контактов контактора РПН в процессе переключения для каждой фазы СТ. Кроме того, параллельно вычисляется значение нагрузки на валу электродвигателя привода РПН.

Информация о длительности коммутаций контактов контактора РПН позволит судить о синхронности работы устройства РПН в фазах СТ, о износе контактов контактора и наличии разрывов тока в процессе переключения. Значение нагрузки на валу электродвигателя позволит судить о техническом состоянии механической части устройства РПН.

Основные достоинства предлагаемых методов заключаются в том, что не требуется установка дополнительных устройств на СТ, а цифровой осциллограф подключается во вторичные измерительные цепи релейной защиты и автоматики, т. к. предлагаемые методы реализованы программно. Отсутствует необходимость ввода в программу априорной информации о контролируемом СТ, т. к. приведенные в данной работе методы основаны на идее параметрической идентификации и таким образом являются универсальными для всех конструкций РПН, а также типов трансформаторов.

УДК 621.391.82.016.35

## МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ТРУБОПРОВОДЕ С НЕОДНОРОДНЫМ ТОКОМ

Н. И. Вяхирев, В. В. Гизенко, Л. А. Захаренко

Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь

Нарушение изоляции расположенного в земле металлического трубопровода приводит к «растеканию» тока трубы в землю. В результате ток трубопровода становится неоднородным. Неоднородности могут быть продольными, поперечными или какой-либо другой формы. В отсутствии неоднородностей тока магнитное поле внутри трубопровода равно нулю, неоднородность тока приводит к появлению поля.

Неоднородность в поперечном (азимутальном) направлении создается утечкой тока, продольной вдоль трубы. Вдоль трубы ток однороден, а в азимутальном направлении изменяется по закону

$$J(\varphi) = \left[ A_0 + A_1 \left| \cos \frac{\varphi}{2} \right|^m \right] \cdot e^{j\omega t}.$$

Здесь  $A_0$  и  $A_1$  – константы, определяющие величину и размах изменения тока;  $\omega$  – круговая частота;  $\varphi$  – азимутальная координата и  $m$  (положительное число) определяет область неоднородности тока. Начало отсчета по  $\varphi$  совпадает с максимумом тока.

Продольная неоднородность задается линейной функцией. Ток в трубе справа и слева от неоднородности постоянен, в пределах неоднородности линейно зависит от продольной координаты.

Решение уравнений Максвелла позволяет определить все составляющие напряженности магнитного поля внутри трубопровода. Для обеих видов неоднородности рассчитывались радиальная и азимутальная составляющие поля.

Вблизи неоднородности тока имеет место всплеск магнитного поля внутри трубы, причем различные составляющие поля имеют различную зависимость от координат. Это продемонстрировано на рис. 1, где приведены радиальная и азимутальная составляющие напряженности магнитного поля вблизи стенки трубы с током, имеющим поперечную неоднородность.

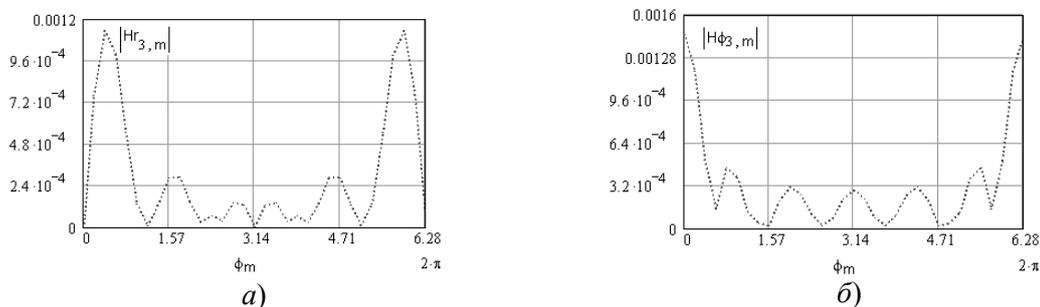


Рис. 1. Напряженность магнитного поля вблизи стенки трубы

Уровень магнитного поля определяется размером и величиной неоднородности тока. На рис. 1 ток трубы составляет 1 А, неоднородность – 1 % от тока трубы,  $m = 400$ , что соответствует реальным размерам неоднородности. Напряженность магнитного поля приводится в А/м.

## СЕКЦИЯ Д. АЭРОГИДРОДИНАМИКА; ПНЕВМО- И ГИДРОСИСТЕМЫ МАШИН И АППАРАТОВ

УДК 621.878.6

### СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГОЗАТРАТ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГИДРОФИЦИРОВАННЫХ МОБИЛЬНЫХ МАШИН

А. Д. Бужинский

*Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Беларусь*

Применение гидропривода в строительно-дорожных машинах позволяет повысить эффективность их эксплуатации. Однако наряду с преимуществами, которые дает гидросистема, она требует значительных затрат мощности двигателя на привод. При этом учитывая, что КПД гидросистем находится в пределах 70 % возникает вопрос о повышении эффективности их функционирования.

Одним из способов снижения энергозатрат на привод гидросистемы может быть исключение периодов работы гидросистемы в транспортном режиме эксплуатации машины. В результате того что приводные валы насосов имеют жесткую кинематическую связь с коленчатым валом двигателя, в периоды неиспользования гидросистемы они продолжают перекачивать рабочую жидкость из гидробака через распределитель и фильтр обратно в гидробак, затрачивая часть мощности двигателя на преодоление гидравлических сопротивлений. Для некоторых машин, таких как скрепер, периоды работы в транспортном режиме, когда гидросистема рабочего оборудования не используется, занимают значительную часть рабочего цикла, что ведет к необоснованным затратам мощности и, как следствие, неоправданному (дополнительному) расходу топлива. Аналогично и для любой другой гидрофицированной мобильной машины, при работе которой имеют место продолжительные транспортные режимы работы, в которых гидросистема машины не используется.

С целью оценки энергозатрат на привод гидросистем машин в транспортном режиме работы были рассмотрены скрепер МоАЗ-6014 и погрузчик МоАЗ-4048, выпускаемые на Могилевском автомобильном заводе (филиале БелАЗ). После анализа конструкторской документации гидросистем указанных машин произведены расчеты потерь давления, которые возникают в результате течения рабочей жидкости.

Потери давления в зависимости от подачи насосов (которая зависит от частоты вращения коленчатого вала двигателя) могут достигать до 1,24 МПа для скрепера и до 2 МПа для погрузчика. Это в свою очередь приводит к затратам мощности, которые могут достигать 7,4 кВт, что составляет 3,4 % от номинальной мощности двигателя, установленного на скрепере. Для погрузчика затраты мощности могут составить величину до 20 кВт, что эквивалентно 9,1 % номинальной мощности двигателя.

Далее затраты мощности пересчитывались на затраты топлива через удельный расход топлива. В результате, в зависимости от частоты вращения коленчатого вала двигателя и, как следствие, от подачи насосов затраты топлива на преодоление сопротивлений в гидросистеме скрепера при работе в транспортном режиме могут достигать 1,9 л/ч (6–7 % нормативного расхода топлива). Для погрузчика эта величина составляет 5 л/ч (17–18 % нормативного расхода топлива).

Как видно, затраты топлива на привод гидросистемы в транспортном режиме работы могут достигать значительных величин, поэтому исключение данных затрат может позволить повысить топливную экономичность машины и снизить эксплуатационные издержки. Это может быть осуществлено путем применения систем, позволяющих отключать насосы в периоды неиспользования гидросистемы, либо устанавливающих их на 0-подачу (в случае использования регулируемых аксиально-плунжерных насосов).

УДК 620.92;532.533

### **АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ КАЧЕСТВО ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С ПОСТОЯННОЙ ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ ВЕТРОТУРБИНЫ**

**Ю. А. Кашин, М. И. Жадан**

*Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины, Беларусь*

**Р. Е. Кашина**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Ветроэлектрические установки (ВЭУ), используемые для снабжения энергией небольших энергосистем, обычно применяются в сочетании с другими более надежными электроэнергетическими источниками. Такими дополнительными, применяемыми в безветрие энергоисточниками являются дизельные или тепловые электростанции и объединяющие их ЛЭП, в которые при достаточно энергичном ветре сбрасывается избыток вырабатываемой ВЭУ электроэнергии [1].

Необходимая для питания такой энергосистемы электросовместимость ВЭУ и резервного источника энергии наиболее просто достигается при работе ВЭУ с определенной постоянной частотой вращения ветротурбин.

В современной ветроэнергетике наибольшее распространение получили одно-роторные ВЭУ, с неподвижной трубчатой мачтой, энергогенераторы которых имеют общий вал с электромотором, питаемым от резервного источника энергии. Общими недостатками подобных ВЭУ является высокая материалоемкость, большое ветровое сопротивление мачты и низкая эффективность использования энергии ветра.

Используя нашу математическую модель ветротурбины [2] и методику оптимизации ВЭУ в условиях прогнозируемой ветровой обстановки [3], критерием оптимальности ВЭУ принято отношение ожидаемой средней мощности установки к массе ее опорной мачты. В данной работе выполнено теоретическое исследование повышения эффективности ВЭУ, параллельно работающих с резервными источниками электроэнергии за счет удвоения количества роторов, за счет улучшения обтекаемости мачты и за счет оптимизации радиального распределения угла атаки лопастей в рабочей зоне ветротурбины. Приведены результаты численного эксперимента по подбору оптимальных параметров ВЭУ для трех крыловых профилей лопастей: N.A.C.A. 6512, N.A.C.A. 6406, N.A.C.A. 6506 [4]. Показано существенное влияние аэродинамического качества профилей лопастей и опорной мачты на энергетическую эффективность ВЭУ.

Литература

1. Твайделл, Дж. Возобновляемые источники энергии / Дж. Твайделл, А. Уэйр. – Москва : ЭнергATOMиздат, 1990. – 392 с.
2. Кашин, Ю. А. Автономная ветроэнергетическая установка (АВЭУ) с максимальным уровнем конверсии энергии ветра. Математическая модель ветротурбины / Ю. А. Кашин, Р. Е. Кашина // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2004. – № 3. – С. 59–64.
3. Кашин, Ю. А. Естественная задача оптимизации параметров проектируемой автономной ветроэнергетической установки / Ю. А. Кашин, И. В. Сафонов, Р. Е. Кашина // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2007. – № 1. – С. 53–61.
4. Eastman N. Jacobs The characteristics of 78 related airfoil sections from test in the variable-density wind tunnel / Eastman N. Jacobs, Kenneth E. Ward, Robert M. Pinkerton. – T.R. № 460, N.A.S.A., 1932. – P. 299–354.

УДК 621.225.7:621.822.572

## ИССЛЕДОВАНИЕ УТЕЧЕК ЖИДКОСТИ В ПОРШНЕВЫХ ПАРАХ ГИДРОМАШИН

Н. Н. Михневич, А. В. Михневич

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Во многих гидравлических машинах конструктивно необходимы малые зазоры, без которых невозможна их нормальная работа. Однако наличие зазоров ведет к неизбежным утечкам рабочей жидкости, что сказывается на важных эксплуатационных характеристиках гидромашин. Кроме того, течение жидкости в малых зазорах обладает качественным своеобразием и может существенно отличаться от расчетного.

В работе приведены результаты исследования течения гидравлических жидкостей в радиальных зазорах поршневых пар на экспериментальной установке, моделирующей как статические, так и динамические условия работы поршневой пары. Установка содержит насос с гидравлическим мультипликатором, позволяющим получать давление до 120 МПа. Возвратно-поступательные (осциллирующие) движения штока создавались специальным виброприводом.

Анализ полученных экспериментальных результатов показывает закономерное нарастание величины утечек при увеличении давления до некоторого определенного предела. В опытах с неподвижным штоком с некоторых значений давления (20–50 МПа) происходит резкое уменьшение величины утечек и последующее их более медленное нарастание с иной закономерностью. При увеличении радиального зазора в поршневой паре значение максимума утечек, с которого начинается резкое их уменьшение, смещается в сторону более высоких значений рабочего давления.

Расчет течения рабочей жидкости, в частности утечек, в поршневых парах гидромашин основан на закономерностях классической ньютоновской гидродинамики. Теоретические (расчетные) результаты удовлетворительно согласуются с экспериментальными результатами только до определенных значений давления. При дальнейшем увеличении давления наблюдается аномальное поведение жидкости, выраженное в резком уменьшении утечек через радиальный зазор, исследованной в статических условиях поршневой пары. При увеличении зазора закономерность ньютоновской гидродинамики сохраняется до более высоких давлений.

Обнаруженные явления при течении жидкости в малых зазорах поршневых пар могут быть объяснены явлением облитерации малых зазоров.

При осциллирующих движениях штока аномальных изменений утечек жидкости через зазоры поршневых пар не обнаружено. Осциллирующие движения штока приводят к разрушению облитерационных (упорядоченных надмолекулярных) структур. В этом случае течение жидкости в радиальном зазоре поршневой пары удовлетворительно согласуется с закономерностями ньютоновской гидродинамики во всем исследованном диапазоне давлений.

Обнаружено, что при достижении давления, примерно соответствующего аномальному изменению утечек в статических условиях, потребляемая вибратором мощность резко возрастает, что свидетельствует о необходимости дополнительного подвода энергии на разрушение образующихся облитерационных структур.

Обнаруженные явления резкого уменьшения утечек и увеличения потребляемой мощности на преодоление трения в поршневых парах необходимо учитывать при проектировании современных гидромашин и гидростатических устройств высокого давления.

УДК 621.225.5

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ ОПОР ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

А. В. Михневич, Н. Н. Михневич

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Надежность и долговечность объемных гидромашин в значительной степени определяются состоянием гидростатических опор. В соответствии с наметившейся тенденцией форсирования гидромашин по давлению рабочее давление в их гидростатических опорах может достигать 60–80 МПа, вызывая значительные деформации контактирующих поверхностей.

С учетом упругой деформации контактных поверхностей под воздействием давления жидкости толщина смазочного слоя в зазоре между башмаком и рабочей поверхностью опоры  $h = h_0 + kp$ , где  $h_0$  – величина зазора по внешней окружности башмака;  $p$  – давление на расстоянии  $r$  от оси опоры;  $k$  – коэффициент пропорциональности, зависит от геометрии деформируемого тела и его упругих свойств.

Решено уравнение Навье-Стокса применительно к данному случаю течения жидкости в зазоре при условии, что вязкость жидкости зависит от давления по закону  $\mu = \mu_0 e^{\alpha p}$ , где  $\alpha$  – пьезокоэффициент вязкости, и получено распределение давления в виде неявной зависимости:

$$\frac{A(p) - A(0)}{A(p_0) - A(0)} = \frac{\ln \frac{R_2}{r}}{\ln \frac{R_2}{R_1}}, \quad (1)$$

где  $A(p)$  – полином третьей степени давления  $p$ ;  $A(p_0)$  – значение  $A(p)$  при  $p = p_0$ ;  $A(0)$  – значение  $A(p)$  при  $p = 0$ ;  $R_1$  и  $R_2$  – радиусы опорного кольца башмака.

Определяемое выражением (1) распределение давления в зазоре гидростатической опоры при наличии упругих деформаций существенно отличается от распределения давлений в недеформируемом зазоре.

Численным интегрированием распределения давления, определяемого выражением (1), по грузонесущей поверхности башмака получены оценки отжимающей силы гидростатических опор различных геометрических размеров. Полученные оценки, а также результаты стендовых испытаний гидростатических опор аксиально-поршневых гидромашин показали, что при невысоких давлениях рабочей жидкости (до 30 МПа) упругие деформации контактных поверхностей опор практически не влияют на их грузонесущую способность. То есть в этом случае можно пользоваться расчетными зависимостями, полученными без учета деформируемости контактных поверхностей.

При более высоких давлениях расчеты гидростатических опор без учета деформируемости контактных поверхностей дают существенно заниженные (на 20–30 %) значения отжимающей силы. Расчеты отжимающей силы гидростатических опор с учетом распределения давления (1) дают значения, практически совпадающие с результатами стендовых испытаний. Отсюда следует, что упругая деформируемость контактных поверхностей приводит к увеличению отжимающей силы и большей возможности нарушения герметичности стыка гидростатической опоры.

Таким образом, при разработке объемных гидромашин высокого давления необходимо учитывать упругую деформируемость контактных поверхностей.

**СЕКЦИЯ Е. ВИБРОДИАГНОСТИКА,  
ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ,  
ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ  
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

УДК 621.313.001.24

**ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫЕ ДВИГАТЕЛИ –  
БУДУЩЕЕ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

**Н. В. Грунтович**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

С целью экономии электрической энергии широко применяется регулируемый электропривод. Как правило, на старые асинхронные двигатели устанавливаются частотные преобразователи. Это делается с целью экономии денежных средств на предприятии. Экономия получается на этапе закупки, а в процессе эксплуатации предприятие несет определенные потери. Несмотря на получаемую экономию электроэнергии, двигатели работают с пониженным КПД, а срок службы сокращается от повышенной вибрации из-за увеличения магнитных потерь. Эти недостатки отсутствуют у вентильно-индукторных двигателей. Они обладают следующими характеристиками:

- гарантированная перегрузочная способность двигателя в пусковом и экстремальных режимах и возможность реализации плавного пуска без превышения моментов и токов над номинальными значениями;
- энергосберегающее сохранение высокого значения КПД, близкого к номинальному (для крупных машин 97–98 %), в часто встречающихся режимах работы двигателей с неполной нагрузкой на валу от 20 %;
- более высокий КПД преобразователя (инвертора) за счет работы на низкой частоте 100–300 Гц в отличие от инвертора асинхронного двигателя, работающего в режиме ШИМ на частотах выше 2000 Гц;
- высокое быстродействие за счет малой инерционности безобмоточного ротора и полностью шихтованной ферромагнитной системы статора и ротора;
- нет обмена с сетью реактивной мощности;
- простота конструкции магнитопроводов статора, ротора и катушечных обмоток двигателя, не имеющих пересекающихся лобовых частей, обеспечивает высокую технологичность, низкие материалоемкость, трудоемкость и стоимость при изготовлении, повышенные надежность, долговечность и ремонтпригодность (достаточно заменить одну катушку, вышедшую из строя);
- ротор двигателя не содержит обмоток, а потери в стали ротора незначительны, поэтому от него не требуется отвод тепла;
- для минимизации уровня шумов и вибраций пульсации вращающего момента двигателя без ущерба для КПД могут быть сведены к 2 % и менее оптимизацией управления временными параметрами импульса напряжения и геометрии двигателя;
- высокая надежность силового инвертора, обусловленная схемными решениями, исключаяющими в нем возможность сквозных коротких замыканий;
- повышенная живучесть ВВП за счет магнитной независимости фазных обмоток в двигателе и электрической независимости фазных блоков в преобразователе питания,

поэтому повреждение какой-либо одной или нескольких фаз приводит не к полной потере работоспособности привода, как у АД, а к частичному снижению мощности;

– секционированная обмотка электродвигателя может быть запитана от двух разных вводов для обеспечения бесперебойности работы, например, при подаче воды в котел с гарантированным статизмом скорости не более 5–7 %.

Высокая надежность электрических двигателей обусловлена тем, что даже при выходе из строя четырех катушек в обмотке статора двигатель будет работать, правда, с несколько заниженной мощностью. Тем не менее, это очень важно для обеспечения высокой надежности технологических линий.

УДК 621.313.001.24

### ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И ЭКОНОМИИ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ ОБЪЕКТОВ СОЦИАЛЬНОЙ СФЕРЫ

**В. В. Бахмутская**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Контроль за эффективным использованием ТЭР на промпредприятиях осуществляется с использованием показателей энергоэффективности, одним из которых является целевой показатель по энергосбережению. Все перечисленные показатели ЭЭФ являются отчетными и контролируются органами Государственного управления.

Целевой показатель по энергосбережению – интегральный показатель ЭЭФ, характеризующий производственную деятельность всего ПП по реализации мер, направленных на эффективное использование и экономное расходование ТЭР на всех стадиях его потребления, определяется из выражения

$$\text{ЦП} = \frac{\text{ОЭЗ}^{\circ}}{\text{ОЭЗ}_{\text{с.у}}^{\circ}} \cdot 100 - J_{\text{ПП}}, \%$$

где  $\text{ОЭЗ}^{\circ}$  – обобщенные энергозатраты отчетного периода, т у. т.;  $\text{ОЭЗ}_{\text{с.у}}^{\circ}$  – обобщенные энергозатраты базисного периода, приведенные к сопоставимым условиям отчетного периода, т у. т.;  $J_{\text{ПП}}$  – темпы изменения объемов производства промышленной продукции в сопоставимых ценах, %.

Для обеспечения сопоставимости условий функционирования ПП в основном необходимо учитывать:

- температуру окружающей среды;
- изменение характеристик сырья;
- изменение состава и мощностей технологического оборудования.

Таким образом, существующие показатели оценки энергетической эффективности не всегда позволяют достоверно оценивать и прогнозировать ЭЭФ современных ПП, работающих в условиях часто изменяющейся производственной программы.

Однако данные показатели для объектов социальной сферы являются неприемлемыми из-за ее специфики и особенностей электропотребления.

В качестве показателей энергоэффективности предлагается удельный расход электроэнергии на единицу площади. Определение энергоэффективности потребителя по этому параметру помогает судить о целесообразности дальнейшего занятия

энергосбережением. Например, для Ирландии указанный критерий ЭЭФ имеет следующую шкалу, т у. т./м<sup>2</sup>:

отличное  $J_{уд} < 0,017$ ;  
хорошее  $J_{уд} = 0,017-0,021$ ;  
удовлетворительное  $J_{уд} = 0,021-0,027$ ;  
плохое  $J_{уд} = 0,027-0,034$ ;  
очень плохое  $J_{уд} = 0,034$ .

Основным потребителем электроэнергии для объектов социальной сферы является система освещения, а тепловая энергия используется на отопление и горячее водоснабжение. Выполнив необходимую замену осветительных установок, утеплив здания и сооружения, объекты соцкультбыта исчерпают свой потенциал энергосбережения и не смогут дальше выполнять целевой показатель по энергосбережению.

УДК 621.311:658.26:35.08

## КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ ЭНЕРГЕТИКИ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

**А. В. Праховник, Е. Н. Иншеков, В. А. Попов**

*Институт энергосбережения и энергоменеджмента НТУУ «КПИ»,  
г. Киев, Украина*

Вопросы энергосбережения, повышения энергетической эффективности систем и комплексов приобретают особую актуальность в условиях поиска решений при наличии многих критериев и ограничений технико-экономического, социального и экологического плана. Учет всех этих факторов, условий и ограничений возможен в рамках разработки концепции построения устойчивого развития общества. Данный подход характеризует гармоничный, сбалансированный, бесконфликтный прогресс всей цивилизации, отдельных стран или их групп. При этом в процессе инновационного, интенсивного (но не экстенсивного) экономического развития стран одновременно позитивно решается комплекс проблем: сохранение окружающей среды, ликвидация эксплуатации, бедности, всех видов дискриминации. Для устойчивого развития общества должны быть обеспечены соответствующие условия функционирования всех его подсистем, среди которых одной из важнейших является энергетика.

Возникла необходимость формирования новой современной концепции и стратегии развития электроэнергетики, в максимальной степени учитывая экономические, политические, социальные, географические и территориальные особенности страны. При этом предлагаемые решения не должны требовать чрезмерных одномоментных капитальных вложений, сравнительно быстро давать реальную отдачу, ориентироваться на наиболее передовые технологии. Такой подход базируется на вовлечении в процесс энергообеспечения множества небольших децентрализованных источников энергии (распределенная генерация), а не ориентируется исключительно на крупные централизованные энергетические системы.

В этой связи в Европейском Союзе принята новая платформа энергообеспечения European Technology Platform-SmartGrids, базирующаяся на преимуществах указанных систем энергоснабжения, которые являются наиболее выгодными для обеспечения энергопотребления с позиций безопасности, надежности (бесперебойности), качества поставляемой энергии и предоставления энергетических услуг, доступных по цене и привлекательных по экологическим последствиям (в первую очередь по выбросам CO<sub>2</sub>), т. е. создание интегрированных систем, основанных на распределен-

ной (в том числе альтернативной) генерации, с последующим увеличением их доли во всей энергосистеме.

Предлагаемая концепция построения энергетики устойчивого развития включает в себя следующие ключевые элементы: использование источников распределенной генерации на базе органического топлива; применение распределенной генерации на базе возобновляемых источников энергии; модернизация источников генерации и совершенствование управления централизованной системой энергоснабжения; непосредственно проекты эффективного энергопотребления.

Рассмотрены такие варианты использования распределенной генерации, как базовое электроснабжение, совместное электро- и теплоснабжение (когенерация), покрытие пиковых нагрузок, обеспечение более высокого уровня надежности электроснабжения и качества электроэнергии, компенсация недостаточной пропускной способности линий электропередач или распределительных систем, генерация вспомогательной мощности, управление реактивной мощностью и регулирование напряжения.

Очевидно, что пересмотр нормативно-правовой базы, либерализация энергорынка с выходом в конечном итоге на тарифы реального времени, является одним из ключевых моментов предлагаемого реформирования энергетики. В сложившихся условиях необходимо ориентироваться на отечественные разработки, создаваемые с учетом передового зарубежного и собственного опыта.

УДК 621.311

## **ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ, ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ И СООРУЖЕНИЙ**

**Ю. Л. Василевский**

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

В связи с актуальностью проблем энергосбережения в Республике Беларусь необходима разработка методик, позволяющих прогнозировать и оптимизировать потребление во многих отраслях народного хозяйства и в промышленности. Одной из таких отраслей является строительство. При проектировании промышленных и гражданских зданий необходимо еще на стадии проектирования определять количество электрической и тепловой энергии, которое будет потрачено за период строительства данного объекта. Этот показатель зависит от многих факторов: от конструктивной схемы и системы здания, технологии монтажа и монтажных циклов, используемых в процессе монтажа электропотребляющих механизмов, и т. д. Для каждого здания с учетом периода и сроков строительства, конструктивных особенностей и используемых механизмов можно подобрать соответствующие технологии монтажа таким образом, чтобы потребление энергии в процессе строительства было наименьшим.

Наиболее крупным потребителем электрической энергии на строительной площадке в зимних условиях является прогрев монолитного бетона (железобетона). Количество прогреваемого бетона для каждого конкретного объекта зависит от технологии монтажа, конструктивной схемы и системы здания. Например, если мы строим крупноблочное (крупнопанельное) здание или здание с бескаркасной (стеновой) системой, то количество используемого бетона, а следовательно, и электроэнергии, затрачиваемой на прогрев этого бетона, расходуется в среднем в 3–4 раза меньше, чем при монтаже здания с бескаркасной системой методом подъема перекрытия.

Однако при проектировании здания, выборе его типа и конструкции учитываются целый ряд факторов, определяющих назначение будущего здания, его технические характеристики, трудоемкость работ, внешний вид и т. д. Среди этих показателей количество электроэнергии, затрачиваемое на строительство здания (сооружения), естественно не будет определяющим. Но при проектировании микрорайонов или разработке новой серии зданий электропотребление строительной площадки при строительстве здания следует учитывать, т. к. это один из факторов, влияющих на стоимость строительства.

Как правило, наиболее оптимальными с точки зрения потребления энергии являются здания, не имеющие монолитных перекрытий или стен.

Расход электроэнергии при строительстве зданий и сооружений во многом зависит и от периода и сроков проведения работ, а это значит от температуры наружного воздуха и влажности.

Наиболее оптимальными сроками строительства является период с конца марта по конец октября. В этот период температура наружного воздуха в большинстве случаев составляет выше  $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$  и, следовательно, бетонные работы можно выполнять без электропрогрева либо минимизировать его использование.

Однако в связи с тем, что строительство в Республике Беларусь ведется круглый год, то для выполнения работ в зимний период необходимо выбрать те объекты, которые требуют наименьшего расхода электроэнергии при прогреве бетона. Также следует выбирать способы прогрева, требующие наименьшего расхода электроэнергии на один кубический метр железобетона. Для уменьшения электропотребления на строительных площадках следует отказаться от сушки оштукатуренных стен с помощью электрообогревателей.

УДК 532.528

## ПОСТРОЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ МОДЕЛЕЙ УДЕЛЬНОГО РАСХОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Е. Л. Шенец, П. М. Колесников

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Оценить структуру удельных расходов топливно-энергетических ресурсов, выделить из них базовые, дать качественную и количественную оценку (по продолжительности) их эффективности возможно на основе структурных моделей удельного расхода электрической энергии, построенных с применением аппарата кластерного анализа (в одномерном пространстве признаков).

Кластерный анализ суточных значений удельных расходов топливно-энергетических ресурсов производится в соответствии с алгоритмом:

1. Количественные характеристики признака рассматриваются как отдельные классы.
2. Два ближайших класса объединяются, и рассчитывается расстояние от этого

класса до остальных по выражению  $R_{KjKi} = \sqrt{(M_{Kj} - M_{Ki})^2}$ , после чего определится

значение внутриклассового коэффициента вариации:  $V = \left( \frac{\sigma_{Ki(j)}}{M_{Ki(j)}} \right) \cdot 100\%$ , где  $M_{Kj}$ ,  $M_{Ki}$  –

средние значения по классам  $K_j$  и  $K_i$ ;  $\sigma_{Ki(j)}$  – среднее квадратическое отклонение по классам  $K_j$  и  $K_i$ .

Каждый сформированный класс характеризуется средней величиной кластеризуемого параметра, количеством суток вошедших в него и величиной коэффициента вариации исследуемого параметра. Классы с наименьшим расстоянием объединяются вновь. Процесс повторяется до тех пор, пока не образуется один единственный класс. Принято разбиение в 10 классов из расчета, что коэффициент вариации базисного класса не превышает 5%. Если по оси ординат откладывать средние значения параметра классификации по каждому классу, а по оси абсцисс количество суток, вошедших в каждый класс, то в результате получим структурную модель исследуемого параметра за исследуемый период времени. Структурные модели суточного удельного расхода электрической энергии позволяют выполнить анализ суточных режимов работы предприятия и его отдельных технологических цехов, процессов с целью определения их энергоэффективности, а также оценить ритмичность работы отдельных производственных цехов, участков, линий. Предельным случаем неритмичного, неотлаженного производства с низкой энергоэффективностью является структурная модель удельного расхода ЭЭ с «дроблением ступеней», для которой невозможно выделить базисный класс (режим) (рис. 1).

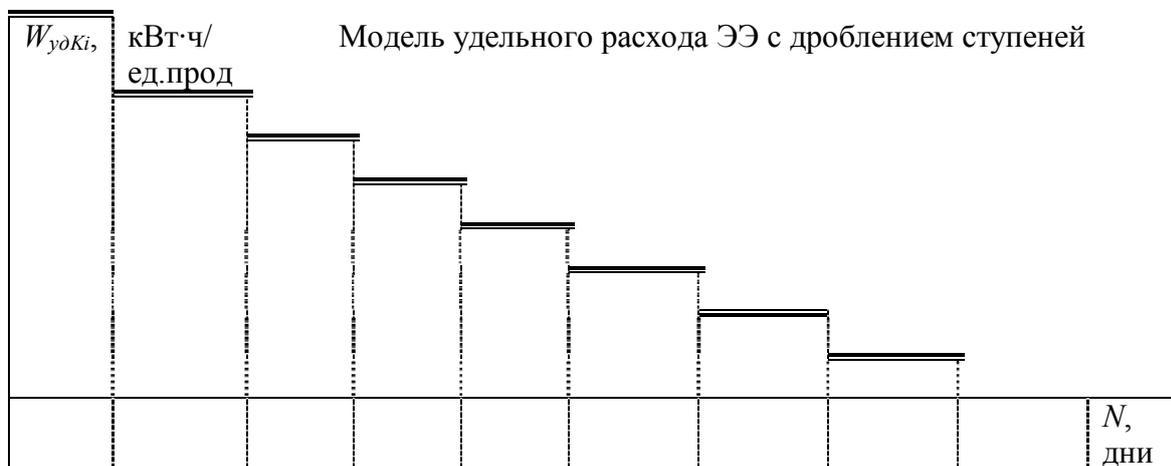


Рис. 1. Структурная модель суточного удельного расхода электропотребления с неотлаженным технологическим процессом

Такое производство требует пристального внимания специалистов – технологов и энергетиков предприятия.

УДК 621

## РАЗВИТИЕ МЕТОДИЧЕСКОЙ БАЗЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКОНОМИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Н. В. Токочакова

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Основной проблемой, сопровождающей проведение энергетического обследования, является отсутствие методической базы, позволяющей как выявлять, так и количественно оценивать потенциал энергосбережения в технологическом процессе промышленных потребителей (ПП). Существуют методики, позволяющие при определенных параметрах режима работы ПП рассчитать достигнутую экономию электрической энергии (ЭЭ) за счет мероприятия в отдельном элементе системы электроснабжения, в отдельном электроприемнике. Эффект от мероприятия в отдельной единице оборудования «растворяется» в общем электропотреблении ПП: при сни-

жении объемов выпуска продукции показатели энергоэффективности могут ухудшаться, несмотря на проводимые мероприятия по энергосбережению.

На рис. 1 представлено изменение экономии ЭЭ при изменении объемов выпуска продукции для технологической линии. В зависимости от технологической загрузки эффект от внедренного мероприятия будет различным. Предлагается подход к оценке экономии ЭЭ за отчетный период с использованием регрессионной аддитивной многофакторной модели электропотребления, построенной на основе суточной статистической информации. В качестве независимых переменных в эту модель включаются технологические факторы, определяющие электропотребление. С использованием модели расход ЭЭ базисного периода приводится в сопоставимые условия с отчетным периодом. Экономия ЭЭ рассчитывается как разница между электропотреблением отчетного и базисного (в сопоставимых условиях) периодов.

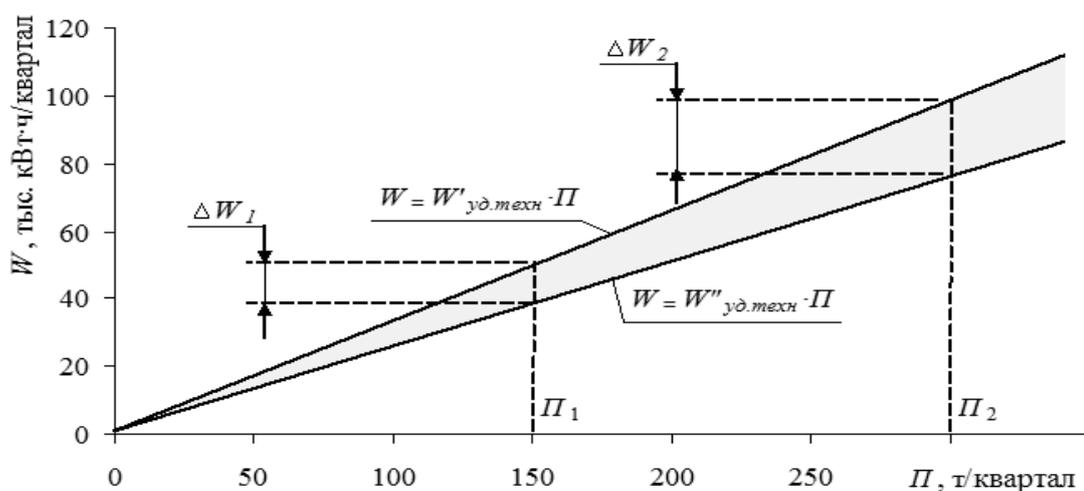


Рис. 1. Изменение ожидаемой экономии ЭЭ в зависимости от загрузки технологической установки

Использование расчетно-статистических моделей позволяет не только дать оценку экономии ЭЭ при существующих условиях функционирования ПП, но и спрогнозировать ее значение, что очень важно при работе ПП в условиях изменяющейся производственной программы.

УДК 621

## КОГЕНЕРАЦИЯ – ТЕХНИЧЕСКАЯ ОСНОВА СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО ПРОГРЕССА СТРАНЫ

**В. К. Судиловский**

*ОАО «Белгорхимпром», г. Минск*

**В. В. Судиловская**

*НПЦ ПЭА БГУИР, г. Минск*

Высокий уровень и продолжающийся рост цен на топливно-энергетические ресурсы требуют принятия неординарных мер в энергетике всех отраслей народного хозяйства республики. Одним из важных направлений переустройства энергетики должна стать когенерация – комбинированное (совместное) производство в одном тепловом двигателе тепловой и электрической энергии. В настоящее время в мировом энергомашиностроении такие двигатели – газовые турбины и газопоршневые агрегаты – достигли высочайшего развития. Они позволяют с каждого сожженного

кубометра природного газа получать до 46 % электроэнергии и до 45 % теплоэнергии при суммарном коэффициенте использования химической энергии топлива свыше 90 %. При этом следует учитывать, что стоимость электрической энергии во всем мире в 2,5–6 раз дороже тепловой, а удельный расход топлива на выработку электроэнергии в 2–2,5 раза ниже лучших в мире конденсационных электростанций.

Это означает, что предприятия, внедряющие когенерационные установки, не только снижают энергоемкость своей продукции и услуг, но по сравнению с лучшими котельными с КПД 94–95 % получают чистую прибыль на 200 % выше, уменьшает экологически вредные выбросы.

В настоящее время республика потребляет свыше 107 млн Гкал в год. В комбинированной выработке в основном на ТЭЦ «Белэнерго» производится только около 24 млн Гкал при выработке 10,7 млрд кВт·ч электроэнергии. Свыше 33 млн Гкал тепловой энергии вырабатывается за счет прямого сжигания природного газа с последующим разбавлением атмосферным воздухом для технологических процессов сушки.

Основная задача по повышению эффективности использования топливно-энергетических ресурсов – максимально приблизиться к развитым странам по уровню энергоемкости ВВП как главного энергетического критерия развития экономики страны. По данным Международного энергетического агентства, энергоемкость ВВП в Беларуси снижена с 800 кг нефтяного эквивалента (н. э.)/1000 дол. США в 1992 г. до 390 кг н. э./1000 дол. в 2005 г. (по паритету покупательской способности). Это значительно ниже, чем в соседних государствах СНГ (России – 470 кг н. э., Украине – 500 кг н. э.), но в 1,5–2,0 раза выше, чем в промышленно развитых странах (Канаде – 270 кг н. э., Финляндии – 230 кг н. э.), что свидетельствует о больших резервах экономии топливно-энергетических ресурсов.

Наибольшую экономию топлива – до 6 млн т у. т. в год можно получить в промышленной энергетике за счет увеличения доли когенерации до 80 млн Гкал в год.

Именно об этом свидетельствует опыт работы таких предприятий в республике, как ОАО «Нафтан», ОАО «ГродноХимволокно», РУП «Белорусский цементный завод» и др.

УДК 621.311:658.26:35.08

## **ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МЕНЕДЖМЕНТА – ИНСТИТУЦИОНАЛЬНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ЭНЕРГЕТИКИ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ**

**Е. Н. Иншеков**

*Институт энергосбережения и энергоменеджмента НТУУ «КПИ»,  
г. Киев, Украина*

Основные угрозы и вызовы существованию современной информационной, постиндустриальной цивилизации непосредственно связаны с вопросами эко- энергетической безопасности и изменения климата, которые идентифицируются международными экспертами как более значимые, чем печально известный «международный терроризм». Общепринятой стратегией решения этих проблем в мире является «устойчивое развитие» экономики, общества, страны, региона и цивилизации в целом. Для обеспечения развития экономики страны с учетом экологических и социально-экономических требований на принципах устойчивости необходимо создание и развитие соответствующих институциональных предпосылок, которые обеспечат такое развитие.

К оценке уровня институционального развития страны относятся: развитие законодательства, его дееспособность (уровень выполнения законов, защищенность

перед административным или экономическим влиянием на решение судов и др.); развитие государственных институтов исполнительной власти; создание и развитие структуры подготовки кадров, образования и повышения квалификации специалистов в понимании заданий устойчивого развития и путей их достижения; и многие другие составляющие. Один из компонентов институциональных предпосылок устойчивого развития – создание и развитие иерархической системы энергетического менеджмента. Это является одним из эффективных путей достижения эко- энергетической безопасности страны и, в свою очередь, положительно характеризует состояние страны с позиций ее общей безопасности и способствует обеспечению условий для устойчивого развития. Задание, методы, рычаги и движущие силы каждой ступени иерархии могут иметь много общего между собой, но и являются специфическими только для данной сферы деятельности.

К основным шагам при создании успешной системы энергетического менеджмента относятся:

- достижение соглашения на проведение деятельности по управлению энергоиспользованием на всех уровнях функционирования объекта, во всех его подразделениях и процессах;
- создание организационной структуры (отдела, управления, службы) энергоменеджмента и назначение руководителя этой службы – энергоменеджера;
- создание, обсуждение и принятие энергетической политики;
- разработка, внедрение и постоянное развитие системы анализа состояния энергоиспользования на объекте, его подразделениях, отдельных технологиях и оборудовании;
- проведение энергетических аудитов для определения достигнутых результатов в энергоиспользовании;
- установление целей и задач энергоиспользования общих для всего объекта и отдельно для его подразделений;
- составление плана действий и работ для всех подразделений, технологий и оборудования, как и для объекта в целом для повышения эффективности энергоиспользования;
- проведение постоянного контроля, верификации исходных данных и достигнутых результатов, информирование о них всех сотрудников;
- внедрение системы мотивации экономии энергии и системы поощрений за достигнутые результаты.

УДК 621

## **МАГНИТНАЯ МУФТА КАК ЭФФЕКТИВНЫЙ СПОСОБ УМЕНЬШЕНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ГЕРМЕТИЧНЫХ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ**

**В. П. Бубнов**

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

**С. П. Субботин**

*ЗАО «Гидродинамика», г. Минск, Беларусь*

Насосы являются одним из самых распространенных видов оборудования и используются практически во всех отраслях народного хозяйства для перекачки как инертных, так и агрессивных сред. Следовательно, эффективность их работы существенно влияет на энергопотребление, т. к. привод насоса, как правило, осуществляется электродвигателем.

В настоящее время в основном используется привод насосов «открытой конструкции», имеющих концевые уплотнения, которые, как показала практика, не всегда

обеспечивают герметичность работы насосного агрегата, что приводит к загрязнению окружающей среды, в том числе и рабочих мест, низким КПД насосов (около 50 %).

Особенно остро проблема эффективности и безопасности работы насосных агрегатов стоит в отраслях химической и нефтяной промышленности, пищевой и коммунальной.

В данной работе рассматривается один из возможных подходов создания герметичных и, на наш взгляд, экологически чистых высокоэффективных насосных агрегатов с магнитной муфтой.

В настоящее время наибольшее применение нашли герметичные насосы двух типов:

- 1) герметичные экранированные электронасосы;
- 2) герметичные насосы с магнитной муфтой.

Герметичные экранированные электронасосы защищенного статора представляют собой симбиоз, состоящий из центробежного насоса и трехфазного индукционного двигателя, причем непосредственная связь существует между гидравлической частью и приводом двигателя.

Альтернативным способом герметичного действия центробежных насосов является привод с помощью муфты постоянного магнита. Особенностью данного типа насоса, по сравнению с первым, является то что в нем вместо электромагнитного привода (трехфазного двигателя) используется коаксиальная центральная вращающаяся муфта, оснащенная постоянными магнитами и, в свою очередь, приводимая нормальным трёхфазным двигателем. В каждой конструкции центробежных насосов с магнитной муфтой можно выделить основные элементы, которые определяют экономичность и надежность их работы: проточные части, разгрузочные устройства, опоры ротора и магнитная муфта.

Теоретические и экспериментальные исследования влияния основных элементов на эффективность герметичного насосного агрегата с магнитной муфтой позволили создать насосы с магнитной муфтой для перекачивания таких продуктов, как стабильный газовый конденсат, нефть и нефтепродукты, диэтиленгликоль, аммиак, воду и водометанольную смесь, бензин, дизельное топливо с расходами от 5 до 1250 м<sup>3</sup>/час при напорах от 30 до 1000 м; для откачки жидкостей из цистерн и технологических емкостей при глубине погружения от 2,7 до 6,2 м работу с подачами от 10 до 200 м<sup>3</sup>/час и напорами до 350 м с КПД более 80 %.

УДК 621.311

## **ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ЭНЕРГОУСТАНОВОК В РЕЖИМАХ ПУСКА И ОСТАНОВА**

**В. П. Бубнов, Е. В. Зеленухо**

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

Энергетические потребности экономики Республики Беларусь удовлетворяются в основном за счет использования органического топлива, большая часть которого импортируется из-за рубежа. Традиционные способы выработки тепло- и электроэнергии в котельных и ТЭС, использование топлива в топливопотребляющих технологических установках сопряжены с разносторонним локальным и глобальным воздействием на окружающую среду. К числу важнейших проблем, связанных со сжиганием органического топлива в первую очередь относятся выбросы в окружающую природную среду вследствие невозможности организации безотходного производства. Характерными для энергетической отрасли загрязняющими веществами являют-

сы оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ), углерода ( $\text{CO}_x$ ), серы ( $\text{SO}_x$ ), твердые вещества. Эти вещества рассеиваются в атмосфере, где претерпевают химические превращения. Качество окружающего воздуха влияет на здоровье людей, развитие животных и растений, состояние зданий и сооружений.

Существующие в настоящее время методики определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух при работе энергоустановок предназначены для определения выбросов в стационарном режиме. Однако изменение структуры потребления электроэнергии, а также изменение организации производства на предприятиях и условий технологического процесса приводят к значительному увеличению неравномерности графиков нагрузок в энергосистеме. Это оказывает существенное влияние на режим работы электростанций и входящего в их состав генерирующего оборудования. Особенно эта проблема может возникнуть после ввода в Республике Беларусь АЭС. Как правило, АЭС должны работать в базовом режиме, а регулирование графика нагрузок осуществляется путем работы ТЭС в переменном, нестационарном режиме, обусловленном переводом из активного состояния в пассивное (с нулевой нагрузкой при любом тепловом состоянии) и обратно или набором (сбросом) нагрузки до разных значений с различной скоростью. К таким режимам работы ТЭС относится пуско-остановочный режим. В процессе пуска-останова резко изменяются экономические, экологические, прочностные характеристики работы оборудования ТЭС. Следовательно, при выборе графика нагрузки или разгрузки электро- и теплоснабжения необходимо учитывать все три фактора.

Многочисленные исследования, касающиеся работы ТЭС в режимах пуска и останова, в большинстве своем базируются на поиске минимальных затрат условного топлива или стоимости топлива. Однако в связи с обострением экологической ситуации важное значение имеет учет фактора воздействия на окружающую среду при работе ТЭС в режимах пуска и останова.

В данной работе рассматривается один из возможных подходов разработки алгоритма пуска энергоустановок, работающих на органическом топливе, учитывающего экологические показатели.

Разработанный алгоритм пуска энергоустановок базируется на определении температуры потока в котле; расчете температуры стенки элементов котла; расчете расхода топлива; определении выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух; расчете экономического ущерба от загрязнения атмосферного воздуха.

УДК 621

## **ФОРМИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ БАЗЫ ДАННЫХ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ ХИМИЧЕСКИХ ВОЛОКОН**

**Д. Р. Мороз**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

В основу моделирования электропотребления предприятий переработки полиэфира заложена статистическая информация, характеризующая фактически существовавшие режимы электропотребления. На стадии моделирования электропотребления, когда еще не известна конечная спецификация модели, необходимо формирование информационной базы данных (ИБД), содержащей значения всех параметров, подлежащих учету на предприятии.

Важной особенностью ИБД, описывающей электропотребление предприятия, и факторов, оказывающих на него влияние, является возможность агрегирования данных по уровням. На рис. 1 приведена схема агрегирования данных по ИБД для одного из предприятий Республики Беларусь.

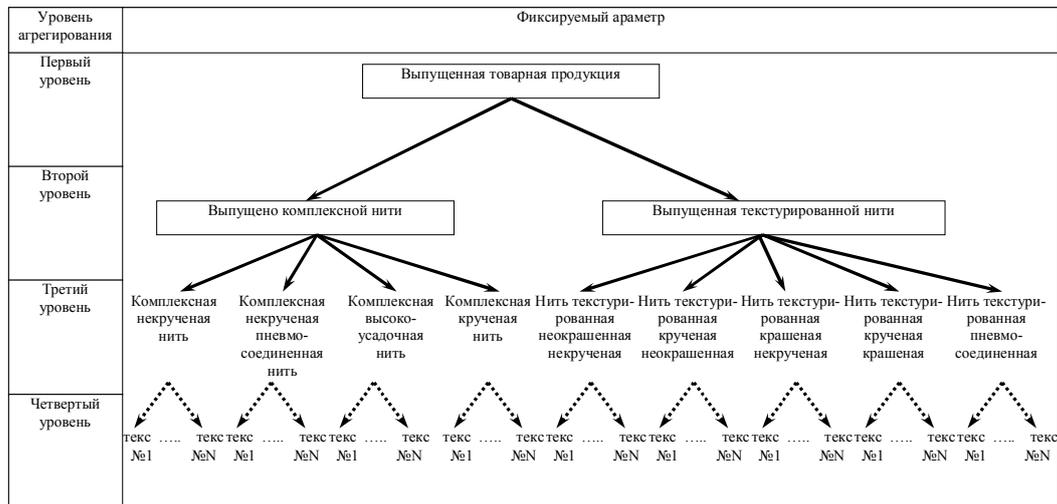


Рис. 1. Схема агрегирования данных по информационной базе данных

Получение информации более высокого уровня агрегирования производится путем обработки данных предыдущего уровня ИБД. При этом в случае, если определяется общая масса произведенных нитей, агрегирование данных производится по выражению

$$X_k = \sum_{i=1}^{i=L_{k-1}} X_{k-1},$$

где  $X_k$  – значение фактора на  $k$ -м уровне агрегирования данных;  $L_{k-1}$  – количество факторов на  $(k - 1)$ -м уровне агрегирования.

Цензурирование исходных данных по ИБД в диссертационной работе производится по вариационному критерию Диксона. При его применении полученные результаты измерений упорядочивают по возрастанию ( $x_1 < x_2 < \dots < x_n$ ). Значение критерия Диксона для каждого элемента упорядоченного ряда определяется по выражению

$$K_D = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_1}.$$

Критическая область этого критерия определяется выражением

$$P(K_D > Z_q) = q,$$

где  $Z_q$  – критические значения критерия Диксона [1], определяемые исходя из объема выборки и заданного уровня значимости. Уровень значимости, принятый в рамках работы для цензурирования исходных данных, принят равным 0,9.

Составлена ИБД, содержащая данные по выпуску продукции на предприятии и его характеристикам по четырем уровням агрегирования, значения электропотребления предприятия на первом уровне агрегирования и среднесуточные значения

температуры окружающей среды. По всем данным проведена процедура цензурирования, из анализа исключены данные, относящиеся к грубым ошибкам и промахам при измерении физических величин.

#### Литература

1. Сергеев, А. Г. Метрология : учеб. пособие / А. Г. Сергеев, В. В. Крохин. – Москва : Логос, 2000. – 408 с.

УДК 621.311

## МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ СЛОЖНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

А. С. Фиков, Д. Р. Мороз

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Математическое моделирование электропотребления традиционно применяется для решения различного вида технических задач. Сущность моделирования заключается в опосредованном познании с помощью некоторого объекта (модели), в определенной степени замещающего объект исследования. Важным является то, что для одного объекта может быть построено некоторое количество различных по способу построения моделей, позволяющих решать вполне определенный круг задач. При этом отдать предпочтение единой модели для решения множества задач не представляется возможным. В докладе обсуждаются достоинства и недостатки наиболее распространенных методов математического моделирования применительно к решению задач управления электропотреблением сложных технологических комплексов: аналитический, статистический, нейросетевой.

*Аналитический* метод успешно применяется для моделирования электропотребления малых и простых детерминированных систем, где отсутствует фактор случайности. В общем виде аналитическую модель электропотребления можно записать:

$$W = f_1(a_1) \cdot f_2(a_2) \cdot \dots \cdot f_n(a_n),$$

где  $f_1, f_2, \dots, f_n$  –  $n$  функций;  $a_1, a_2, \dots, a_n$  –  $n$  аргументов, каждый из которых является комплексом технологических параметров.

*Статистический* метод. Статистическое математическое описание определяет связь между соответствующими мгновенными значениями входных и выходных параметров. В общем виде эту связь для сложной системы можно записать в виде:

$$W = \Psi(X, Z),$$

где  $X$  – вектор параметров технологического процесса;  $Z$  – вектор случайных неконтролируемых параметров.

*Нейросетевой* метод моделирования основывается на построении модели в виде искусственной нейронной сети. Как математическая модель искусственная нейронная сеть представляет собой частный случай методов распознавания образов и является попыткой смоделировать процессы мышления человека. За счет поочередного расчета

линейных комбинаций и нелинейных преобразований достигается аппроксимация электропотребления в виде произвольной многомерной функции:

$$W = F \left( \sum_{i_N} w_{i_N j_N N} \cdots \sum_{i_2} w_{i_2 j_2 2} F \left( \sum_{i_1} w_{i_1 j_1 1} x_{i_1 j_1 1} - \theta_{j_1 1} \right) - \theta_{j_2 2} \cdots - \theta_{j_N N} \right),$$

где  $F$  – нелинейная функция;  $\theta$  – пороговый уровень нейрона;  $w$  – вектор весов всех входов нейрона;  $x$  – входной вектор слоя нейронов.

При выборе метода моделирования электропотребления для решения задач прогнозирования потребления и экономии ТЭР необходимо учитывать тот факт, что конечной формой реализации решаемой задачи должно быть программное обеспечение. Программная реализация методов моделирования исключает лишь грубые арифметические ошибки. Но вовсе не исключает ошибочность действий энергетиков, являющихся не специалистами в области анализа статистических данных и прогнозирования. Выбор наиболее простого метода прогнозирования снижает вероятность возникновения таких ошибочных действий производственного персонала.

УДК 621

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВМЕЩЕНИЯ ДИСПЕТЧЕРСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДОБЫЧЕЙ РУДЫ И ПРОГРАММЫ УЧЕТА ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЗА ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ**

**Т. В. Логвинова**

*Открытое акционерное общество «Белгорхимпром», г. Минск*

На исследуемом предприятии РУП «ПО «Беларуськалий» существует система учета потребления электроэнергии с регистрацией множества значимых параметров: активная и реактивная потребляемые мощность и энергия, получасовое, суточное и месячное потребления по ячейкам и расчетным группам, параметры электросети. Но учитывая специфику горно-добывающего предприятия, часто крайне дорого, а иногда и не возможно оснастить крупных потребителей электроэнергии отдельными приборами учета.

Таким образом, имея обширную обобщенную систему учета потребления электроэнергии, для рудников на данном этапе оснащения приборами учета выделены такие группы потребителей, как вентиляторы главного проветривания, скиповые подъемные установки и потребление рудника, разграниченное по горизонтам. Между тем в подземной части функционируют такие крупные потребители, как магистральные и панельные конвейера, лавы и проходческие комбайны.

В то же время в диспетчерском пункте рудника для возможности управления процессом непрерывной добычи руды отслеживаются режимы работы конвейерного транспорта, напрямую зависящего от работы комбайнов и лав.

В рамках существующей диспетчерской программы ведется непрерывный контроль над работой всех наблюдаемых элементов с их архивированием на любой заданный срок.

Используя данные о работе механизмов, согласно диспетчерской программе, а также соотнося эти данные с потреблением электроэнергии, отслеживаемым соответствующей программой, можно создать матрицу, отражающую работу оборудования и потребления электроэнергии (мощности) во времени. В таблице приведен пример такой матрицы.

Время	Наименование оборудования											Мощность, кВт
	Лава № 6	Лава № 29в	Лава № 32н	Урал № 5	Урал № 6	Урал № 35	ПК № 86	ПК № 87	ПК № 90	ПКС № 1	ПКС № 4	
00.30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	698,2
01.00	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1904,4
01.30	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2200,3
02.00	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	2390,4
02.30	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	2952,5
03.00	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2585,3
....												

При накоплении большего объема данных и решении полученного массива (матрицы) возможно определить фактическое потребление электроэнергии определенным оборудованием при различных режимах работы (под нагрузкой, холостой ход...).

Совмещение диспетчерской программы и программы электропотребления позволяет:

- контролировать расход электроэнергии по потребителям (группам потребителей) без использования отдельных приборов учета;
- дистанционно определять режим работы потребителя (холостой ход, работа, остановка...);
- определять оптимальные графики работы оборудования.

УДК 621

## ИННОВАЦИОННЫЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ

**Н. А. Мурашова, О. В. Федоров**

*Нижегородский государственный технический университет  
имени Р. Е. Алексеева, Россия*

Структурная ломка российской машиностроительной промышленности в начале 90-х гг. XX в. характеризовалась резким падением производства и другими негативными явлениями. В то же время сохранять собственное литейное производство очень важно для отечественного машиностроения. Это не только дополнительные рабочие места, но и возможность обеспечения лидирующего положения в производстве сложной высокотехнологичной продукции, сохранения конкурентоспособности на мировом рынке машиностроения. Мировая практика показывает, что промышленно-развитые страны экспортируют в основном продукцию литейного производства, готовое литье, импортируя сырьевые ресурсы – металл. В России основную долю экспорта составляет металлический лом и продукция большой металлургии: металл в слитках и массивных заготовках. Повышение эффективности российского машиностроения невозможно без развития литейного производства. Развитие должно идти не за счет простого увеличения объема выпуска литья, а за счет внедрения

новых ресурсосберегающих, прогрессивных технологических процессов, снижающих воздействие вредных производственных факторов и себестоимость изготовления, повышающих производительность и качество литых заготовок.

Литейное производство является основной заготовительной базой машиностроения: литые детали используют практически во всех отраслях машиностроения; методами литья изготавливают до 60 % заготовок деталей машин, а в станкостроении доля литых изделий приближается к 90 %; литейное производство обладает высоким коэффициентом использования металла от 75 до 98 % и более низкую себестоимость по сравнению с другими способами изготовления.

Литье в песчано-глинистые формы (ЛПГФ) уступает другим видам литья по степени точности отливок, качеству поверхности и ряду других характеристик. ЛПГФ широко распространено по причине своей универсальности: обеспечивает возможность получения крупногабаритных фасонных отливок из всех существующих литейных сплавов; широкого диапазона форм и размеров получаемых заготовок; относительной простоты технологического процесса. В настоящее время этим методом изготавливают 70–75 % всего выпускаемого объема литья.

Литье по газифицируемым моделям (ЛГМ) – новый прогрессивный способ литья, позволяющий получить высокоточные качественные отливки, с минимальным уровнем затрат и временем на подготовку производства. Использование литья по газифицируемым моделям по сравнению с традиционным методом литья позволяет уменьшить себестоимость отливок от 20 до 40 %.

Сравнительный анализ эффективности литья в песчано-глинистые формы и литья по газифицируемым моделям показал, что затраты на энергоресурсы уменьшаются на 32 %, это связано с более низким расходом (в 7,8 раза) силовой электроэнергией и электроэнергией на освещение (в 2 раза), последнее напрямую зависит от производственных площадей, которые в свою очередь в 3,5 раза при использовании литья по газифицируемым моделям меньше, чем при литье традиционным методом (рис. 1).

Повышение выхода годного обеспечивает возможность снижения расхода электроэнергии до 100 кВт/час на тонну получаемого литья по сравнению с литьем в песчано-глинистые формы.

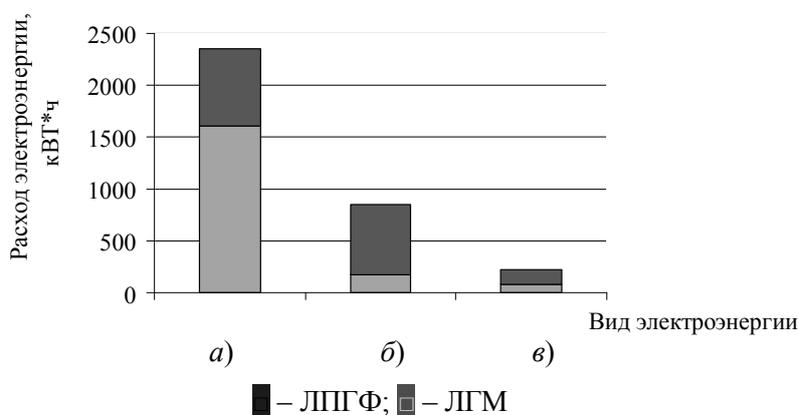


Рис. 1. Соотношение расхода трех видов электроэнергии:  
а – технологическая; б – силовая; в – освещения

УДК 621

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПОСТРОЕНИЯ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ДЛЯ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ, ВЫПУСКАЮЩИХ ОДНОРОДНУЮ ПРОДУКЦИЮ

Е. Л. Шенец, П. М. Колесников

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Нормирование расхода ТЭР является одним из элементов экономической части политики энергосбережения, способствует устранению бесхозяйственного использования ТЭР и внедрению энергосберегающих мероприятий, призвано регулировать деятельность потребителей в области энергосбережения. Совершенствование системы нормирования потребителей и в первую очередь расчетно-статистического метода, основанного на построении математических моделей электропотребления в зависимости от влияющих факторов, является актуальной проблемой. Предложен алгоритм построения регрессионной модели электропотребления для потребителей, выпускающих однородную продукцию:

1) формируются временные ряды расхода ЭЭ и объема выпускаемой продукции на временном интервале  $t = 1, 2, \dots, n''$ :  $\{W_t\}_{t=1,2,\dots,n''}$ ,  $\{\Pi_t\}_{t=1,2,\dots,n''}$ ;

2) сформированные временные ряды переформируются в соответствии с сезоном года, соответствующему осенне-зимнему и весенне-летнему периоду, что позволяет учитывать сезонную специфику электропотребления:  $\{\Pi_t\}_{t=1,2,\dots,n'}$ ,  $\{W_t\}_{t=1,2,\dots,n'}$ ;  $n' = n'' - NK$ , где  $NK$  – количество значений, исключенных из временного ряда;

3) полученные временные ряды сглаживаются скользящим средним с периодом усреднения  $\tau = 90$  сут (для суточных временных рядов),  $\tau = 3$  мес. (для месячных временных рядов):

$$\bar{\Pi}_t = \frac{1}{\tau} \sum_{i=t}^{t+\tau-1} \Pi_i, \quad \bar{W}_t = \frac{1}{\tau} \sum_{i=t}^{t+\tau-1} W_i;$$

$$\{\bar{\Pi}_t\}_{t=1,2,\dots,n}, \quad \{\bar{W}_t\}_{t=1,2,\dots,n}, \quad n = n' - (\tau - 1); \quad t = 1, 2, \dots, n;$$

- 4) строится модель электропотребления потребителей;
- 5) производится разделение общезаводского электропотребления по видам выпускаемой продукции;
- 6) производится построение модели УРЭ в зависимости от объемов выпускаемой продукции вида;
- 7) с использованием  $F$ -критерия Фишера и  $t$ -критерия Стьюдента проверяется значимость коэффициентов регрессии;
- 8) с использованием модели  $W_{\text{уд}} = f(\Pi)$  рассчитываются УРЭ, дифференцированные по объемам выпущенной продукции; производится проверка разработанных норм расхода ЭЭ по данным кварталов предыдущего периода.

УДК 621

## СНИЖЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ЗАТРАТ НА ТРАНСПОРТ НЕФТИ ЗА СЧЕТ ОПТИМИЗАЦИИ СТАНЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

В. В. Воробьев, А. Н. Козик

*РУП «Гомельтранснефть Дружба», Беларусь*

В структуре затрат предприятий трубопроводного транспорта нефти более 50 % приходится на электрическую энергию, потребляемую магистральными насосными агрегатами.

Известны различные методы снижения потребления энергоресурсов на перекачку нефти, например, строительство лупингов, применение противотурбулентных присадок и др. Их общий недостаток – большие первоначальные капитальные вложения и длительный срок окупаемости. В такой ситуации на первый план выходит оперативное управление трубопроводными системами. Внедрение энергосберегающих мероприятий необходимо совмещать с проведением плановых реконструкций оборудования нефтеперекачивающих станций (НПС) и линейной части. Так, для длительно эксплуатируемых трубопроводов со сроком наработки 30–40 лет, которых в РБ большинство, ежегодно необходимо менять 50–100 км наружной изоляции трубопроводов, вырезать и ремонтировать дефектные секции, менять целые участки и т. д. В подобной ситуации создаются особенно подходящие условия для внедрения энергосберегающих технологий. На НПС технологические узлы имеют такой же срок наработки, а многие компоненты уже не отвечают современным нормативным требованиям: тройники, отводы, переходы полевого изготовления, негерметичная запорная арматура и т. д. Это увеличивает гидравлические потери на узлах, которые могут быть оценены по формуле Лейбензона:

$$\Delta h = \beta \cdot \frac{q^{2-m} \cdot \nu^m \cdot L}{d_3^{5-m}} + \Delta z, \text{ м}, \quad (1)$$

где  $\beta$  и  $m$  – коэффициенты, характеризующие режим течения нефти;  $q$  – производительность участка нефтепровода, м<sup>3</sup>/с;  $\nu$  – кинематическая вязкость нефти, м<sup>2</sup>/с;  $d_3$  – эквивалентный диаметр нефтепровода, м;  $L$  – протяженность участка нефтепровода, м;  $\Delta z$  – разность геодезических отметок между концом и началом участка нефтепровода, м.

Для уменьшения гидравлических потерь на одной из НПС было принято решение о монтаже дополнительной перемычки с отсекающей задвижкой. При этом весь поток нефти будет проходить напрямую от выкидного коллектора в магистраль, а при пропуске внутритрубных устройств, перекрывая отсекающую задвижку, поток направляется через узел пропуска и осуществляется выталкивание устройств, после чего направление движения вновь направляется по пути с наименьшим сопротивлением. Расчеты показали, что величина гидравлических потерь будет не выше 0,01 МПа. Учитывая что в 99 % времени нефтепровод работает напрямую, будет достигнута существенная годовая экономия электроэнергии, которая за один год полностью окупит и дополнительные строительно-монтажные работы и дополнительные расходы на приобретение задвижки.

Пуск в работу узла после реконструкции с установкой перемычки подтвердил эффективность выполненных работ: снижение гидравлических потерь составило 0,04 МПа.

УДК 620.9:004.9

**ПРИМЕНЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ  
КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ВИБРАЦИОННОГО  
КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ****П. Ю. Бранцевич, С. Ф. Костюк, Д. В. Носко***Белорусский государственный университет информатики  
и радиоэлектроники, г. Минск*

Современные экономические условия требуют обеспечения высокой эффективности работы промышленных и энергетических предприятий. В большинстве это материало- и энергоемкие производства с большим количеством разнообразного оборудования, ряд из которого функционирует в непрерывном технологическом цикле. Непредвиденные, вследствие поломок и отказов, остановки таких механизмов и агрегатов ведут к существенным издержкам. Для предотвращения таких ситуаций наиболее важные объекты оснащаются автоматизированными системами контроля, диагностики, защиты. Одним из наиболее информативных, но и достаточно сложных, параметров контроля для механизмов с вращательным движением является вибрация.

Развитие электроники и вычислительной техники способствовало созданию и последующему применению широкого спектра аппаратных и программных средств, ориентированных на решение задач вибрационного контроля и диагностики.

Научно-исследовательская лаборатория вибродиагностических систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники длительное время занимается разработкой соответствующих приборов, программного обеспечения и методик.

В лаборатории разработан и производится многоканальный (до 27 каналов) измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) «Лукомль-2001», который более десяти лет эксплуатируется на большинстве крупных турбоагрегатов Беларуси.

Структурно ИВК представляет собой универсальную ПЭВМ с типизированным модулем АЦП, подключаемым к ее стандартному интерфейсу (ISA или PCI), блока аналоговой обработки сигналов, к которому подключаются первичные виброизмерительные каналы и блока управления сигнализацией и защитным отключением. Основное назначение комплекса – решение задач вибрационного контроля турбоагрегатов по стандартизованным критериям. Существенным развитием функциональных возможностей комплекса «Лукомль» стала реализация алгоритмов автоматической защиты технических объектов по вибрационным параметрам не только по стандартизованным критериям, но и с учетом расширенного числа показателей, индивидуальных особенностей конкретного объекта и обобщенной оценки ситуации на объекте, полученной на основе измерений в нескольких точках контроля.

Однако решение задач вибрационной диагностики до настоящего времени остается весьма проблематичным, так как формулирование вывода о техническом состоянии объекта на основе количественных значений вибрационных параметров во многих случаях достаточно неоднозначно.

Для более достоверных заключений представляется целесообразным проведение анализа динамики изменения непрерывных вибрационных сигналов, отражающих техническое состояние объекта на достаточно длительном временном интервале (минуты, часы и даже сутки).

С целью получения и исследования таких вибрационных сигналов разработан 16-канальный измерительно-вычислительный комплекс «Тембр».

УДК 621

## **ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОЙ ИЗОЛЯЦИИ – ОДНО ИЗ ВАЖНЫХ РЕШЕНИЙ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ**

**И. П. Сницаренко**

*ОАО «Белгорхимпром», г. Минск*

Экономия топливно-энергетических ресурсов является одной из приоритетных задач в развитии экономики Республики Беларусь. Тепловая изоляция является необходимым элементом промышленного оборудования, обеспечивающим принципиальную возможность проведения высоко- и низкотемпературных технологических процессов в энергетике и промышленности при оптимальном потреблении топливно-энергетических ресурсов.

От правильного выбора тепловой изоляции во многом зависит реализация одного из основополагающих принципов – требования энергоэффективности и безопасности для обслуживающего персонала, а также сохранение параметров технологического процесса в заданных пределах.

РУП «ПО «Беларуськалий» является одним из крупнейших предприятий Республики Беларусь. Годовое потребление всех видов ТЭР (электроэнергии, топлива и тепловой энергии) всеми четырьмя рудоуправлениями составляет около 790 тыс. т у. т. Годовое потребление тепловой энергии всеми четырьмя рудоуправлениями составляет около 1450 тыс. Гкал.

Каждое из четырех рудоуправлений РУП «ПО «Беларуськалий» представляет собой достаточно крупное предприятие. Для того, чтобы продукция, выпускаемая предприятием, оставалась конкурентоспособной на мировом рынке, необходимо постоянно снижать долю стоимости потребляемых энергоресурсов в себестоимости продукции. Немаловажную роль в этом процессе играет задача предельно возможного снижения теплотерь на технологическом оборудовании и трубопроводах силикатнообогатительных фабрик (СОФ), что прежде всего зависит от эффективности применяемой теплоизоляции и ее состояния.

Сотрудниками отдела энергосберегающих технологий и диагностики были проведены исследования и разработана методика по оптимизации выбора вида ремонтнопригодной тепловой изоляции технологических трубопроводов и оборудования с учетом температурных режимов эксплуатации и сделан ряд соответствующих выводов. Выбор вида тепловой изоляции прежде всего производится по техническим характеристикам теплоизоляционного материала: диапазон рабочих температур, возможность использовать при данных внешних воздействиях (влага, агрессивная среда), пожароопасность, эффективный срок службы, коэффициент теплопроводности и возможная толщина покрытия. Поэтому в том или ином случае необходимо правильно и оптимально выбрать теплоизоляцию. Как показали исследования, тепловые потери на однотипном оборудовании при одинаковой тепловой изоляции могут отличаться на 30–40 %. Это обуславливается целым рядом факторов: прогары теплоизоляции, ее старение, толщина покрытия изоляции и др.

В настоящее время предлагается использовать как современные тонкослойные жидкие теплоизоляционные материалы, так и комбинировать различные виды теп-

лоизоляционных материалов, а также использовать вспененные теплоизоляторы (на сегодняшний день одним современных является K-FLEX). Следует сделать вывод, что необходимо своевременно обнаруживать и устранять дефекты теплоизоляции, так как это не приведёт к потерям тепловой энергии, нарушениям технологического режима и ускоренному износу корпусов оборудования и трубопроводов.

Поэтому эффективное использование тепловой изоляции позволяет реализовать одну из важных задач в области энергосбережения.

УДК 621

## **ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИОМАССЫ И ЕЕ ОТХОДОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭНЕРГИИ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ**

**В. С. Дорожко, С. В. Дорожко**

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

Использование местных видов топлива является составным элементом политики энергетической безопасности Республики Беларусь. Уменьшение их доли в общем энергетическом балансе страны представляет собой возможность уменьшения расходной части бюджета и дополнительный источник экономии средств. С учётом высокой доступности такого вида топлива, как древесные отходы, его использование в малой энергетике экономически выгодно и обосновано даже с учётом капитальных затрат на замену оборудования, использующего ископаемое топливо. Разумный и рациональный подход к этому вопросу важен не только по экономическим причинам, но также и в силу международных экологических обязательств, взятых на себя Республикой Беларусь в сфере уменьшения выбросов парниковых газов, поскольку использование биотоплива является ключевым фактором в замене углерода ископаемого топлива в цикле углерода на углерод биомассы, что позволяет удерживать содержание его в атмосфере на стабильном уровне. При этом необходимо учитывать технологические особенности процесса сжигания биотоплива, в частности, древесных отходов, так как при несоблюдении параметров технологического процесса увеличиваются выбросы и снижается эффективность котла.

Использование местных видов топлива также существенно с социальной точки зрения, поскольку при одновременном снижении расходов государства на энергозатраты позволяет создать рабочие места в тех районах, где существует наибольшая проблема занятости, т. е. в сельской местности и малых городах. К тому же это немаловажный фактор при работе с населением и осознании им принципов энергосбережения, формировании позитивного восприятия биомассы как традиционного, но тем не менее современного, доступного и надежного источника энергии, эффективность которого при использовании технологий более качественного сжигания не уступает ископаемым видам топлива. Проведя анализ существующей ситуации в сфере использования биомассы для получения энергии и внедрения проектов с использованием местных видов топлива, следует отметить, что политика в данной области оправдывает себя как с финансовой, так и социальной и экономической точек зрения.

УДК 621.311

## НОМОГРАФИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И ЭКОНОМИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМЕ ТРАНСПОРТА НЕФТИ

А. С. Фиков

Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь

В связи с повышенными требованиями со стороны государства к энергосбережению на предприятиях Республики Беларусь задачи определения экономии электрической энергии (ЭЭ) и потенциала энергосбережения в технологическом процессе транспорта нефти становятся повседневной задачей службы главного энергетика. С целью контроля над эффективным потреблением ТЭР, планированием и контролем за выполнением энергосберегающих мероприятий в течение года неоднократно возникает необходимость в проведении расчетов экономии ЭЭ. Одним из эффективных путей решения данной задачи является использование номограмм. Для белорусских участков нефтепровода «Дружба» разработаны номограммы, позволяющие определить важный параметр системы нефтепровода – коэффициент эластичности ( $e_d$ ) расхода ЭЭ по эквивалентному диаметру нефтепровода (рис. 1). Данный коэффициент показывает процентное изменение технологического потребления ЭЭ при изменении параметра  $d_3$  на 1 %.

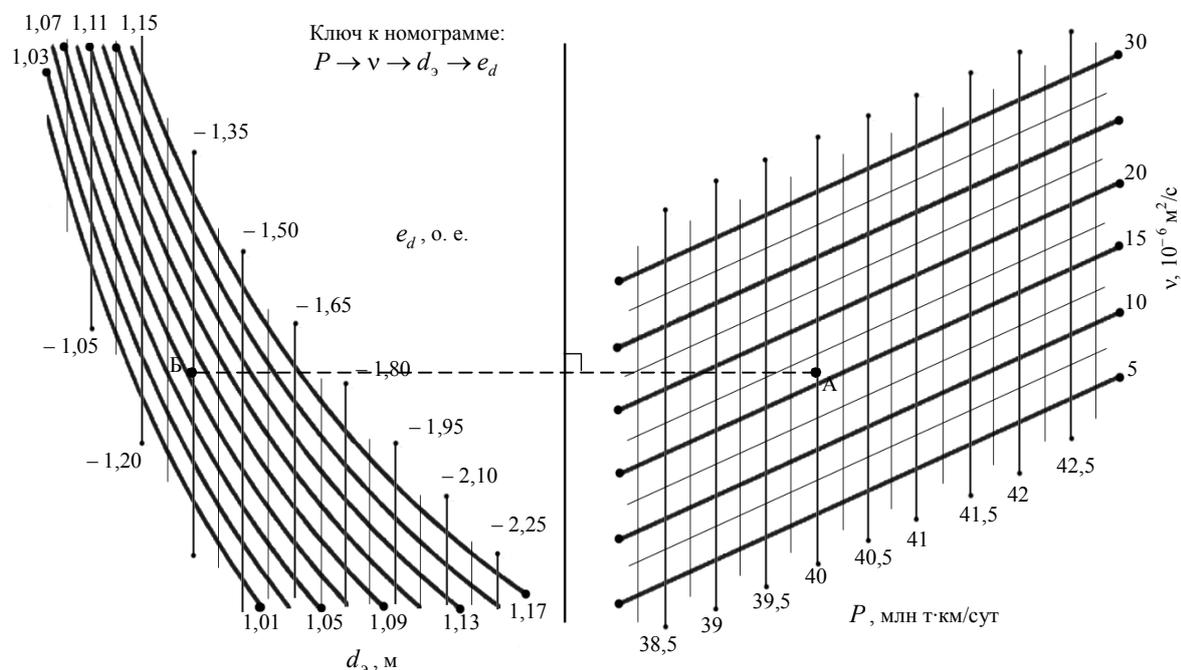


Рис. 1. Номограмма для определения коэффициента эластичности расхода ЭЭ по эквивалентному диаметру участка нефтепровода «Унеча – Мозырь»

Определение значения коэффициента эластичности производится путем одного наложения линейки на номограмму, соответствующее отрезку АБ (рис. 1). Точка А данного отрезка получена на пересечении заданных значений грузооборота нефти  $P$  и вязкости нефти  $\nu$ . Для получения точки Б из точки А опускается перпендикуляр на немой носитель шкалы. Перпендикуляр продлевается до пересечения с заданным значением  $d_3$ . Искомый результат находится в точке Б, определяемой парой значений  $d_3$  и  $e_d$ .

УДК 621.311

## ПРОГРАММА ПО ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДОЛГОСРОЧНЫХ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ МЕРОПРИЯТИЙ

М. Н. Кузнецов, В. В. Савочкина

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Для оценки эффективности долгосрочных энергосберегающих мероприятий, которые при длительном сроке окупаемости имеют высокий индекс доходности, была разработана компьютерная программа, учитывающая энергетические и экономические характеристики оборудования, а также динамику роста цен на электроэнергию.

С помощью программы была произведена оценка эффективности замены распределительных трансформаторов, а также устаревшего лампового светофора на энергоэффективный светодиодный светофор. Результаты расчета эффективности замены светофоров представлены в виде зависимостей сравнительной цены (рис. 1) и динамического срока окупаемости (рис. 2) от роста цен на электроэнергию.

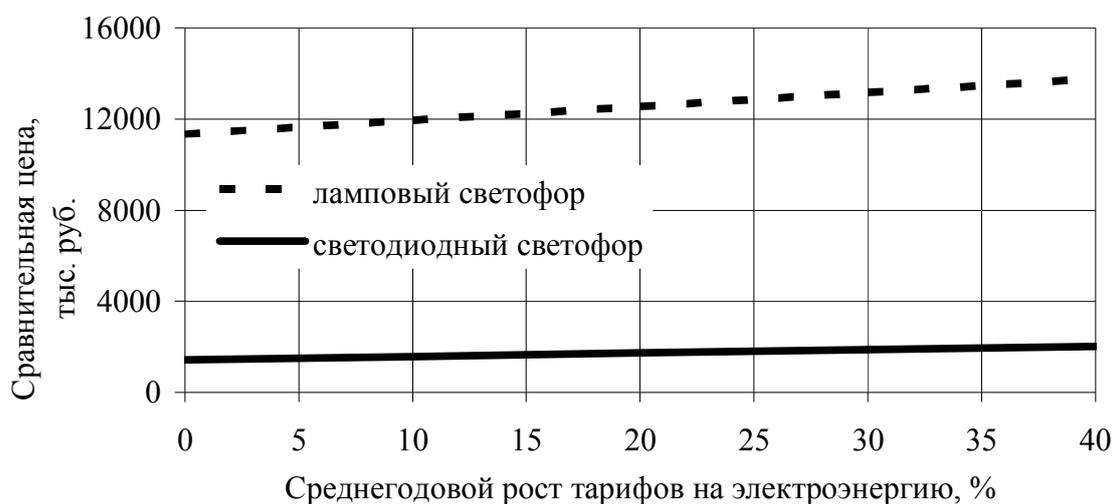


Рис. 1. Зависимость сравнительной цены светофоров от роста цен на электроэнергию

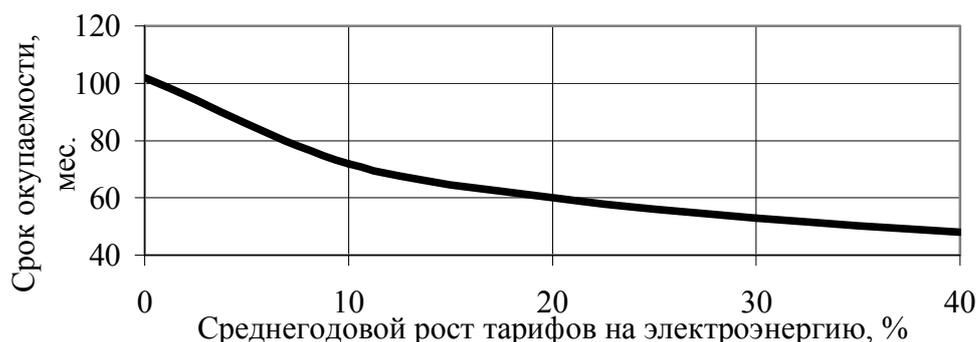


Рис. 2. Зависимость динамического срока окупаемости от роста цен на электроэнергию

Установлено, что учет динамики роста цен на электроэнергию при анализе эффективности долгосрочных энергосберегающих мероприятий позволяет существенно уточнить их технико-экономические показатели эффективности.

УДК 621.311

### ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ИНДУКЦИОННЫХ ТИГЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ РУП ГЛЗ «ЦЕНТРОЛИТ»

А. Г. Ус, Ю. Н. Колесник, А. В. Иванейчик, А. М. Кузоро

*Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого, Беларусь*

В рыночных условиях функционирования режимы электропотребления отличаются нестабильностью. При этом потребители вынуждены подстраиваться под внешние условия (заявленная мощность; различная стоимость электроэнергии в тарифных зонах), что приводит к работе оборудования с изменяющейся энергетической эффективностью. В циклических условиях производства, наряду с непрерывными расходными характеристиками электропотребления, выделяют потребителей с кусочно-непрерывными расходными характеристиками. Причем кусочно-непрерывными расходными характеристиками могут описываться не только режимы отдельных электроприемников, но и их групп, объединенных одним технологическим процессом, что ставит важную задачу по оптимизации режима электропотребления.

Для решения задачи оптимизации электропотребления индукционных тигельных печей РУП ГЛЗ «Центролит», использующих в сутки порядка 80 тыс. кВт · ч электроэнергии, что составляет 65 % от общезаводского электропотребления, необходимо проанализировать их работу.

Установлено, что к основным факторам, формирующим режим электропотребления, относятся: режим работы печей (расходная характеристика), распределение нагрузки между печами, величина зумпфа, подготовка футеровочного материала и шихты, организация загрузки шихты. Был произведен всесторонний анализ каждого из факторов и установлена их взаимосвязь с удельным расходом электрической энергии. В результате обработки данных, полученных из оперативных журналов и отчетов предприятия, были получены удельные расходные характеристики печей ИЧТ-10 и EGES. Было произведено ранжирование всего диапазона производительности, с учетом полученных удельных расходных характеристик и производительности каждой печи, и получена кусочно-непрерывная модель электропотребления (рис. 1).

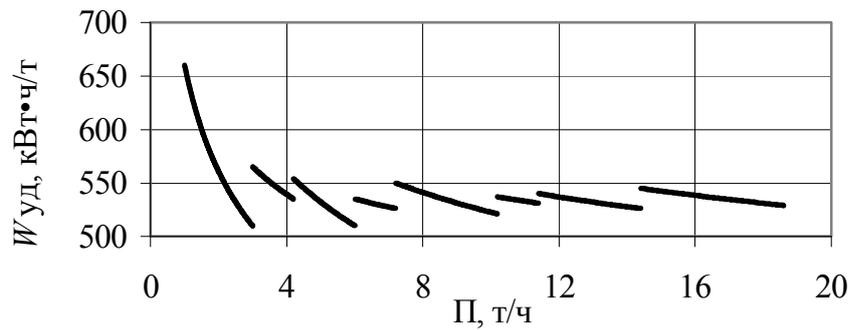


Рис. 1. Кусочно-непрерывная модель электропотребления печей РУП ГЛЗ «Центролит»

В результате для каждого из диапазонов производительности был установлен оптимальный состав работающих печных агрегатов и нормы удельного расхода электрической энергии.

УДК 621.311

**ГРАФИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОПТИМАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ С КУСОЧНО-НЕПРЕРЫВНЫМИ РАСХОДНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

**Ю. Н. Колесник, А. Г. Ус, А. В. Иванейчик, А. М. Кузеро**

*Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого, Беларусь*

Целью данного исследования является определение и графическое моделирование энергетически и экономически эффективных режимов работы технологического оборудования с кусочно-непрерывными расходными характеристиками электропотребления.

В результате исследований были получены графические модели оптимальной электрической нагрузки для энергоемкого технологического оборудования ряда потребителей электроэнергии. Расчеты выполнялись при двухставочном и двухставочно-дифференцированном (рис. 1, 2) тарифах на электроэнергию, где пунктирными линиями выделены периоды максимальных нагрузок.

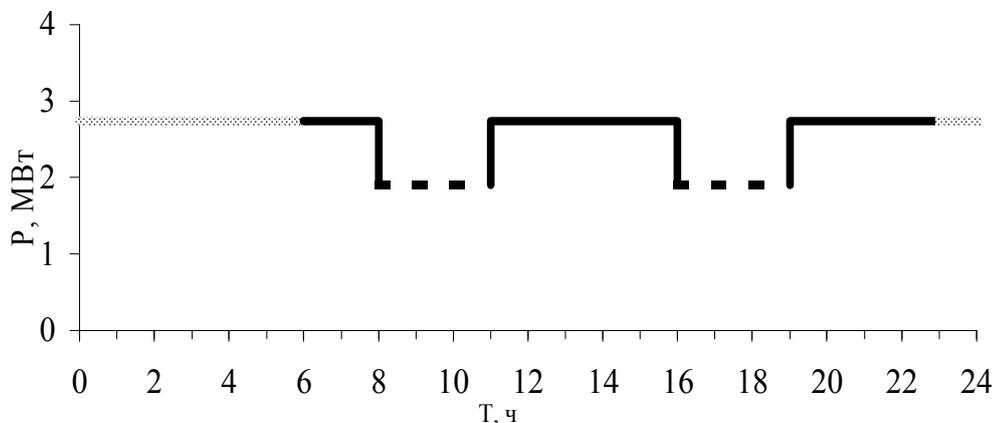


Рис. 1. Графическая модель экономически эффективного режима работы оборудования

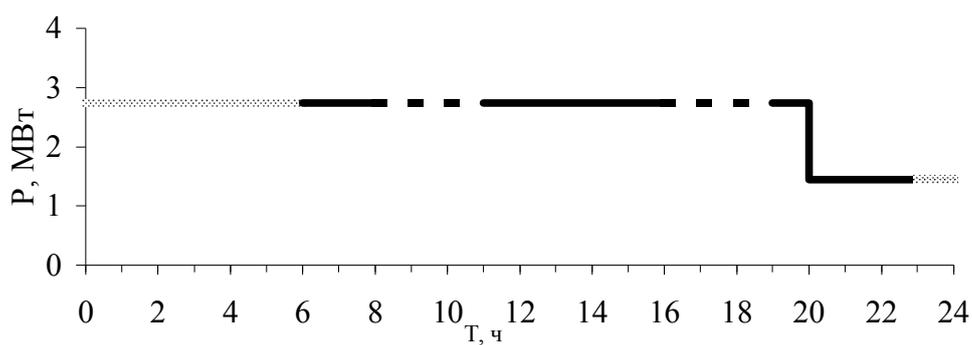


Рис. 2. Графическая модель энергоэффективного режима работы оборудования

Полученные графические модели позволили определить экономически и энергетически эффективные режимы работы технологического оборудования при различных тарифах на электроэнергию и заданных объемах выпускаемой продукции.