

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ

«ГОМЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ П. О. СУХОГО»

ПАО «ОАК» ОКБ Сухого

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МАШИНОВЕДЕНИЯ

Сборник научных трудов

В двух частях

Часть 1

Гомель

ГГТУ им. П. О. Сухого

2025

УДК 621.01(063.3)

ББК 34.4

C56

Рецензенты: доктор технических наук, профессор *М. И. Михайлов* (ГГТУ им. П. О. Сухого), доктор технических наук, профессор *А. А. Бойко* (ГГТУ им. П. О. Сухого), доктор технических наук, профессор *В. П. Кудин* (ГГТУ им. П. О. Сухого), доктор технических наук, профессор *Н. В. Грунтович* (ГГТУ им. П. О. Сухого), доктор технических наук, профессор *А. В. Овсянник* (ГГТУ им. П. О. Сухого), доктор геолого-минералогических наук, профессор *В. Д. Порошин* (ГГТУ им. П. О. Сухого), доктор физико-математических наук, профессор *О. Н. Шабловский* (ГГТУ им. П. О. Сухого)

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук, проф. *А. Б. Невзорова*
канд. физ.-мат. наук, доц. *А. А. Бабич*
канд. техн. наук, доц. *М. Г. Гегедеш*
канд. техн. наук, доц. *М. Ю. Целуев*
канд. техн. наук, доц. *К. С. Курочка*
канд. техн. наук, доц. *Ж. В. Кадолич*
канд. техн. наук, доц. *Н. А. Демяненко*
канд. техн. наук, доц. *Т. А. Трохова*
канд. техн. наук, доц. *Ю. В. Крышнев*
канд. техн. наук, доц. *Т. В. Алферова*
канд. экон. наук, доц. *М. Н. Андриянчикова*
канд. экон. наук, доц. *И. В. Ерманина*

Под общей редакцией д-ра техн. наук, проф. *А. А. Бойко*

Современные проблемы машиноведения : сб. науч. тр. В 2 ч. Ч. 1 /
C56 М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого,
ПАО «ОАК» ОКБ Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ
им. П. О. Сухого, 2025. – 253 с.

ISBN 978-985-535-616-6.

Представлены новейшие результаты научных исследований в области аддитивных технологий; наноматериалов в машиностроении; компьютерного моделирования технических, механических и биомеханических систем; мехатроники; энергосберегающих технологий и альтернативной энергетики; разработки нефтяных и газовых месторождений; физических и математических методов исследования сложных систем; проблем экономики, организации и управления производством.

Для научных и инженерно-технических работников промышленных предприятий и научно-исследовательских учреждений.

УДК 621.01(063.3)

ББК 34.4

ISBN 978-985-535-616-6 (ч. 1)
ISBN 978-985-535-618-0

© Оформление. Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого», 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

<i>Зализный Д. И., Капанский А. А.</i> Методика оценки пропускной способности электрических сетей в условиях роста электропотребления бытовых потребителей частного жилого фонда.....	7
---	---

**Секция 1. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
В МАШИНОСТРОЕНИИ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ.
АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

<i>Егорова К. В., Агеев О. В.</i> Коррозия стали в присутствии микромицетов рода <i>Penicillium</i>	12
<i>Беляков Н. В., Селезнёв С. К.</i> Пути совершенствования в подготовке управляющих программ для станков с ЧПУ на основе учета параметров переходных процессов.....	15
<i>Савенко В. С., Скворцов О. Б., Сташенко В. И.</i> Микроструктура деформационного алюминия в условиях электропластичности	19
<i>Filatov S. A., Dolgikh M. N., Filatova O. S., Paz Esteves E. A., Gavrilenko N. A., Batyrev E. V.</i> Medical and biological aspects of the application of composite materials based on polylactide for bioprinting	22
<i>Филатов С. А., Долгих М. Н., Филатова О. С., Пас Эстеves Э. А., Гавриленко Н. А., Батырев Е. В.</i> Функционализация композиционных материалов на основе PLA, с использованием углеродных волокон	25
<i>Филатов С. А., Долгих М. Н., Пас Эстеves Э. А., Филатова О. С., Гавриленко Н. А., Батырев Е. В.</i> Технологии 3D-печати создания персонализированных стелек	29
<i>Савич В. В., Тарайкович А. М., Голодок Р. П., Вербицкий Д. Ю.</i> Аэрация воды трубчатыми и плоскими пористыми аэраторами	35
<i>Максимчик К. В., Комаровский Н. В.</i> Анализ результатов моделирования напряженно-деформированного состояния концевой полувагона снегоуборочного поезда СМ-2	38
<i>Lin J., Xu Y. T., Lun J., Reutskiy S. Y.</i> Simulation of plate bending vibration problems by the meshless backward substitution method	41
<i>Гегедеш М. Г., Ворожун И. А., Ворожун А. В.</i> Применение современных технологий для оценки динамических характеристик системы «длинномерный груз – сцеп вагонов»....	44
<i>Тюрин С. А., Прядко М. О.</i> Комплексная система испытаний сельскохозяйственных машин производства ОАО «Гомсельмаш».....	47
<i>Бобарикин Ю. Л., Мартынов Ю. В.</i> Влияние параметров плоского изгиба тонкой стальной высокоуглеродистой проволоки на механические свойства проволоки.....	51
<i>Целуев М. Ю., Целуева С. Н.</i> Нагрев стальной заготовки сканированием излучения непрерывного лазера с различным коэффициентом перекрытия	54
<i>Процко В. Ю., Стасенко Д. Л.</i> Анализ методов предварительной обработки, обеспечивающей наилучшую адгезию при газотермическом напылении	57
<i>Родзевич П. Е.</i> Сравнительный анализ и оценка эффективности тормозов микроавтобусов.....	61
<i>Шаповалов П. С.</i> Функция распределения температуры в веществе при нагреве осесимметричным лазерным пучком	65
<i>Попов В. Б., Занкевич И. А.</i> Математическое моделирование механизма навески подъемно-навесного устройства мобильного энергетического средства	68

Секция 2. СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, НАНОМАТЕРИАЛЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

<i>Пумпур В. А., Дувалов П. Ю., Андриенко В. М.</i> Определение оптимальной комбинированной формы для литья износостойких втулок.....	72
<i>Дувалов П. Ю., Андриенко В. М., Сушко А. А.</i> Применение стального стержня в качестве внутреннего источника теплоотвода в деталях из хромистого чугуна	75
<i>Сергиенко В. П., Бухаров С. Н., Тулейко А. С.</i> Перспективные акустические материалы для шумопонижающих конструкций в машиностроении и на транспорте	79
<i>Ухарцева И. Ю., Бобрышева С. Н.</i> Проблемы утилизации «активных» упаковочных материалов	82
<i>Бобрышева С. Н., Ухарцева И. Ю.</i> Проблемы материаловедения в 3D-технологиях.....	85
<i>Давыдова О. В., Подденежный Е. Н., Кравченко А. И., Дробышевская Н. Е., Лёвкина А. Д.</i> Люминесцентные покрытия на основе поливинилового спирта и наноструктурированных порошков иттрий-алюминиевого граната, легированного ионами церия	88
<i>Сутормыа И. И.</i> Кинетика гомогенного плавления чистых металлов	91
<i>Бобарикин Ю. Л., Швецов А. Н.</i> Зависимость технологических свойств слоистого металлополимерного материала с дисперсным порошковым слоем от режимов электроимпульсной обработки	94
<i>Эльшербинин С. М. Э., Аль-Камали М. Ф. С. Х., Бойко А. А.</i> Сорбционная способность материалов на основе MgO, легированных наночастицами металлов, получаемых золь-гель методом	96
<i>Поздняков Е. П., Степанкин И. Н., Левкина А. Д., Куис Д. В., Лежнев С. Н.</i> Сравнение износостойкости науглероженных слоев конструкционных сталей 18ХГТ и 16CRMNS5.....	99
<i>Аль-Камали М. Ф. С. Х., Бойко А. А.</i> Влияние технологических режимов на синтез порошков MgO : CoO и ZnO : CoO: структура, валентное состояние ионов кобальта и распределение в матрице оксидов.....	103

Секция 3. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ, МЕХАНИЧЕСКИХ И БИОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

<i>Ефимчик К. В., Кудина Е. Ф.</i> Моделирование изделий из композиционных материалов с использованием современных систем инженерного анализа.....	107
<i>Чернин Р. И.</i> Оценка влияния скорости движения на прочность соединения внутренних колец буксовых подшипников с шейкой оси колесной пары	110
<i>Демьянчук О. В.</i> Влияние граничных условий на результаты моделирования обтекания воздушным потоком железнодорожного вагона.....	113
<i>Сапарова О. Н., Курбансахатов М. Ч.</i> Особенности использования искусственного интеллекта при цифровизации бизнес-операций	117
<i>Эбердиева Т. К., Агамырадова Дж. Г., Реджебова А. Г.</i> Промышленные сети в условиях киберугроз	119
<i>Шемсетдинов С. Я., Курбансахатов М. Ч.</i> Компьютерное моделирование двигательного аппарата человека	123
<i>Гундина М. А., Кондратьева Н. А.</i> Наглядность на занятиях математики	125
<i>Асенчик О. Д., Леоненко В. Ю.</i> Автоматизированное формирование Web-приложений для заданной предметной области.....	129
<i>Половцев М. С., Токочаков В. И.</i> Компьютерное моделирование процесса сушки песка в потоке отходящих газов.....	132
<i>Курочка К. С., Башаримов Ю. С.</i> Адаптация метода границ Канни для подсчета количества бактерий на изображениях, получаемых с помощью цифрового микроскопа	134

<i>Лёвкина А. Д.</i> Статический анализ на прочность элементов прототипа регулирующего клапана «шток» и «плунжер»	137
<i>Курочка К. С., Житко А. С.</i> Алгоритм улучшения качества КТ-изображений позвоночника человека с применением вариационного автокодировщика	141
<i>Горбунов К. С., Дорощенко И. В.</i> Приложение для обнаружения объектов по данным подводной видеосъемки	144
<i>Кадолич Ж. В., Кашиперов А. А., Бобович А. П.</i> Опыт применения инженерных навыков для производства эндопротезов височно-нижнечелюстного сустава	147
<i>Трохова Т. А., Емельяненко И. В.</i> Применение методов голосового интерфейса для решения задач производственного программирования	150
<i>Мурашко В. С.</i> Компьютерное моделирование процесса торцового фрезерования	154

Секция 4. РАДИОТЕХНИКА, МЕХАТРОНИКА, ТЕХНИЧЕСКИЕ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

<i>Преображенский А. П., Тихонов И. А.</i> Проблемы проектирования электродинамических объектов с заданным уровнем рассеянного поля	157
<i>Проскуряков М. А.</i> Разработка Web-интерфейса контроллера автоматизации установок штанговых глубинных насосов	161
<i>Холодилов О. В., Шкороедов Д. В.</i> Использование нейронных сетей в неразрушающем контроле деталей подвижного состава	164
<i>Джанмырадов А., Атаев И., Урунов Ф., Мамедов Ш.</i> Эффективность цифровых технологий в моделях тепловых исследований	167
<i>Атаев М. Г., Меледжаев Д. Б., Овлиягулыева А. Ч.</i> Разработка системы управления и мониторинга умного дома	170
<i>Савельев В. А., Рябый А. В.</i> Система удаленного мониторинга технологического оборудования	173
<i>Савельев В. А., Грицков Е. Д.</i> Устройство для плавного пуска асинхронного электропривода	176
<i>Ковалев А. В., Литвинов Д. А., Росткина О. М.</i> Способ организации интерфейса взаимодействия оператора с пультом управления электронной системы управления оборудованием автогудронатора	179
<i>Ковалев А. В., Литвинов Д. А., Росткин О. М.</i> Особенности работы и настройки электронных систем управления оборудованием автогудронаторов	183
<i>Дорощенко И. В.</i> Синтез модального регулятора момента инвариантной системы автоматического управления стенда на основе асинхронно-вентильного каскада	186
<i>Матвеевцева М. В.</i> Выбор системы управления робототехнического комплекса для интегрирования с обрабатывающим центром	189
<i>Погуляев М. Н.</i> Гармонический состав выходных напряжений и тока устройства нагружения резервных электрогенераторов	192
<i>Погуляев М. Н., Назарчук В. Е.</i> Регулирование коэффициента мощности в устройствах нагружения дизель-генераторных установок	194
<i>Логвин В. В., Веннер Л. В.</i> Энергоэффективный электропривод колебательного движения	197
<i>Веннер Л. В., Логвин В. В.</i> Проектирование системы частотного преобразования с беспроводным управлением для трехфазных асинхронных двигателей	198
<i>Захаренко Л. А., Карнов В. А., Цикунов Е. Д., Змиевский В. В.</i> Разработка системы бесключевого доступа	201
<i>Захаренко Л. А., Росткина О. М.</i> Разработка лабораторного стенда «Проектирование и расчет радиатора теплонагруженного элемента»	204

Щуплов В. В., Кухаренко С. Н., Красовская Н. А. Адаптивный режекторный фильтр в задаче обнаружения внутритрубного трансмиттера в нефтепроводе	207
Брель В. В. Схемы управления силовыми электромагнитами в системах автоматизации	209
Карпов В. А., Ростоккина О. М., Котова Ю. Е. Исследование погрешности измерения электролитических инклинометров при подключении к ним измерительной схемы	211
Запольскі А. Я., Сахарук А. У., Мурач А. С., Пляскач К. А., Вышынскі М. А. Рэалізацыя канала сувязі для кантрольна-вымяральнага пункта станцыі катоднай абароны падземных трубаправодаў з прымяненнем кароткахвалевага дыяпазону	215
Крышнеў Ю. В., Запольскі А. Я., Рогаў М. А., Котава Ю. Я. Аналіз умоў узнікнення карозіі падземных трубаправодаў і метадаў яе прадухілення	218
Карпов В. А., Ростоккина О. М., Котова Ю. Е. Температурные погрешности электролитического чувствительного элемента инклинометра	221
Виноградов Э. М. Микроконтроллерная система автоматического управления нагревательным котлом	225
Погуляев М. Н., Мельников Д. Ю. Анализ процессов, протекающих в стенде нагружения двигателей постоянного тока	228
Захаренко Л. А., Кокоулина Е. С. Измерительные преобразователи для датчиков нижнего уровня (Low Level) системы управления детектором SPD проекта NICA	232
Крышнеў Ю. В., Гапоненка М. І., Буракова М. У., Запольскі А. Я., Белка М. М. Рэалізацыя кроссплатформеннага комплексу для англа-руска-беларускага слоўніка тэхнічных тэрмінаў	235
Аль-Камали М. Ф. С. Х. Исследование поверхностных свойств композиционных материалов $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^0$, полученных золь-гель методом с использованием программы Gwyddion	238
Кухаренко С. Н., Крышнев Ю. В., Терещенко В. В., Запольский А. Е., Белка М. М. Анализ структур и схемотехнических решений преобразователя VME-64 CAEN для электропитания системы управления детектором SPD проекта NICA	241
Крышнев Ю. В., Кокоулина Е. С., Сахарук А. В., Запольский А. Е. Принципы организации среднего уровня (Middle Level) в системе управления детекторами SPD проекта NICA и особенности реализации функций диспетчерского управления	246
Кухаренко С. Н., Крышнев Ю. В., Терещенко В. В., Запольский А. Е. Анализ структур и схемотехнических решений преобразователей PWS-441P SUPERMICRO и NMP-650 MEAN WELL для электропитания системы управления детектором SPD проекта NICA	250
Крышнеў Ю. В., Запольскі А. Я., Бай Вэй Вэй, Шаўчэнка А. А., Моцар С. І., Хадакоўскі К. А. Аналіз нарматыўных патрабаванняў да арганізацыі актыўных і пасіўных спосабаў абароны магістральных трубаправодаў	253

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

УДК 621.3.052.3

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ В УСЛОВИЯХ РОСТА ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ БЫТОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЧАСТНОГО ЖИЛОГО ФОНДА

Д. И. Зализный, А. А. Капанский

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

Предложена методика оценки пропускной способности низковольтных электрических сетей для потребителей частного жилого фонда. Методика основана на классификации этих потребителей, их графиков электропотребления, а также на программном обеспечении, позволяющем рассчитать напряжения их питания, температуры проводов и температуры силовых трансформаторов. Внедрение разработанных методики и программного обеспечения позволит повысить эффективность и точность оценки пропускной способности электрических сетей при выдаче разрешений частным потребителям на комплексное использование электроэнергии (подключение электрокотлов, подогрев воды и т. д.).

Ключевые слова: электрическая сеть, пропускная способность, линия электропередачи, потери напряжения, температура, силовой трансформатор

METHODOLOGY FOR ESTIMATING THE POWER GRIDS CAPACITY IN THE CONDITIONS OF INCREASING ELECTRICITY CONSUMPTION OF PRIVATE HOUSING STOCK CONSUMERS

D. I. Zalizny, A. A. Kapansky

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

A methodology for estimating the capacity of low-voltage power grids for private housing stock consumers is proposed. The methodology is based on the classification of these consumers, their power consumption schedules, as well as on software that allows calculating their supply voltages, wire temperatures and power transformer temperatures. The implementation of the developed methodology and software will improve the efficiency and accuracy of assessing the power grids capacity when issuing permits to private consumers for the integrated use of electricity (connecting electric boilers, heating water, and so on).

Keywords: power grid, capacity, power line, voltage losses, temperature, power transformer.

В связи с вводом в эксплуатацию Белорусской атомной электростанции существенно возросла актуальность использования электроэнергии для обогрева частных жилых домов. Однако электрокотлы имеют значительную мощность и могут негативно повлиять на работу всего участка электрической сети, к которой они подключены. Если пропускная способность сети недостаточна, то у некоторых потребителей возможно недопустимое снижение напряжения. Также возможен перегрев проводов и силовых трансформаторов. Для предотвращения такой ситуации предприятия электрических сетей перед выдачей разрешения на подключение электрокотла должны провести расчеты по оценке пропускной способности сети. Однако в силу разветвленности электрической сети и случайного характера нагрузок потре-

бителей, выполнить такие расчеты достаточно непросто. В нормативных документах, таких как СТП [1] и ТКП [2], имеются только методики расчета нагрузок потребителей, но методики оценки пропускной способности сложных электрических сетей фактически отсутствуют.

Цель представленных исследований – разработать алгоритмы и программное обеспечение для повышения эффективности и точности оценки пропускной способности электрических сетей, питающих потребителей частного жилого фонда.

На кафедре «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого выполняется НИР «Разработка методики оценки пропускной способности электрических сетей 0,4 кВ в условиях роста электропотребления бытовых потребителей частного жилого фонда» в сотрудничестве с РУП «Гомельэнерго». В рамках данной НИР решаются следующие задачи:

- классификация потребителей частного жилого фонда по критерию электропотребления;
- классификация условий, в которых происходит электропотребление;
- статистическая обработка данных по электропотреблению отдельных потребителей и формирование типовых графиков электропотребления;
- статистическая обработка данных по температуре наружного воздуха;
- разработка алгоритмов расчета установившихся режимов низковольтных несимметричных трехфазных электрических сетей;
- экспериментальные исследования тепловых процессов в проводах и формирование алгоритмов расчета их температур;
- разработка программного обеспечения, позволяющего производить оценку пропускной способности и исследование режимов электрических сетей.

По имеющимся на данный момент результатам предложено разделить потребителей частного жилого фонда (далее – потребителей) на две категории: не имеющие комплексного использования электроэнергии (КИЭ) и имеющие его (потребители без КИЭ и потребители с КИЭ). В качестве условий электропотребления предлагается разбить год на два сезона: зимний (октябрь–апрель) и летний (май–сентябрь). В зимний сезон наблюдается максимальное электропотребление, а летний сезон характеризуется тем, что в этот период возможны максимальные температуры воздуха. Оба фактора являются ограничительными для пропускной способности сети. Повышенное потребление приводит к снижению напряжения у потребителей, а значительные температуры воздуха могут привести к перегреву проводов и силовых трансформаторов.

Для проведения исследований РУП «Гомельэнерго» периодически передает на кафедру результаты замеров нагрузок потребителей, сформированные с помощью автоматической системы контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ). Так, для одного из населенных пунктов Жлобинского района были получены годовые графики реального электропотребления каждого потребителя. Кроме этого имеется значительный объем данных по так называемым балансным приборам учета – счетчикам электроэнергии, установленным на выходе силового трансформатора.

При формировании типовых графиков электропотребления были использованы современные методы статистического анализа: тест на нормальное распределение, тепловая карта, «диаграмма с усами», дисперсионный анализ, матрица коэффициентов корреляции Пирсона и др. В результате рассчитаны типовые профили средней мощности нагрузки для каждого месяца года по обеим категориям потребителей. В качестве примера на рис. 1 показан типовой профиль потребителя без КИЭ за январь.

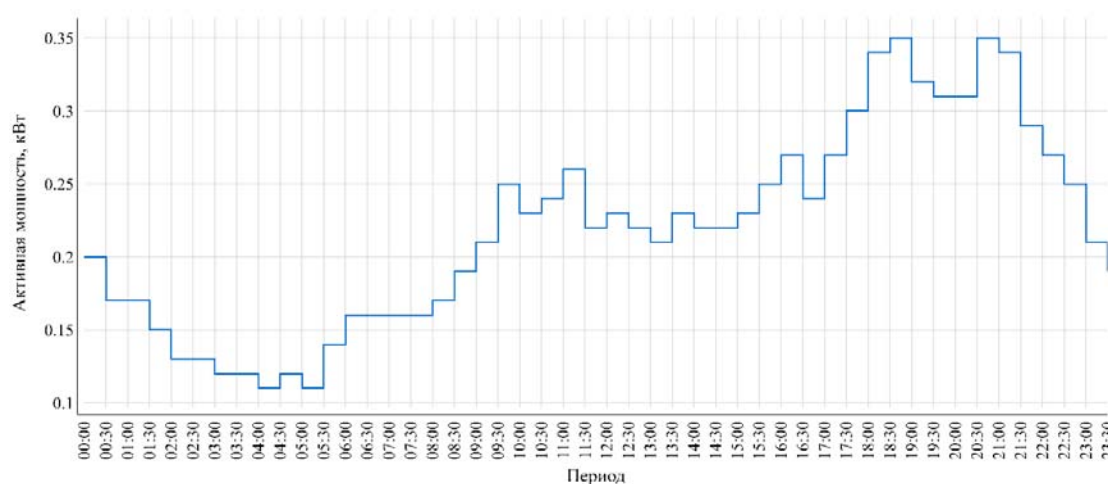


Рис. 1. Профиль усредненной активной мощности за январь для потребителя без КИЭ

Для выполнения расчетов режимов электрической сети из этих профилей были выбраны получасовые максимумы электропотребления в наиболее загруженные месяцы зимнего и летнего сезонов. Результаты приведены в таблице.

Типовые значения мощности потребителей частного жилого фонда

Показатели	Зимний сезон		Летний сезон	
	Январь	Январь	Сентябрь	Май
Тип потребителя	без КИЭ	с КИЭ	без КИЭ	с КИЭ
P , кВт	0,35	4,15	0,31	2,36

Значения мощности в таблице можно интерпретировать как максимальные статистически обоснованные для формирования наихудших условий при оценке пропускной способности электрической сети. Вместе с тем получасовые профили мощности не учитывают кратковременных всплесков электропотребления, вызванных использованием электрочайников, утюгов, пылесосов и другого бытового оборудования, потребляющего существенную мощность. Именно в моменты подключения таких электроприемников происходит максимальное снижение напряжения у потребителя. Чтобы учесть данное явление, было предложено для наиболее удаленных от трансформаторной подстанции потребителей без КИЭ к типовой мощности, указанной в таблице, прибавлять мощность утяжеления. Исследования в рамках НИР показали, что ее статистически обоснованное значение составляет около 1,8 кВт.

С целью определения температур проводов был выполнен статистический анализ температуры воздуха по Гомельской области. В результате статистически обоснованные максимальные значения этой температуры составили: для зимнего сезона (октябрь–апрель) 30,6 °С и летнего сезона (май–сентябрь) 17,8 °С. Данные значения используются также при корректировке сопротивлений проводов (при возрастании температуры сопротивления алюминия и меди возрастают).

В качестве алгоритма расчета режима электрической сети выбран классический матричный метод узловых потенциалов с применением комплексных чисел. При этом для решения получаемой системы уравнений предложено рассматривать сопротивление

ния нагрузки потребителей как линейные, т. е. не зависящие от напряжения. Такой подход позволяет отказаться от итерационных методов и применять однократный расчет на основе метода Гаусса, что существенно сокращает время выполняемых расчетов, которое даже на современных компьютерах может составлять десятки секунд при работе с электрическими сетями, питающими более 40 потребителей. Для проверки правильности этого решения были проведены экспериментальные исследования, подтвердившие линейность сопротивлений большинства мощных бытовых электроприемников.

В рамках разработки алгоритмов для расчета температур проводов в лаборатории кафедры был выполнен ряд экспериментов по нагреву различных марок проводов током, что позволило уточнить их тепловые параметры при моделировании тепловых процессов. Экспериментально подтверждено, что для большинства проводов тепловая постоянная времени не превышает 15 мин. Это значит, что в рамках получасового максимума нагрузки температуры проводов должны рассчитываться как установившиеся, т. е. в стационарном тепловом режиме.

Все предложенные в рамках НИР алгоритмы применены в новой компьютерной программе, создаваемой на языке C++ как *Windows*-приложение, которая получила название *LineCapacity* (пропускная способность линий). Внешний вид главного окна данной программы с результатами расчетов электрической сети реального населенного пункта и окном основных результатов приведен на рис. 2.

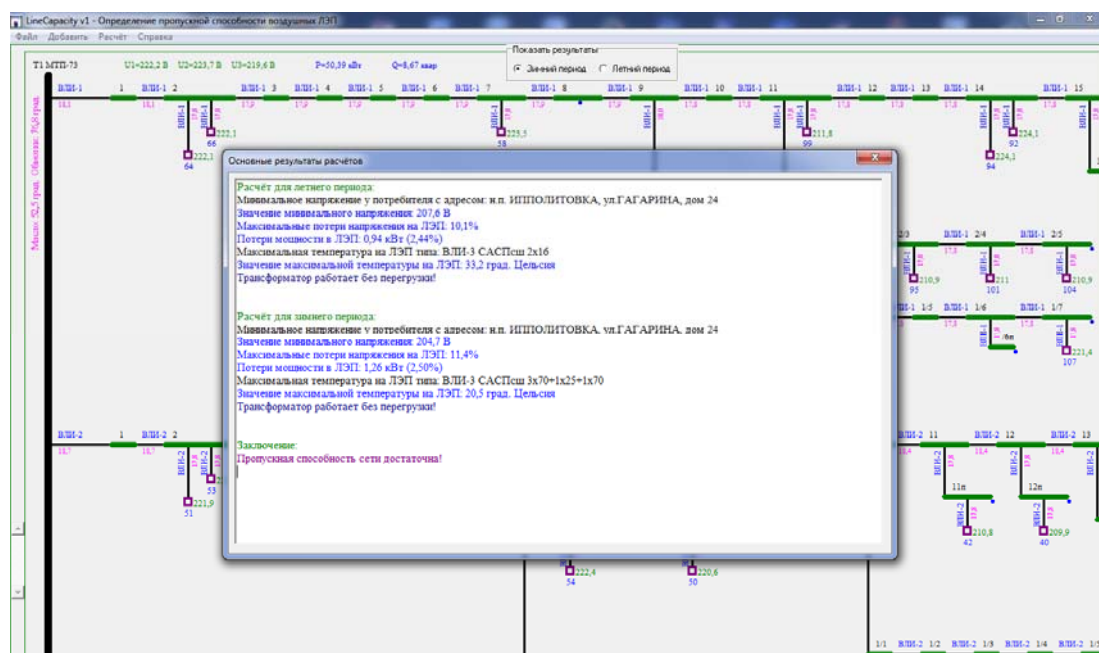


Рис. 2. Внешний вид главного окна программы *LineCapacity*

Программа *LineCapacity* оснащена графическим редактором, позволяющим формировать схему сети с выбором типов трансформатора и проводов из базы данных. Схема является интерактивной, т. е. при щелчке мышью на ее элементы появляются соответствующие окна, где можно корректировать параметры объектов и просматривать результаты расчетов.

Расчеты выполняются для зимнего и летнего сезонов, а в итоговом окне можно посмотреть информацию о потерях в линиях и заключение о пропускной способности сети.

Внедрение разработанных методики и программного обеспечения позволит повысить эффективность и точность оценки пропускной способности электрических сетей при выдаче разрешений частным потребителям на комплексное использование электроэнергии (подключение электрод котлов, подогрев воды и т. д.).

Л и т е р а т у р а

1. Электрические сети 0,38–110 кВ сельскохозяйственного назначения. Порядок расчета электрических нагрузок : СТП 33240.20.178-20. – Минск : Белэнерго, 2021. – 96 с.
2. Сети электрические распределительные сельские напряжением 0,38–10 кВ : ТКП 385-2022. – Минск : Минэнерго, 2023. – 71 с.

СЕКЦИЯ 1. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ В МАШИНОСТРОЕНИИ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ. АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 62.193.82

КОРРОЗИЯ СТАЛИ В ПРИСУТСТВИИ МИКРОМИЦЕТОВ РОДА *PENICILLIUM*

К. В. Егорова, О. В. Агеев

*Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение «Калининградский государственный
технический университет», Российская Федерация*

*Проанализирован процесс коррозии стали СТ3 в присутствии дейтеромицетов видов *Pen. chrys.* и *Pen. charl.* Определены количественные характеристики коррозионного процесса: скорость коррозии, содержание абсорбированного металлом водорода; состав коррозионной среды. Проведен сравнительный анализ коррозионной активности сред с содержанием продуктов жизнедеятельности микромицетов. Установлена высокая коррозионная активность указанных видов микромицетов.*

Ключевые слова: конструкционная сталь, коррозия, микробиологическая коррозия, пищевое производство, коррозионная среда.

CORROSION OF STEEL IN THE PRESENCE OF MICROMYCETES OF THE GENUS *PENICILLIUM*

K. V. Egorova, O. V. Ageev

Kaliningrad State Technical University, the Russian Federation

*The paper examines the corrosion of ST3 steel in the presence of deuteromycetes of the species *Pen. chrys.* and *Pen. charl.* The quantitative characteristics of the corrosion process are determined: the corrosion rate, the content of hydrogen absorbed by the metal during the corrosion process; the composition of the corrosion environment. A comparative analysis of the corrosion activity of media containing the waste products of micromycetes was carried out. The high corrosion activity of these types of micromycetes has been established.*

Keywords: structural steel, corrosion, microbiological corrosion, food production, corrosion media.

В настоящее время при проектировании оборудования пищевых производств все шире применяются полимерные материалы, но использование металлов в качестве конструкционных материалов по-прежнему сохраняет актуальность. Одной из самых востребованных марок стали благодаря сочетанию доступной стоимости и функциональных характеристик является сталь СТ3. Указанная марка стали обладает высокой пластичностью, хорошо переносит отпуск, относится к хорошо свариваемым материалам, а также имеет ряд других положительных эксплуатационных свойств. Сталь СТ3 широко востребована для изготовления трубопроводов, контейнеров, швеллеров, ковшей для просеивания и других деталей пищевых машин и аппаратов. По этой причине отказ от применения стали СТ3, в том числе и на произ-

водства пищевой промышленности, не представляется возможным. Однако условия пищевых производств зачастую являются благоприятными для развития различных микроорганизмов, которые известны как активаторы коррозионных процессов [1]. К таким микроорганизмам, в частности, относятся микромицеты, которые могут использоваться в пищевой отрасли в качестве сырьевого объекта. Так, например, в производстве элитных сортов сыров используются дейтеромицеты рода *Penicillium*. Учитывая вышеизложенное, исследование процесса коррозионного разрушения стали СТ3 по электрохимическому механизму в присутствии микромицетов является актуальной задачей.

При решении вышеуказанной задачи коррозионным испытаниям подвергались образцы стали СТ3 размерами $50 \times 20 \times 1,5$ мм. Образцы предварительно отпускали при температуре 150°C с целью освобождения металла от промышленного водорода. После отпуска образцы помещали в пробирки с коррозионной средой ($3-4^\circ$ сусло), которую предварительно инокулировали спорами мицелиальных грибов *Penicillium chrysogenum* и *Penicillium charlessii*. Пробирки закрывали ватно-марлевыми пробками во избежание деаэрации. Эксперимент проводили в статических условиях (комнатная температура, повышенная влажность, освещение). Время экспозиции – 30 сут. В процессе экспозиции образцов измеряли значение pH коррозионной среды и потенциал стальной пластины. После извлечения образцов определяли скорость коррозии гравиметрическим методом и объем водорода, абсорбированного образцами. В качестве метода определения наводороживания образцов использовали метод анодного растворения, позволяющий оценить объем абсорбированного металлом водорода. Коррозионную среду исследовали с помощью ИК-спектрометрического метода на наличие кислот – продуктов жизнедеятельности грибов. Исследования проводили с использованием инфракрасного спектрофотометра Perkin Elmer Spectrum Lan. Данные о скорости коррозии, представленные на рис. 1, свидетельствуют о несомненном влиянии присутствия микромицетов и продуктов их жизнедеятельности в коррозионной среде на скорость разрушения металла. Так, скорость коррозии в присутствии *P. chrys.* увеличивается почти в 2,5 раза, а в присутствии *P. char.* – в 1,6 раза.

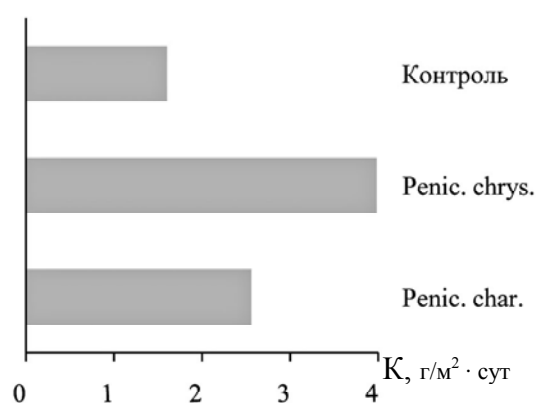


Рис. 1. Скорость коррозии образцов стали СТ3 в присутствии микромицетов

Экспериментальные данные о потенциале поверхности образцов стали, показанные на рис. 2, говорят о его резком сдвиге в сторону отрицательных значений, а значит, об увеличении активности растворения анодных участков на поверхности образцов. В ходе эксперимента к 12 сут потенциал остается практически неизменным,

14 Секция 1. Современные технологии проектирования в машиностроении

что можно объяснить образованием на поверхности стали пассивных пленок из соединений железа с многоосновными карбоновыми кислотами, которые являются продуктами жизнедеятельности рассматриваемых видов микромицетов [2]. Данные, полученные в ходе анализа коррозионных сред, свидетельствуют о наличии в них таких кислот, как лимонная, щавелевая и др. В соответствии с этим можно предполагать, что на поверхности образцов имеются пленки, которые в основе своей состоят из нерастворимых соединений железа (II) – цитрата и оксалата; на это дополнительно указывает цвет налета на образцах после экспонирования.

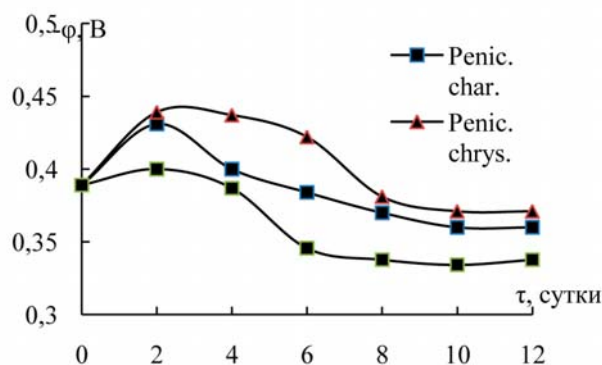


Рис. 2. Изменение потенциала стали СТ3 в присутствии микромицетов

На рис. 3 приведены сведения об изменении водородного показателя коррозионной среды в ходе эксперимента. Наблюдается значительное снижение значения рН среды в случае присутствия мицелиальных грибов по сравнению с контрольной серией, которое достигает максимума к 10 сут экспозиции образцов – в 1,5 раза в присутствии *P. chrys.* и в 1,3 раза – в присутствии *P. char.*

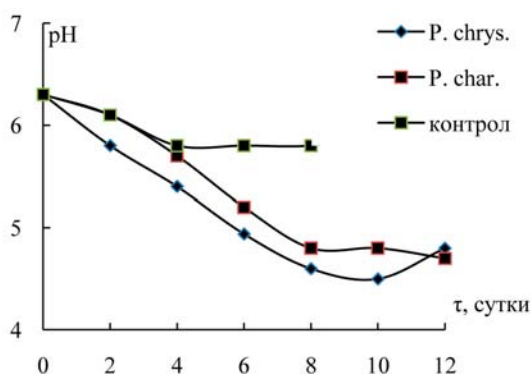


Рис. 3. Изменение рН среды при коррозии образцов стали СТ3 в присутствии микромицетов

Одним из важнейших количественных параметров коррозионного процесса является концентрация водорода, абсорбированного металлом. Концентрационный профиль водорода рассматриваемых в работе образцов представлен на рис. 4. Максимальная концентрация водорода в приповерхностном слое металла находится на глубине примерно 10 мкм. В данном слое образуется значительное количество коллекторов,

заполненных молекулярным водородом, которые препятствуют диффузии атомов водорода, вызывая наклеп слоев металла, окружающих коллекторы. Отмечается увеличение концентрации водорода в случае экспонирования образцов в присутствии *P. chrys.* и *P. char.* по сравнению с контрольной серией в 1,6 и 1,3 раза соответственно.

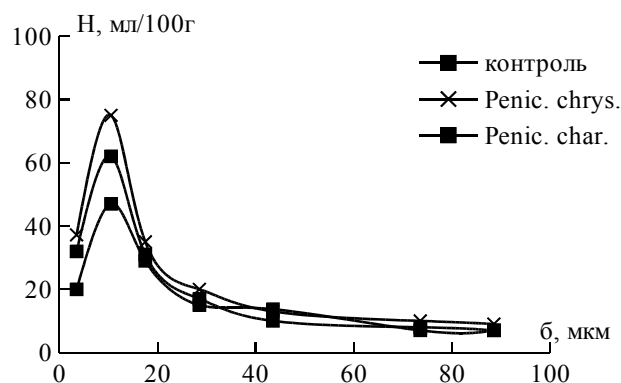


Рис. 4. Концентрационный профиль водорода в образцах стали после мицелиальной коррозии

Анализ полученных экспериментальных данных позволяет установить, что исследованные в работе мицелиальные грибы видов *P. chrys.* и *P. charl.* являются активаторами коррозии стали марки СТЗ. Присутствие указанных видов микромицетов, а также продуктов их жизнедеятельности в коррозионной среде значительно увеличивает скорость процесса коррозии, оказывая влияние на его ключевые показатели.

Л и т е р а т у р а

1. Пехташева, Е. Л. Биоповреждения непродовольственных товаров. / Е. Л. Пехташева. – Москва : Дашков и К, 2015. – 332 с.
2. Сазонова, К. В. Органические кислоты грибов и их эколого-физиологическое значение : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.01.05 / Сазонова Катерина Владимировна ; С.-Петербург. гос. ун-т. – Санкт-Петербург, 2014. – 24 с.

УДК 621:658.512

ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ В ПОДГОТОВКЕ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ ДЛЯ СТАНКОВ С ЧПУ НА ОСНОВЕ УЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Н. В. Беляков, С. К. Селезнёв

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

Проведен обзор тенденций в подготовке управляющих программ для металлорежущих станков с ЧПУ. Описано направление в развитии подготовки управляющих программ на основе учета параметров переходных процессов для обеспечения качества и производительности механической обработки поверхностей деталей машин.

Ключевые слова: ЧПУ, САМ-система, переходный процесс, адаптивные системы, управляющая программа, машиностроение.

WAYS TO IMPROVE TRAINING CONTROL PROGRAMS FOR CNC MACHINES BASED ON ACCOUNTING PARAMETERS OF TRANSIENTS

N. V. Belyakov, S. K. Seleznev

Vitebsk State Technological University, the Republic of Belarus

The analysis of modern trends in programming of CNC machine tools is carried out. Methods for creation control programs taking into account transient parameters to ensure the quality and efficiency of machining of machine parts are presented.

Keywords: CNC, CAM-system, transition process, adaptive systems, control program, mechanical engineering.

В современном машиностроении широкое применение нашли металлорежущие станки с числовым программным управлением (ЧПУ). Программирование процесса обработки с использованием таких станков может осуществляться следующими способами: 1) вручную в текстовом редакторе; 2) на стойке станка; 3) с помощью специализированного программного обеспечения.

Первый и второй способы применяются на производствах, в основе которых лежат повторяющиеся однотипные переходы и операции обработки несложных по конфигурации заготовок деталей, не требующие больших затрат времени на расчет траекторий, математические и технологические расчеты, а также ввод полученных параметров в систему. Реализация таких операций осуществляется, как правило, на универсальных токарных, фрезерных, сверлильных и других станках с ЧПУ невысокой ценовой категории, а в интеграции станков в единую сеть управления по экономическим соображениям нет необходимости. К пользователям (технологам и операторам) предъявляется требование безупречного владения командами в виде G-кодов.

Третий способ находит применение на производствах сложных по конфигурации заготовок деталей, требующих применения разнообразных переходов и операций. Для их реализации, как правило, необходимо использовать обрабатывающие центры. Для таких деталей затраты времени на подготовку управляющих программ первым и вторым способами часто в разы превышают затраты времени на обработку. Современные CAM-системы (Mastercam, NX, Solidcam, Edgcam, PowerMill Creo, Esprite, Xpress, HSMWorks, Radan, CamWorks, VisiSeries, T-Flex ЧПУ, Компас ЧПУ, Прамень ЧПУ и др.) позволяют значительно сократить время программирования станков с ЧПУ за счет возможности автоматизированного определения траекторий перемещений инструментов и определения ряда технологических параметров, а также объединения оборудования в единую сеть передачи данных.

При проектировании операций обработки на металлорежущих станках с ЧПУ важное значение имеет расчет границ и параметров режимов резания при врезании и выходе инструментов (переходных процессах), а также определение положения систем координат заготовки и инструмента в начальной, промежуточных и конечной точках траекторий резания. Во время врезания и выхода инструментов динамически меняются составляющие силы резания, наблюдается нестабильность упругих деформаций технологической системы, возрастание уровня вибраций, что существенно влияет на качество обработанной поверхности, может приводить к затуплению, перегреву и поломке инструмента, а также к снижению производительности обработки [1].

Основными направлениями снижения последствий указанных негативных явлений при переходных процессах являются использование систем адаптивного управления, обеспечение постоянства ряда параметров с помощью изменения режимов резания.

В системах адаптивного управления при переходных процессах применяются методы регистрации изменения сил резания и (или) крутящего момента, активной мощности, перемещения слоя металла заготовки, виброакустических сигналов и др.

Однако предлагаемые решения адаптивного управления требуют использования специальных сложных и дорогих конструктивных решений, часто являются недостаточно эффективными ввиду отсутствия математических моделей для управления процессами резания, недостаточности быстродействия механизмов станков, а также отсутствия и (или) невозможности установки из-за неприспособленности станков измерительных датчиков нужных размеров, точности и эффективности.

К параметрам, постоянство которых обеспечивается для снижения негативных последствий, переходных процессов, относятся объемная производительность, подача на зуб, погрешность и др. Особый интерес представляет высокоскоростная обработка, суть которой заключается в том, что при управлении станком при переходных процессах необходимо добиться постоянного малого сечения среза и высокой скорости (в 8–10 раз выше скорости традиционной обработки). При таком подходе из-за постоянной толщины среза уменьшаются колебания сил резания, а выделяющееся тепло переходит не в заготовку и инструмент, а в стружку.

Реализовать высокоскоростную обработку возможно только на самых современных станках с новыми типами приводов главного движения и подач, обеспечивающих соответствующие высокие значения частот вращения шпинделя, подач на рабочем и холостом ходах, дискретность перемещений, конструкциями направляющих, подшипниковых узлов, а также с новыми конструкциями режущего и вспомогательного инструмента. Особенности систем ЧПУ для высокоскоростной обработки являются короткий цикл определения траекторий; заложенные функции искусственного интеллекта (например, система контурного и наноконтурного управления (Modeler Control для Fanuk); система учета износа инструмента); реализация алгоритма просмотра кадров look-ahead со скоростью 100–200 кадров в секунду и др. Стоимость таких станков в сотни раз превышает стоимость традиционных станков с ЧПУ, составляющих по оценкам экспертов 85–95 % отечественного станочного парка.

Подготовка управляющих программ для высокоскоростной обработки производится с использованием CAM-систем, что требует соответствующего инструментария. Как показал анализ CAM-систем, одним из лидеров в этом направлении является компания CNC Software (система Mastercam). В системе для обработки фрезерованием можно применять технологию динамических перемещений Dynamic Motion, согласно которой снимаемый припуск разбивается на одинаковые микрообъемы. Далее назначаются режимы резания для удаления этих микрообъемов при каждом срезе материала и так формируется траектория перемещения инструмента. Схожие подходы предлагаются в системе NX (компания Siemens) в виде автоматической оптимизации подачи Automatic feed rate optimization. Система рассчитывает не микрообъемы снимаемого материала, а усредненные их значения, что позволяет использовать алгоритмы и для традиционной обработки.

Однако технологии Dynamic Motion и Automatic feed rate optimization специализируются на обработке фрезами и не предусматривают использования других, например, осевых, инструментов. Так, для обработки сверлением при таких подходах

18 Секция 1. Современные технологии проектирования в машиностроении

невозможно прогнозировать влияние на качество обработки (точность размеров, шероховатость, допуски формы и расположения) таких негативных явлений, как наростообразование, изменение твердости поверхности заготовки, автоколебания, изменение векторов сил резания и деформации технологической системы, износ инструментов, температурные воздействия и др.

Таким образом, использование систем адаптивного управления, а также известные алгоритмы обеспечения постоянства параметров вносят существенный вклад в решение проблемы обеспечения качества, но имеют ограниченную специфическую область применения.

При подготовке управляющих программ для металлорежущих станков с ЧПУ технологи и операторы чаще всего решают задачи программирования обработки типовых элементарных поверхностей (плоскости, уступы, окна, открытые отверстия и т. п.). Для ускорения процесса их программирования широкое распространение получили стандартные циклы и специальные G-коды, а также калькуляторы режимов резания. Однако кроме описанного инструментария современные средства программирования станков с ЧПУ не позволяют для типовых конструктивных элементов и различных форм режущих частей инструментов в автоматическом режиме определять и (или) задавать длины врезаний, устойчивого резания и выходов, координат начальных, промежуточных и конечных положений инструментов, а также обоснованно при этом менять режимы резания.

Для типовых конструктивных элементов зоны врезания и выхода инструментов можно классифицировать на основе учета форм обрабатываемых поверхностей и режущих частей инструментов, а также рассчитать геометрические параметры этих зон. Классификация и расчет зон врезания и выхода инструментов даст возможность для теоретико-эмпирического имитационного моделирования процессов резания в зонах переходных процессов для обеспечения максимальной производительности обработки и стойкости инструментов с учетом воздействия различных негативных явлений. Поэтому перспективным представляется решение задачи построения указанных моделей для последующего управления станком с ЧПУ на их основе [1].

Для решения указанной задачи, прежде всего, необходимо: провести анализ и классификацию наиболее распространенных обрабатываемых типовых конструктивных элементов, поверхностей врезания и выхода с учетом форм режущих частей инструментов; разработать схемы и модели для определения параметров размерной настройки инструментов; провести теоретико-экспериментальные исследования режимов резания при переходных процессах и построить имитационные модели; разработать алгоритмическое и программное обеспечения реализации моделей.

Данные разработки могут использоваться: в проектных бюро машиностроительных предприятий при создании управляющих программ для станков с ЧПУ, а также размерной настройке универсальных станков и проектировании их наладок; в организациях-разработчиках систем автоматизированного проектирования – для совершенствования стандартных циклов САМ-систем; в учебном процессе – для подготовки специалистов в области технологии машиностроения.

Л и т е р а т у р а

1. Попок, Н. Н. Система поддержки принятия решений по определению параметров размерной настройки сверл для программирования обработки отверстий на станках с ЧПУ / Н. Н. Попок, Н. В. Беляков, С. К. Селезнёв // Вестник БарГУ. Серия Технические науки. – 2023. – № 2 (14). – С. 50–63.

УДК 669.2/8:620

МИКРОСТРУКТУРА ДЕФОРМАЦИОННОГО АЛЮМИНИЯ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧНОСТИ

В. С. Савенко

*Мозырский государственный педагогический университет
имени И. П. Шамякина, Республика Беларусь*

О. Б. Скворцов, В. И. Сташенко

*Институт машиноведения имени А. А. Благонравова РАН,
г. Москва, Российская Федерация*

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований электропластической деформации металлов с учетом пондеромоторных факторов. Рассмотрено влияние импульсного тока плотностью 10^3 А/мм² и длительностью 10^{-4} с на реализацию электропластического волочения в деформационном узле, нагруженном выше предела текучести, в условиях возбуждения электронной подсистемы металла. Показана принципиальная возможность управления деформационными процессами для модификации физико-механических свойств технически важных материалов.

Ключевые слова: электропластическая деформация, виброакустические колебания, пондеромоторные эффекты, импульсный ток, микроструктура.

MICROSTRUCTURE OF DEFORMABLE ALUMINUM UNDER CONDITIONS OF ELECTROPLASTICITY

V. S. Savenko

*Mozyr State Pedagogical University named after I. P. Shamyakin,
the Republic of Belarus*

O. B. Skvortsov, V. I. Stashenko

*Institute of Mechanical Engineering named after A. A. Blagonravova,
Moscow, the Russian Federation*

The article presents the results of theoretical and experimental studies of electroplastic deformation of metals taking into account ponderomotive factors. The influence of a pulsed current with a density of 10^3 A/mm² and a duration of 10^{-4} s on the implementation of electroplastic drawing in a deformation unit loaded above the yield limit under conditions of excitation of the electronic subsystem of the metal is considered, and the fundamental possibility of controlling deformation processes to modify the physical and mechanical properties of technically important materials.

Keywords: electroplastic deformation, vibroacoustic vibrations, ponderomotive effects, pulsed current, microstructure.

В настоящее время достаточно изучены и внедрены в производство процессы электропластической деформации металлов (далее – ЭПДМ) при обработке давлением для волочения медной, стальной и алюминиевой проволоки и других деформационных процессов в технически важных материалах.

Ток большой плотности $J_m = 10^3$ А/мм², и длительностью 10^{-4} с, пропущенный через металл во время деформации выше предела текучести в деформационной зоне, вызывает ЭПДМ, в том числе за счет пондеромоторных факторов, пинч- и скин-эффектов, которые обуславливают дополнительные механические напряжения в кристаллической решетке металла и стимулируют пластическую деформацию. В зоне

20 Секция 1. Современные технологии проектирования в машиностроении

механических скалывающихся напряжений с периодичностью подачи импульсов тока на фронте их нарастания создается ультразвуковая вибрация атомного остова кристаллической решетки, которая активно влияет на деформационные процессы, модифицируя служебные характеристики материала [1–3].

Катанка технического алюминия марки АКЛП-5 ПТ полутвердая с максимальным сечением 196 мм² подвергалась электропластическому волочению на промышленном волочильном стане СМВ-1-9М4.

В процессе волочения осуществлялся подвод импульсного тока длительностью 10⁻⁴ с и плотностью $J_m = 10^3$ А/мм² в зону деформации алюминиевой проволоки для каждой волоки по технологическому маршруту. Импульсы тока подавались генератором мощностью 70 кВт. с частотой следования импульсов тока 600–800 Гц.

Исследовались следующие режимы: обычное волочение без подвода тока; электропластическое волочение (далее – ЭПВ) с импульсным током длительностью 10⁻⁴ с и плотностью $J_m = 10^3$ А/мм², пропускаемым через зону деформации при полярности плюс источника тока до зоны деформации, и с полярностью минус источника тока до деформационной зоны.

Микроструктурное исследование полученных образцов проводилось сканированием поверхности шлифов на электронном микроскопе Hitachi Table Microscope TM4000plusII сфокусированным высокоэнергетическим тонким электронным лучом, который генерирует, увеличивает и отображает физическую информацию. Отображение микроструктуры поверхности образца реализуется при помощи электронного пучка на сканируемую поверхность. Возбуждение электронным лучом обуславливает генерацию вторичных электронов, оже-электронов и рентгеновских лучей непрерывного спектра, а также электромагнитного излучения в видимой, ультрафиолетовой и инфракрасной областях света.

Использование электронов обратного рассеяния в качестве сигналов визуализации может не только помочь осуществить анализ новых микроструктурных характеристик внешнего вида, но и отображать футеровку атомного номера для качественного анализа состава образца. Вторичные электроны с энергией 0–50 эВ чувствительны к состоянию поверхности материала и эффективно отображают микроморфологию поверхности исследуемого образца, а также анализ формы, состава и структуры объекта путем приема сигналов с помощью детекторов вторичного электронного и обратного рассеяния.

На рис. 1–3 представлена микроструктура деформационного алюминия при электропластическом волочении на различных технологических переходах с разной степенью обжата и полярностью электрического импульса тока.

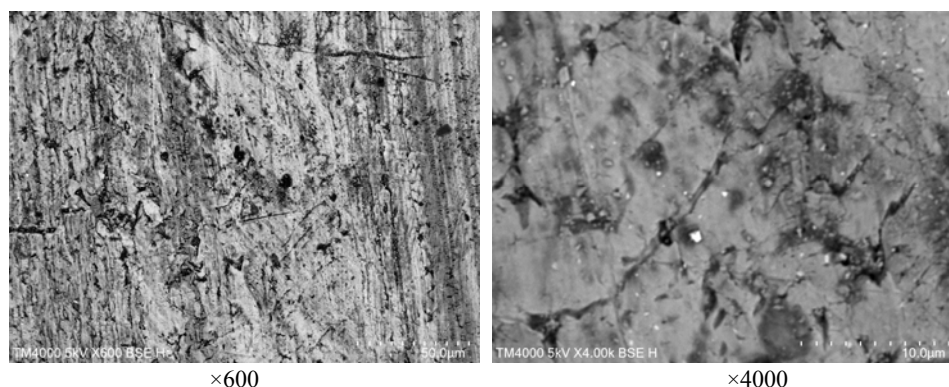


Рис. 1. Электропластическое волочение на технологическом переходе 2,98–2,64 мм; 0,5 м/с без тока

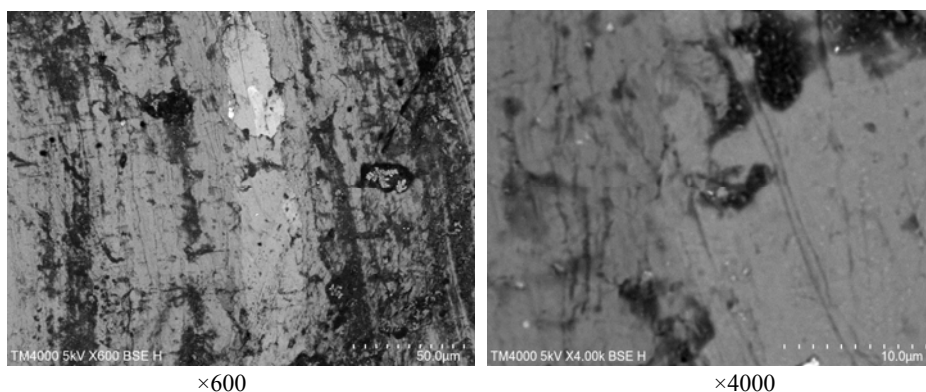


Рис. 2. Электропластическое волочение с полярностью «минус-плюс» на технологическом переходе 2,98–2,64 мм; $V = 0,5$ м/с

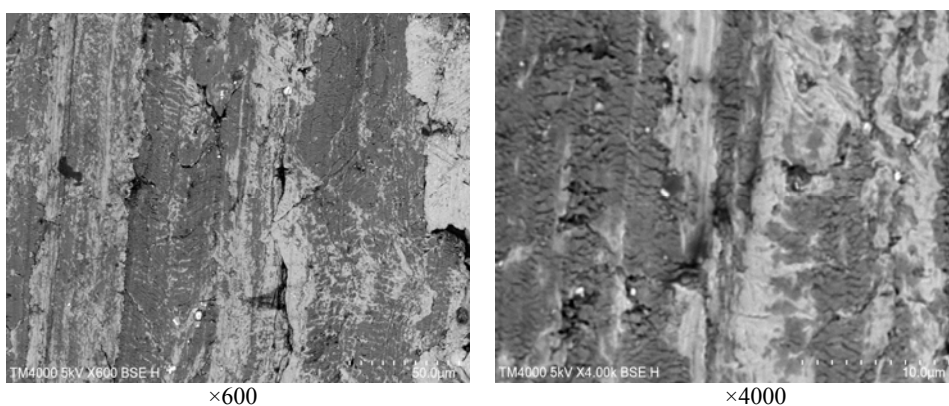


Рис. 3. Электропластическое волочение с полярностью «плюс-минус» на технологическом переходе 2,98–2,64 мм; $V = 0,5$ м/с

Образцы проходили специальное химическое травление. Исследования проводились на приборе «Пост микроконтроля МК-3» (на базе микроскопа МИ-1) с использованием программ AutoscanObject (программа выделения и анализа объектов на растровых изображениях) и AutoscanAreas (программа выделения и анализа площадей на растровых изображениях). Под влиянием импульса тока большой плотности происходит модификация микроструктуры шлифа. Размеры зерен алюминиевой проволоки, деформированной без тока, намного больше, чем с током. Зерна принимают более округлую форму с уменьшением удлинения зерна, с преимущественной ориентацией аксиальной структуры, существенно уменьшается длина, ширина и удлинение зерен, вертикальная и горизонтальная проекции [4–7].

Исследования по параметру «длина зерна» показали, что наибольшему деформационному влиянию подвержены образцы с направлением тока от плюса к минусу, что свидетельствует о достаточно высоком уровне остаточных напряжений, а также о том, что под действием электрического тока на всех технологических переходах в зоне деформации происходит уменьшение площади и периметра зерен, и микроструктура деформационной части образца становится мелкозернистой.

Литература

1. Савенко, В. С. Вклад пондеромоторных факторов в реализацию электропластической деформации / В. С. Савенко, О. А. Троицкий, А. Г. Силивонец // Известия НАН Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2017. – № 1. – С. 85–91.

22 Секция 1. Современные технологии проектирования в машиностроении

2. Savenko, V. S. Electroplastic deformation by twinning metals / V. S. Savenko // Actamechanica automatic. – 2018. – Vol. 12, N 4. – P. 6–12.
3. Троицкий, О. А. Фундаментальные и прикладные исследования электропластической деформации металлов : монография / О. А. Троицкий, В. С. Савенко. – Минск : ИВЦ Минфина, 2013. – 375 с.
4. Рошупкин, А. М. О влиянии электрического тока и магнитного поля на взаимодействие дислокаций с точечными дефектами в металлах / А. М. Рошупкин, И. Л. Батаронов // Физика твердого тела. – 1988. – Т. 30, № 11. – С. 3311.
5. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы / Ю. В. Баранов, О. А. Троицкий, Ю. С. Авраамов. – Москва : МГИУ, 2001. – 844 с.
6. Savenko, V. S. Electroplastic effect under the simultaneous superposition and magnetic fields / V. S. Savenko // Journal of applied physics. – 1999. – N 5. – P. 1–4.
7. Сташенко, В. И. Новые исследования вибрации металлов с помощью пьезометрических преобразователей под влиянием импульсов тока в статических и динамических условиях / В. И. Сташенко, О. А. Троицкий, О. Б. Скворцов, В. С. Савенко // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении : IV Междунар. науч. конф., Москва, 24–26 нояб. 2015 г. / Ин-т машиноведения им. А. А. Благоврадова РАН. – Москва, 2015. – С. 242–244.

UDC 57.086.83

MEDICAL AND BIOLOGICAL ASPECTS OF THE APPLICATION OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON POLYLACTIDE FOR BIOPRINTING

S. A. Filatov¹, M. N. Dolgikh¹, O. S. Filatova¹, E. A. Paz Esteves²,
N. A. Gavrilenko¹, E. V. Batyrev¹

¹A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus, Minsk

²Center for the Study of Advanced and Sustainable Manufacturing,
University of Matanzas, the Republic of Cuba

The paper presents the results of analysis of PLA structures based on gyroids. The possibilities of the development of more stable and durable structures are investigated.

Keywords: 3D-bioprinting, composite materials, polylactide, bioprinting, scaffolds, biodegradation.

МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИЛАКТИДА ДЛЯ БИОПЕЧАТИ

С. А. Филатов¹, М. Н. Долгих¹, О. С. Филатова¹, Э. А. Пас Эстевес²,
Н. А. Гавриленко¹, Е. В. Батырев¹

¹Государственное научное учреждение «Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси», г. Минск

²Центр изучения передового и устойчивого производства,
Университет Матансаса «Камило Сьенфуэгос», Республика Куба

Представлены результаты анализа конструкций ПЛА на основе гироидов. Исследованы возможности создания более устойчивых и долговечных конструкций.

Ключевые слова: 3D-био печать, композитные материалы, полилактид, био печать, скаффолды, биодegradация.

The purpose of the work is to study the medical and biological aspects of creating implants with controlled biodegradation using 3D-bioprinting from biocompatible composite materials based on polylactide (PLA) with biocompatible nano-sized fillers.

Three-dimensional printing (3D-bioprinting) of implants using biocompatible PLA-based materials can be used to create porous three-dimensional scaffolds (matrices, cell scaffolds) to replace human tissue defects in regenerative surgery [1]. Biodegradable three-dimensional structures provide replacement mechanical and transport functions, including drug delivery with subsequent replacement of the scaffold with the body's own tissues.

To carry out the experiments, we used PLA, CAS No: 33135-50-1, from eSunMed, China with additives of hydroxyapatite (HAp) and calcium phosphate (CaP) (Figure 1). For 3D-printing (bioprinting) of samples, a specialized 3D machine was used FDM (Fused Deposition Modeling) bioprinter with an extruder temperature of 165–180 °C and a layer thickness of 0.2–0.4 mm.

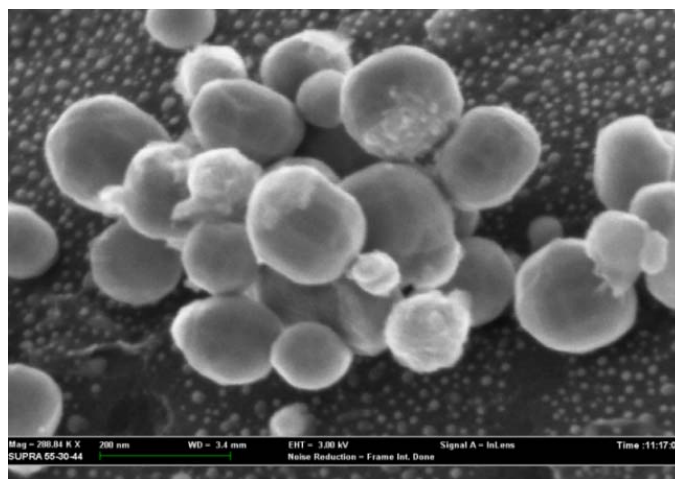


Figure 1. SEM image of nanoparticles HAp in PLA matrix

Tests to assess the fragility of scaffolds representing a three-dimensional composition of PLA thermoplastic filaments (with unidirectional or multidirectional strengthening components and cellular components) were carried out according to State Standard 4647–2015 for measuring impact strength using the Charpy method, which made it possible to determine the mechanical characteristics of the samples at high strain rates. The typical Charpy impact strength values for the samples with continuous filling are 4.6–4.8 kJ/m², for samples with gradient filling – 3.5–4.0 kJ/m², depending on the type of filling. Laboratory (accelerated) tests of biodegradation of PLA-based tissue-engineered matrices were carried out in a thermostated simulated body fluid (SBF) with a composition and concentration of ions close to the concentration of ions in human blood plasma. The testing regime included placing samples in SBF at a temperature of 37–40 °C for a period of 24 to 580 hours with periodic monitoring of the mass and structure of the tested samples.

It is established that the main mechanism of PLA matrices destruction from PLA formed by the FDM method is the hydrolysis of ester bonds. In this case, hydrolytic degradation is additionally catalyzed by the newly formed carboxyl groups of PLA, as a result the destruction of massive fragments of three-dimensional structures of tissue-engineered implants can occur faster, due to the accumulation of lactic acid and localized low pH values (3.2–3.4).

24 Секция 1. Современные технологии проектирования в машиностроении

To reduce the volume of the polymer (PLA) framework, it is proposed to use the topology of gyroids with a periodic surface of minimum energy, trigonometrically approximated by the equation $\cos(x)\sin(y) + \cos(y)\sin(z) + \cos(z)\sin(x) = 0$, to fill the internal volume, that allows the formation of three-dimensional biocompatible structures with low density and high strength (Figure 2).

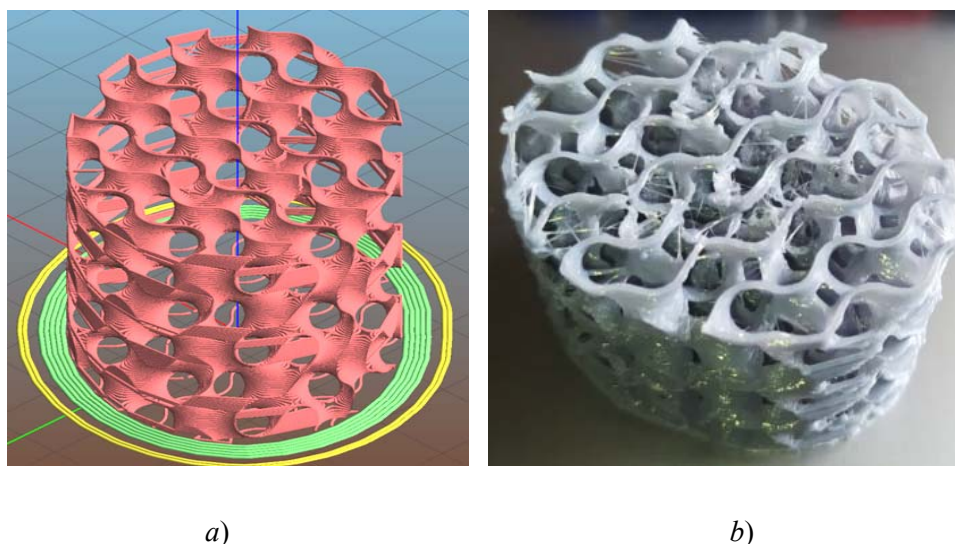


Figure 2. PLA frame model (a) and test sample with a 3D-gyroid structure (b)

The surface of the gyroid with a constant average curvature allows dividing the volume of the tissue-engineered framework into two congruent labyrinths with the channels formed in the directions (100) and (111) and passages at an angle of 70.5 degrees to any channel. The formation of the implant framework filling with a gyroid structure was performed using Slik3 and Ultimaker Cura slicers. The obtained results made it possible to determine the characteristics of the degradation of three-dimensional PLA scaffold structures with a gradient density and a variable type of filling of the internal volumes of the frame (scaffold) and to create a computer model of the biodegradation of 3D-composite PLA structures (Figure 3).

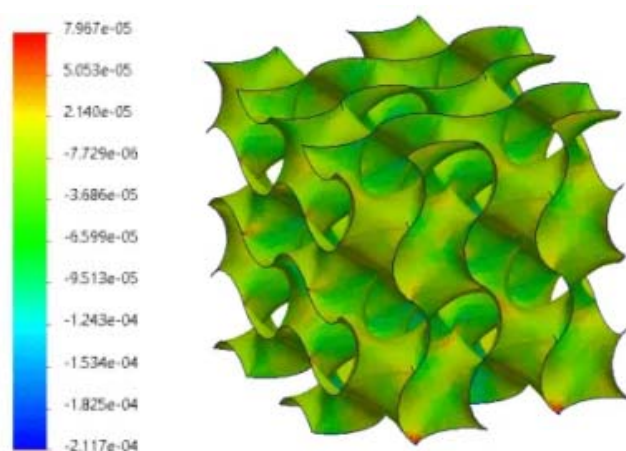


Figure 3. Localization of stress deformations in a gyroid structure under loading in the direction $[0, 0, 1]$

It was also found that the failure of the gyroid-type structures under mechanical load has several features related to their geometry and the materials they are made of. In particular, failure can occur in areas with the highest stress concentrations. In gyroids, such zones can occur at the points of connection of elements or near defects. In addition, gyroid structures can respond differently to static and dynamic loads. For example, fatigue cracks can be expected to form under dynamic loads.

Gyroid structures can exhibit fractal properties to the greatest extent, which affects the nature of crack propagation and failure. This can complicate the prediction of behavior under loads.

At the same time, modern gyroid structures can be made adaptive, changing their rigidity in response to changes in loads, which can help avoid failures.

Studying these features can help in the development of more stable and durable PLA structures based on gyroids, taking into account specific application conditions and the characteristics of materials with nanoscale fillers. This work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Basic Research (Project No. T23KUB-007).

References

1. Calcium phosphate compositions with polyvinyl alcohol for 3D-printing in Inorganic Materials / O. N. Musskaya, V. K. Krut'ko, A. I. Kulak [et al.] // Applied Research. – 2020. – Vol. 11, N 1. – P. 192–197.
2. Composite materials and coatings based on polylactide and nanosized fillers for bioprinting / S. A. Filatov, M. N. Dolgikh, O. S. Filatova [et al.] // Heat and mass transfer–2023 : collection of scientific papers / ITMO named after A. V. Lykov of the National Academy of Sciences of Belarus. – Minsk, 2023. – P. 283–287.
3. Formation of tissue-engineering materials based on porous scaffolds from bioresorbable materials based on polylactide / S. A. Filatov, M. N. Dolgikh, E. A. Paz Esteves [et al.] // Actual problems of strength : materials of the LXVIII Int. scientific conferences, Vitebsk, May 27–31, 2024 / UP “IVC of the Ministry of Finance”. – Minsk, 2024. – P. 313–315.

УДК 539.2-022.532

ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ PLA С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН

**С. А. Филатов¹, М. Н. Долгих¹, О. С. Филатова¹, Э. А. Пас Эстевес²,
Н. А. Гавриленко¹, Е. В. Батырев¹**

¹ *Государственное научное учреждение «Институт
тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной
академии наук Беларуси», г. Минск*

² *Центр изучения передового и устойчивого производства,
Университет Матансаса «Камило Сьенфуэзос», Республика Куба*

Возможность интерактивного внесения различных функциональных групп и компонентов на поверхность углеродных волокон позволяет адаптировать свойства в зависимости от планируемого применения. Добавление допированных углеродных волокон может быть сочетано с методами создания пористых структур, что улучшает прочность и проницаемость для биологических жидкостей, что, в свою очередь, способствует лучшей остеоинтеграции.

Ключевые слова: аддитивные технологии, послойный синтез, полимерные материалы, функционализация материалов, 3D-печать.

FUNCTIONALIZATION OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON PLA AND CARBON FIBERS

S. A. Filatov¹, M. N. Dolgikh¹, O. S. Filatova¹, E. A. Paz Esteves²,
N. A. Gavrilenko¹, E. V. Batyrev¹

¹A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus, Minsk

²Center for the Study of Advanced and Sustainable Manufacturing,
University of Matanzas, the Republic of Cuba

The ability to introduce various functional groups and components onto the surface of carbon fibers interactively allows its properties to be adapted depending on the planned application. The addition of doped carbon fibers can be combined with techniques to create porous structures, that improves strength and permeability to biological fluids ensuring better osseointegration.

Keywords: additive technologies, layer-by-layer synthesis, polymer materials, functionalization of materials, 3D-printing.

Аддитивные технологии являются технологиями послойного синтеза, позволяющими осуществить прямое «цифровое» производство сложных трехмерных изделий по компьютерной модели. Использование биосовместимых углеродных волокон [1, 2] в полимерах, используемых для 3D-печати, позволяет сформировать изделия, включающие трехмерные структуры, имеющие различную электрическую проводимость, заданные механические и теплофизические свойства.

Другим перспективным классом материалов, для функционализации таких традиционных полимерных материалов как полилактида (PLA), являются углеродные (карбонизированные) аэрогели с большой удельно площадью поверхности (активированные углеродные волокна, аэрогели). Углеродные волокна и углеродные аэрогели имеют графитовую структуру с прочными ковалентными связями сильно анизотропных кристаллитов, со слабыми силами Ван-дер-Ваальса между слоями.

Модификация поверхности углеродных материалов перед введением их в PLA матрицу может быть осуществлена воздействием плазмы, термической и химической обработкой. Хотя благодаря сильным углеродным ковалентным связям поверхность углеродных материалов инертна по отношению к кислотам и щелочам при комнатной температуре, химическая модификация поверхности возможна в атмосфере барьерного разряда, либо за счет окисления или фторирования.

Примером функционализации является модификация поверхности углеродных волокон Бусофит барьерным разрядом в атмосфере изобутана и водорода (рис. 1).

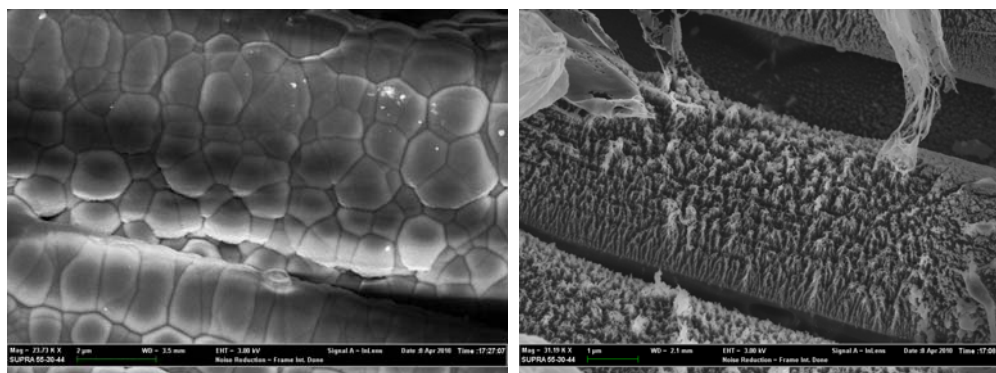


Рис. 1. Модификация поверхности углеродных волокон барьерным разрядом в атмосфере изобутана (слева) и водорода (справа)

Для создания полимерных материалов с бактерицидными свойствами в их состав можно вводить волокна, декорированные металлическими наночастицами при их обработке в растворах солей с последующим восстановлением в водороде при температурах до 400 °С (рис. 2).

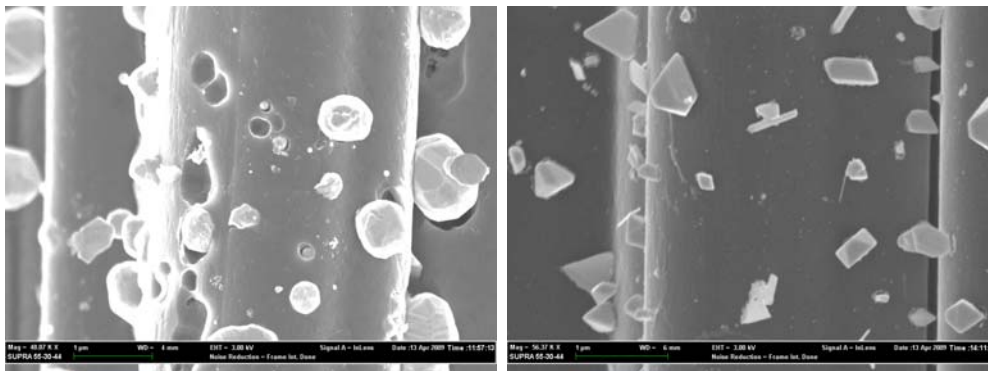


Рис. 2. Углеродное волокно, используемое в качестве наполнителя полимерного PLA филамента при 3D-биопринтинге, декорированное частицами кобальта (слева) и никеля (справа)

Использование плазмы барьерного разряда в электродной системе, где один из электродов изолирован от поверхности, на которую подается напряжение, позволяет создать высокоэнергетические условия для ионизации и возбуждения газов, при этом минимизируя термическое воздействие на обрабатываемый материал. В таком процессе плазма взаимодействует с углеродными волокнами, приводя к удалению загрязнителей и образованию активных функциональных групп (например, $-\text{OH}$, $-\text{COOH}$, $-\text{NH}_2$). Это увеличивает реакционную способность поверхности, а возросшая реакционная способность улучшает адгезию углеродных волокон к матрицам, что особенно важно в композитных материалах. Применяя плазменную обработку, можно создать пространство, способствующее адсорбции металлов или оксидов, которые затем будут преобразованы в наночастицы. Эти частицы могут служить для введения новых функциональных свойств, таких как антимикробное действие или каталитическая активность. При этом процесс плазменной функционализации позволяет точно контролировать размер и распределение наночастиц на поверхности углеродных волокон через регулирование условий обработки (параметры давления, времени и состава плазмы).

Существенным преимуществом плазменной функционализации является то, что плазма барьерного разряда дает возможность проводить функционализацию без разрушения волокон (это критично для сохранения их механических свойств). Возможность интерактивного внесения различных функциональных групп и компонентов на поверхность углеродных волокон позволяет адаптировать свойства в зависимости от планируемого применения. В качестве наполнителей для полимерных материалов могут быть также использованы углеродные аэрогели, полученные по золь-гель технологии (рис. 3).

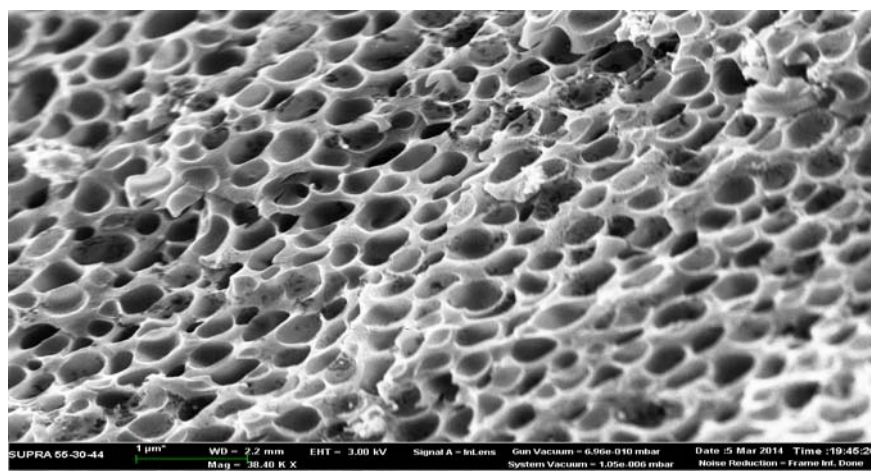


Рис. 3. Типичная структура углеродного аэрогеля с наноразмерными мезопорами ($S_{BET} = 800\text{--}900 \text{ m}^2/\text{g}$)

Преимущества остеоимплантов с добавлением углеродных волокон обусловлены увеличением прочности и жесткости материала. Это позволяет уменьшить риск деформации и разрушения импланта под действием нагрузок, которые возникают в процессе эксплуатации. Также структура углеродных волокон может способствовать улучшению взаимодействия с костной тканью. Многочисленные работы показали, что импланты с углеродными волокнами лучше интегрируются с окружающими тканями, что повышает надежность их фиксации.

Использование углеродных волокон позволяет создавать более легкие конструкции по сравнению с традиционными металлическими имплантами, сохраняя при этом достаточную прочность.

Функционализация поверхности углеродных волокон с помощью плазмы барьерного разряда – это эффективный и многообещающий подход, дающий возможность создавать новые свойства и улучшать взаимодействие углеродных волокон с различными матрицами, что открывает новые перспективы в области материаловедения и новейших технологий. Функционализированные углеродные волокна могут использоваться в различных отраслях, в том числе в медицине (например, для остеоимплантов), а также в композитных материалах для улучшения их механических и химических свойств.

Добавление допированных углеродных волокон возможно в сочетании с методами создания пористых структур, в результате чего улучшается прочность и проницаемость для биологических жидкостей, что, в свою очередь, способствует лучшей остеоинтеграции. Следует отметить, что углеродные волокна считаются биосовместимыми. Это минимизирует риск отторжения импланта организмом, а долгосрочные эффекты на биологическую совместимость и свойства материалов при длительном контакте с живыми тканями требуют дальнейших исследований. Для достижения оптимальных биомеханических свойств и остеоинтеграции необходимо учитывать особенности структуры и распределения углеродных волокон в матрице.

Выполненные исследования показывают, что остеоимпланты с добавлением углеродных волокон обладают потенциалом для улучшения результатов хирургических вмешательств и качества жизни пациентов, но требуют дальнейшего изучения и оптимизации.

Введение углеродных наполнителей в состав PLA при биопринтинге перспективно для создания остеоимплантатов с высокой биохимической инертностью и хорошей пролиферацией клеточного материала.

Литература

1. Carbon fiber-reinforced bone cement in orthopedic surgery / R. M. Pilliar, R. Blackwell, I. Macnab, H. U. Cameron // Biomed. Mater. Res. – 1976. – Vol. 10. – P. 893–906.
2. A new volar plate made of carbon-fiber-reinforced polyetheretherketon for distal radius fracture: Analysis of 40 cases / L. Tarallo, R. Mugnai, R. Adani [et al.] // Orthop. Traumatol. – 2014. – July 15 (4). – P. 277–283.

УДК 617.55-007.43-089.844

**ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ СОЗДАНИЯ
ПЕРСОНАЛИЗИРОВАННЫХ СТЕЛЕК**

**С. А. Филатов¹, М. Н. Долгих¹, Э. А. Пас Эстевес², О. С. Филатова¹,
Н. А. Гавриленко¹, Е. В. Батырев¹**

*¹Государственное научное учреждение «Институт
тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной
академии наук Беларуси», г. Минск*

*²Центр изучения передового и устойчивого производства,
Университет Матансаса «Камило Сьенфуэгос», Республика Куба*

Рассмотрены особенности создания персонализированной обуви по цифровым моделям с помощью аддитивных технологий 3D-печати. Показано, что использование аддитивных подходов к производству обуви позволяет ускорить процесс производства индивидуальных корректирующих и ортопедических изделий.

Ключевые слова: 3D-печать, аддитивное производство, персонализированные технологии.

**3D-PRINTING TECHNOLOGIES FOR CREATING
PERSONALIZED INSOLES**

**S. A. Filatov¹, M. N. Dolgikh¹, E. A. Paz Esteves², O. S. Filatova¹,
N. A. Gavrilenko¹, E. V. Batyrev¹**

¹A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus, Minsk

*²Center for the Study of Advanced and Sustainable Manufacturing,
University of Matanzas, the Republic of Cuba*

The article examines the features of creating personalized footwear based on digital models using additive 3D-printing technologies. The use of additive approaches to the production of footwear allows us to speed up the process of producing customized corrective and orthopedic products.

Keywords: 3D-printing, additive manufacturing, personalized technologies.

Современное производство обуви в мире достигает 20 млрд пар обуви в год (стоимость глобального рынка обуви – 400 млрд долл.). Для ее прототипирования широко используется 3D-печать. В последние годы развитие аддитивного производства позволило перейти к массовому производству так называемых межподошв (3D-printed midsoles) – сэндвич-структур на основе материала, зажатого между внешней и внутренней стороной обуви. Уровень использования 3D-печати в произ-

30 Секция 1. Современные технологии проектирования в машиностроении

водстве обуви составляет до 0,3 % [1] и, как ожидается, составит 1,5 % от общей мировой выручки от продажи обуви к 2029 г. Ведущие мировые обувные компании используют технологию аддитивного производства для улучшения характеристик конечного продукта и создания локализованных и персонализированных продуктов. Большинство промежуточных подошв изготавливаются из пены этиленвинилацетата (EVA) и менее прочны, чем полиуретановые полимерные материалы, напечатанные на 3D-принтере. Кроме того, 3D-печать позволяет производителям оптимизировать структуру межподошвы, чтобы удовлетворить более широкий спектр индивидуальных предпочтений [2–4].

Процесс производства персонализированной обуви включает операции сканирования стопы, исследование динамики нагружения стоп при ходьбе или беге, информацию о походке и корректирующие операции, зависящие от функционального назначения обуви.

Современные специализированные 3D-сканеры ног по конструкции близки к планшетным сканерам и плантографам и обеспечивают регистрацию контура подошвы даже у самых полых стоп, регистрацию медиального контура, включая верхушку медиальной лодыжки, боковых контуров и задней части пятки (рис. 1). Это дает возможность точного формирования индивидуального трехмерного профиля стопы, описывающего подробные размеры стопы, включая длину, ширину, высоту и обхват – персональный 3D-паспорт стопы.

Специальный датчик давления в таком сканере позволяет измерить распределение давления по поверхности стоп при статической и динамической нагрузке (рис. 2). Сенсоры передают в программу информацию о походке: изменения положения ноги, давления на разных участках ступни при ходьбе. Анализ этой информации выявляет особенности и патологии опорно-двигательного аппарата, формирует требования к индивидуальным стелькам и межподошвам.

Дополнительная информация может быть получена при анализе походки с помощью компьютеризированной видеокамеры и анализа движения в замедленном темпе, применяя такие программы, как Kinovea.



Рис. 1. 3D-сканер стоп. Сканирование геометрии стопы
3D-сканером RSscan Tiger

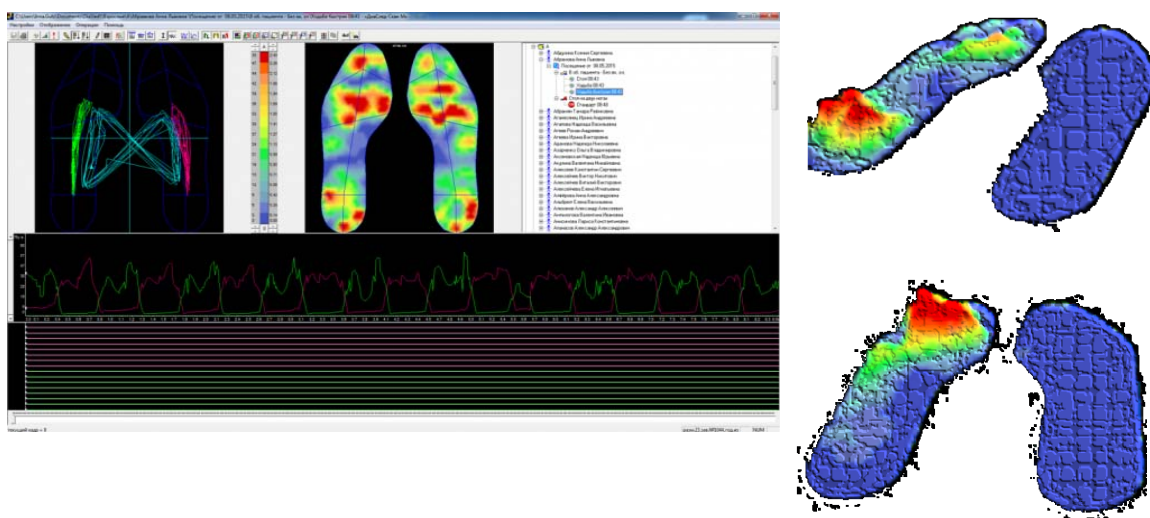


Рис. 2. Компьютерная диагностика динамической нагрузки на стопы с отображением нагрузки на разных отделах стопы при стоянии и ходьбе в комплексе «Диа-След»

Полученная информация используется для создания индивидуальных анатомических стелек или межподошв при помощи FDM или SLA 3D-принтера и специализированного программного обеспечения. В то время как традиционные ортопедические методы основаны на статических отпечатках стопы, цифровые модели для 3D-печати используют динамические данные объемного сканирования и анализа походки, учитывая уникальные модели движения стопы.

В наших экспериментах для регистрации распределения давления на поверхности стоп применялся сканер Medilogic (T&T Medizintechnik GmbH, Германия) с программным обеспечением FootScan ver. 4.4. Характерное распределение давления по поверхности стопы приведено на рис. 3.

Для создания цифровой модели стопы информация о распределении давления по поверхности стопы совмещалась с подоскопическим изображением стопы (рис. 4). Полученное изображение разделялось на области с фиксированным уровнем жесткости (упругости) в соответствии с решаемой терапевтической задачей и используемыми материалами (рис. 5).

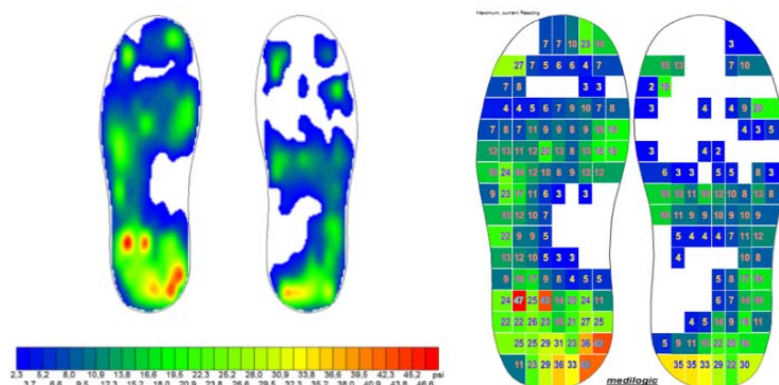


Рис. 3. Характерное распределение давления по поверхности стопы при использовании сканера Medilogic

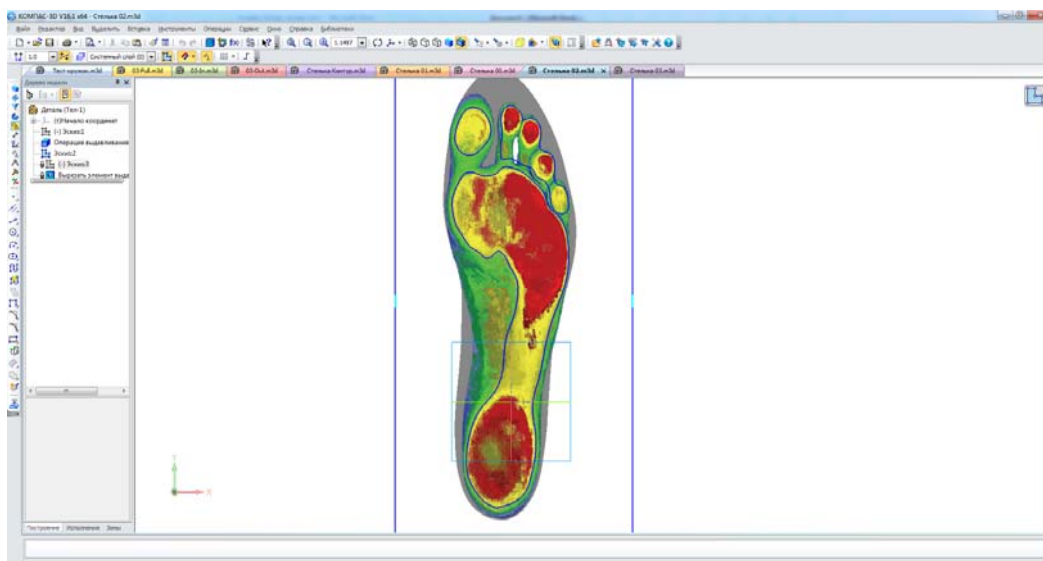


Рис. 4. Совмещение подоскопического изображения и распределения давления по поверхности стопы в КОМПАС 3D

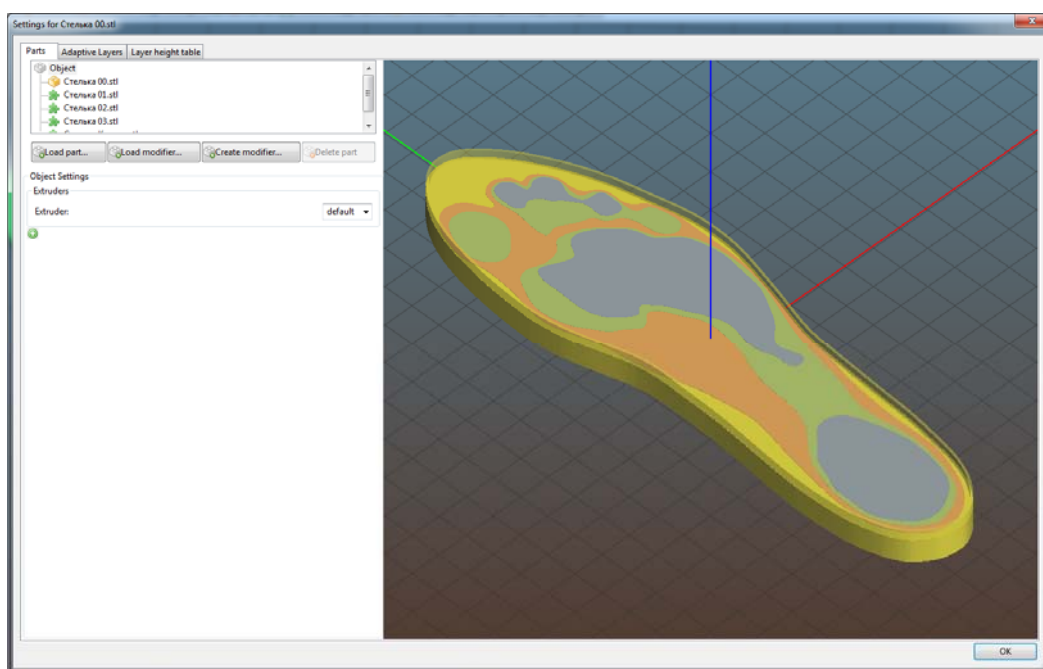


Рис. 5. Области равного давления на поверхности стопы при создании цифрового двойника персонализированной межподошвы (стельки)

После разделения и корректировки контуров областей равного давления задается различный тип заполнения областей (рис. 6, 7) и выполняется подготовка G-кода для печати в программе Slic3r. 3D-печать персонализированной стельки на 3D-принтере была выполнена с применением термопластичного полиуретана Sharebot TPUaz batchJW1377 с соплом 0,4 мм.

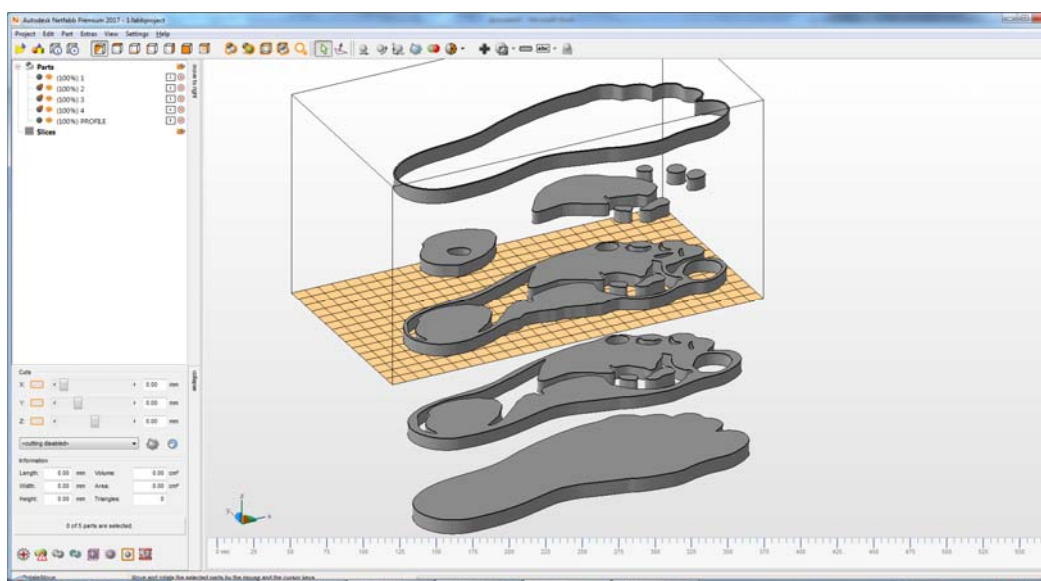


Рис. 6. Разделение 3D-модели персонализированной стельки на области различной жесткости

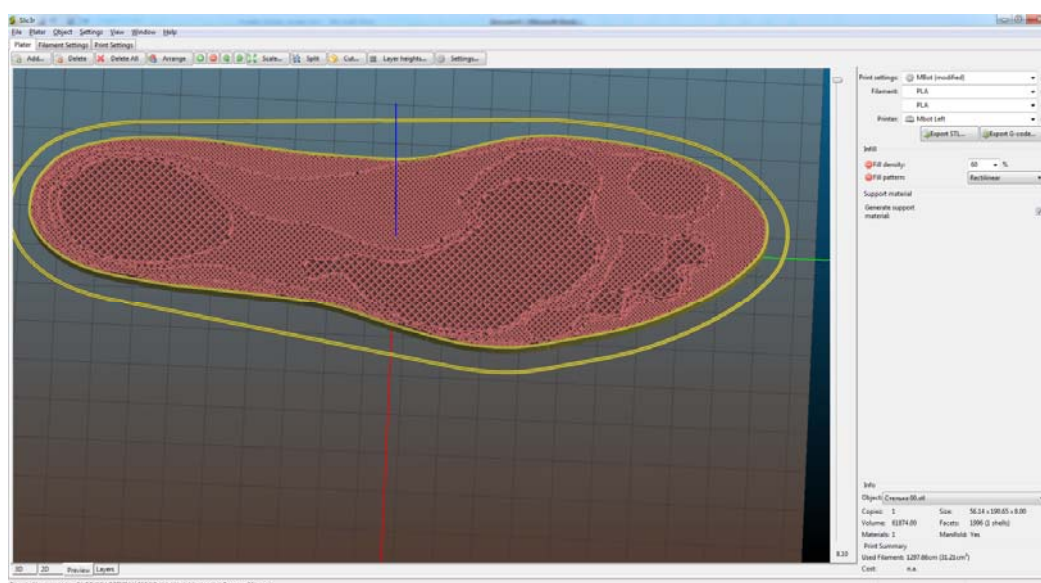


Рис. 7. 3D-модель персонализированной стельки с выделенными областями различной жесткости в слайсере Slic3r

Измерение физико-механических свойств характеристик полученных образцов персонализированной стельки было выполнено с использованием твердомера ИПМ-1К (Государственный реестр средств измерений Республики Беларусь № РБ 03 03 425815). При измерениях контролировалась твердость (по Шору и в международных единицах IRHD), оценивалась эластичность, вязкость, динамический модуль упругости и релаксационные характеристики как исходного TPU, так и участков стельки с различным типом заполнения.

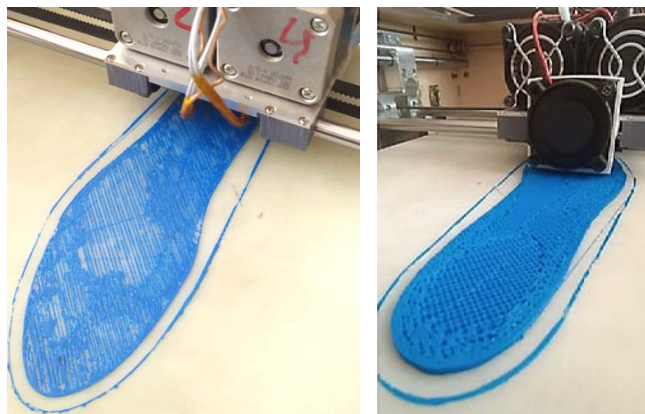


Рис. 8. 3D-печать персонализированной стельки на 3D-принтере с использованием термопластичного полиуретана Sharebot TPUaz batchJW1377



Рис. 9. Тестирование персонализированной стельки

Применение аддитивных подходов к производству обуви позволяет ускорить процесс производства индивидуальных корректирующих и ортопедических изделий, исключая длительные периоды ожидания, связанные с традиционными методами. Кроме того, эффективность процесса 3D-печати дает возможность клиникам обслуживать больше пациентов за меньшее время, увеличивая рентабельность и качество лечения и коррекции заболеваний стопы.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № T23КУБ-007).

Л и т е р а т у р а

1. 3D-Printed Footwear 2019–2029, an Analysis of the Market Potential of 3D-Printing in the Footwear Industry. – URL: <https://www.businesswire.com/news/home/20190415005378/en/3D-Printed-Footwear-2019-2029-An-Analysis-of-the-Market-Potential-of-3D-Printing-in-the-Footwear-Industry-ResearchAndMarkets.com>.
2. Jandova, S. Benefits of 3D-Printed and Customized Anatomical Footwear Insoles for Plantar Pressure Distribution / S. Jandova, R. Mendricky // 3D Print Addit Manuf. – 2022. – Dec. 1. – N 9 (6). – P. 547–556. – DOI 10.1089/3dp.2021.0002
3. Shadpour Mallakpour. Advanced application of additive manufacturing in the footwear industry: from customized insoles to fully 3D-printed shoes / Shadpour Mallakpour, Zeinab Radfar, Chaudhery Mustansar Hussain // Medical Additive Manufacturing / editor(s): Shadpour Mallakpour, Chaudhery Mustansar Hussain. – In Additive Manufacturing Materials and Technologies. – Elsevier, 2024. – P. 153–178.
4. Коновалова, О. Б. Особенности создания обуви с использованием 3D-технологий и 3D-печати / О. Б. Коновалова, В. В. Костылева, Е. В. Федосеева // Костюмология. – 2022. – Т. 7, № 1. – С. 1–15.

УДК 628.1/621.762

АЭРАЦИЯ ВОДЫ ТРУБЧАТЫМИ И ПЛОСКИМИ ПОРИСТЫМИ АЭРАТОРАМИ

В. В. Савич, А. М. Тарайкович, Р. П. Голодок, Д. Ю. Вербицкий

Государственное научное учреждение «Институт порошковой
металлургии имени академика О. В. Романа», г. Минск,
Республика Беларусь

Отмечено, что в технологии очистки воды важную роль играют биохимические и физико-химические методы, в которых решающее значение имеют процессы тонкой диспергации газовой фазы (воздуха, кислорода, озонородной смеси и других газов) в воде с использованием аэраторов разных типов и конструкций. При очистке питьевой воды аэрация способствует удалению гидроксида железа, свободной углекислоты и сероводорода, а озонирование дополнительно обеззараживает и улучшает качество воды.

Приведено сравнение технико-экономической эффективности очистки воды при использовании для ее насыщения газом пористых трубчатых и плоских аэраторов.

Ключевые слова: аэратор, аэротенк, озонирование, диспергация, пористость, титан.

WATER AERATION WITH TUBULAR AND FLAT POROUS AERATORS

V. V. Savich, A. M. Taraikovich, R. P. Golodok, D. Yu. Verbitsky

Institute of Powder Metallurgy named after Academician O. V. Roman,
Minsk, the Republic of Belarus

The main objective of this work is to compare the technical and economic efficiency of water purification when using porous tubular and flat aerators to saturate it with gas. Biochemical and physico-chemical methods play an important role in water purification technology, in which the processes of fine dispersion of the gas phase (air, oxygen, ozone-air mixture and other gases) in water using aerators of various types and designs play a decisive role. Air dispersion is used to ensure the vital activity of microorganisms that mineralize organic substances and other pollutants dissolved in wastewater, as well as to mix the sludge mixture. When purifying drinking water, aeration contributes to the removal of iron hydroxide, free carbon dioxide and hydrogen sulfide, and ozonation additionally disinfects and improves water quality. It is the technical level of aeration systems that determines the degree and quality of purification, as well as the technical and economic performance of treatment facilities. The dispersion of gas in liquid is most often carried out using porous aerators placed at the bottom of an aeration tank or contact chamber, through which gas is pumped.

Keywords: aerator, aeration tank, ozonation, dispersion, porosity, titanium.

Диспергация воздуха применяется для обеспечения жизнедеятельности микроорганизмов, осуществляющих минерализацию растворенных в сточных водах органических веществ и других загрязнений, а также для перемешивания иловой смеси [1].

Именно техническим уровнем систем аэрации определяется степень и качество очистки, а также технико-экономические показатели работы очистных сооружений. Диспергация газа в жидкости чаще всего осуществляется при помощи помещаемых на дно аэротенка или контактной камеры пористых аэраторов, через которые нагнетается газ [2].

В качестве объекта исследований выбраны два типа аэраторов: трубчатый Ø 120 × 600 мм и дисковый – Ø 290 мм. Оба пористых аэратора получены прессованием и спеканием губчатого порошка титана марки ТПП-5 и имеют близкие пористость (0,38–0,41) и средние размеры пор (~150–180 мкм) [3]. Исследования процесса

36 Секция 1. Современные технологии проектирования в машиностроении

аэрации проводились в экспериментальной установке, разработанной в Институте порошковой металлургии НАН Беларуси и представляющей собой прозрачную емкость габаритами $2000 \times 1000 \times 800$ мм, в которую до уровня 600–700 мм наливали чистую водопроводную воду, а на дне в специальной оснастке размещали поочередно исследуемые аэраторы [3]. К аэраторам через редуктор с плавной регулировкой подавали воздух от пневмосети, давление и расход которого фиксировали манометром и ротаметром. На рис. 1 представлена генерация пузырьков воздуха в воде трубчатым и дисковым пористыми аэраторами.

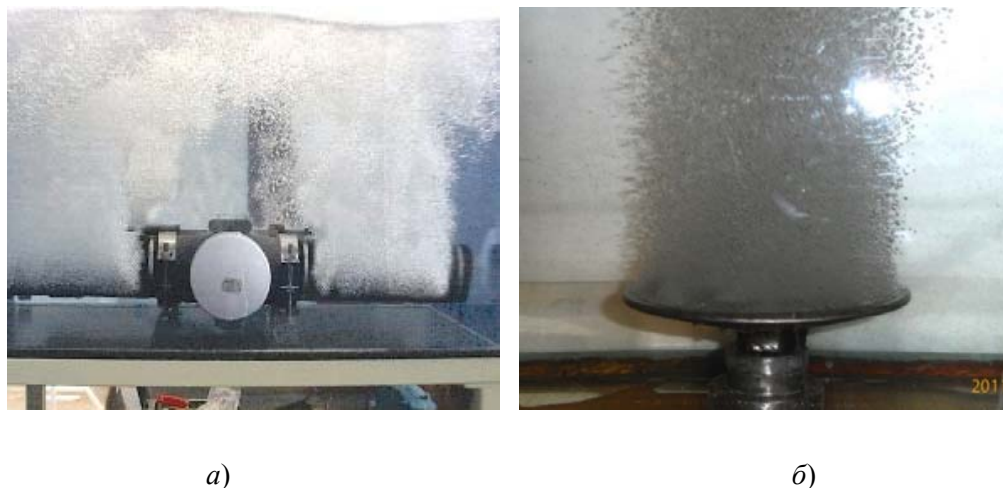


Рис. 1. Генерация пузырьков воздуха в воде трубчатым (а) и дисковым (б) пористыми аэраторами, спеченными из губчатого порошка титана марки ТПП-5

Как видно из рис. 1, а, трубчатые аэраторы имеют существенный недостаток – неэффективное использование поверхности, связанное с трубчатой формой. Во-первых, используется лишь $1/4$ – $1/3$ поверхности трубы выше горизонтальной диаметральной плоскости [4]. Во-вторых, пузырьки, выходящие из нижней части трубы, огибая ее поверхность при всплытии, коалесцируют, увеличиваясь в размерах, что приводит к резкому увеличению скорости всплытия, переходу на струйный режим движения и существенному уменьшению времени и поверхности контакта кислорода воздуха с жидкостью [4]. При этом дисковый аэратор использует всю свою поверхность для генерации пузырьков номинального размера.

Плоские пористые аэраторы по сравнению с другими распространенными типами имеют наименьшие затраты электроэнергии (табл. 1).

Таблица 1

Сравнение энергоэффективности различных систем аэрации при производительности станции аэрации $50\,000 \text{ м}^3/\text{сут}$ [3]

Тип системы аэрации	Затраты электроэнергии, кВт/кг БПК ₅	Потребление электроэнергии, кВт · ч/сут
Плоские пористые аэраторы	0,47	2720
Механические поверхностные аэраторы	0,78	3730
Трубчатые пористые аэраторы	0,79	3780
Перфорированные трубы	0,85	7000

С 1987 г. 2 тыс. пористых дисковых аэраторов из спеченного порошка титана ТПП-5 успешно эксплуатируются на очистной водопроводной станции г. Минска без ремонтов и заметного ухудшения своих эксплуатационных характеристик. Общая производительность станции подготовки питьевой воды составляет 200 000 м³/сут.

Замена системы диспергирования с керамическими пористыми трубами «Aerolit» (фирма «Schumacher») на дисковые пористые титановые аэраторы позволила уменьшить на 14–17 % дозу и подачу озона при сохранении параметров очистки питьевой воды. В табл. 2 приведено сравнение технико-экономических показателей одной из камер озонирования предприятия речного водозабора ПО «Минскводоканал» с импортными и отечественными аэраторами.

Применение пористых титановых дисковых аэраторов типа ПА-2 позволило не только снизить в 3 раза капитальные затраты, но и уменьшить на 40 % среднюю потребляемую воздухоудовками мощность, сберечь значительное количество энергоресурсов. В 1995–1996 гг. 5 тыс. аэраторов ПА-2 были установлены на Восточной водопроводной станции г. Москвы производительностью 1 200 000 м³/сут. С начала 2000-х гг. на Восточную и Рублевскую водопроводные станции г. Москвы было поставлено еще свыше 5000 тыс. аэраторов ПА-2-1.

Таблица 2

**Характеристика камеры озонирования питьевой воды
ПО «Минскводоканал» с разными пористыми аэраторами**

Тип аэратора и его изготовитель	«Aerolit», «Schumacher», ФРГ	ПА-2, ИПМ, Беларусь
Форма и размеры	Труба, Ø 150 × 1000 мм	Диск, Ø 190 мм
Материал	Керамика SiO ₂ , связка	Порошок титана
Подача озono-воздушной смеси в камеру, м ³ /ч	1020–1200	800–960
Доза озона, г/м ³	2,2–2,8	1,5–2,0
Количество аэраторов	240	480
Цена аэратора (в 1986 г.), у. е.	128,59	21,35
Капитальные затраты, у. е.	30861,6	10248,0
Потребляемая воздухоудовкой мощность, кВт	70–80	55–60

Таким образом, пористые дисковые аэраторы типа ПА-2, ПА-2-1, полученные прессованием и спеканием губчатого порошка титана, разработанные и изготовленные в Институте порошковой металлургии имени академика О. В. Романа, проработали в камерах озонирования очистной водопроводной станции г. Минска с 1987 по 2003 г. без замены и ремонтов при сохранении показателей очистки воды. Замена аэраторами ПА-2 пористых керамических труб «Aerolit» фирмы «Schumacher» (ФРГ) позволила уменьшить на 14–17 % дозу озона и подачу озонородушной смеси при сохранении параметров очистки питьевой воды, сократить почти на 40 % среднюю потребляемую воздухоудовками мощность, сберечь значительное количество энергоресурсов. Снижение эксплуатационных характеристик аэраторов ПА-2 обусловлено осаждением соединений железа на поверхности и в порах титанового диска. Химическая регенерация позволила восстановить проницаемость и размеры пор у ~30 % пористых дисков. Однако механическая прочность дисков при этом оказалась в 2,0–2,5 раза ниже, чем у новых, что связано с длительной коррозией межчастичных контактов под действием озонородушной смеси и воды, а также коррозией при обработке растворами в процессе регенерации [5]. Совершенствуя

38 Секция 1. Современные технологии проектирования в машиностроении

и оптимизируя аэрационные системы путем замены пористых аэраторов старых типов на современные дисковые, можно достичь существенной экономии электроэнергии на очистку сточных вод без значительных капитальных затрат на реконструкцию действующих очистных сооружений. При этом пористые аэраторы из порошка титана, несмотря на их высокую стоимость, имеют ресурс, на порядок превышающий ресурс полимерных аэраторов, что также обеспечивает экономию за счет сокращения объемов строительно-монтажных работ, простоев при ремонте и обслуживании аэротенков.

Л и т е р а т у р а

1. Кудина, Е. Ф. Химия и микробиология воды : учеб. пособие / Е. Ф. Кудина, О. А. Ермолович, Ю. М. Плескачевский ; под ред. Ю. М. Плескачевского, А. С. Неверова. – Гомель : БелГУТ, 2010. – 335 с.
2. Жерноклев, А. К. Аэрация и озонирование в процессах очистки воды / А. К. Жерноклев, Л. П. Пилинович, В. В. Савич ; под ред. Н. В. Холодинской. – Минск : Тонпик, 2002. – 129 с.
3. Радкевич, И. Л. Аэраторы и системы аэрации / И. Л. Радкевич // Вода. – 1997. – № 7. – С. 4–7.
4. Непаридзе, Р. Ш. Мелкопузырчатая система аэрации сточных вод в аэротенках / Р. Ш. Непаридзе // Водоснабжение и санитарная техника. – 2004. – № 2. – С. 12–16.
5. Пористые аэраторы из порошков металлов. Опыт применения в системах очистки питьевой и сточной воды / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Экологическая и техногенная безопасность. Охрана водного и воздушного бассейнов. Утилизация отходов : сб. науч. тр. XIX Междунар. науч.-техн. конф. ; под ред. В. Ф. Костенко, Д. Н. Почепецкого / УкрВОДГЕО. – Харьков, 2012. – С. 163–176.

УДК 629.464.2:004.94

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОНЦЕВОГО ПОЛУВАГОНА СНЕГОУБОРОЧНОГО ПОЕЗДА СМ-2

К. В. Максимчик, Н. В. Комаровский

*Учреждение образования «Белорусский государственный
университет транспорта», г. Гомель*

Проведен анализ прочности конструкции рамы концевого полувагона снегоуборочного поезда СМ-2. С использованием программного комплекса ANSYS Workbench выполнено конечно-элементное моделирование его напряженно-деформированного состояния при нормативных режимах нагружения. Получены схемы распределения напряжений, которые показали, что максимальные значения эквивалентных по Мизесу напряжений наблюдаются в местах соединения хребтовой балки со шкворневой, а также в боковой балке в зоне установки выбросного конвейера. Результаты являются основой для разработки рекомендаций по усилению конструкции рамы концевого полувагона снегоуборочного поезда СМ-2.

Ключевые слова: снегоуборочный поезд, конечной полувагон, метод конечных элементов, нормативные режимы нагружения, напряженно-деформированное состояние.

ANALYSIS OF THE RESULTS OF STRESS-STRAIN STATE MODELING OF THE END HALF-WAGON OF THE SM-2 SNOW REMOVAL TRAIN

K. V. Maksimchyk, N. V. Komarovsky

Belarusian State University of Transport, Gomel

The strength of the end half-wagon frame structure of the SM-2 snow removal train was analyzed. Using the ANSYS Workbench software package, finite element modeling of its stress-

strain state under standard loading conditions was carried out. Stress distribution patterns were obtained, which showed that the maximum equivalent von Mises stresses are observed at the junctions of the spine beam with the pivot beam, as well as in the side beam in the ejector conveyor installation. The results serve as the basis for developing recommendations to reinforce the frame structure of the end half-wagon of the SM-2 snow removal train.

Keywords: snow removal train, end half-wagon, finite element method, standard loading conditions, stress-strain state.

В современных условиях эксплуатации железнодорожного транспорта особое внимание уделяют его надежности и долговечности. Снегоуборочный поезд, который используют в пространстве железнодорожной колеи 1520 мм, не является исключением. В частности, поезд СМ-2 играет важную роль в обеспечении бесперебойной работы железнодорожных путей в зимний период.

Исследования [1, 2] показывают, что большинство машин данной модели вырабатывали свой нормативный ресурс, и единовременное обновление всего парка техники невозможно. Поэтому возникает необходимость в выполнении исследований для определения возможности продления срока полезного использования единиц техники.

Анализ публикаций [3–5] указывает на то, что результаты компьютерного моделирования с достаточной точностью описывают напряженно-деформированное состояние различных конструкций и могут служить теоретической основой для моделирования единиц подвижного состава снегоуборочного поезда СМ-2.

Метод конечных элементов (далее – МКЭ) является одним из наиболее эффективных и широко используемых методов анализа напряженно-деформированного состояния различных конструкций [6, 7]. Этот метод позволяет рассматривать любое сочетание и вид эксплуатационных нагрузок и тем самым оценить несущую способность рассматриваемой конструкции. При помощи МКЭ выявляют наиболее опасные зоны конструкции и предлагают варианты их усиления, что способствует повышению надежности и долговечности железнодорожного подвижного состава [8, 9].

Геометрическая и конечно-элементная модели. Геометрическая модель полувагона разработана на основе конструкторской документации в среде программы CreoParametric. В работе рассматривается сварная конструкция, состоящая из продольных и поперечных балок, связанных вертикальными стойками и раскосами, образующими каркас полувагона, которые несут основную нагрузку от рабочего оборудования и собственной массы. Еще в модель включены элементы крепления накопителя, питателя и выбросного конвейеров, а также узлов шкворневых балок и упоров автосцепного устройства.

Конечно-элементная модель концевого полувагона снегоуборочного поезда СМ-2 выполнена в среде программного пакета ANSYS Workbench. Модель включает 353 твердотельные детали, ограниченные в трех плоскостях, что создает между ними 731 контакт. Материал деталей – сталь со следующими характеристиками: модуль упругости $E = 210$ ГПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$; плотность $\rho = 7800$ кг/м³. Параметры сетки конечных элементов: характерный размер конечного элемента – 50 мм; количество узлов – 1697091; число конечных элементов – 539719.

Результаты моделирования. В процессе работы получены схемы распределения эквивалентных напряжений и деформаций в металлоконструкции полувагона в соответствии с нормативными расчетными режимами по ГОСТ 33211. Особое внимание уделено областям с максимальными значениями эквивалентных напряжений (см. таблицу). Они являются наиболее уязвимыми и требуют детального анализа для предотвращения возможных повреждений и отказов конструкции.

40 Секция 1. Современные технологии проектирования в машиностроении

Максимальные эквивалентные по Мизесу напряжения наблюдались в области соединения шкворневой балки с хребтовой и составили 493,72 МПа, при допускаемых значениях для заданного материала – 250 МПа (режим, соответствующий торможению поезда, движущегося в кривом участке пути). В некоторых точках конструкции проявились всплески напряжений, связанные с несовершенством геометрии модели. В остальных областях конструкции напряжения не превысили допускаемых значений и составили не более 160 МПа. Максимальные напряжения наблюдаются в хвостовой части концевого полувагона, что обусловлено наличием в этой области выбросного конвейера, который делает конструкцию рамы менее жесткой по сравнению с головной частью.

**Максимальные по Мизесу эквивалентные напряжения
по расчетным режимам**

Наименование элемента	Максимальные по Мизесу эквивалентные напряжения по режимам, МПа							
	Ia (удар в хвостовую часть)	Ia (удар в головную часть)	Iб (трогание со стороны хвостовой части)	Iб (трогание со стороны головной части)	Iв (закрепление в хвостовой части)	Iв (закрепление в головной части)	Iг (закрепление в хвостовой части)	Iг (закрепление в головной части)
Хребтовая балка в зоне контакта с шкворневой	326,24	380,06	378,97	330,78	471,69	493,72	284,58	313,8
Боковая балка в зоне установки выбросно- го конвейера	206,65	380,14	212,22	198,26	332,58	372,95	163,36	227,69

В ходе выполнения работы проведен анализ напряженно-деформированного состояния металлоконструкции концевого полувагона снегоуборочного поезда СМ-2 под действием предельных эксплуатационных нагрузок. Эквивалентные по Мизесу напряжения в зоне соединения хребтовой балки со шкворневой превышают допускаемые значения. Также значительные напряжения наблюдаются в боковой балке в районе установки выбросного конвейера. Результаты указывают на необходимость установки дополнительных усиливающих элементов для обеспечения требуемой прочности конструкции. Выполненное моделирование также позволяет определить оптимальное положение точек размещения тензометрических датчиков при проведении натурных испытаний.

Л и т е р а т у р а

1. Балтабаев, А. С. Оценка прочности вагонов-снегоочистителей при коррозионном утонении их базовых узлов / А. С. Балтабаев, М. В. Зимакова, А. С. Сараев // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2011. – № 3 (28). – С. 34–39.
2. Максимчик, К. В. Конечно-элементное моделирование деформирования рамной конструкции вагона снегоуборочного поезда СМ-2 / К. В. Максимчик, А. О. Шимановский // Механика. Исследования и инновации. – 2023. – № 16. – С. 142–147.

3. Liang, Y. A new method for multivariable nonlinear coupling relations analysis in complex electromechanical system / Y. Liang, Z. Gao, J. Gao // *Applied Soft Computing*. – 2020. – Vol. 94. – Art. 106457. – DOI 10.1016/j.asoc.2020.106457
4. Ratner, S. Developing a strategy of environmental management for electric generating companies using DEA-methodology / S. Ratner, P. Ratner // *Advances in Systems Science and Applications*. – 2017. – Vol. 17 (4). – P. 78–92. – DOI 10.25728/assa.2017.17.4.521
5. Kassner, M. Fatigue strength analysis of a welded railway vehicle structure by different methods / M. Kassner // *International Journal of Fatigue*. – 2012. – Vol. 34, is. 1. – P. 103–111.
6. Finite element analysis (FEA) of stress distribution in platform-switched short dental implants / K. N. Gosai, V. D. Tripathi, S. Yadav [et al.] // *Bioinformation*. – 2024. – Mar. 31. – Vol. 20 (3). – P. 248–251. – DOI 10.6026/973206300200248
7. Barbero, E. J. Finite element analysis of composite materials using Abaqus / E. J. Barbero. – Boca Raton : CRC press, 2023. – 456 p.
8. Kanavalau, Y. Evaluation techniques for residual in-use utility of the railway car hopper-batcher bearing structure with a long-term service / Y. Kanavalau, A. Putsiata // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 134. – P. 57–63. – DOI 10.1016/j.proeng.2016.01.039
9. Афанаськов, П. М. Несущая способность кузова вагона-самосвала для перевозки сыпучих грузов после длительной эксплуатации / П. М. Афанаськов // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. – 2020. – № 4 (68). – С. 202–210.

UDC 539.3

SIMULATION OF PLATE BENDING VIBRATION PROBLEMS BY THE MESHLESS BACKWARD SUBSTITUTION METHOD

J. Lin, Y. T. Xu

*Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence (Ministry of Education),
Hohai University, Nanjing, China*

*College of Mechanics and Engineering Science, Hohai University,
Nanjing, China*

J. Lun

*Materials and Structural Engineering Department,
Nanjing Hydraulic Research Institute, China*

S. Y. Reutskiy

*A. Pidhornyi Institute of Mechanical Engineering Problems,
National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv*

In this work the meshless backward substitution method is proposed for the first time to solve the fourth-order plate bending vibration problems. The numerical solution consists of approximation from the boundary conditions and the revised basis functions which satisfying the homogeneous conditions with weighted parameters which are obtained from the governing equations by the collocation method. Then the key issues are the organization of initial approximation and the revised basis function derived from the traditional basis functions. To demonstrate the accuracy and validity of the proposed method, several numerical examples are conducted and compared with popular methods in literature. The obtained results from numerical experiments confirm the potential of the proposed method in terms of both accuracy and efficiency.

Keywords: meshless method, plate bending vibration, radial basis function, backward substitution method.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ КОЛЕБАНИЙ ИЗГИБА ПЛАСТИНЫ МЕТОДОМ БЕССЕТОЧНОЙ ОБРАТНОЙ ПОДСТАНОВКИ

J. Lin, Y. T. Xu

*Ключевая лаборатория прибрежных катастроф и обороны
(Министерство образования), Университет Хохай, Нанкин,
Китайская Народная Республика*

*Колледж механики и инженерных наук, Хохайский университет,
Нанкин, Китайская Народная Республика*

J. Lun

*Отделение материаловедения и конструкционной инженерии,
Нанкинский гидравлический научно-исследовательский институт,
Китайская Народная Республика*

С. Ю. Реутский

*Институт проблем машиностроения имени А. П. Подгорного
НАН Украины, г. Харьков*

Отмечено, что впервые предложен метод обратной бессеточной подстановки для решения задач колебаний изгиба пластины четвертого порядка. Численное решение состоит из аппроксимации с учетом граничных условий и пересмотренных базисных функций, которые удовлетворяют однородным условиям с весовыми параметрами, выведенными из управляющих уравнений методом коллокации. Ключевыми вопросами являются организация начального приближения и пересмотренная базисная функция, полученная из традиционных базисных функций. Для демонстрации точности и обоснованности предлагаемого метода приведено несколько численных примеров и проведено сравнение с популярными методами в литературе. Представленные результаты численных экспериментов подтверждают потенциал предлагаемого метода с точки зрения как точности, так и эффективности.

Ключевые слова: бессеточный метод, изгибные колебания пластины, радиальная базисная функция, метод обратной подстановки.

Introduction. Plate structures, serving as fundamental components in various engineering fields such as aerospace, marine engineering, civil construction, and industrial sectors, play a pivotal role and find numerous applications. As for the solution to these problems, conventional and popular methodologies come to the forefront, such as the finite element method, finite difference method, boundary element method, finite volume method. Recent decades have witnessed remarkable developments in meshless or meshfree methods such as smooth particle dynamics, method of particular solutions, and methods based on radial basis functions. The utilization of radial basis functions was introduced by Kansa for the solutions of partial differential equations. Reutskiy introduced a new method called the backward substitution method (BSM) for addressing multi-node problems. The conventional approach of the BSM approach involves transforming the original problem into Laplace equations and then applying the meshless method of fundamental solutions to solve the corresponding equations. However, there is a critical limitation in this approach, especially when dealing with real-application problems in anisotropic and inhomogeneous media. To overcome this limitation and extend the application of traditional BSM, an improved version has been proposed. The solution process begins with an initial approximation from boundary conditions which serves as the foundation for deriving the primary solution. The final approximation is obtained by combining the elementary approximation, the traditional basis function, and their associated correction functions.

In this paper, we further extend this method for the first time to solve the fourth-order plate bending vibration problems. We will provide detailed explanations of the boundary conditions approximation and revised basis function tailored to the specific problems under consideration. To validate the accuracy and effectiveness of this approach, several examples in regular and irregular domains have been performed and the results are rigorously compared with existing popular methods in literature.

Problem definition. In general, according to the principles of thin plate theory, the governing equation for plate bending vibration problem under external loading $q(\mathbf{x})$ can be simplified as below:

$$\nabla^4 w(\mathbf{x}) + \lambda w(\mathbf{x}) = p(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in \Omega,$$

with $w(\mathbf{x})$ represents the deflection of the middle surface of the plate, $p(\mathbf{x}) = \frac{q(\mathbf{x})}{D}$, and λ represents the types of the plate where

$$\lambda = 0,$$

applies to the Kirchhoff plate, and

$$\lambda = \frac{k_w}{D},$$

applies to the Winkler plate, with k_w representing the foundation stiffness. The plate flexural rigidity D are defined as follows:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)},$$

In this study, we consider the following three typical boundary conditions:

Clamped edge:

$$w(x, y) = 0, \quad \ell_{\theta_n} = 0. \quad (1)$$

Simply supported edge:

$$w(x, y) = 0, \quad \ell_{M_n} = 0. \quad (2)$$

Free edge:

$$w(x, y) = 0, \quad \ell_{V_n} = 0. \quad (3)$$

Method for the problem. The numerical solution comprises two components:

$$w(\mathbf{x}) = w_p(\mathbf{x}) + w_\delta(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in \Omega,$$

where first part $w_p(\mathbf{x})$ is the boundary approximation, which satisfies the original boundary conditions, and the second part $w_\delta(\mathbf{x})$ is the correction function, which satisfies the governing equation and the homogeneous boundary conditions. These two parts are represented as linear combinations of the basis functions $\theta_l(\mathbf{x})$ and $\Phi_u(\mathbf{x})$, respectively:

$$w_p(\mathbf{x}) = \sum_{l=1}^L \alpha_l \theta_l(\mathbf{x}), \mathbf{x} \in \Omega;$$

$$w_\delta(\mathbf{x}) = \sum_{u=1}^U \gamma_u \Phi_u(\mathbf{x}), \mathbf{x} \in \Omega.$$

These functions are approximated by the modified radial basis functions. For more details, please refer to some related papers.

Numerical results. In this case, the aim is to verify the applicability of the proposed numerical method by examining the response of an irregular plate under the influence of a uniform load q_0 . The geometry of the plate is a right-angled sector with $(0, 0)$ as the center of the circle and radius 1.

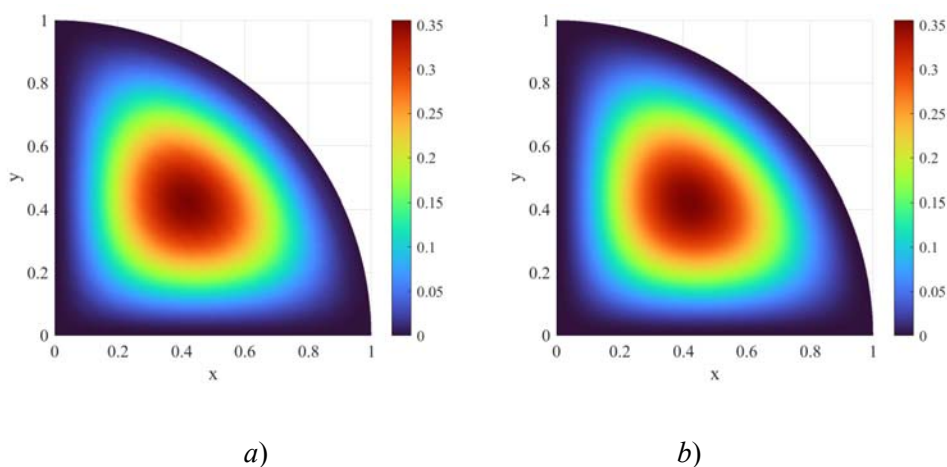


Fig. 1. The numerical solution by the present method and FEM:
a – Numerical solution; b – FEM solution

The obtained results from numerical experiments confirm the potential of the proposed method in terms of both accuracy and efficiency.

УДК 629.4.045:629.4.015

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ «ДЛИННОМЕРНЫЙ ГРУЗ – СЦЕП ВАГОНОВ»

М. Г. Гегедеш^{1, 2}, И. А. Ворожун², А. В. Ворожун²

¹ Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

² Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель

Рассмотрены возможности применения инженерного пакета MSC.Adams для имитации работы системы «длинномерный груз – сцеп вагонов» и анализа движения такой системы в условиях эксплуатации, приближенным к реальным. Выполнено компьютерное моделирование соударения системы «длинномерный груз – сцеп вагонов» при условии закрепления груза с помощью турникетных опор, включающих как подвижные, так и неподвижные эле-

менты. Сделаны выводы об адекватности разработанных компьютерных моделей и применимости MSC.Adams к решению задач динамики подобных систем.

Ключевые слова: сцеп вагонов, длинномерный груз, турникетная опора, соударение вагонов, динамика системы тел.

MODERN TECHNOLOGIES APPLICATION TO ASSESSMENT OF THE “LONG CARGO – FLATCARS COUPLING” SYSTEM DYNAMIC CHARACTERISTICS

M. G. Gegedesh^{1,2}, I. A. Varazhun², A. V. Varazhun²

¹*Sukhoi Gomel State Technical University, the Republic of Belarus*

²*Belarusian State University of Transport, Gomel*

The paper considers the possibilities of using the MSC.Adams engineering package to simulate the operation of the “long load-wagon coupling” system and to analyze the motion of such a system under operating conditions close to real ones. A computer simulation of the collision of the “long load-wagon coupling” system is performed for the case when the load is fastened using turnstile supports, including both movable and fixed elements. There are made the conclusions about the adequacy of the developed computer models and the MSC. Adams applicability to solving problems of the such systems dynamics.

Keywords: wagon coupling, long cargo, turnstile support, wagon collision, bodies system dynamics.

В связи с постоянно расширяющейся номенклатурой транспортируемых железнодорожным транспортом грузов возникает необходимость совершенствования и модернизации существующего парка вагонов, а также разработки новых вариантов единиц подвижного состава, обладающих повышенной вместимостью и грузоподъемностью. В последнее время значительно возросли масса и длина поездов, а также их максимальная скорость, что может привести к невозможности обеспечения их безопасной эксплуатации и небезопасной перевозке грузов из-за продольных динамических усилий в межвагонных связях [1], влияющих на плавность хода подвижного состава.

Достаточно часто грузы при погрузке в вагон выходят за пределы одной или обеих его концевых балок рамы более чем на 400 мм [2]. Примерами таких грузов являются рельсы, арматура, железобетонные и деревянные изделия. В таких случаях их относят к длинномерным и размещают на сцепе вагонов с опорой на один вагон или с опорой на два вагона в зависимости от их длины и массы. Наибольшие динамические нагрузки имеют место при перевозке длинномерных грузов, размещаемых на сцепе вагонов, что обусловлено отклонением от горизонтали между опорными устройствами (провисание) и возможностью смещения осей вагонов друг относительно друга при движении по кривому в плане или профиле пути. Одними из устройств, ограничивающих относительные смещения длинномерных грузов, являются турникетно-крепежные устройства (ТКУ) [3, 4], а также иные конструкции, которые, как правило, разрабатываются индивидуально для конкретного груза или группы грузов со сходными свойствами.

Целью представленной работы является анализ динамики системы «сцеп вагонов – длинномерный груз» на основе компьютерного моделирования в системе инженерного проектирования MSC.Adams.

Размещение длинномерного груза на сцепе с опорой на два вагона, произведенное с применением турникетов, приведено на рис. 1. Длинномерный груз длиной 22 м имеет массу 32,5 т и размещается при перевозке на две 4-осные универсальные плат-

формы базой 9720 мм и грузоподъемностью 69 т. Центр тяжести длинномерного груза, погруженного на сцеп вагонов с опорой на два вагона, располагается на пересечении продольной и поперечной плоскостей симметрии сцепа.

Для определения основных характеристик груза и сил, действующих на него в продольном поперечном направлениях, использована стандартная методика, применяемая при разработке схем размещения и крепления грузов, описанная в Соглашении о международном железнодорожном грузовом сообщении (СМГС) [5], подразумевающая определение инерционных сил, действующих на груз в продольном и поперечном направлениях, а также подбор параметров турникетных опор, способных оказать удерживающее от относительного смещения груза воздействие, обеспечивающих гашение этих инерционных сил. При транспортировке на груз и на турникеты действуют продольная, поперечная инерционные силы, силы тяжести, ветровая нагрузка, а также силы трения.

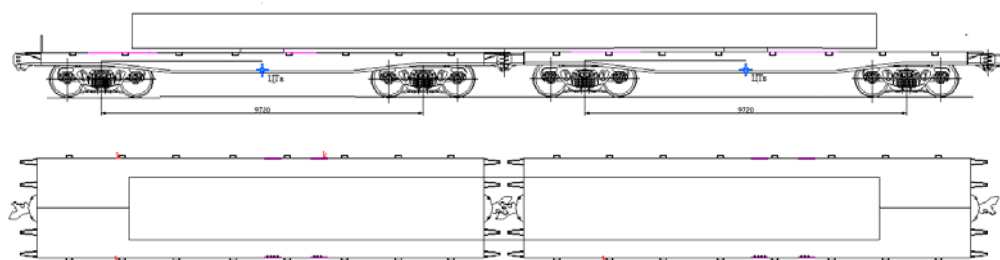


Рис. 1. Схема размещения рассматриваемого длинномерного груза на сцепе с опорой на два вагона с применением турникетов

В инженерном пакете MSC Adams разработана компьютерная модель сцепа вагонов с размещенным на нем длинномерным грузом (рис. 2) с его опорой на два вагона посредством турникетных опор. Все тела являются абсолютно твердыми, автосцепка заменена аналоговой пружиной, имеющей коэффициенты жесткости и демпфирования, соответствующие реальному автосцепному устройству. Получена зависимость относительного ускорения груза при столкновении сцепа с группой неподвижно стоящих вагонов от начальной скорости движения сцепа, представленная на рис. 2, б и согласующаяся с результатами натурных испытаний (погрешность составила 9 %).

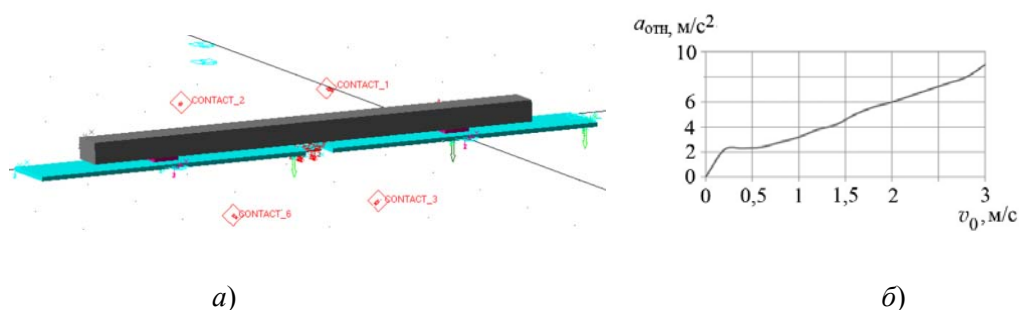


Рис. 2. Компьютерная модель длинномерного груза, опирающегося на два вагона посредством турникетных опор (а), и зависимость относительного ускорения длинномерного груза для случая соударения с группой неподвижно стоящих вагонов при условии использования двух подвижных турникетных опор (б)

Кроме того, выполнены расчеты для случая крепления длинномерного груза только с использованием продольных и поперечных брусков (рис. 3, а). Результаты моделирования в этом случае подтверждают сложившуюся практику перевозок длинномерных грузов и показывают, что из-за продольных колебаний, вызванных особенностями работы автосцепок, крепление длинномерного груза на сцепе с помощью стандартных деревянных упоров (брусков) не может обеспечить сохранность груза при перевозке (рис. 3, б). При этом бруски, на которые действуют инерционные силы, деформируются.

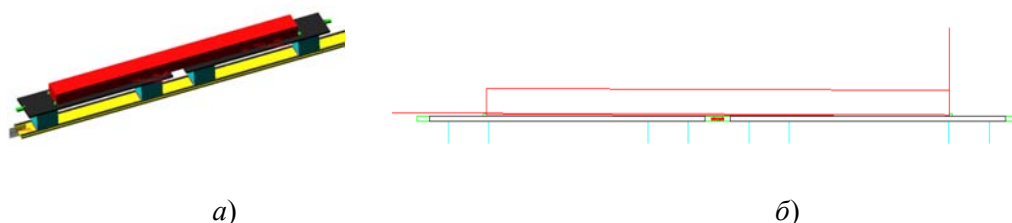


Рис. 3. Компьютерная модель длинномерного груза, размещенного на сцепе из двух вагонов (а) и закрепленного только брусками, работающими в продольном и поперечном направлениях, и смещение груза в процессе движения поезда (б)

Таким образом, можно сделать вывод о том, что применение инженерного пакета MSC.Adams позволяет решать динамические задачи, связанные с движением поездов и транспортировкой грузов, и получать при адекватно составленной модели результаты, близкие к реальным перевозочным характеристикам.

Л и т е р а т у р а

1. The influence of resistant force equations and coupling system on long train dynamics simulations / N. Bosso, M. Magelli, L. Rossi Bartoli, N. Zampieri // Journal of Rail and Rapid Transit. – Vol. 236, iss. 1. – P. 35–47.
2. Технические условия размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах : ТУ № ЦМ-943. – Утв. 27.05.2003 МПС России. – Москва : Юртранс, 2003. – 544 с.
3. Васильев, С. М. Математическое моделирование динамических воздействий на длинномерные грузы и опорные вагоны / С. М. Васильев // Вестник Белорусского государственного университета транспорта. Наука и транспорт. – 2006. – № 1–2 (12–13). – С. 30–36.
4. Research of the operation of the turnstile support-fastening device during the transportation of a long-dimensional heavy load / J. Musayev, V. Solonenko, A. Zhauyt, S. Zhunisbekov // Vibroengineering Procedia. – 2023. – Vol. 49. – P. 80–85.
5. Соглашение о международном железнодорожном грузовом сообщении (СМГС) : действует с 1 нояб. 1951 г. : с изм. и доп. на 1 июля 2015 г. – Минск : Амалфея, 2015. – 216 с.

УДК 539.431:621.891

КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА ИСПЫТАНИЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН ПРОИЗВОДСТВА ОАО «ГОМСЕЛЬМАШ»

С. А. Тюрин, М. О. Прядко

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

Приведена концепция испытаний сельскохозяйственных машин производства ОАО «Гомсельмаш» на стадиях их проектирования и производства. На базе которой ре-

шаются задачи обеспечения их требуемого качества при снижении риска повреждения в эксплуатации.

Ключевые слова: сельскохозяйственные машины, испытания, система, качество, надежность.

COMPREHENSIVE TESTING SYSTEM FOR AGRICULTURAL MACHINERY PRODUCED BY JSC GOMSELMASH

S. A. Tyurin, M. O. Pryadko

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The concept of testing agricultural machinery manufactured by JSC GOMSELMASH at the stages of their design and production is described, on the basis of which the tasks of ensuring their required quality while reducing the risk of damage during operation are solved.

Keywords: agricultural machinery, testing, system, quality, reliability.

К настоящему времени специалисты ОАО «Гомсельмаш» создали целый ряд современных высокопроизводительных зерноуборочных, кормоуборочных, свеклоуборочных, картофелеуборочных и других машин и комбайнов. Теперь перед предприятием стоит сложная задача – обеспечение высокого уровня их качества и надежности, чтобы удовлетворять все возрастающим требованиям современного рынка. Это означает, что надо иметь комплексную систему испытаний на стадиях проектирования, изготовления и эксплуатации машин.

Натурные и модельные испытания. Поскольку силовые системы являются, как правило, наиболее ответственными и тяжело нагруженными узлами машины, то обеспечение их требуемой эксплуатационной надежности становится задачей первоочередной важности.

В сельскохозяйственном машиностроении давно сложилась и получила широкую реализацию концепция приоритетности натурных испытаний – от отдельных деталей и узлов до агрегатов и машин в целом. Недостатки таких испытаний хорошо известны: высокая трудоемкость и стоимость, а результаты испытаний имеют ограниченное значение, они относятся лишь к тем типоразмерам объекта, которые предусмотрено испытывать на данном стенде. Если появляются иные типоразмеры, надо строить новый стенд со всеми вытекающими отсюда последствиями.

В последнее десятилетие получила признание идея модельных испытаний относительно небольших объектов. Приведем только один пример ее эффективности. Анализ показал, что вместо 125 силовых систем механизма движения комплекса для заготовки кормов целесообразным оказывается проводить ускоренные лабораторные испытания лишь трех типоразмеров моделей [1]. Однако здесь тоже возникает проблема: как осуществить обратный переход от модели к натуре, чтобы получить достаточно достоверный прогноз сопротивления реальных силовых систем износоустойчивым повреждениям.

Итак, с одной стороны, имеем традиционную для машиностроения концепцию натурных испытаний, имеющую ряд недостатков. С другой стороны, современная концепция модельных испытаний тоже не может стать приоритетной: это другая крайность; к тому же методы эффективного моделирования разработаны недостаточно.

И здесь целесообразным представляется подход, заключающийся в разумном сочетании обеих концепций. В то же время нельзя не признать огромной роли механических испытаний материалов в обеспечении надежности изделий, поскольку эти изделия изготавливают из различных материалов.

Исходя из изложенных соображений, и была разработана семиуровневая концепция испытаний (рис. 1), которая позволяет экспериментально установить показатели надежности и качества объектов на трех масштабных ступенях (рис. 2), если разработаны соответствующие методы испытаний (рис. 3). Таким образом, реализация предложенной концепции должна обеспечить требуемый уровень качества и надежности как машины в целом, так и составных ее частей (агрегатов, узлов, систем, деталей), а также материалов. Конечно, обоснование и выбор необходимого числа уровней испытания (рис. 1) в значительной мере обуславлен экономической и иной ответственностью исследуемого или разрабатываемого объекта.

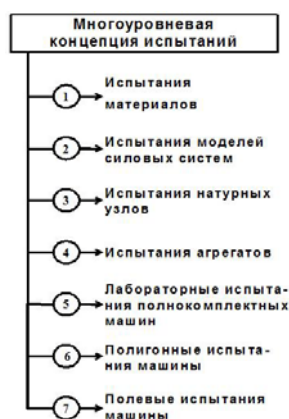


Рис. 1. Последовательный ряд уровней испытаний



Рис. 2. Иерархическая структура свойств испытываемых объектов

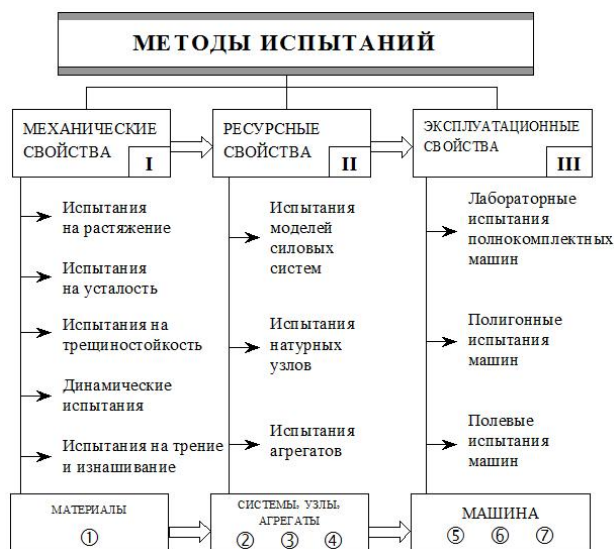


Рис. 3. Комплексная система испытаний сельскохозяйственных машин

50 Секция 1. Современные технологии проектирования в машиностроении

Для реализации описанной концепции испытаний имеется целый ряд испытательного оборудования, некоторые примеры которого приведены ниже.

Стендовый комплекс для натурных испытаний. Для своевременного проведения все возрастающего объема стендовых испытаний в НТЦК ОАО «Гомсельмаш» существует мощный стендовый комплекс, который включает в себя стенды как для доводочных испытаний и проверки на функционирование вновь разработанных узлов, агрегатов, комбайнов, так и для проведения испытаний на надежность [2]. Стендовый комплекс оснащен оборудованием, позволяющим проводить испытания практически любых объектов: от деталей до машин в сборе (полнокомплектных машин).

В стендовый комплекс входит, в частности, стенд для испытания самоходных машин (рис. 4), предназначенный главным образом для испытаний универсальных энергосредств типа УЭС-250 и других машин, однако конструкция стенда позволяет трансформировать его для испытаний машин с другими габаритами.



Рис. 4. Стенд для натурных испытаний полнокомплектных самоходных машин



Рис. 5. Стенд для модельных комплексных износоусталостных испытаний типа SZ

Машины для модельных испытаний. На базе ряда изобретений ОАО «Гомсельмаш», ОИМ НАНБ и ИМАШ РАН создали новый класс испытательного оборудования – модульные машины для износоусталостных испытаний моделей силовых систем (рис. 5). Описание машин и методов испытаний можно найти в работе [3]. К основным достоинствам этих модульных машин можно отнести, в частности, высокую универсальность, полную автоматизацию испытаний, возможность проведения ускоренных испытаний и др.

Таким образом, разработана концепция испытания сельскохозяйственных машин на стадиях их проектирования и производства, на базе которой решаются задачи обеспечения их требуемого качества при снижении риска повреждения в эксплуатации. Она предусматривает 7 уровней испытания на трех масштабных ступенях. Важное достоинство концепции состоит в том, что в нее включены эффективные методы износоусталостных испытаний наиболее ответственных силовых систем машин. Реализация концепции обеспечивается соответствующими методиками испытаний.

Для реализации разработанной концепции создан стендовый комплекс для натурных испытаний разработанных узлов, агрегатов и комбайнов в целом, а также ряд модульных машин для износоусталостных испытаний моделей силовых систем.

Литература

1. Тюрин, С. А. Силовые системы сельскохозяйственной техники: моделирование и испытания / С. А. Тюрин, Н. Н. Малык // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2023. – № 2 (93). – С. 5–13.
2. Комплекс испытательных стендов для ускоренной экспериментальной оценки ресурса кормоуборочных машин и их ответственных узлов / В. А. Шуринов [и др.]. – Гомель : ГСКБ ПО «Гомсельмаш», 1990. – 37 с.
3. Испытательный центр SZ : Hi-Tech / Л. А. Сосновский, В. О. Замятин, Н. А. Махутов, Н. В. Псырнов // Актуальные вопросы машиноведения : сб. науч. тр. / ОИМ НАН Беларуси. – Минск, 2012. – Вып. 1. – С. 276–278.

УДК 621.778

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛОСКОГО ИЗГИБА ТОНКОЙ
СТАЛЬНОЙ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ ПРОВОЛОКИ
НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРОВОЛОКИ**

Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартьянов

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

Для тонкой высокопрочной проволоки диаметром 0,30 мм класса прочности HT из стали 80 определено: предел прочности проволоки с ростом количества плоских изгибов в процессе рихтовки уменьшается в среднем с 3455 до 3107 МПа, а среднее относительное удлинение проволоки изменяется в диапазоне 2,20–2,63 %.

Ключевые слова: стальная тонкая проволока, изгиб, механические свойства.

**INFLUENCE OF FLAT BENDING PARAMETERS OF THIN STEEL
HIGH-CARBON WIRE ON THE MECHANICAL PROPERTIES
OF THE WIRE**

Y. L. Bobarikin, Y. V. Martyanov

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

For thin high-strength wire with a diameter of 0.30 mm of strength class HT made of steel 80, it has been determined: the tensile strength of the wire decreases from an average of 3455 to 3107 MPa with an increase in the number of flat bends during the straightening process, and the average relative elongation of the wire changes in the range of 2.20–2.63 %.

Keywords: steel thin wire, bending, mechanical properties.

Стальная тонкая высокоуглеродистая проволока используется для свивки металлокорда. В производстве проволоки применяется плоский изгиб в рихтовальном устройстве (рис. 1) для снижения уровня и повышения равномерности остаточных напряжений. Рихтовальное устройство позволяет производить знакопеременный плоский изгиб. Снижение остаточных напряжений дает возможность уменьшить величину отклонения от прямолинейности тонкой проволоки и металлокорда из этой проволоки. Однако знакопеременный изгиб проволоки в рихтовальном устройстве оказывает влияние на комплекс механических свойств тонкой проволоки из-за эффекта Баушингера. В этой связи исследование влияния изгиба на механические свойства проволоки является актуальным.



Рис. 1. Рихтовальное устройство для проволоки

Цель работы – исследовать влияние параметров плоского изгиба проволоки на механические свойства проволоки

Задачи исследования включают следующее:

- построить расширенную численную модель знакопеременного изгиба проволоки, учитывающую количество и интенсивность изгибов, и провести анализ величины и распределения эквивалентных напряжений в проволоке в процессе изгиба для определения эффективного параметра настройки рихтовки;
- провести механические испытания тонкой проволоки для определения предела прочности и относительного удлинения проволоки при испытании на разрыв.

Методика проведения исследований. В качестве объекта исследования использовалась тонкая высокопрочная проволока диаметром 0,30 мм класса прочности НТ, изготовленная из стали 80. Скорость прохождения проволоки через рихтовку – 150 мм/с. Диаметр роликов рихтовального устройства по дну проточки составляет 13 мм. Варьируемым параметром рихтовки является изменение расстояния между верхней и нижней секциями роликов рихтовки.

Методика исследования заключается в построении численной модели процесса рихтовки проволоки, определении оптимального значения варьируемого параметра рихтовки и получении образцов проволоки, проведении их механических испытаний на растяжение на разрывной испытательной машине INSTRON 5969.

Полученные результаты. По результатам моделирования определены эквивалентные активные и остаточные напряжения в тонкой проволоке, возникающие в процессе плоского изгиба (рис. 2). Зависимость величины максимальных эквивалентных напряжений от количества роликов рихтовки для различных значений варьируемого параметра рихтовки представлена на рис. 2.

Аналогичные данные получены для всех порядковых номеров изгибов семироликовой рихтовки. Определено, что наиболее равномерное воздействие на проволоку имеет рихтовка с варьируемым параметром рихтовки 2,5 мм. Полученные механические свойства представлены в таблице.

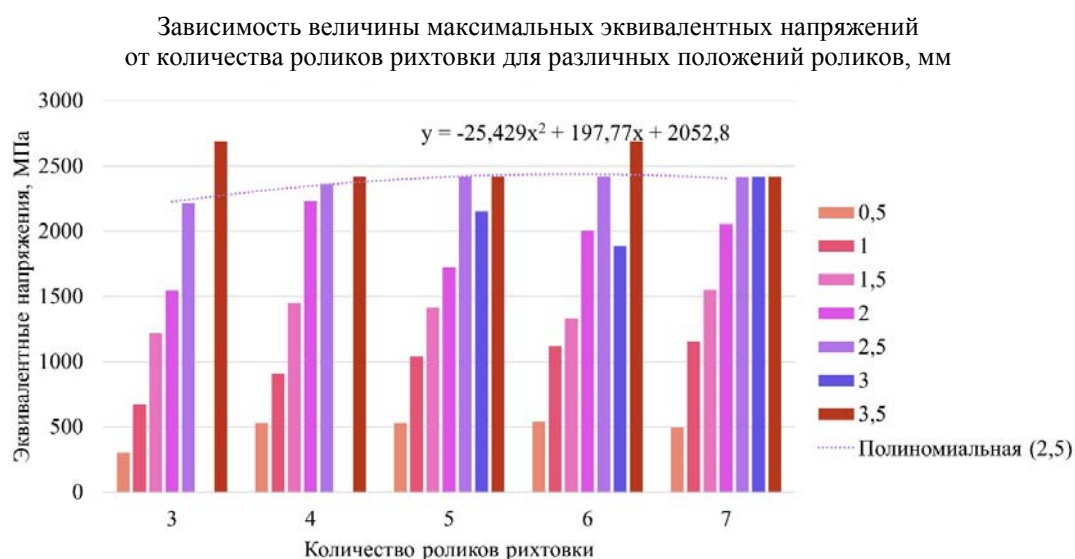


Рис. 2. Зависимость максимальных эквивалентных напряжений в проволоке от варьируемого параметра рихтовки

Механические свойства тонкой проволоки после изгиба в рихтовальном устройстве

Количество роликов	2		
Параметр	Перемещение, мм	Относительное удлинение, %	Предел прочности, мм
Среднее	3,38	2,25	3455,73
Количество роликов	3		
Параметр	Перемещение, мм	Относительное удлинение, %	Предел прочности, мм
Среднее	4,04	2,69	3401,74
Количество роликов	4		
Параметр	Перемещение, мм	Относительное удлинение, %	Предел прочности, мм
Среднее	3,41	2,27	3385,04
Количество роликов	5		
Параметр	Перемещение, мм	Относительное удлинение, %	Предел прочности, мм
Среднее	3,23	2,15	3432,31
Количество роликов	6		
Параметр	Перемещение, мм	Относительное удлинение, %	Предел прочности, мм
Среднее	3,34	2,23	3347,74
Количество роликов	7		
Параметр	Перемещение, мм	Относительное удлинение, %	Предел прочности, мм
Среднее	3,30	2,20	3107,24

Полученные данные (см. таблицу) позволяют сделать вывод о том, что предел прочности проволоки с ростом количества изгибов в среднем становится меньше – с 3455 до 3107 МПа, а относительное удлинение проволоки изменяется в пределах 2,20–2,63 %.

Л и т е р а т у р а

1. Tensile straightening and roller straightening of fine drawn wire / Kazunari Yoshida, Hiroyuki Sato, Tsuyoshi Sugiyama // Tetsu-to-hagane = Journal of the Iron and Steel Institute of Japan. – 2009. – Vol. 95, N 11. – P. 788–793.
2. Проявление эффекта Баушингера при знакопеременной деформации / Р. Р. Адигамов, В. А. Андреев, С. О. Рогачев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. – 2022. – Т. 65, № 7. – С. 455–466. – DOI 10.17073/0368-0797-2022-7-455-466
3. Бобарикин, Ю. Л. Тонкое волочение и свивка в металлокорд стальной латунированной проволоки / Ю. Л. Бобарикин, М. Н. Верещагин, Ю. В. Мартьянов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – 304 с. : ил.

УДК 621.785.54

**НАГРЕВ СТАЛЬНОЙ ЗАГОТОВКИ СКАНИРОВАНИЕМ
ИЗЛУЧЕНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО ЛАЗЕРА С РАЗЛИЧНЫМ
КОЭФФИЦИЕНТОМ ПЕРЕКРЫТИЯ**

М. Ю. Целуев, С. Н. Целуева

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

На примере быстрорежущей инструментальной стали теоретически рассмотрены особенности формирования температурного поля заготовки при сканировании излучения непрерывного лазера с различной величиной коэффициента перекрытия.

Ключевые слова: лазерный нагрев, температурное поле, коэффициент перекрытия.

**STEEL SAMPLE HEATING BY OSCILLATING LASER BEAM
WITH DIFFERENT OVERLAP RATIO**

M. Yu. Tseluev, S. N. Tselueva

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

On high-speed steel example were analytically studied a steel sample heating process by oscillating laser beam with different overlap ratio.

Keywords: laser heating, temperature field, overlap ratio.

С совершенствованием оборудования и аппаратуры технология лазерной закалки находит все более широкое применение для повышения твердости, улучшения износостойкости и сопротивления усталостному разрушению поверхностных слоев деформирующего и режущего инструмента, деталей машин и механизмов различного назначения [1, 2]. К настоящему времени выполнен ряд экспериментальных и теоретических исследований [1–3], по результатам которых разработаны практические рекомендации, предложены технологические схемы и режимы лазерной поверхностной закалки сталей различного химического состава. Однако до настоящего времени вопрос поиска оптимальных технологических параметров обработки излучением лазера,

обеспечивающих высокие показатели качества закаленного поверхностного слоя стальных деталей, является важной и актуальной научно-технической задачей в технологии термической обработки стали.

Целью работы является теоретическое исследование особенностей нагрева поверхности стальной заготовки при закалке сканированием излучения лазера по полосовой области с различными коэффициентами перекрытия.

Методы исследований. На основе закономерностей классической теории теплопроводности в работе [3] сформулирована тепловая задача нагрева и последующего охлаждения массивной стальной заготовки при сканировании по полосовой области ее плоской поверхности излучения непрерывного лазера с нормально-круговым распределением плотности мощности в поперечном сечении луча и регулированием мощности лазера во времени. Решение тепловой задачи, полученное методом тепловых источников, имеет вид [3]:

$$T = T_0 + \frac{2(1-r)}{c[4\pi d]^{3/2}} \int_0^t \frac{P(t')}{[t-t']^{1/2} [t_0+t-t']} \exp\left(-\frac{z^2}{4d[t-t']} - \frac{[x-Vt']^2 + [y-A\sin(2\pi ft')]^2}{4d[t_0+t-t']}\right) dt', \quad (1)$$

где $T = T(x, y, z, t)$ – нестационарное температурное поле заготовки, зависящее от координат x , y и z прямоугольной координатной системы и времени t ; T_0 – температура окружающей среды; r – коэффициент отражения излучения лазера от поверхности; c – объемная теплоемкость материала; d – температуропроводность материала; $P = P(t)$ – зависимость мощности излучения лазера от времени; $t_0 = [4md]^{-1}$ – постоянная времени; $m = 3/R^2$ – коэффициент сосредоточенности теплового источника; $2R$ – диаметр пятна нагрева на поверхности заготовки; V – скорость продольного перемещения излучения лазера; $2A$ – ширина полосовой области сканирования; f – частота колебаний излучения лазера при сканировании.

Зависимость изменения мощности излучения $P = P(t)$, обеспечивающая улучшение равномерности распределения энергии лазера по ширине полосовой области сканирования поверхности заготовки, имеет следующий вид [3]:

$$P = P_m |\cos(2\pi ft)|, \quad (2)$$

где P_m – максимальная мощность лазера на оси $y = 0$ полосовой области поверхности заготовки.

Особенности формирования температурного поля при сканировании излучения лазера по полосовой области плоской поверхности заготовки исследовали путем численного решения математической модели (1). Для целей исследования была разработана компьютерная программа, написанная на языке FORTRAN, в которой вычисление определенного интеграла, входящего в (1), осуществлялось с помощью подпрограммы QAG библиотеки алгоритмов численного интегрирования QUADPACK. Расчеты выполняли для оптических и теплофизических характеристик, характерных для быстрорежущей стали Р6М5, для случая регулирования мощности излучения итербиевого лазера (длина волны $\lambda = 1070$ нм) в соответствии с выражением (2). Ширина полосовой области сканирования лазера составляла $2A = 6$ мм,

диаметр пятна излучения на поверхности заготовки – $2R = 0,7$ мм, частота сканирования – $f = 220$ Гц. В качестве варьируемого параметра использовали коэффициент перекрытия $K = V/(2Rf)$ дорожек лазерного излучения, который изменялся в пределах от 0,05 до 0,5. Расчеты температурного поля осуществлялись при значениях максимальной мощности P_m излучения лазера, определяемой расчетом из условия отсутствия плавления поверхности заготовки.

Полученные результаты. Как видно из графических данных, приведенных на рис. 1, при сканировании излучения с регулированием мощности лазера в соответствии с зависимостью (2) по ширине полосовой области поверхности заготовки наблюдается один максимум температуры, перемещающийся вместе с движением пятна нагрева. Согласно кривой 3, в конце каждого цикла колебания луча лазера формируется близкое к однородному распределение температуры на поверхности заготовки по ширине полосовой области. Отношение максимальной температуры к минимальной температуре поверхности в пределах ширины $2A$ полосовой области нагрева для коэффициента перекрытия 0,05 составляет 1,065.

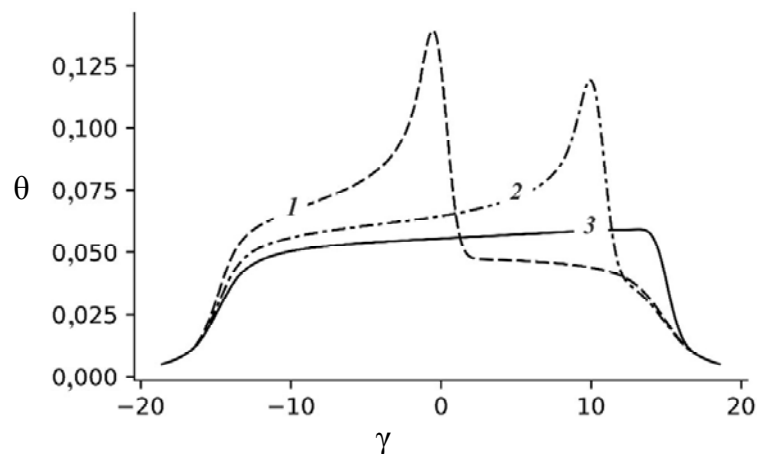


Рис. 1. Зависимость безразмерной температуры $\theta = \pi k(T - T_0)/(P_m m^{1/2})$ на поверхности заготовки от безразмерной координаты $\gamma = ym^{1/2}$ при сканировании излучения лазера с коэффициентом перекрытия $K = 0,05$ для различных положений центра пятна нагрева по ширине полосовой области сканирования:
1 – $A/y = 0$; 2 – 0,5; 3 – 1

Графические зависимости, представленные на рис. 2, свидетельствуют о росте неравномерности распределения температуры по ширине полосовой области сканирования излучения лазера при увеличении коэффициента перекрытия. Относительный перепад температуры между центром и краем полосовой области сканирования излучения лазера при изменении коэффициента перекрытия от 0,05 до 0,5 практически линейно увеличивается от 0,065 до 1,044.

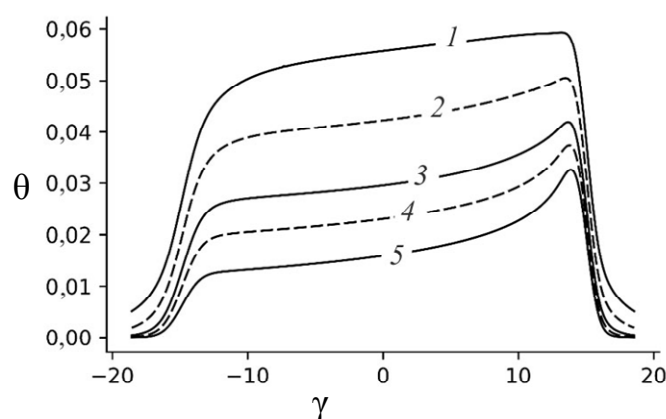


Рис. 2. Зависимость безразмерной температуры θ на поверхности заготовки от безразмерной координаты γ в момент положения центра пятна нагрева на краю полосовой области сканирования для коэффициентов перекрытия излучения:
1 – $K = 0,05$; 2 – $0,10$; 3 – $0,20$; 4 – $0,30$; 5 – $0,50$

На основе теоретических исследований показана зависимость неравномерности распределения температуры в заготовке по ширине полосовой области сканирования луча лазера от величины перекрытия пятна излучения. Для рассмотренных условий нагрева заготовки относительный перепад температуры между центром и краем полосовой области сканирования излучения лазера при изменении коэффициента перекрытия от 0,05 до 0,5 практически линейно увеличивается от 0,065 до 1,044.

Литература

1. Майоров, В. С. Лазерное упрочнение металлов / В. С. Майоров // Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных и прикладных разработок / под ред. В. Я. Панченко. – Москва, 2009. – С. 439–469.
2. Девойно, О. Г. Моделирование поверхностной закалки с использованием сканирующего оптоволоконного лазера / О. Г. Девойно, В. В. Жарский, А. П. Пилипчук // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2018. – Т. 63, № 4. – С. 435–443.
3. Целуева, С. Н. Температурное поле стальной заготовки при закалке сканированием излучения непрерывного лазера / С. Н. Целуева, М. Ю. Целуев, С. И. Красюк // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра : сб. науч.х ст. 7-й Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 ч. / НТЦК ОАО «Гомсельмаш». – Гомель, 2023. – Ч. 2. – С. 41–46.

УДК 669.017; 539.213

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЙ НАИЛУЧШУЮ АДГЕЗИЮ ПРИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОМ НАПЫЛЕНИИ

В. Ю. Процко, Д. Л. Стасенко

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

Показано, что предварительная обработка поверхности основы является важным фактором для обеспечения прочного сцепления напыленного слоя с материалом основы.

Отмечено, что необходимое условие для этого – подготовка поверхности основного материала путем удаления загрязнений и активации поверхности основы. Раскрыто, что анализ, обоснование и выработка рекомендаций по использованию механических свойств материалов, в том числе и композиционных, при нанесении покрытий методами газопламенного напыления покрытий – один из наиболее важных этапов исследования, который позволит не только объективно судить о поведении деталей при эксплуатации, но и активно управлять ресурсом их работы, воздействуя на состав, структуру, свойства и, естественно, технологию получения покрытий.

Ключевые слова: газотермическое напыление, адгезия, технология и оснастка, подготовка поверхности, порошковый материал.

ANALYSIS OF PRE-TREATMENT METHODS PROVIDING, THE BEST ADHESION IN GAS-THERMAL SPRAYING

V. Yu. Protsko, D. L. Stasenko

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

Pre-treatment of the base surface is an important factor in ensuring strong adhesion of the sprayed layer to the base material. A necessary condition for this is the preparation of the surface of the base material by removing contaminants and activating the surface of the base. Analysis, justification and development of recommendations on the use of mechanical properties of materials, including composites, when applying coatings using flame spraying methods of coatings is one of the most important stages of the study, which will allow not only to objectively judge the behavior of parts during operation, but also to actively manage their service life, influencing the composition, structure, properties and, naturally, the technology of obtaining coatings.

Keywords: thermal spraying, adhesion, technology and equipment, surface preparation, powder material.

При проведении газотермического напыления на воздухе большое значение имеет предварительная подготовка поверхности детали перед напылением, так как состояние поверхности определяет качество адгезионной связи на границе раздела «покрытие – основа». Выполненные рядом исследователей работы по изучению работоспособности деталей с покрытиями убедительно показали, что основной причиной их разрушения является недостаточная связь между материалом покрытия и основы. По указанной причине серьезным ограничением на пути более широкого применения изделий, упрочненных покрытиями, следует считать прочность сцепления.

Предварительная обработка поверхности основы – важный фактор для обеспечения прочного сцепления напыленного слоя с материалом основы. Необходимое условие для этого – подготовка поверхности основного материала путем удаления загрязнений и активации поверхности основы.

К основным технологическим приемам активации относятся: повышение шероховатости поверхности; деформирование поверхности основы для создания напряженного состояния; предварительный нагрев изделия. Одним из технологических приемов является точение «рваной» резьбы с углом при вершине 55–60° и радиусом закругления 0,3–0,5 мм, угол резания – 80°, передний угол резца равен 0° или отрицателен (2–5°). Резец устанавливают в резцедержателе с вылетом 100–150 мм. Для получения необходимой шероховатости режущую кромку смещают ниже оси детали. Вибрация резца вызывает дробление металла на обрабатываемой поверхности, что приводит к шероховатости. Рекомендуются следующие значения шага рваной резьбы: при диаметре детали до 20 мм – 0,5 мм, 25–50 мм – 0,8–1,0 мм, 60–100 мм – 1,5 мм [1].

Используют и такой технический прием, как накатывание на восстанавливаемой или упрочняемой поверхности заготовки резьбы с замковым профилем. При подготовке к напылению наружных гладких цилиндрических поверхностей незакаленных деталей из материала, твердость которого не превышает 35 HRC, часто применяют косую сетчатую накатку [1]. При такой обработке прочность сцепления напыленного покрытия с основным металлом при испытаниях на сдвиг резко возрастает, достигая 100 МПа. Другим технологическим приемом является метод струйно-абразивной обработки поверхности. В качестве абразивных материалов для дробеструйной обработки используют стальную и чугунную крошку (дробь), корунд, карбид кремния, кварцевый песок. На процесс дробеструйной обработки влияет вид абразивного материала, форма, размеры, требования, предъявляемые к свойствам покрытий. Стальная крошка должна быть твердой (7500 МПа), остроугольной, свободной от ржавчины. Наилучшее качество поверхности получается при давлении сжатого воздуха 0,6 МПа. Также технологический прием активации – шлифование и ультразвуковая финишная обработка металлическими щетками, при которой снимается слой 0,5–2 мм и обеспечивается высокое качество поверхности с шероховатостью Ra 10–50 мкм [1–3].

Существенное влияние на взаимодействие материалов при газотермическом напылении оказывает шероховатость основы. При подготовке поверхности основы для газотермического напыления необходимо учитывать физико-механические свойства поверхности и условия напыления. Так, при напылении частиц с низкой скоростью увеличение шероховатости ведет к росту прочности их с основой и повышению коэффициента напыления. Достигнув максимального значения, прочность сцепления начинает уменьшаться. При напылении высокоскоростных частиц увеличение высоты микронеровностей поверхности основы их взаимодействие в зоне контакта изменяет незначительно. С увеличением шероховатости наблюдаются следующие закономерные явления [1]: 1) уменьшается удельная площадь поверхности основы; 2) снижается концентрация микровыступов; 3) растет пластическая деформация вершин микровыступов при напылении; 4) ухудшаются условия взаимодействия во впадинах; 5) при соизмеримых с размерами напыляемых частиц и больших микронеровностях роль микровыступов в образовании связи невелика.

Для формирования равномерного и качественного покрытия на фасонных поверхностях необходимо обеспечить равномерное перемещение горелки, расположенной перпендикулярно поверхности на заданном расстоянии от детали, поскольку оптимальный режим напыления зависит от многих факторов, в том числе от угла и дистанции напыления. При малой дистанции напыления создается опасность деформации металла основы под влиянием термических напряжений, при больших расстояниях температура и скорость напыляемых частиц снижается, что приводит к образованию «рыхлого» покрытия и уменьшению прочности сцепления с основой. Определенное влияние на формирование покрытия при газопламенном напылении оказывает угол атаки, т. е. угол между направлением напыления и поверхностью основы. По мере уменьшения угла напыления возрастает пористость покрытия, снижаются коэффициент использования напыляемого материала, его плотность и прочность сцепления покрытия с основой, т. е. наилучшие характеристики покрытия получают при перпендикулярном направлении пламени горелки относительно напыляемой поверхности. Деформация напыляемых частиц происходит при соударении с поверхностью основы. В случаях, когда невозможно обеспечить этот угол, допускается отклонение от вертикали, но не более чем на 45°. В противном случае сильно снижается качество покрытия и возрастают потери порошка. Наиболее интенсивное напыление происходит по центру потока, где сосредотачиваются самые

крупные фракции наименее окисленных распыленных частиц. Основная масса напыляемого материала поступает по центру потока, где достигаются наилучшее сцепление с основой, минимальная пористость и окисление частиц. В наружной части факела материал напыляется с минимальной скоростью, при этом образуется окисленный слой частиц с высокой пористостью и плохим сцеплением с подложкой. Следовательно, при восстановлении криволинейных поверхностей необходимо обеспечить перпендикулярность пламени относительно напыляемой поверхности и равномерное перемещение горелки в горизонтальной плоскости с соблюдением фиксированной дистанции напыления [2, 10]. Решения этой задачи можно добиться путем копирования поверхности горелкой, расположенной на неизменном расстоянии напыления и зафиксированной от перемещения в вертикальном направлении.

На основе проведенного анализа установлено, что максимальная эффективная площадь контакта поверхности формируется при струйно-абразивной обработке основы. Рельеф поверхности в этом случае представлен совокупностью неориентированных в пространстве зубчатых выступов. После шлифования и ультразвуковой финишной обработки максимальная эффективная площадь контакта поверхности – меньше и примерно одинакова. Однако геометрия формируемых профилей сильно отличается. После шлифовки на поверхности образцов сохраняются направленные следы режущего инструмента, не удаленные в процессе шлифования и образующие острые риски. После ультразвуковой финишной обработки рельеф поверхности точения сглаживается, и формируется субмикрорельеф, состоящий из следов множественных ударов ультразвукового инструмента.

Отрыв покрытия, напыленного на основу после струйно-абразивной обработки, площадь очагов схватывания составляет около 53 %, что соответствует высоким показателям адгезионной прочности между покрытием и основой. На поверхности шлифованной основы площадь очагов схватывания составляет около 24 %, а на основе с ультразвуковой обработкой – около 38 %.

Результаты оценки адгезии между покрытием и основой

Способы предварительной обработки поверхности	Исходная шероховатость основы Ra , мкм	Совокупная площадь очагов схватывания частиц и основы, %
Струйно-абразивная	4,38	53
Шлифование	0,85	24
Ультразвуковая финишная обработка	0,7	38

Анализ, обоснование и выработка рекомендаций по использованию механических свойств материалов, в том числе и композиционных, при нанесении покрытий методами газопламенного напыления покрытий является одним из наиболее важных этапов исследования, который дает возможность не только объективно судить о поведении деталей при эксплуатации, но и осуществлять активное управление ресурсом их работы, воздействуя на состав, структуру, свойства и технологию получения покрытий. Максимальная прочность сцепления для всех композиций обеспечивается при параметре шероховатости $Ra = 40\text{--}45$ мкм. На прочность сцепления влияет также способ обеспечения оптимальной шероховатости. При той же шероховатости прочность сцепления – больше у образцов, подвергнутых дробеструйной обработке. Очевидно, что при дробеструйной обработке кроме шероховатости на прочность

сцепления оказывает влияние повышение общей потенциальной энергии поверхности (наклеп). В поверхностях, подвергнутых дробеструйной обработке, запас поглощенной энергии будет больше, чем при лезвийной.

Таким образом, при подготовке поверхности основы для газотермического напыления с целью получения прочного соединения основы с покрытием необходимо учитывать перечисленные закономерности, а прочность сцепления покрытий достигает максимальных значений при $R_z / d = 0,75$, где d – диаметр напыляемой частицы. Наиболее высокая прочность сцепления отмечена при напылении порошком фракции 80–100 мкм [2].

Л и т е р а т у р а

1. Теория и практика нанесения защитных покрытий / П. А. Витязь, В. С. Ивашко, А. Ф. Ильюшенко [и др.]. – Минск : Беларус. навука, 1998. – 583 с.
2. Исследование адгезии покрытий, полученных высокоскоростным газопламенным напылением / В. А. Клименов, Ж. Г. Ковалевская, К. В. Зайцев, А. И. Толмачев // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 310, № 3. – С. 57–61.
3. Процко, В. Ю. Анализ методов подготовки поверхности детали для нанесения покрытия напылением / В. Ю. Процко, Д. Л. Стасенко // МИТРО 2023 – Машиностроение. Инновации. Технологии. Робототехника : тез. докл. науч.-техн. конф. студентов и молодых ученых, Гомель, 6 дек. 2023 г. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – Гомель, 2023. – С. 78.

УДК 621.838:621.891

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОРМОЗОВ МИКРОАВТОБУСОВ

П. Е. Родзевич

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

Проведены расчеты приращений температур на поверхности трения тормозов микроавтобусов различных марок и моделей при экстренном однократном торможении.

Ключевые слова: тормоз, фрикционное тепловыделение, приращения температур, тепловые потоки.

COMPARATIVE ANALYSIS AND EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF MINIBUS BRAKES

P. E. Radzevich

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

Calculations were carried out of the temperature increase on the surface of the brakes of minibuses of various brands and models during a single emergency braking.

Keywords: brakes, frictional heat generation, temperature increase, heat flows.

В настоящее время микроавтобусы используются для перевозки пассажиров и грузов на городских, пригородных и междугородных маршрутах. Безопасность пассажиров и других участников движения во многом зависит от исправности, эффективности работы и надежности основных агрегатов, механизмов и систем, в том числе тормозной системы. При проектировании тормозов микроавтобусов должны учитываться не только стабильность тормозного момента и высокая износостойкость

62 Секция 1. Современные технологии проектирования в машиностроении

пары трения, но и допустимый тепловой режим работы тормоза, исключая аварийную ситуацию из-за перегрева фрикционной пары трения.

На микроавтобусах устанавливаются дисково-колодочные тормоза со сплошным (ДКС) и вентилируемым (ДКВ) дисками, а также барабанные (Б) тормоза. Тормоза каждого типа имеют сходную конструкцию, однако отличаются разными геометрическими параметрами. В связи с необходимостью замены асбестовых фрикционных материалов на новые безасбестовые композиты представляет интерес оценить эффективность тормозов микроавтобусов, исходя из их теплового режима работы.

Цель работы – проведение сравнительного анализа тепловой нагруженности тормозов микроавтобусов различных марок и моделей, а также оценка их эффективности.

Постановка задачи. Основной величиной при сравнительном анализе конструкций тормозов является среднее приращение температур в зоне контакта «фрикционная накладка–контртело (диск, барабан)». Расчет ведется для случая экстренного торможения микроавтобуса полной массы на горизонтальном участке сухой асфальтированной дороги с максимально разрешенной скоростью движения (90 км/ч) без учета теплоотдачи в окружающую среду. В расчетах нагрузка считалась равномерно распределенной на переднюю и заднюю оси. Торможение – равнозамедленное, без проскальзывания. Материалы фрикционных накладок и дисков (барабанов) принимались одинаковыми для всех тормозов микроавтобусов со следующими показателями теплопроводности, теплоемкости, плотности и температуропроводности соответственно:

– накладка: безасбестовый композит (ТУ ВУ 400084698.163-2005):

$$\lambda_1 = 0,96 \text{ Вт/мК}; c_1 = 1200 \text{ Дж/кгК}; \rho_1 = 2000 \text{ кг/м}^3; a_1 = 2,0 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с};$$

– диски (барабаны):

$$\lambda_2 = 30 \text{ Вт/мК}; c_2 = 540 \text{ Дж/кгК}; \rho_2 = 7300 \text{ кг/м}^3; a_2 = 7,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Краткие технические характеристики микроавтобусов приведены в таблице.

Краткие технические характеристики микроавтобусов

Марка микроавтобуса	Полная масса, кг	Передние тормоза			Задние тормоза		
		Тип	Размеры диска, мм	Площадь накладки, см ²	Тип	Размеры диска (барабана), мм	Площадь накладки, см ²
Citroen Jumper	3400	ДКВ	$D = 280,$ $h_2 = 8$	90	Б	$D = 254,$ $h_2 = 6$	165
Iveco Daily-Grinta	3050	ДКС	$D = 267,$ $2h_2 = 14$	78	Б	$D = 254,$ $h_2 = 6$	250
Mercedes Benz Sprinter	3500	ДКВ	$D = 276,$ $h_2 = 7$	101	ДКС	$D = 272,$ $2h_2 = 16$	45
Ford Transit	3400	ДКВ	$D = 270,$ $h_2 = 7$	65	Б	$D = 260,$ $h_2 = 6$	200
Volkswagen Transporter	2900	ДКВ	$D = 285,$ $h_2 = 8$	70	ДКС	$D = 280,$ $2h_2 = 6$	50
ГАЗ-32213 «Газель»	3450	ДКВ	$D = 280,$ $h_2 = 7$	45	Б	$D = 280,$ $h_2 = 6$	135

Теоретическая часть. Определение приращения температур проводили по методике, приведенной в работах [1–5]. Считая торможение равнозамедленным, полное время торможения t_T , а также тормозной путь S_T с учетом начальной скорости торможения машины v_0 и коэффициента сцепления φ , определяются по формулам:

$$t_T = \frac{2S_T}{v_0}; \quad S_T = \frac{v_0^2}{2g\varphi}.$$

Кинетическая энергия микроавтобуса полной массой m , а также кинетическая энергия, поглощаемая одной фрикционной парой, определяются выражениями:

$$W = \frac{mv_0^2}{2}; \quad W_1 = \frac{W}{8}.$$

Средняя и начальная интенсивности фрикционного тепловыделения соответственно на поверхности трения фрикционная накладки-контртело с учетом номинальной площади контакта накладки A_{a_1} вычисляется по формулам:

$$q_{cp} = \frac{W_1}{A_{a_1} t_T}; \quad q_0 = 2q_{cp} = \frac{mv_0^3}{16A_{a_1} S_T}.$$

Средние приращения температур на поверхности трения определяли уравнением [1]:

$$\Delta\vartheta_2 = \vartheta_2(0, Fo_2) - \vartheta_0 = \frac{(1 - \alpha_T) q_0 K_{\text{вз}} h_2}{\lambda_2} \Theta'_2(0, Fo_2) - \frac{(1 - \alpha_T) q_0 K_{\text{вз}} h_2^3}{t_T \lambda_2 a_2} \Theta''_2(0, Fo_2),$$

где $\Theta'_2(0, Fo_2)$, $\Theta''_2(0, Fo_2)$ – безразмерные комплексы, зависящие от числа Фурье Fo_2 ; h_2 – толщина контртела (барабана или полудиска), м; α_T – коэффициент распределения тепловых потоков:

$$\alpha_T = \frac{K_{\text{вз}} \sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1}}{K_{\text{вз}} \sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1} + \sqrt{\lambda_2 c_2 \rho_2}},$$

здесь $K_{\text{вз}} = \frac{A_{a_1}}{A_{a_2}}$ – коэффициент взаимного перекрытия трущихся пар с номинальной

площадью контакта A_{a_2} контртела.

Результаты расчетов. Результаты расчетов тепловой нагруженности передних и задних тормозов микроавтобусов представлены на рис. 1.

Приведенные зависимости демонстрируют следующее:

– передние тормоза (рис. 1, а) – наиболее теплонагруженными являются тормоза микроавтобусов Ford Transit, в которых приращение температур составляет 195 К, и тормоза для микроавтобуса ГАЗ-32213 – приращение температур – 192 К. Это обусловлено значительной полной массой машин. Наименее теплонагруженные – тормоза микроавтобуса Volkswagen Transporter, в которых приращение температуры составляет 126 К;

– задние тормоза (рис. 1, б) – наибольшие приращения температур наблюдаются в тормозах микроавтобуса ГАЗ-32213. Средние приращения температур достигают 310 К. Это связано с неудовлетворительным выбором геометрических параметров барабанного тормоза, в частности, площади фрикционной накладки. В то же время наиболее благоприятными по тепловому режиму работы являются дисково-колодочные тормоза микроавтобуса Volkswagen Transporter, в которых приращения температур – 157 К.

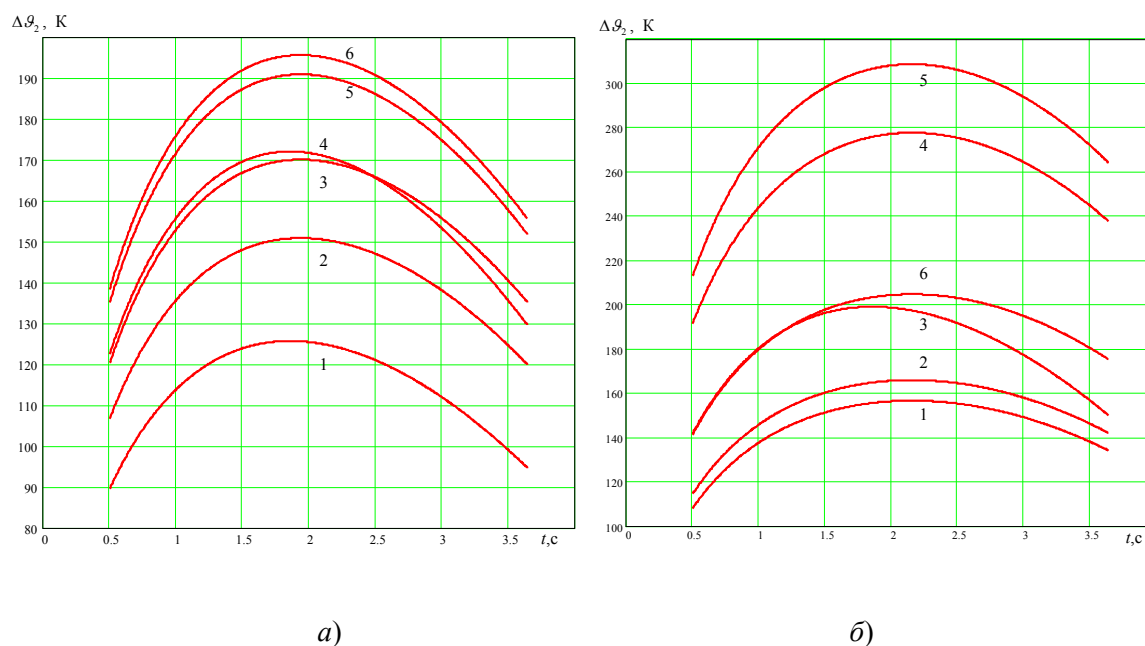


Рис. 1. Зависимости приращений температур в передних (а) и задних (б) тормозах микроавтобусов от времени торможения:
1 – Volkswagen Transporter; 2 – Iveco Daily-Grinta;
3 – Mercedes-Benz Sprinter; 4 – Citroen Jumper;
5 – ГАЗ-32213; 6 – Ford Transit

Таким образом, полученные данные свидетельствуют, что при экстренном торможении наименее теплонагруженными являются дисково-колодочные тормоза по сравнению с барабанными. Барабанный тормоз – тормоз закрытого типа, теплоотдача в окружающую среду затруднена и при многократных торможениях (притормаживаниях) температура накладок будет стремиться к критическим, при которых происходит деструкция полимерных связующих, используемых в фрикционных материалах, снижение износостойкости пар трения. Применение дисково-колодочных тормозов на микроавтобусах позволит обеспечить оптимальный тепловой режим работы пар трения, повысить надежность тормозной системы, что является существенным фактором в повышении безопасности движения.

Л и т е р а т у р а

1. Балакин, В. А. Тепловые расчеты тормозов и узлов трения / В. А. Балакин, В. П. Сергиенко. – Гомель : ИММС НАН Беларуси, 1999. – 220 с.
2. Балакин, В. А. Сравнительный анализ тепловой нагруженности тормозов легковых автомобилей / В. А. Балакин, В. П. Сергиенко, П. Е. Родзевич // Трение и износ. – 2000. – Т. 21, № 4. – С. 408–413.

3. Балакин, В. А. Тепловая нагруженность тормозов с учетом сил инерции / В. А. Балакин, В. П. Сергиенко, П. Е. Родзевич // Трение и износ. – 2000. – Т. 21, № 6. – С. 585–592.
4. Сравнительный анализ тепловой нагруженности тормозов грузовых автомобилей / В. А. Балакин, В. П. Сергиенко, П. Е. Родзевич, Ю. В. Лысенко // Трение и износ. – 2001. – Т. 22, № 2. – С. 123–126.
5. Родзевич, П. Е. Сравнительный анализ тепловой нагруженности тормозов автобусов / П. Е. Родзевич, В. А. Балакин, В. П. Сергиенко // Трение и износ. – 2003. – Т. 24, № 4. – С. 413–417.

УДК 669.71.535.241

ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ВЕЩЕСТВЕ ПРИ НАГРЕВЕ ОСЕСИММЕТРИЧНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ПУЧКОМ

П. С. Шаповалов

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

Найдено путем дифференцирования эллиптического уравнения теплопроводности аналитическое распределение температуры в веществе при нагреве лазерного осесимметричного гауссова пучка произвольного профиля. Представлено распределение температуры обычного гауссова и кольцевого гауссова пучка.

Ключевые слова: уравнение теплопроводности, нагрев лазерным пучком, распределение температуры, круговой гауссов пучок.

TEMPERATURE DISTRIBUTION FUNCTION IN MATTER DURING AXISYMMETRIC LASER BEAM HEATING

P. S. Shapovalov

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

By differentiating the elliptic heat conduction equation, the analytical temperature distribution in matter during heating of an axisymmetric gaussian laser beam of arbitrary profile is found. The temperature distributions of the ordinary gaussian and annular gaussian beam are presented.

Keywords: heat conduction equation, laser beam heating, temperature distribution, circular gaussian beam.

В промышленном производстве широко применяются лазеры для различных технологических процессов. Лазеры находят применение для резки материалов, лазерной сварки, термообработки и наплавки [1]. Лазеры, в первую очередь, используются в промышленности в тех процессах, которые неосуществимы с помощью других способов, и там, где применение лазера обеспечивает большую эффективность работы и производительность труда.

Для лучшей оптимизации использования лазеров в технологии нагрева и плавления вещества необходимо знать точное распределение температур в использованном материале в зависимости от распределения интенсивности света в поперечном сечении лазерного пучка. Важнейшей физической характеристикой процесса нагрева при воздействии лазерного излучения является распределение температурного поля в материале. Если распределение температуры в веществе известно для разных типов лазерных пучков, то это позволяет выбрать наиболее оптимальные и эффективные технологические режимы обработки материалов.

Для нахождения распределения температуры в веществе, создаваемом лазерным пучком используется неоднородное эллиптическое уравнение теплопроводности [2]. Для нагрева вещества применяется осесимметричный лазерный пучок. Исходное уравнение в полярной системе координат имеет вид:

$$\frac{d^2T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} = -\frac{1}{\lambda} I(r), \quad (1)$$

где T – искомая функция распределения температуры в веществе; λ – коэффициент теплопроводности материала; $I(r)$ – поперечное распределение интенсивности света в лазерном пучке используемого в качестве теплового источника нагрева вещества; r – радиус полярной системы координат.

Лазерный тепловой источник представим в виде произведения круговой гауссовой функции на многочлен четной степени от r :

$$I = (C_0 + C_1 r^2 + C_2 r^4 + \dots + C_n r^{2n}) \exp\left(-\frac{2r^2}{w^2}\right). \quad (2)$$

где w – радиус пучка.

В случае $C_0 \neq 0$, а $C_i = 0$, ($i = \overline{1, n}$) имеем простейший гауссов круговой пучок, где C_0 является интенсивностью лазерного излучения на оси пучка $r = 0$. Если $C_0 = 0$, а $C_i \neq 0$, то имеем произвольный кольцевой лазерный пучок. Такое представление теплового источника позволяет подобрать любую произвольную форму пучка с круговой симметрией. Учитывая постановку задачи для решения уравнения (1), граничные условия могут быть записаны в виде:

$$T(r = b) = 0; \quad (3a)$$

$$\frac{dT(r = 0)}{dr} = 0. \quad (3б)$$

В первом граничном условии (3a) следует, что температура при удалении в поперечном направлении при $b \rightarrow \infty$ стремится к нулю. Второе граничное условие (3б) следует из круговой симметрии лазерного теплового источника при нагревании вещества.

Интегрируя дифференциальное уравнение (1), с учетом граничного условия (3б) получим:

$$\frac{dT}{dr} = \frac{w^2}{4\lambda} r e^{-\frac{2r^2}{w^2}} \sum_{k=1}^n C_k \left[r^{2k} + \sum_{i=1}^k k(k-1) \dots (k-i+1) \frac{w^{2i}}{2^i} r^{2(k-i)} \right]. \quad (4)$$

Повторно интегрируя исходное уравнение с учетом первого граничного условия (3a), получим решение уравнения (4) в аналитическом виде:

$$T = -\frac{\lambda w^2}{8} \times \left[e^{-\frac{2r^2}{w^2}} \sum_{k=2}^n S_k(r) - e^{-\frac{2a^2}{w^2}} \sum_{k=2}^n S_k(b) + \left(Ei\left(\frac{2r^2}{w^2}\right) - Ei\left(\frac{2b^2}{w^2}\right) - 2\ln(r) + 2\ln(b) \right) \sum_{k=1}^{n+1} (-1)^{k-1} \frac{C_{k-1} w^{2(n-1)}}{2^{k-1}} k(k-1) \dots \cdot 2 \cdot 1 \right], \quad (5)$$

где $S_k(r) = C_k \sum_{i=1}^k \left((-1)^{k-1} \frac{w^{2(r-i+1)} r^{2(i-1)}}{2^{r-i+1}} \sum_{m=i}^k \frac{1}{m} k(k-1) \cdots (i+1)i \right)$; $Ei(x)$ – интегральная показательная функция [3]. В случае, когда используется обыкновенный круговой гауссов пучок ($C_0 \neq 0, C_i = 0, i = \overline{1, n}$), распределение температурного поля имеет вид:

$$T = -\frac{\lambda w^2 C_0}{8} \left[Ei\left(\frac{2r^2}{w^2}\right) - Ei\left(\frac{2b^2}{w^2}\right) - 2 \ln\left(\frac{r}{b}\right) \right]. \quad (6)$$

При численном исследовании решений (5), (6) использовались круговые и кольцевые гауссовы пучки (рис. 1).

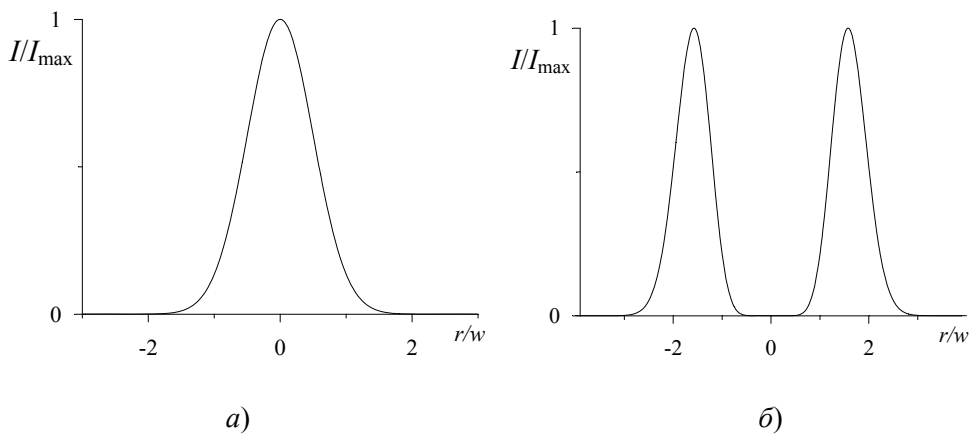


Рис. 1. Распределение интенсивности излучения в поперечном сечении кругового (а) $C_0 \neq 0$ и кольцевого гауссова пучка (б) $C_0 = 0; C_1 \neq 0; C_i = 0$

Качественное распределение температурного поля при воздействии таких пучков на поверхность материала имеет такой вид, как на рис. 2.

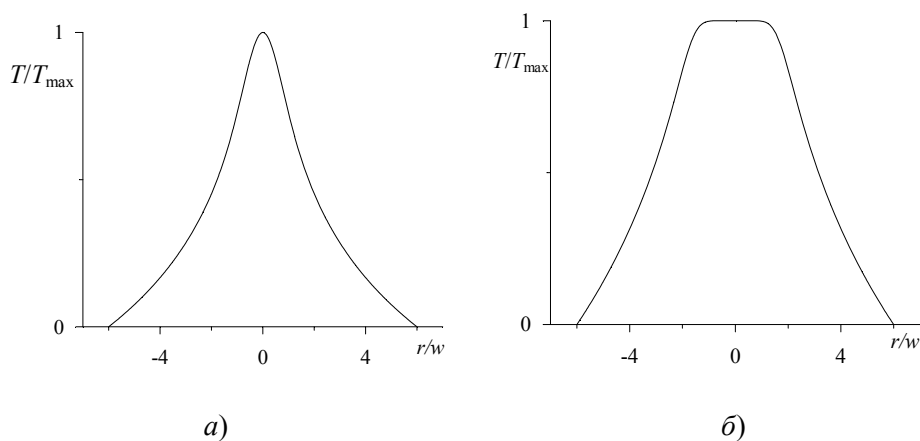


Рис. 2. Распределение температурного поля на поверхности материала при нагревании круговым (а) $C_0 \neq 0, b = 6r/w$ и кольцевым гауссовым пучком (б) $C_1 \neq 0, b = 6r/w$

Из рис. 2, а следует, что использование кругового пучка приводит к более узкому отверстию в материале и при одинаковой мощности с кольцевым пучком – к более глубокому отверстию, что выгодно для резки материалов. Применение кольцевых пучков выгодно для равномерного нагрева и плавления (наплавки) материала.

Литература

1. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 663 с.
2. Моделирование теплофизических процессов импульсного лазерного воздействия на металлы / А. А. Углов, И. Ю. Смуров, А. М. Лашин, А. Г. Гуськов. – Москва : Наука, 1991. – 288 с.

УДК 631.3-52:631.3

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМА НАВЕСКИ
ПОДЪЕМНО-НАВЕСНОГО УСТРОЙСТВА МОБИЛЬНОГО
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СРЕДСТВА**

В. Б. Попов, И. А. Занкевич

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

Представлена последовательность формирования функциональной математической модели механизмов навески подъемно-навесного устройства мобильного энергетического средства. Рассмотрены варианты структуры и функциональное описание функциональной математической модели.

Ключевые слова: функциональная математическая модель, механизм навески, подъемно-навесное устройство, мобильное энергетическое средство.

**MATHEMATICAL MODELING OF THE ATTACHMENT
MECHANISM OF THE LIFTING-ATTACHED DEVICE
OF A MOBILE POWER VEHICLE**

V. B. Popov , I. A. Zankevich

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The sequence of formation of a functional mathematical model of the attachment mechanisms of the lifting-attached device of a mobile power vehicle is presented. Variants of the structure and functional description of the functional mathematical model are considered.

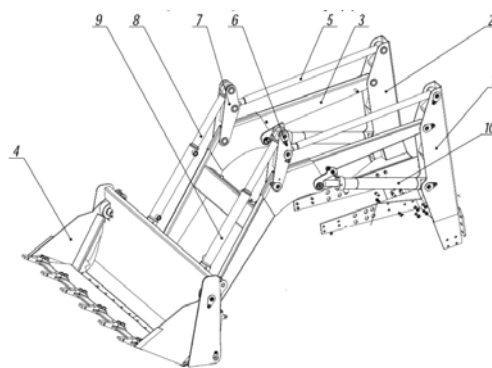
Keywords: functional mathematical model, attachment mechanisms, lifting-attached device, mobile power vehicle.

Мобильные сельскохозяйственные агрегаты (МСХА) формируются из мобильных энергетических средств (МЭС) и навесных машин (НМ). Подъемно-навесное устройство (ПНУ), состоящее из гидропривода (ГП) открытого типа и переднего или заднего механизмов навески (МН), расположено на МЭС. При этом МН – это основной структурный компонент ПНУ, определяющий характер взаимодействия МЭС с НМ.

Для обеспечения качественного взаимодействия МЭС и НМ рекомендуется рациональный выбор параметров МН, что обеспечивается посредством математического моделирования режимов работы МН [1]. Следует отметить, что к МЭС относятся универсальные энергетические средства (УЭС), сельскохозяйственные и лесотехнические тракторы, фронтальные погрузчики (ФП) (рис. 1), а также шасси погрузочные многофункциональные (ШПМ).



а)



б)

Рис. 1. Погрузчик фронтальный одноковшовый «АМКОДОР 332В» (а);
погрузочное оборудование «АМКОДОР 702 ЕМ-03» (б):

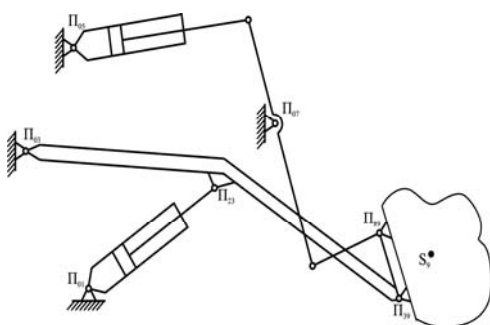
1, 2 – портал; 3 – стрела; 4 – ковш двухчелюстной;
5 – тяга; 6, 7 – рычаг; 8–10 – гидроцилиндры

Погрузчик фронтальный одноковшовый «АМКОДОР 332В» (рис. 1, а) предназначен для механизации погрузочно-разгрузочных работ, выполнения землеройно-транспортных работ на грунтах до III категории без предварительного рыхления и на грунтах IV категории после предварительного рыхления, строительно-монтажных и такелажных работ.

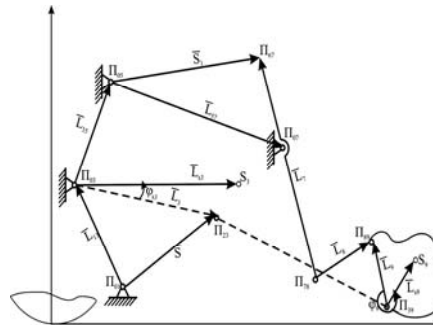
Подъемно-навесное устройство погрузчика состоит из симметрично расположенных гидроприводов, а также механизмов подъема стрелы и поворота траверсы, на которой крепится сменный рабочий орган.

Эффективность агрегатирования как погрузчика, так ШПМ с различными рабочими орудиями и машинами определяется, в первую очередь, грузоподъемностью его ПНУ. ПНУ – это необходимый комплект механизмов, предназначенных для связи мобильного энергоносителя (ШПМ) с рабочим орудием.

Состоит ПНУ ФП или ШПМ из объемного гидропривода, гидроцилиндры которого движут расположенные симметрично относительно продольной плоскости симметрии ШПМ механизмы подъема стрелы (МПС) и поворота траверсы (МПТ), где жестко крепится рабочий орган (РО). На рис. 2 представлен плоский аналог механизмов ПНУ шасси «АМКОДОР 332С» – структурная схема с РО в виде ковша.



а)



б)

Рис. 2. Схема механизмов ПНУ «АМКОДОР-332С» (а); векторная интерпретация механизмов подъема стрелы и поворота траверсы ПНУ (б)

Структурный анализ показывает, что в проекции на продольную плоскость симметрии ШПМ его МПС представляет собой одноподвижный четырехзвенник со средней поступательной парой [2], а МПТ идентифицируется одноподвижным шестизвенником (рис 2, а).

Координаты характерных точек вышеупомянутых механизмов определяются на основе метода замкнутых векторных контуров (рис 2, б) [2]:

$$X_{S3}(S) = X_{03} + L_{S3} \cos[\varphi_3(S) + \Delta\varphi]; \quad Y_{S3}(S) = Y_{03} + L_{S3} \sin[\varphi_3(S) + \Delta\varphi]; \quad (1)$$

$$X_{09}(S) = X_{03} + L_{39} \cos[\varphi_3(S) + \Delta\varphi_1]; \quad Y_{09}(S) = Y_{03} + L_{39} \sin[\varphi_3(S) + \Delta\varphi_1], \quad (2)$$

где X_{S3} , Y_{S3} – координаты центра тяжести стрелы; X_{09} , Y_{09} – координаты оси подвеса стрелы; φ_3 – угол характеризующий изменение расположения стрелы в правой декартовой системе координат; $\Delta\varphi$ – угол между L_3 и L_{S3} ; $\Delta\varphi_1$ – угол между векторами L_3 и L_{39} .

Также по результатам анализа МПТ были установлены координаты центра тяжести РО (S_9) в зависимости от обобщенных координат S , S_1 :

$$X_{S9}(S, S_1) = X_{09}(S) + L_{S9} \cos[\varphi_9(S_1) + \varphi_{S9}]; \quad (3)$$

$$Y_{S9}(S, S_1) = Y_{09}(S) + L_{S9} \sin[\varphi_9(S_1) + \varphi_{S9}], \quad (4)$$

где φ_9 – угол, образуемый вектором L_9 (геометрическая модель траверсы) в правой декартовой системе координат; φ_{S9} – угол между векторами L_9 и L_{S9} в момент начала движения закрепленного на траверсе РО.

Влияние МПС и МПТ на изменение координат центра тяжести РО однозначно связано с изменением независимых друг от друга обобщенных координат S и S_1 . Причем первая изменяет положение оси подвеса стрелы (Π_{09}) относительно ШПМ, а вторая – положение траверсы (L_9) относительно оси подвеса.

Кинематический анализ механизмов выполняется на базе геометрического анализа путем дифференцирования проекций характерных точек по независимой переменной t . В результате определяются передаточные числа МПС и МПТ. Передаточное число представляет собой аналог вертикальной скорости центра тяжести РО или кинематическую передаточную функцию 1-го порядка, зависящую только от внутренних параметров механизмов ПНУ ШПМ [3].

Понятие грузоподъемности ПНУ ФП и ШПМ введено по аналогии с грузоподъемностью ПНУ колесного трактора. Грузоподъемность ПНУ трактора вычисляется по массе поднимаемого груза (m) при максимальной величине усилия на штоке гидроцилиндра МН $F_{шт}^{max}$:

$$m = \frac{F_{шт}^{max} \eta_{МН}}{g I_s}, \quad (5)$$

где g – ускорение свободного падения; I_s – передаточное число МН трактора; $\eta_{МН}$ – КПД МН.

Максимальная сила на штоке гидроцилиндра МПС определяется по выражению

$$F_{шт}^{\max} = p_{гц}^{\max} F_n, \quad (6)$$

где F_n – площадь поршня со стороны напорной магистрали.

В выражении (6) верхняя граница $p_{гц}^{\max}$ устанавливается по настройке предохранительного клапана гидропривода ПНУ.

С учетом принятых допущений используя выражение (5), получим уравнение установившегося движения двух нагруженных поршней силовых гидроцилиндров:

$$(m_{p.o} I_{S9} + m_{стр} I_{S3}) g = F_{шт}^{\max} - F_{гц}(S), \quad (7)$$

где I_{S9} , I_{S3} – аналоги вертикальной скорости характерных точек – центров тяжести рабочего орудия и стрелы:

$$I_{S3}(S) = \varphi'_3(S) L_{S3} \cos[\varphi_3(S) + \Delta\varphi_1]; \quad (8)$$

$$I_{09}(S) = \varphi'_3(S) L_{39} \cos(\varphi_{39}(S)); \quad (9)$$

$$I_{S9}(S, S_1) = I_{09}(S) + \varphi'_5(S_1) U_{97}(S_1) L_{S9} \cos(\varphi_9(S_1)), \quad (10)$$

где $\varphi'_3(S)$ и $\varphi'_5(S_1)$ – аналоги угловой скорости звеньев L_3 и L_5 ; $I_{09}(S)$ – аналог вертикальной скорости оси подвеса стрелы; $U_{97}(S_1)$ – передаточное отношение угловых скоростей звеньев L_9 и L_7 МПТ.

Так как аналоги вертикальных скоростей характерных точек изменяются в зависимости от текущего положения звеньев МПС и МПТ, то и грузоподъемность ПНУ – $G(S, S_1)$ в диапазоне изменения обобщенных координат (S, S_1) , как это следует из уравнения, будет величиной переменной:

$$G(S, S_1) = \frac{p_{гц}^{\max} F_n - F_{гц}(S)}{\left[I_{S9}(S, S_1) + I_{S3}(S) \frac{m_{стр}}{m_{p.o}} \right] g}. \quad (11)$$

Как правило, конструктора интересует минимальное значение грузоподъемности, поскольку РО с таким весом устойчиво перемещается ПНУ во всем диапазоне изменения (S, S_1) . В этом положении аналог вертикальной скорости центра тяжести РО – наиболее влиятельный выходной параметр МПС, становится максимальным. Грузоподъемность можно рассматривать как обобщенный показатель качества ПНУ, зависящий, с одной стороны, от параметров гидропривода – давления в гидроцилиндре и площади его поршня со стороны напорной магистрали, а с другой – от параметров механизмов ПНУ и рабочего органа – их масс, передаточных чисел и КПД.

Л и т е р а т у р а

1. Попов, В. Б. Математическое моделирование подъемно-навесных устройств мобильных энергетических средств / В. Б. Попов. – Гомель : ГГТУ им. П.О. Сухого, 2016. – 251 с. : ил.
2. Артоболевский, И. И. Теория механизмов и машин / И. И. Артоболевский. – Москва : Машиностроение, 1988. – 640 с.
3. Попов, В. Б. Аналитические выражения кинематических передаточных функций механизмов навески энергоносителей / В. Б. Попов // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2000. – № 2. – С. 25–29.

СЕКЦИЯ 2. СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, НАНОМАТЕРИАЛЫ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 621.74.04:669.15-196.5:519.633

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ КОМБИНИРОВАННОЙ ФОРМЫ ДЛЯ ЛИТЬЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ВТУЛОК

В. А. Пумпур, П. Ю. Дувалов, В. М. Андриенко

*Государственное научное учреждение «Институт технологии
металлов Национальной академии наук Беларуси», г. Могилев*

Представлены результаты исследований по определению оптимальной комбинированной формы для получения литьем заготовок втулок из износостойкого хромистого чугуна. Основным критерием выбора вида и размеров элементов комбинированной формы является средняя скорость роста металлической корки в процессе затвердевания отливки с момента ее образования на стенках формы-кристаллизатора. Исследования выполнялись на основе математического моделирования теплообмена при литье втулки.

Ключевые слова: литье чугуна, износостойкий хромистый чугун, математическое моделирование.

DETERMINING THE OPTIMAL COMBINED MOLD FOR CASTING WEAR-RESISTANT BUSHINGS

V. A. Pumpur, P. Yu. Duvalau, V. M. Andryienka

*State Scientific Institution "Institute of Metal Technology
National Academy of Sciences of Belarus", Mogilev*

The article presents the results of studies on determining the optimal combined mold for casting bushing blanks from wear-resistant chromium cast iron. The main criterion for selecting the type and size of the combined mold elements is the average growth rate of the metal crust during the solidification of the casting from the moment of its formation on the walls of the crystallizer mold. The research was carried out on the basis of mathematical modeling of heat exchange during casting of the bushing.

Keywords: cast iron casting, wear-resistant chromium cast iron, mathematical modeling.

Втулки, работающие в условиях абразивного износа, должны обладать необходимыми эксплуатационными свойствами, прежде всего, высокой износостойкостью, твердостью и достаточной прочностью. Такие свойства достигаются получением соответствующей структуры заготовок при литье, которая в наибольшей степени определяется скоростью кристаллизации и затвердевания отливок в форме. Более высокая скорость кристаллизации износостойкого хромистого чугуна (ИЧХ) позволяет получить структуру отливки с более мелкими зернами металлической матрицы и карбидной фазы, повысить плотность литого металла, исключить усадочные дефекты и пористость.

Цель исследований – определить оптимальный вариант комбинированной формы и размеры составляющих ее элементов для обеспечения наиболее высокой средней скорости затвердевания заготовки втулки из ИЧХ.

Заготовка для последующего изготовления втулок представляет собой полый цилиндр высотой 300 мм, толщиной 14,5 мм, с наружным и внутренним диаметрами, равными соответственно 66 и 29 мм. Комбинированная форма для получения заготовки литьем состоит из внутреннего и наружного элементов. Рассматривались 4 варианта конструкции комбинированной формы для литья заготовки (рис. 1).

Внутренний элемент формы представляет собой:

- цилиндр из стали 20 с песчаным стержнем внутри (рис. 1, а);
- песчаный стержень из холодно-твердеющей смеси (ХТС) (рис. 1, б);
- полый стальной цилиндр (рис. 1, в, г).

Наружный элемент формы представляет собой или ХТС (рис. 1, а–в), или полый цилиндр из стали 20 (рис. 1, г), на внешней поверхности которого происходит конвективный теплообмен с воздушной средой.

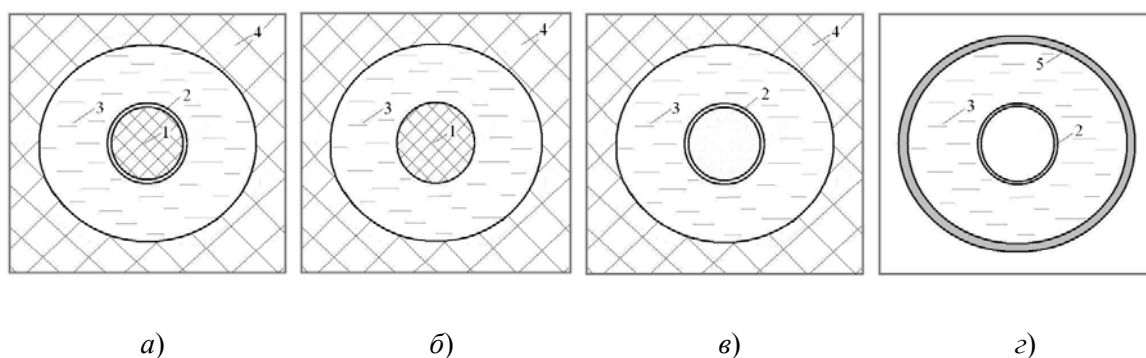


Рис. 1. Рассматриваемые варианты комбинированных форм:
1 – внутренний стержень из ХТС; 2 – внутренний стальной цилиндр;
3 – отливка; 4 – наружная форма из ХТС; 5 – наружный полый стальной цилиндр

Исследования проводились на основе использования специально разработанного программного комплекса, реализующего математическую модель теплообмена при литье заготовки втулки из ИЧХ в рассматриваемые комбинированные формы. При разработке математической модели было принято допущение о мгновенном заполнении формы расплавом при заливке. Кроме того, рассматривался теплообмен лишь в поперечном сечении отливки, так как высота заготовки значительно превосходит ее толщину, т. е. реализована двухмерная математическая модель теплообмена в цилиндрической системе координат.

Температура заливаемого расплава $T_{\text{зал}} = 1400^\circ\text{C}$. Начальная температура элементов формы – 100°C . Температура горячего воздуха внутри полого стального цилиндра (рис. 1, в и г) принималась равной 200°C . Теплообмен между формирующейся отливкой и стальной поверхностью формы учитывался посредством граничных условий третьего рода с коэффициентами контактного теплообмена, равными $1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Теплообмен между формирующейся отливкой и поверхностью формы из ХТС учитывался посредством граничных условий третьего рода с коэффициентом контактного теплообмена, равным $10^5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ [1]. Теплообмен между внутренним стальным цилиндром и поверхностью песчаного стержня учитывался посредством граничных условий третьего рода с коэффициентом контактного теплообмена, равным $10^4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Входными варьируемыми факторами численных экспериментов являлись:

- материал внутреннего стержня: ХТС (песок) или корундовый песок;
- материал наружной стенки формы: сталь 20 или ХТС;
- толщина стенки внутреннего элемента формы – стального цилиндра (рис. 1, а) $b_{цв}$: 2 или 3 мм;
- толщина стенки наружного элемента формы – стального цилиндра (рис. 1, в) $b_{фн}$: 3 или 5 мм;
- толщина стенки наружного элемента формы из ХТС (рис. 1, а, б и в) $b_{фн}$: 10 или 30 мм.

Определяли и анализировали:

- температурные поля по толщине затвердевающей отливки, внутренней и наружной стенок формы в динамике;
- средние температуры по толщине затвердевающей отливки, внутренней и наружной стенок формы в динамике;
- время снятия перегрева расплава при литье $\tau_{пер}$, с, после заливки в форму;
- момент начала затвердевания отливки $\tau_{0зтв}$, с;
- время полного затвердевания отливки $\tau_{зтв}$, с, после заливки в форму;
- продолжительность затвердевания отливки от момента снятия перегрева $\Delta\tau_{зтв} = \tau_{зтв} - \tau_{пер}$, с;
- продолжительность роста корки $\Delta\tau_{кор} = \tau_{зтв} - \tau_{0зтв}$, с, от момента начала затвердевания;
- ширину и скорость увеличения двухфазной зоны в процессе затвердевания отливки;
- толщину затвердевшей части отливки (корки) и скорость ее затвердевания на рабочих поверхностях формы в динамике;
- долю двухфазной зоны $\delta_{дф}$ и затвердевшей корки $\delta_{кор}$ отливки в процессе затвердевания, %;
- среднюю скорость роста корки $V_{кор}$ за время $\Delta\tau_{кор}$.

Проведено 14 численных экспериментов. В результате выполненных исследований определено следующее.

Применение ХТС и корундового песка в качестве материала стержня, находящегося внутри цилиндра (рис. 1, а), оказывает примерно одинаковое влияние на кинетику затвердевания отливки. Средняя скорость роста корки $V_{кор}$ при использовании корундового песка выше на 4,1 % при $b_{фн} = 10$ мм и на 8,4 % – при $b_{фн} = 30$ мм по сравнению с ХТС. Увеличение толщины внутреннего элемента формы – стального цилиндра – дает еще меньший эффект: $V_{кор}$ увеличивается лишь на 0,8–1,6 %.

Использование в качестве внутреннего элемента комбинированной формы стального цилиндра с песчаным стержнем внутри (рис. 1, а) малоэффективно, так как он достаточно быстро прогревается, достигая температуры самой отливки, что приводит в дальнейшем к значительному увеличению продолжительности ее затвердевания и снижению его скорости. Средняя скорость роста корки без применения цилиндра (рис. 1, б) увеличивается многократно по сравнению с вариантом на рис. 1, а – от 0,366 до 4,625 мм/с.

Оптимальным вариантом комбинированной формы, обеспечивающей наиболее высокую среднюю скорость затвердевания заготовки втулки $V_{кор} = 5,781$ мм/с, является

форма, в которой в качестве внутреннего элемента используется полый цилиндр из стали 20 толщиной 3 мм, а в качестве наружного – полый цилиндр из стали 20 толщиной 5 мм (рис. 1, *з*). При использовании ХТС в качестве наружного и внутреннего элементов формы (рис. 1, *б*) средняя скорость затвердевания ниже на 25 %. При использовании ХТС в качестве наружного элемента формы, а в качестве внутреннего – полого стального цилиндра (рис. 1, *в*) средняя скорость затвердевания ниже на 3 %.



Рис. 2. Полученные заготовки из износостойкого хромистого чугуна

Кроме того, именно при литье в комбинированную форму, представленную на рис. 1, *з*, обеспечивается одинаково высокая скорость роста металлической корки на обеих поверхностях стального кристаллизатора. В отличие от формы, представленной на рис. 1, *в*, где происходит направленное затвердевание отливки со стороны внутреннего полого цилиндра, на поверхности ХТС толщина корки незначительна. В свою очередь, вариант на рис. 1, *в* обеспечивает более устойчивый и технологичный процесс затвердевания отливки. Данный способ позволил получить заготовки требуемого качества и без дефектов (рис. 2).

Литература

1. Затвердевание отливок из износостойких чугунов при литье в кокиль, песчаную и комбинированные формы / Э. Ф. Барановский, В. А. Пумпур, В. М. Ильющенко, К. Э. Барановский // Литейное производство. – 2011. – № 2. – С. 20–24.

УДК 621.74.043.1:669.15-196.5

ПРИМЕНЕНИЕ СТАЛЬНОГО СТЕРЖНЯ В КАЧЕСТВЕ ВНУТРЕННЕГО ИСТОЧНИКА ТЕПЛОТВОДА В ДЕТАЛЯХ ИЗ ХРОМИСТОГО ЧУГУНА

П. Ю. Дувалов, В. М. Андриенко, А. А. Сушко

*Государственное научное учреждение «Институт технологии
металлов Национальной академии наук Беларуси», г. Могилев*

Показана возможность увеличения твердости чугуна и улучшения микроструктуры в центральной зоне отливки за счет размещения стального стержня в центре формы перед заливкой.

Ключевые слова: износостойкий хромистый чугун, ИЧХ, неоднородность микроструктуры и твердости, HRC, стальной стержень, форма.

USING A STEEL ROD AS AN INTERNAL HEAT SINK IN HCCI COMPONENTS

P. Yu. Duvalau, V. M. Andryienka, A. A. Sushko

State Scientific Institution "Institute of metal technology

National Academy of Sciences of Belarus", Mogilev

A possibility to increase hardness and to improve microstructure of iron cast in inner zone of casting due to inserting steel rod in a mould before pouring has been presented.

Keywords: HCCI, nonuniformity of microstructure and hardness, HRC, steel rod, mould.

Центробежные измельчители являются наиболее эффективными машинами для тонкого помола сыпучих материалов, в которых реализуется высокоскоростное ударное воздействие [1]. Сменными деталями дробильно-размольного оборудования (ДРО) являются вкладыши отбойные. От срока их службы зависит производительность всего оборудования. Из опыта литья деталей из износостойкого хромистого чугуна (ИЧХ) в ИТМ НАН Беларуси [2] известно, что детали ДРО склонны к структурной неоднородности вследствие разных локальных скоростей охлаждения на поверхности и внутри отливки, что коррелирует с твердостью, которая в глубине отливки заметно ниже, чем на поверхности.

Определенный эффект выравнивания скорости кристаллизации по всему сечению отливки и сопутствующее изменение структуры достигается применением внутренних холодильников [3]. Для литья вкладышей отбойных ($70 \times 70 \times 200$ мм) предложено использовать стержень $\varnothing 15$ мм из стали Ст3 в качестве закладного элемента с целью изучения его влияния на структуру и твердость ИЧХ во внутренних областях отливки. Для этого было подготовлено 5 вариантов форм: три – со стержнем в полости формы (рис. 1) и два – без стержня (I из ХТС, V из стали, аналогичны вариантам II, IV).

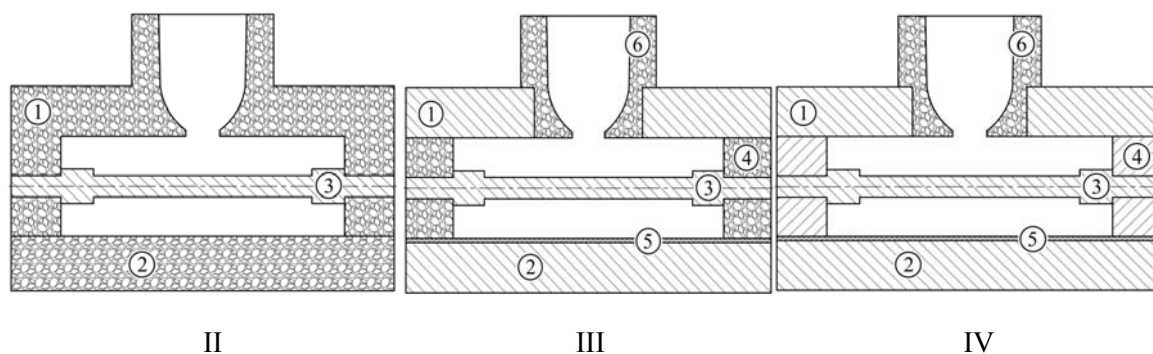


Рис. 1. Сечения литейных форм для изготовления отбойных вкладышей с торцевыми стержневыми выступами:

1 – верхняя часть формы (ХТС/сталь); 2 – нижняя часть формы (ХТС/сталь);

3 – стальной стержень; 4 – боковая часть формы (ХТС/сталь);

5 – кремнеземная ткань; 6 – заливочная чаша из ХТС

Заливочная чаша из холодно-твердеющей смеси (ХТС) была смещена от центра верхней поверхности отливки к боковой, чтобы расплав при заливке не попадал сразу на стержень. В результате эксперимента было отлито пять вкладышей отбойных следующего химического состава: 3,66 % С, 18,6 % Cr, 0,11 % Ni, 0,55 % Mn, 0,68 % Si,

0,36 % W, 0,14 % V, 0,27 % Mo. Три экспериментальные детали (II, III, IV) получены с закладным охлаждающим элементом в виде стального стержня (рис. 2) и две детали – без стержня (I, V), которые были приняты за эталоны для последующих исследований.



Рис. 2. Экспериментальные детали «Вкладыш отбойный» I, II, III, IV, V слева направо после выбивки

Из полученных отливок вырезались образцы для изучения микроструктуры и испытаний на твердость. Подготовка образцов для шлифов проводилась на «Полировальном двухшпиндельном станке для шлифов модели 3881Б». Для изучения кристаллического строения образцов применялся металлографический микроскоп «Leica DMI8». Твердость по Роквеллу измерялась с помощью «Твердомера ТКМ-459С». На рис. 3 представлены вырезанные из вкладышей отбойных образцы, подготовленные для шлифования и испытаний на твердость.

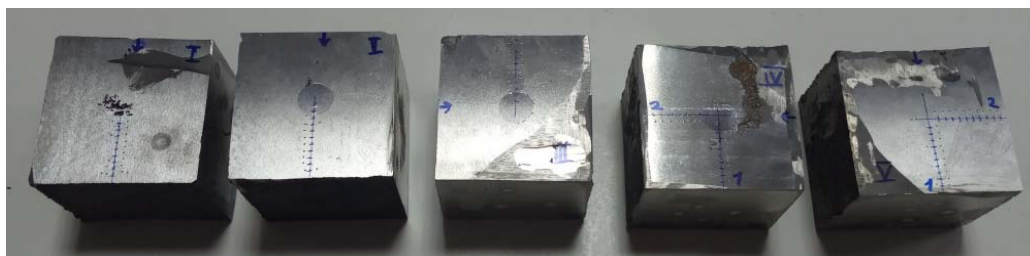


Рис. 3. Вырезка образцов для исследований из экспериментальных деталей «Вкладыш отбойный», полученных в формах вариантов I, II, III, IV, V соответственно слева направо

Сравнение микроструктур образцов разных вариантов I–V показало, что использование стержня (II, III, IV) приводит к измельчению структуры, однако для II, III эффект значительно менее выражен, чем для IV (рис. 4). Варианты I (ХТС) и II (ХТС + стержень) дали результаты, схожие по микроструктуре, при этом влияние стержня присутствует только на пристержневых зонах. Вариант III (комбинированная форма + стержень) по микроструктуре представляет собой нечто среднее между II и IV (кокиль + стержень).

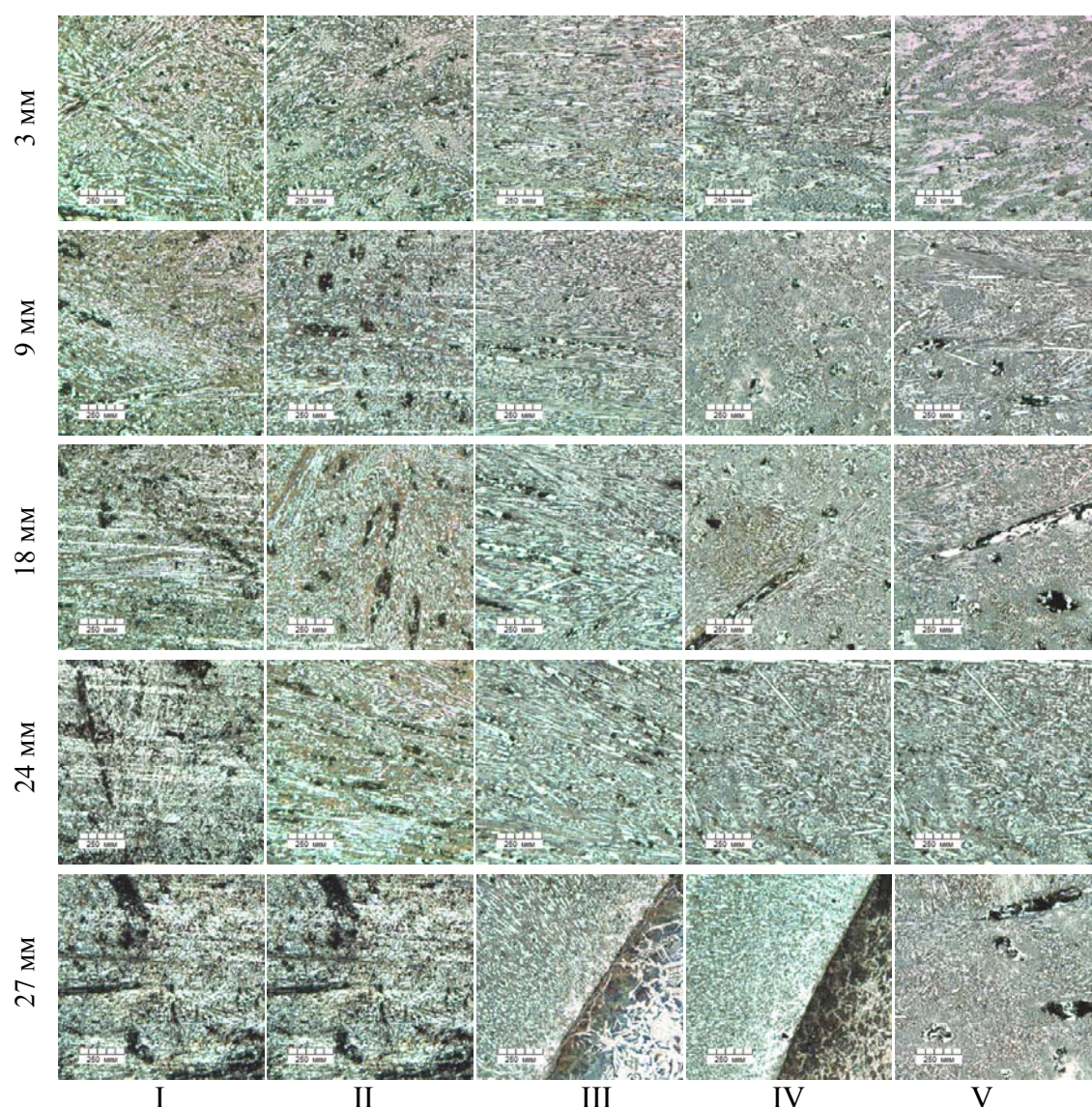


Рис. 4. Сравнение микроструктур пяти образцов на разной глубине

Испытания на твердость показали следующую тенденцию: по мере приближения к стержню снижение твердости с глубиной замедляется, прекращается, после чего твердость начинает возрастать. Применение стержня в кокиле (вариант IV) имеет перспективу дальнейших исследований и использования полученных результатов для изготовления деталей «Вкладыш отбойный» с улучшенными механическими свойствами.

Литература

1. Бороха, Э. Л. Центробежные дробилки и мельницы ударного типа / Э. Л. Бороха, В. В. Воробьев, А. В. Горобец // Центробежная техника – высокие технологии : материалы 3-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2008. – С. 5–15.
2. Барановский, К. Э. Получение отливок из износостойких хромистых чугунов в комбинированных формах и кокилях / К. Э. Барановский, В. М. Ильющенко, П. Ю. Дувалов // Металл и литье Украины. – 2012. – № 6. – С. 10–13
3. О применении внутренних источников теплоотвода при получении отливок из износостойких хромистых чугунов / В. А. Пумпур, А. Г. Анисович, К. Э. Барановский, [и др.] // Наука и техника. – 2022. – Т. 21, № 6. – С. 464–472.

УДК 699.844:534.84

**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ
ДЛЯ ШУМОПОНИЖАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ
В МАШИНОСТРОЕНИИ И НА ТРАНСПОРТЕ**

В. П. Сергиенко, С. Н. Бухаров, А. С. Тулейко

*Государственное научное учреждение «Институт механики
металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси»,
г. Гомель*

Применение эффективных акустических материалов обеспечивает снижение шума и улучшение экологической обстановки в различных сферах жизнедеятельности человека, в том числе в жилых и производственных помещениях, на транспорте и т. д. Обсуждены современные тенденции в области создания эффективных звукопоглощающих и звукоизолирующих материалов для снижения шума в промышленности и на транспорте.

Ключевые слова: шум, акустические композиционные материалы, звукопоглощение, звукоизоляция.

**PROMISING ACOUSTIC MATERIALS FOR NOISE-REDUCING
STRUCTURES IN MECHANICAL ENGINEERING
AND TRANSPORT INDUSTRY**

V. P. Sergienko, S. N. Bukharov, A. S. Tuleiko

*State Scientific Institution “V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute
of National Academy of Sciences of Belarus”, Gomel*

The use of effective acoustic materials provides noise reduction and environmental improvement in various spheres of human life, including in residential and production premises, transportation and so on. The trends in the field of creating promising sound-absorbing and sound-insulating materials for use in industry and transport are considered.

Keywords: noise, acoustic composite materials, sound absorption, sound insulation.

Акустические материалы – это искусственные материалы, предназначенные для диссипации звуковой энергии [1]. Принято выделять акустические материалы со звукопоглощающими и звукоизолирующими свойствами [2]. Звукопоглощающие материалы рассеивают энергию звуковых волн, распространяющихся в них. Механизм звукопоглощения заключается в преобразовании энергии звуковых колебаний в тепловую энергию за счет потерь на вязкое трение в капиллярах пор или необратимых потерь из-за деформации волокнистой структуры материала. Пористые и волокнистые материалы, характерными отличительными особенностями которых являются относительно невысокие объемная плотность и сопротивление продуванию воздушным потоком, обладают, как правило, достаточно высокими звукопоглощающими свойствами. Эффективность звукопоглощающих материалов оценивается безразмерным коэффициентом звукопоглощения, равным отношению количества поглощенной энергии к общему количеству падающей на материал энергии звуковых волн. Материалы, обладающие коэффициентом звукопоглощения выше 0,2, относят к акустическим звукопоглощающим материалам и применяют для нанесения на отражающие звук поверхности потолка, пола и стен с целью минимизации звуковых переотражений. Главное отличие акустических звукоизоляционных материалов от звукопоглощающих заключается в том, что звукоизоляционные материалы

отражают звук и тем самым препятствуют его прохождению к защищаемому объекту. Как правило, звукоизоляционные материалы имеют относительно высокую плотность. В определенном смысле к акустическим материалам относятся также вибропоглощающие и виброизолирующие материалы.

В настоящей работе рассматриваются некоторые направления выполняемых в ИММС НАН Беларуси исследований по созданию передовых технологий и разработке акустических материалов.

Создание новых шумопоглощающих материалов заключается в решении взаимосвязанных задач разработки звукоизолирующих и звукопоглощающих материалов, эффективных в заданном диапазоне звуковых частот. Кроме того, для снижения интенсивности передачи колебательной энергии виброактивных объектов от мест возникновения к местам излучения звука необходимо разрабатывать соответствующие материалы с вибропоглощающими и виброизолирующими свойствами. Общей целью при создании вибро- и звукопоглощающих материалов является улучшение динамических механических свойств, связанных с рассеиванием колебательной энергии волн за счет вязкого трения или необратимых упругих потерь деформации в компонентах структуры композиционного материала. Теоретические предпосылки и накопленный практический опыт, прежде всего, в автомобильной промышленности, свидетельствуют о том, что эффективные инновационные материалы для структурной вибрации и шума могут быть созданы на основе компонентов (веществ) с высоким показателем механических потерь в широком диапазоне температур и частот. К таким веществам относятся растительные волокна и различные биоразлагаемые природные линейные и разветвленные высокомолекулярные соединения (натуральный каучук, целлюлоза, полимеризующиеся смолы, крахмал, жидкость из скорлупы орехов кешью и др.). За счет сложного композиционного состава возможно обеспечить комплекс акустических и эксплуатационных характеристик композитов на основе высокомолекулярных соединений природного происхождения и растительных волокон (биокомпозитов). Основными преимуществами композитов на основе природных компонентов являются экологичность, относительно низкая плотность и, как следствие, малый вес готовых изделий, простота использования и утилизации, а также возможность вторичной переработки. Традиционно используемые природные компоненты, которые наиболее широко применяются при создании акустических композитов, включают волокна льна, конопли, джута, кенафа, кокосового волокна, тростника, соломы и т. д. [3]. Конкретный тип используемых природных волокон зависит как от требуемых физико-механических и акустических свойств конечных изделий, так и от наличия подходящего сырья на местах.

В ряде случаев композиты на основе природных волокон обладают лучшими физико-механическими и акустическими характеристиками, чем композиты на основе химически синтезированных (искусственных) полимеров и волокон. Так, звукопоглощающие свойства композитов на основе волокон бамбука, кенафа, люфы, финиковой пальмы, кокоса, чайного листа, конопли и тростника превосходят аналогичные свойства аналогичных композитов на основе полипропиленовых и полиэфирных волокон. Проведенные нами исследования показали возможность использования волокнисто-гранулированного сырья растительного происхождения в качестве базовых компонентов для акустических композитов. В частности, использование в составе акустических композитов отходов производства крупы (шелухи) риса и гречихи позволяют сформировать открыто-пористую структуру с низкой плотностью и малым сопротивлением

воздушному потоку [4], что является необходимым условием для высоких звукопоглощающих свойств. Таким образом, волокнисто-гранулированное сырье растительного происхождения можно рассматривать в качестве перспективного базового наполнителя для экологически чистых звукопоглощающих композиционных материалов.

В последние годы значительные усилия исследователей были направлены на разработку принципиально новых акустических композитов на основе нанотехнологий и принципов проектирования акустических метаматериалов. Нами проведены исследования влияния слоистого силикатного наномодификатора (монтмориллонита) на динамические механические и акустические свойства нанокомпозитов на основе эпоксидных матриц, используемых в многослойных шумопонижающих конструкциях. Разработаны акустические композиты, содержащие наномодификаторы, позволяющие увеличить показатель звукоизоляции до 58 дБ, что на 36 дБ больше по сравнению со слоем той же толщины базового состава [5].

Современный этап развития акустических материалов, в первую очередь, благодаря развитию и внедрению аддитивных технологий, характеризуется появлением принципиально нового подхода к формированию искусственных метаструктур, обеспечивающего ранее недостижимые показатели звукопоглощения в области средних (250–1000 Гц) и низких (ниже 200 Гц) частот при относительно малой толщине материалов. Известны образцы звукопоглощающих метаматериалов, реализованные на принципах резонаторов Гельмгольца, Фабри–Перо, мембранных поглотителей, расщепленной трубы (split-tube resonators), метаповерхностных структур когерентных поглотителей и др. Общим характерным недостатком всех перечисленных резонансных подходов является узкая полоса рабочих частот, в которой эффективны такие искусственные поглотители. Для преодоления этого недостатка было предложено несколько способов, например, за счет объединения элементарных ячеек с разными пиками поглощения в многослойные акустические системы, набором вложенных микроцелевых поглотителей, объединения набора элементарных ячеек с разными структурными параметрами в одном слое, спирально-пространственных резонаторов со слоем сверхтонкого губчатого покрытия, за счет резонаторов со слабым резонансом и когерентной связью, нелокальными характеристиками, двойных разрезных кольцевых резонаторов.

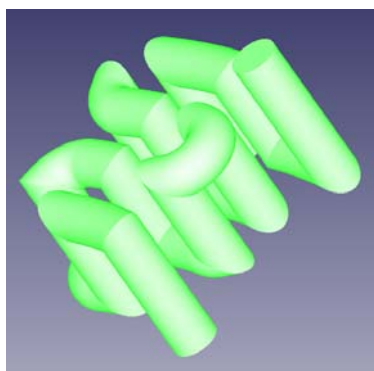


Рис. 1. Акустическая 3D-метаструктура на основе спирально-пространственного резонатора

В разрабатываемых нами акустических метаматериалах применены лабиринтные спирально-пространственные резонаторы (рис. 1), позволяющие достичь предельно высокие значения коэффициента звукопоглощения (близкие к 1,0) в наиболее востребованном диапазоне рабочих частот 500–2000 Гц. Важнейшее преимущество

разрабатываемых метаматериалов состоит в том, предложенные решения позволяют реализовать предельно высокую акустическую эффективность при недостижимых для традиционных материалов (вспененные полиуретаны, ячеистые резины, нетканые и др.) соотношениях толщины к длине поглощаемых звуковых волн. Акустические метаматериалы крайне востребованы авиационной промышленностью.

Литература

1. Acoustic composites and noise-reducing structures. Part I. Environmentally friendly components and nanofillers (a review) / S. N. Bukharov, V. P. Sergienko, V. V. Kozhushko [et al.] // Polymer Materials and Technologies. – 2021. – Vol. 7, N 1. – P. 6–22.
2. Hopkins, C. Sound Insulation. Elsevier / C. Hopkins. – London : Butterworth-Heinemann, 2007. – 622 p.
3. Promper, E. Natural fibre and wood fibre reinforced compounds for automotive interiors – A success story / E. Promper // International congress of raw Material Shift & biomaterials, 3rd–4th December 2008, Maritim Hotel Cologne. – Germany, 2008.
4. Buckwheat husk and epoxy resin based composites for noise abating / V. V. Kozhushko, S. N. Bukharov, A. Alexiev, R. Iankov // Journal Akustika. – 2021. – Vol. 40. – P. 17–20.
5. Development of new environmental safety sound-absorbing materials and layered sound-proofing structures for transport taking into account the spectral characteristics of the noise / V. P. Sergienko, S. N. Bukharov, V. V. Kozhushko [et al.] // Scientific proceedings NTD days. – 2015. – Vol. 150, N 1. – P. 469–473.

УДК 628.477.6:658.567.1

ПРОБЛЕМЫ УТИЛИЗАЦИИ «АКТИВНЫХ» УПАКОВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

И. Ю. Ухарцева, С. Н. Бобрышева

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

Представлены результаты исследований по изучению способов утилизации «активных» упаковочных материалов, содержащих различные добавки природного и синтетического происхождения. Приведены данные о влиянии факторов окружающей среды на деформационно-прочностные характеристики пленочных образцов и их деструкцию при экспозиции в различных средах. Полученные данные позволяют предложить наиболее рациональные способы утилизации таких материалов и дифференцировать наполнители по их стойкости к фото- и биodeградации.

Ключевые слова: «активные» упаковочные материалы, утилизация, фото- и биodeградация.

PROBLEMS OF DISPOSAL OF “ACTIVE” PACKAGING MATERIALS

I. Yu. Ukhartseva, S. N. Bobrysheva

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The results of research on the methods of disposal of “active” packaging materials containing various additives of natural and synthetic origin are presented. Data on the influence of environmental factors on the deformation and strength characteristics of film samples and their destruction during exposure in various media are presented. The obtained data allow us to propose the most rational ways of recycling such materials and differentiate fillers according to their resistance to photo- and biodegradation.

Keywords: “active” packaging materials, recycling, photo- and biodegradation.

Сегодня не осталось практически ни одной отрасли экономики, где бы не использовались полимерные материалы. Благодаря комплексу полезных свойств и своему многообразию, полимерные материалы являются важнейшим сегментом мирового упаковочного рынка и используются для создания потребительской, промежуточной и транспортной упаковки. Из всех выпускаемых полимерных материалов 41 % используется в упаковке, из этого количества 47 % расходуется на упаковку пищевых продуктов.

Упаковочные материалы на основе высокомолекулярных соединений эффективно защищают продукты от микробного поражения и влияния вредных факторов окружающей среды (свет, повышенные температура и влажность, кислород воздуха, механические и химические загрязнения и т. д.), что увеличивает сроки хранения изделий, сокращает количество отходов из-за порчи, особенно при транспортировке и реализации. Анализ технологических особенностей получения упаковок, условий их эксплуатации, основных потребительских характеристик позволяет среди основных классов полимерных упаковочных материалов выделить «активные» материалы, способные регулировать в упаковочном пространстве химический и биологический состав среды. Срок хранения продуктов в таких упаковках увеличивается от 1,5 до 4 раз [1, 2].

С каждым годом объемы производства и потребления упаковочных материалов увеличиваются, а значит, постоянно увеличивается количество образующихся при этом отходов. Утилизация их отходов в основном осуществляется двумя основными способами – захоронением и сжиганием, которые нерациональны и неэкономичны. При захоронении из полезного использования изымаются участки земли, а сжигание требует предварительной обработки отходов и при этом часто происходит выделение ядовитых продуктов, опасных для человека. Известно, что наиболее экономически целесообразным и экологически безопасным способом утилизации использованной полимерной упаковки является рециклинг, хотя в настоящее время высокие требования к защите окружающей среды диктуют появление новых видов ее переработки путем самодеструкции [3].

Цель настоящего исследования заключалась в оценке влияния различных добавок синтетического и природного происхождения на степень деструкции «активных» упаковочных материалов и определении способов их утилизации.

В качестве исследуемых образцов были отобраны пленочные образцы из традиционного используемого в упаковочной отрасли полиэтилена высокого давления (ПЭВД) и образцы экспериментальных «активных» упаковочных материалов, содержащих в своем составе различные добавки.

Известно, что многие полимерные материалы сложного состава подвергаются фото- и биодegradации [2]. Существует большое количество методов, позволяющих установить степень разложения материала под действием этих факторов. Одним из таких методов является стандартизированный метод с использованием различных типов почв, которые взаимодействуют, например, с использованной упаковкой и вызывают их заражение микроорганизмами, обуславливающими деструкцию полимера [4]. Все исследуемые образцы были помещены в почву с высоким содержанием торфа. Предварительно для них были определены деформационно-прочностные характеристики в соответствии с требованиями действующих нормативных документов [5].

После 18 месяцев экспозиции пленочные образцы были извлечены из почвы и вновь испытаны. Одновременно пленки экспонировались на свету в закрытом помещении при температуре 25 °С и относительной влажности воздуха 40 %. Результаты испытаний представлены в таблице.

**Деформационно-прочностные характеристики «активных»
полимерных упаковочных материалов при испытании
на стойкость к фото- и биodeградации**

Составы пленок	Характеристики пленок								
	до экспозиции			после экспозиции в течение месяца					
	σ , МПа	ε , %	ρ , г/см ³	18 (в почве)			18 (на свету)		
				σ , МПа	ε , %	ρ , г/см ³	σ , МПа	ε , %	ρ , г/см ³
ПЭВД	14	480	0,91	14,2	555	0,9	14,3	540	0,89
ПЭ + горчичное масло	13	550	0,81	13,4	730	0,85	14,8	604	0,84
ПЭ + вазелиновое масло + кориандровое масло	11,5	460	0,79	13,6	550	0,85	15,1	530	0,79
ПЭ + вазелиновое масло + аскорбиновая кислота	13,0	540	0,79	14,7	720	0,82	9,5	560	0,83
ПЭ + вазелиновое масло + глюкоза	12,3	530	0,79	13,8	770	0,82	11,2	540	0,83

Из данных таблицы следует, что после 18 месяцев экспозиции в почве и на открытом воздухе у образцов, содержащих растительные масла, повышаются прочностные характеристики по сравнению с образцами из чистого полиэтилена. Особенно заметно это для пленок, экспонированных на воздухе. Наблюдаемый эффект частично может быть связан с полимеризацией масел, которая активнее протекает при воздействии фотонов света. Но, скорее всего, изменение прочности материалов протекает под воздействием релаксационных процессов, происходящих в полимерной матрице при воздействии как света, так и почвенных микроорганизмов.

У образцов «активных» пленок, содержащих аскорбиновую кислоту и глюкозу, наоборот, прочность снижается. Возможно, эти компоненты выполняют роль фотоактивирующих добавок, которые нестабильны на свету и, разрушаясь, вызывают деструкцию полимера. При экспозиции в почве, без доступа света эти компоненты не подвергаются фотодеструкции, а наличие релаксационных процессов в полимерной матрице приводит лишь к незначительному увеличению прочности материала по сравнению с исходным ее значением.

Что касается некоторого увеличения деформации таких материалов при обоих условиях экспозиции, то оно, вероятно, связано с процессами синерезиса пластификатора (вазелинового масла) из модифицированного слоя и смыкания пор. Это подтверждается и увеличением их плотности. Кроме того, повышение эластичности пленок можно объяснить частичным перераспределением пластификатора в объеме полимерной матрицы.

Таким образом, проведенные исследования свидетельствуют о невозможности глубокой фото- и биodeградации таких «активных» материалов, содержащих функциональные добавки, что подтверждает данные некоторых авторов [6] о стойкости полимерных материалов, содержащих бактерицидные добавки. Для таких материалов более рациональным способом утилизации будет их вторичная переработка.

Литература

1. Ухарцева, И. Ю. Современные тенденции применения высокомолекулярных соединений в создании упаковочных материалов для пищевых продуктов (обзор) / И. Ю. Ухарцева // Пластические массы. – 2014. – № 9/10. – С. 57–62.
2. Упаковка пищевых продуктов: материалы, технологии, экология / И. Ю. Ухарцева, В. А. Гольдаде, Е. А. Цветкова, В. М. Шаповалов ; под ред. В. А. Гольдаде. – Минск : Беларус. навука, 2023. – 286 с.
3. Ермаков, А. И. Утилизация тары и упаковки : учеб.-метод. пособие / А. И. Ермаков. – Минск : БНТУ, 2017. – 194 с.
4. Прудникова, С. В. Микробиологическая деградация полигидроксиалканоатов в модельных почвенных средах / С. В. Прудникова // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2012. – № 10. – С. 39–43.
5. Пленки полимерные. Метод испытания на растяжение : ГОСТ 14236-81. – Введ. 30.06.1981. – Москва : Изд-во стандартов, 1989. – 10 с.
6. Соломатов, В. И. Биологическое сопротивление материалов / В. И. Соломатов, В. Т. Ерофеев, В. Ф. Смирнов. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2001. – 196 с.

УДК 621.01

ПРОБЛЕМЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ В 3D-ТЕХНОЛОГИЯХ**С. Н. Бобрышева, И. Ю. Ухарцева***Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Проведен анализ современных материалов, используемых в 3D-технологиях. Рассмотрены их свойства, оказывающие влияние на качество и эксплуатационные характеристики получаемых изделий. Перечислены основные требования к материалам различных классов, используемых в 3D-технологиях, позволяющие наметить пути разработки новых и совершенствования существующих материалов.

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-печать, 3D-принтеры, кастомизация, пластики.

PROBLEMS OF MATERIALS SCIENCE IN 3D TECHNOLOGIES**S. N. Bobrysheva, I. Y. Ukhartseva***Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

The analysis of modern materials used in existing 3D technologies is carried out. Their properties that affect the quality and performance characteristics of the resulting products are considered. The main requirements for materials of various classes used in 3D technologies are listed, allowing us to outline ways to develop new and improve existing materials.

Keywords: additive technologies, 3D-printing, 3D-printers, customization, plastics.

Настоящий бум развития аддитивных технологий приходится на нулевые годы, хотя первые разработки можно отнести к концу 19 в. (что, возможно, удивит многих) [1]. В настоящее время пик эйфории от всеприменимости аддитивных технологий пройден. Конечно, по-прежнему, нет сомнений в их инновационности и эффективности, но возникает осознание необходимости анализа выявленных и накопившихся проблем с целью определения главных направлений их развития.

В триединую проблему прорывного технического направления можно включить наличие специалистов, разработку технологий и оборудования, создание материалов. Количество специалистов в области аддитивных технологий повышается

за счет выпускников технических вузов страны, концепция технологий и оборудования определена, а создание материалов требует анализа их достоинств, недостатков для использования и расширения существующей номенклатуры.

Номенклатура материалов для аддитивных технологий включает как традиционные материалы, так и современные: металлы и сплавы (порошки, специализированные сварочные проволоки); полимеры (термопласты и реактопласты, фотополимеры, пастообразные пластики); композиты (дисперсно-наполненные, волокнисто-наполненные); пескообразные и вяжущие материалы, воск, гипс и даже биологические материалы. Перечень материалов объединяет как серийно выпускаемые (АБС пластик, поликапролактон PCL, полилактид PLA, поливинилсульфон PPSU, органическое стекло PPMA, полиэтилентерефталат PET, поливиниловый спирт PVA, полистирол PS, полиэтилен PEH, полипропилен высокопрочный полистирол HIPS и др.), так и креативные (класс имитаторов – древесные, песчаники, металлов; биоматериалы – на основе волокон, семян растений; материал на основе углерода – графен, армированный углеродными нитями PLA). Если первые отличаются технологической проработанностью, недефицитностью и дешевизной, то другие – еще дорогие и производятся в ограниченном количестве. Интерес к ним обуславлен и оправдан комплексом тех свойств, которые позволяют решать актуальные проблемы производства и эксплуатации продукции – соответствия техническим, экологическим, требованиям утилизации, стоимости, экономии. Так, имитаторы позволяют сэкономить основной материал и получить изделие с хорошими эксплуатационными свойствами. Древесные имитаторы отличаются прочностью, в то же время легко обрабатываются, имеют красивую окраску и приятный запах, имитаторы песчаника отличаются гладкостью и эстетичностью поверхности, легкостью получения и обработки, отсутствием токсичности, имитатор металлов PLA пластик с микрочастицами бронзы, например, имеет бронзовую окраску легок и удобен для обработки.

Применяемый материал может иметь вид дисперсных порошков (металлов, сплавов, полимеров); гранул (полимеров); проволоки (металлов, сплавов); филаментов и волокон (полимеров и композиционных материалов). Выбор вида материала обуславлен в большей мере технологией для обеспечения точности геометрических параметров, качества поверхности, легкости обработки, а выбор состава материала – сферой применения и соответственно требуемым уровнем эксплуатационных свойств (например, уровнем их стабильности физических, механических и других свойств). Необходимо отметить, что в процессе применения нового материала возникают неожиданные проявления аддитивных технологий: большая усадка, неоднородность, расслоение, шероховатость, неточность размеров, которые зависят как от материала, так и от применяемой технологии. Решение таких проблем часто представляет компромисс, а иногда приводит к отказу от такой технологии. Анализ результатов использования различных классов материалов в аддитивных технологиях позволил выявить следующие вопросы, возникающие при выборе материала: выбор технологии и оборудования, зависящих от физико-химических, механических и технологических и эксплуатационных свойств материала; вид исходного материала, обуславливающий конструктивные особенности 3D-принтера, температура переработки материала, необходимость постобработки, возможность обеспечения экологичности и утилизации отработанного материала.

Ниже отмечены общие достоинства и недостатки аддитивных технологий, в некоторой мере касающиеся и аспектов применения материалов.

Рассмотрим достоинства:

- по аддитивным технологиям можно изготавливать все, одно из главных требований при этом – выбор необходимого материала, однако результат может быть ниже ожидаемого по качеству в силу специфики технологии (послойного синтеза);
- снижение трудозатрат: печатание объекта по разработанной модели предполагает минимальное присутствие специалиста;
- возможность производить уникальную, штучную, сложную продукцию (кастомизация), применять новые материалы, оперативно вносить изменения в конструкцию изделия, меняя программу, работая с CAD-моделью;
- снижение массы объекта и количества деталей сложных конструкций в результате топологической оптимизации, последнее позволяет выбрать из существующего ассортимента материал, соответствующий требованиям и снизить материалоемкость в результате оптимизации конструкции;
- экологичность производства, применение аддитивных технологий снижает количество отходов, уровень шума и выделение вредных веществ по сравнению с традиционными процессами – литьем, фрезерованием, штамповкой.

Укажем недостатки:

- ограничение размеров камеры 3D-принтеров, обусловленное как техническими особенностями принтеров, так и технологическим временем изготовления объекта из конкретного материала;
- высокая стоимость из-за временных затрат (скорость изготовления серии по причине штучного изготовления, недостаточна для применения в массовом производстве);
- точность, качество поверхности, необходимость доработки, связанные с видом исходного материала (дисперсность, волокнистость) и послойной структурой изделия.

Изучение существующих недостатков и проблем в области материаловедения позволяет наметить пути их устранения и решения.

Прежде всего, необходимо расширение номенклатуры материалов, которое возможно за счет использования нетрадиционных материалов биологического и растительного происхождения, ископаемых минеральных компонентов, волокнистых и дисперсных армирующих наполнителей в составе композитов [2]. Обеспечение основных качественных характеристик (прочность, монолитность, точность размеров, отсутствие усадки и минимальная шероховатость) во многих случаях достигается варьированием состава, дисперсности исходного материала, соблюдением технологических режимов.

Устранение проблем материаловедения в аддитивных технологиях возможно только в комплексе с технологиями и оборудованием. Концепция аддитивных технологий определена и в настоящее время активно осуществляются модификация и разработка оборудования печати, расширение размеров печати, применение гибридных вариантов (сочетание аддитивных технологий с традиционными). Однако такая проблема как временные затраты, вероятно, будет ограничивать применение аддитивных технологий в серийном производстве.

Таким образом, расширяются области использования аддитивных технологий и номенклатура используемых материалов. Правильный подбор материала позволяет улучшить качество изделий, снизить материалоемкость и трудоемкость изделия. Но практический опыт, наработанный специалистами, показал, что применение аддитивных технологий в настоящее время имеет больше целесообразности при штучном производстве, изготовлении уникальных объектов, объектов одного назначения

с незначительными особенностями, что имеет место при ремонте оборудования, создании сложных конструкций, в медицине при протезировании, замене органов. В настоящее время аддитивные технологии эффективно применяются в дополнение к традиционным.

Литература

1. Фролова, А. Б. История, текущее состояние и перспективы развития аддитивных технологий / А. Б. Фролова, А. И. Шигапов // Научные известия. – 2022. – № 29. – С. 198–202.
2. Сорокин, И. 7 необычных материалов для 3D-печати / И. Сорокин. – URL: <https://kolomo.ua/blog/3d-tehnologii/kreativnye-materialy-dlya-3d-pechati-samy-neveroynatn> (дата обращения: 07.11.24).

УДК 546.284-31:544.722.13

**ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ
ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА И НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ
ПОРОШКОВ ИТТРИЙ-АЛЮМИНИЕВОГО ГРАНАТА,
ЛЕГИРОВАННОГО ИОНАМИ ЦЕРИЯ**

**О. В. Давыдова, Е. Н. Подденежный, А. И. Кравченко,
Н. Е. Дробышевская, А. Д. Лёвкина**

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

Разработаны составы и методика формования композиционных покрытий из пленкообразующих растворов, содержащих поливиниловый спирт (ПВС), тетраэтоксисилан (ТЭОС) и наноструктурированные порошки иттрий-алюминиевого граната, легированные ионами церия YAG : Ce. Пленочные покрытия были нанесены методом полива на подложки из стекла, обработанные изопропиловым спиртом. Адгезионную прочность исследуемых композиционных материалов определяли в соответствии с ГОСТ 31149-2014 методом решетчатых надрезов. Установлено, что покрытия, полученные без добавления ТЭОС, отслаиваются от подложки, в то время как покрытия с введением ТЭОС в пленкообразующий раствор демонстрируют удовлетворительную адгезию. Спектры люминесценции покрытий, полученных с введением YAG : Ce, показали, что наибольшая интенсивность люминесценции наблюдается для покрытий с содержанием люминофора 20 мас. %. При увеличении количества порошка наблюдается эффект концентрационного тушения.

Ключевые слова: покрытия, люминесценция, поливиниловый спирт, иттрий алюминиевый гранат, ионы, церий.

**LUMINESCENT COATINGS BASED ON POLYVINYL ALCOHOL
AND NANOSTRUCTURED POWDERS OF YTTRIUM-ALUMINUM
GARNET DOPED WITH CERIUM IONS**

**O. V. Davydova, E. N. Poddenezhny, A. I. Kravchenko,
N. E. Drobyshevskaya, A. D. Levkina**

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

Compositions and methods of forming composite coatings from film-forming solutions containing polyvinyl alcohol (PVA), tetraethoxysilane (TEOS) and nanostructured yttrium-aluminum garnet powders doped with cerium ions YAG : Ce have been developed. The film coatings were applied by irrigation to a glass substrate treated with isopropyl alcohol. The adhesive strength of the studied composite materials was determined in accordance with GOST 31149-2014 by the method of lattice incisions. It was found that coatings obtained without the addition of TEOS peel off from the substrate, while coatings with the introduction of TEOS into the film-forming

solution demonstrate satisfactory adhesion. Luminescence spectra of coatings obtained with the introduction of YAG : Ce showed that the highest luminescence intensity is observed for coatings with a phosphor content of 20 wt. %. With an increase in the amount of powder, the effect of concentration quenching is observed.

Keywords: coatings, luminescence, polyvinyl alcohol, yttrium-aluminum garnet, ions, cerium.

Светодиодные светильники широко применяются ввиду своей экономичности, энергоэффективности по сравнению с лампами накаливания и отличаются длительным сроком службы [1]. Наиболее распространенным способом получения белых светодиодов (СД) является применение микрокристаллических люминофоров, преобразующих излучение чипов синего цвета в широкий спектр, соответствующий солнечному спектру с использованием микрокристаллических люминофоров, изготавливаемых на основе иттрий-алюминиевого граната, активированного ионами церия (YAG : Ce³⁺) [2]. Известно несколько работ, в которых предлагается удалить люминофор от чипа, что позволило бы уменьшить термическую деградацию, увеличить срок службы, а также повысить однородность излучения. Такой преобразователь может быть изготовлен в виде люминесцентного покрытия на прозрачной подложке [3].

Целью настоящей работы является разработка составов люминофорной композиции на основе полимерной матрицы и люминофора – иттрий-алюминиевого граната, активированного ионами церия. В качестве подложек для нанесения покрытий применяли пластины прозрачного строительного стекла СТБ ЕН 572-1-2007 толщиной 2 мм. Порошок граната получали методом термохимических реакций окисления – восстановления соответствующих азотнокислых солей в карбамиде [4]. Композиционные покрытия на основе поливинилового спирта (ПВС) наносили из пленкообразующих растворов методом полива. Состав пленкообразующего раствора: H₂O – 100 мл, ПВС – 6 г, тетраэтоксисилан (ТЭОС) – 10 мл, поверхностно-активное вещество (ПАВ) – полисорбат Твин-80, используемое для стабилизации системы и предотвращения оседания частиц SiO₂ – 3 капли, NH₄OH (до pH = 9). Наноструктурированные частицы люминофора вводят после формирования пленкообразующего раствора непосредственно перед нанесением покрытия. В 100 мл горячей воды ($T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$) засыпаем порошковый ПВС небольшими порциями, ставим на мешалку и растворяем ПВС до состояния прозрачного раствора. Затем по каплям добавляем Твин-80, доводим pH раствора до 9 ед. с помощью раствора аммиака, перемешиваем в течение 30 мин. В стакане образуется стабильная суспензия, содержащая частицы SiO₂. Заливаем ТЭОС при перемешивании. Остужаем стакан с суспензией, отбираем 10 мл пленкообразующего раствора, добавляем в него порошок YAG : Ce с концентрацией от 10 до 30 мас. % относительно общей массы покрытия. Далее следует термическая обработка полученного покрытия в сушильном шкафу при температуре 60 °C в течение 6 часов. Для сравнения адгезионной прочности покрытий часть образцов изготавливали без введения в раствор добавки ТЭОС.

Адгезионную прочность исследуемых композиционных материалов определяли в соответствии с ГОСТ 31149-2014 методом решетчатых надрезов. За результат испытания принимали значение адгезии в баллах, соответствующее большинству совпадающих значений по стандартной классификации.

Экспериментально установлено, что при нанесении сетки надрезов покрытия, полученные без добавления ТЭОС, отслаиваются, в то время как покрытия с введением ТЭОС в пленкообразующий раствор демонстрируют удовлетворительную адгезию за счет химических связей материала пленки с поверхностью стеклянной подложки (рис. 1).

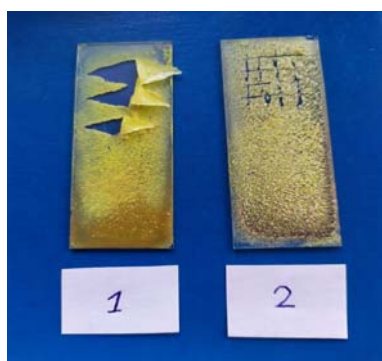


Рис. 1. Адгезия покрытий, содержащих YAG : Ce на стеклянных подложках, полученных методом полива без добавления (1) и с введением ТЭОС в пленкообразующий раствор (2)

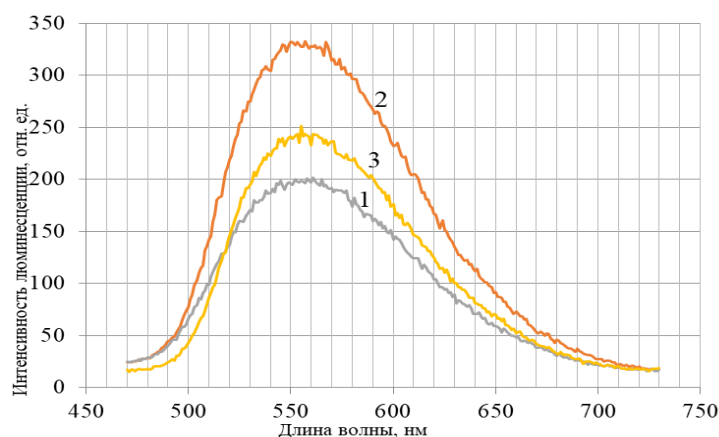


Рис. 2. Спектры люминесценции покрытий, содержащих YAG : Ce, мас. %:
1 – 10; 2 – 20; 3 – 30 ($\lambda_{\text{возб.}} = 370 \text{ нм}$)

Спектры люминесценции покрытий, полученных с введением YAG : Ce' разной концентрации, показали, что наибольшая интенсивность наблюдается для покрытий с содержанием люминофора 20 мас. %, однако при увеличении количества порошка наблюдается эффект концентрационного тушения (рис. 2).

Л и т е р а т у р а

1. Solid-State Lighting R&D Opportunities / M. Pattison, M. Hansen, G. Thomson [et al.]. – 2022. – DOI 10.13140/RG.2.2.16101.47844
2. Synthesis design of $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12} : \text{Ce}^{3+}$ phosphor for fabrication of ceramic converter in automotive application / S. B. Kwon, S. H. Choi, J. H. Yoo [et al.] // Optical Materials (Amsterdam). – 2018. – N 80. – P. 265–270. – DOI 10.1016/J.OPTMAT.2018.04.03
3. Luminescent phosphor-in-glass composite for white light-emitting diodes / M. A. Kistankina, V. A. Aseev, J. V. Tuzova [et al.] // Journal of Optoelectronics Engineering. – 2017. – N 5/1. – P. 7–9. – DOI 10.12691/JOE-5-1-2
4. Давыдова, О. В. Синтез иттрий-алюминиевого граната, активированного ионами церия, термохимическим методом / О. В. Давыдова, Н. Е. Дробышевская, Е. Н. Подденежный // Труды БГТУ. Серия 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. – 2018. – № 2 (211). – С. 106–112.

УДК 539.2+620.18+669+674

КИНЕТИКА ГОМОГЕННОГО ПЛАВЛЕНИЯ ЧИСТЫХ МЕТАЛЛОВ**И. И. Суторьма***Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Методики расчета процессов плавления и кристаллизации, разработанные на основе положений термодинамической и флуктуационной теорий, позволяют найти скорость зарождения центров и линейную скорость роста этих центров, но не решают важные вопросы определения количества и размеров образующейся новой фазы. Давно замечено, что динамика процессов плавления и кристаллизации имеет аналогию с химической. В связи с этим предложены уравнения, описывающие температурную зависимость количества образующейся новой фазы в гомогенных процессах плавления чистых металлов, полученные с позиций обобщения положений теории химической кинетики.

Ключевые слова: плавление, жидкая фаза, металл, энергия активации, численный метод.

KINETICS OF HOMOGENEOUS MELTING OF PURE METALS**I. I. Sutarma***Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

Methods for calculating melting and crystallization processes, developed on the basis of the provisions of thermodynamic and fluctuation theories, allow us to find the rate of nucleation of centers and the linear rate of growth of these centers, but do not solve important issues of determining the amount and size of the new phase being formed. It has long been noted that the dynamics of melting and crystallization processes has an analogy with the chemical one. In this paper, equations are proposed that describe the temperature dependence of the amount of the new phase being formed in homogeneous melting processes of pure metals, obtained from the standpoint of generalizing the provisions of the theory of chemical kinetics.

Keywords: melting, liquid phase, metal, activation energy, numerical method.

Рассмотрим процесс гомогенного плавления чистого металла. Подвергнем нагреву некоторое его количество массой M , находящееся в твердой фазе при начальной температуре T_s . В процессе нагрева твердая фаза переходит в жидкое (твердожидкое) состояние, характеризующееся температурой T_{SL} , и далее доводится до конечной температуры T_G , соответствующей температуре перехода в газообразное состояние (температура испарения). В твердожидком состоянии массу твердой фазы (исходный компонент) обозначим M_s , а массу жидкой фазы (конечный продукт) – M_L . Связь между исходным компонентом и конечным продуктом имеет вид:

$$M = M_s + M_L. \quad (1)$$

Разделим обе части выражения на M . Получим:

$$\frac{M_s}{M} + \frac{M_L}{M} = 1. \quad (2)$$

Обозначим:

$$a = \frac{M_s}{M}, \quad b = \frac{M_L}{M}. \quad (3)$$

Тогда

$$a + b = 1, \quad (4)$$

где a – концентрация твердой фазы (количество, доля в общей массе), кг/кг; b – концентрация жидкой фазы (количество, доля в общей массе), кг/кг.

В процессе плавления a изменяется от 1 до 0, а b изменяется от 0 до 1.

Чтобы отметить, что это именно процесс плавления, введем индекс L . В работе получена зависимость концентрации жидкой фазы от температуры в процессе плавления:

$$b_L = \frac{1}{1 + e^{\frac{E}{RT} - \frac{E}{RT_{SL}}}}. \quad (5)$$

В процессе плавления температура изменяется в пределах:

$$t_s \leq t \leq t_G \quad \text{или} \quad T_s \leq T \leq T_G, \quad (6)$$

где t, T – текущая температура металла соответственно в °С и К; t_G, T_G – температура испарения металла соответственно в °С и К; t_s, T_s – начальная температура металла в твердой фазе соответственно в °С и К (удобно взять $t_s = 0$ °С или $T_s = 273$ К).

Количество жидкой фазы будет изменяться в пределах:

$$0 \leq b_L \leq 1. \quad (7)$$

Зависимость количества жидкой фазы от температуры $b_L = f(T)$ в процессе плавления представлена на рис. 1.

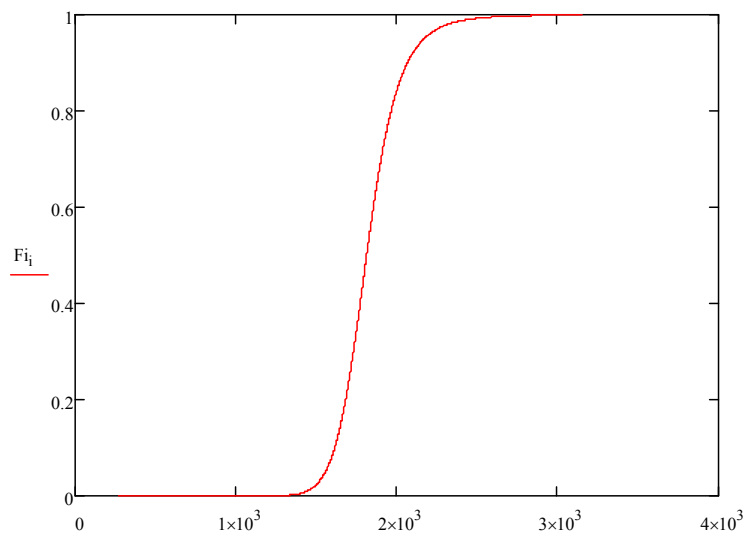


Рис. 1. Зависимость количества жидкой фазы b_L от температуры в процессе плавления чистого железа T, K

Задаваясь справочными значениями T_E , а также конечным значением $b_s = 0,999$ (погрешность – 0,1 %), найдем численно оптимальные значения энергии активации процесса плавления для некоторых чистых металлов, получивших широкое применение в металлургии. Результаты расчетов представлены в таблице.

**Значение энергии активации E процессов плавления
и кристаллизации некоторых чистых металлов**

Металл	T_{SL} , К	T_G , К	Энергия активации E	
			$\times 10^7$, Дж/моль $\times 10^{14}$, эрг/моль	$\times 10^7$, кал/моль
Al	933	2773	8,8808	2,1225
Cu	1356	2573	18,1347	4,3342
Fe	1812	3153	26,9192	6,4337
Ti	1933	3533	26,9573	6,4428

В отличие от квазигазового и квазикристаллического подходов при рассмотрении жидкого состояния в данной работе принят подход, при котором между твердым и газообразным существует твердожидкое состояние вещества, а жидкое состояние в чистом виде возможно только в точке начала перехода вещества в газообразное состояние (т. е. в точке, соответствующей температуре кипения или испарения). Данный механизм основан на принципе структурного дуализма в расплаве, соответствующем термодинамическому принципу двухфазности [5]. Вследствие этого он хорошо согласуется на микроуровне с кластерной моделью плавления и кристаллизации, например, в [3]. Следует особо отметить, что уравнения типа (5) в рамках рассмотрения процессов плавления и кристаллизации с позиций иных механизмов не дают адекватных результатов.

Численное решение уравнения (5) позволило получить приближенные теоретические значения энергий активации процессов гомогенного плавления некоторых чистых металлов, получивших широкое применение в технике.

В рамках предложенного подхода табличное значение энергии активации применимо как при взаимных переходах между твердым и твердожидким состояниями, так и между твердожидким и газообразным состояниями. Это обусловлено наличием особенности на кривой, представленной на рис. 1, при плавлении (процесс идет скачкообразно) и отсутствием такой особенности при испарении (непрерывный переход между твердожидким и газообразным состояниями), что также хорошо представлено в работах прошлых лет [1–5].

Л и т е р а т у р а

1. Акулов, Н. С. Основы химической динамики / Н. С. Акулов. – Москва : МГУ, 1940. – 95 с.
2. Колмогоров, А. Н. К статистической теории кристаллизации металлов / А. Н. Колмогоров // Известия АН СССР. Серия математическая. – 1937. – № 3. – С. 9.
3. Гаврилин, И. В. Плавление и кристаллизация металлов и сплавов / И. В. Гаврилин. – Владимир : Владим. гос. ун-т, 2000. – 196 с.
4. Эммануэль, М. Н. Курс химической кинетики / М. Н. Эммануэль, Д. Г. Кнорре. – Москва : Высш. шк., 1978. – 463 с.
5. Уббеллоде, А. Р. Расплавленное состояние вещества / А. Р. Уббеллоде. – Москва : Металлургия, 1982. – 467 с.

УДК 621.762

**ЗАВИСИМОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
СЛОИСТОГО МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА
С ДИСПЕРСНЫМ ПОРОШКОВЫМ СЛОЕМ ОТ РЕЖИМОВ
ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ**

Ю. Л. Бобарикин, А. Н. Швецов

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

Определены оптимальные режимы процесса электроимпульсной обработки для достижения требуемого уровня технологических свойств слоистого композита: среднее абсолютное обжатие материала при предварительном формовании и спекании – 1,65–1,86 мм; скорость вращения валков-электродов – 0,8–0,9 м/мин; сила тока спекания – 19 кА.

Ключевые слова: слоистый металлополимерный материал, режимы электроимпульсной обработки.

**DEPENDENCE OF TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF LAYERED
METAL-POLYMER MATERIAL WITH DISPERSED POWDER LAYER
ON THE MODES OF ELECTRIC PULSED PROCESSING**

Yu. L. Bobarikin, A. N. Shvetsov

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

Optimal modes of the process of electric pulse processing for achieving the required level of technological properties of the layered composite were determined: average absolute compression of the material during preliminary molding and sintering – 1.65–1.86 mm; speed of rotation of the roller electrodes – 0.8–0.9 m/min; sintering current – 19 kA.

Keywords: layered metal-polymer material, electric pulse processing modes.

Одним из перспективных методов нанесения износостойких порошковых покрытий является метод электроимпульсного спекания [1–3]. Он заключается в электроконтактном припекании порошкового материала в виде композиционного слоя к поверхности стальной полосы. В зону припекания порошок подается в свободно насыпанном состоянии, где он одновременно спекается в слой покрытия и припекается к поверхности полосы. Полосы с покрытием используются для дальнейшего изготовления из них подшипников скольжения различных конструкций. Основными преимуществами этого метода являются: высокая производительность, низкая энергоемкость, возможность получения спеченных изделий с незначительной пористостью. Основная проблема этой технологии заключается в достижении требуемых прочностных свойств слоистого композита в зависимости от технологических режимов. Прочностные свойства слоистого композита определяются величиной угла его перегиба, при котором наступает разрушение композиционного слоя.

Цель исследований – получение зависимости технологических свойств слоистого композита с дисперсным порошковым слоем от режимов электроимпульсной обработки.

Получение слоистого композита состоит из следующих этапов:

1. Подготовка поверхности полосы-подложки. Для увеличения адгезионного взаимодействия «сырого» слоя и полосы-подложки, а также исключения применения специ-

альных флюсов при спекании полоса-подложка подвергается механической обработке. На ней создается с помощью металлических щеток шероховатость ($Rz\ 60$).

2. Предварительное формование. На стальную полосу-подложку насыпается слой порошковой ихты и прокатывается между двумя прокатными валками на прокатном стане. Для обеспечения точной дозировки шихты используется дозирующее устройство. Метод предварительного формования позволяет избежать выноса ферромагнитных порошков из зоны контакта при последующем спекании, так как ферромагнитные включения находятся в спрессованном состоянии.

3. Электроимпульсное пекание. Полоса с «сырым» слоем прокатывается между двумя прокатными валками-электродами, подключенными к сварочному трансформатору. Эта операция обеспечивает спекание «сырого», предварительно спрессованного порошкового слоя и одновременно его припекания к поверхности стальной полосы.

4. Калибровка прокаткой. Завершающей операцией является калибровка путем прокатки полосы в размер.

В качестве материала композиционного слоя для проведения экспериментов по данной технологии использован композиционный материал, включающий в себя порошковые компоненты: 70 мас. % Fe, 7–10 мас. % Cu, 5–10 мас. % Ni, 5–10 мас. % Sn и 10–15 мас. % омедненного графита.

Методика проведения исследований. Для определения оптимальных технологических режимов получения композиционного слоя на металлической матрице с ферромагнитными порошковыми компонентами использован статистический метод планирования многофакторного эксперимента [4]. В качестве исследуемой функции отклика был выбран качественный критерий – проверка на адгезию композиционного слоя с полосой-подложкой методом перегиба (α°) и визуальная оценка отсутствия выноса ферромагнитных компонентов из зоны формирования покрытия, а в качестве варьируемых факторов – параметры технологического процесса: среднее абсолютное обжатие при предварительном формовании и спекании (X_1); скорость вращения валков-электродов (X_2); и сила тока спекания (X_3).

Исследовались образцы с материалом полосы-подложки – сталь 08 кп, шириной полосы 15 мм и уровнем насыпки порошковой шихты 2 мм. Электроимпульсное спекание проводилось при постоянном давлении 200 МПа, обеспечивающем плотный электроконтакт.

Предварительно методом «крутого восхождения» с учетом технических характеристик экспериментальной установки была экспериментально определена область изменения интервалов варьирования. Дальнейшее исследование совместного влияния варьируемых факторов X_1 , X_2 , X_3 на качество адгезии композиционного слоя с полосой подложкой проводилось с помощью метода рототабельного планирования второго порядка.

Согласно рототабельному плану эксперимента было проведено 20 опытов, каждый из которых осуществлялся трижды.

Для проверки однородности дисперсий параллельных опытов использовался критерий Кохрена. Гипотеза об однородности дисперсий была подтверждена при уровне значимости $\alpha = 0,05$, что позволяет использовать регрессионный анализ и провести статистическую обработку полученных результатов эксперимента. Проверка адекватности математической модели проводилась с помощью F-критерия Фишера для уровня значимости $\alpha = 0,05$.

Полученные результаты. После обработки экспериментальных данных и с учетом значимости коэффициентов уравнения регрессии, которая проверялась по t -критерию Стьюдента для уровня значимости $\alpha = 0,05$, было получено уравнение регрессии, отражающее влияние факторов на исследуемую функцию:

$$\alpha^0 = -1562,05 + 1526,8X_1 - 1817,2X_2 + 78,7X_3 + 83,3X_1X_2 - 4,8X_1X_3 + \\ + 16,7X_2X_3 - 366,9X_1^2 + 757,3X_2^2 - 1,9X_3^2.$$

На основании анализа уравнения можно сделать следующие выводы: адгезия композиционного слоя с полосой-подложкой зависит от среднего абсолютного обжатия материала при предварительном формовании и спекании X_1 , скорости вращения валков-электродов X_2 и силы тока спекания X_3 по квадратичной зависимости.

Анализ результатов эксперимента позволяет определить режимы процесса, обеспечивающие угол перегиба 180° до проявления трещинообразования в композиционном слое, который на основании экспериментальных данных является достаточным условием отсутствия разрушения после последующей штамповки подшипников скольжения из получаемого полосового материала.

После анализа результатов математического планирования эксперимента и на основании проведенных экспериментов можно определить следующие оптимальные режимы процесса, обеспечивающие угол перегиба 180° :

1. Среднее абсолютное обжатие материала при предварительном формовании и спекании: 1,65–1,86 мм.
2. Скорость вращения валков-электродов: 0,8–0,9 м/мин.
3. Сила тока спекания: 19 кА.

Л и т е р а т у р а

1. Ковтун, В. А. Триботехнические покрытия на основе порошковых медно-графитовых систем / В. А. Ковтун, Ю. М. Плескачевский. – Гомель : ИММС НАН Беларуси, 1998 – 148 с.
2. Ярошевич, В. К. Электроконтактное упрочнение / В. К. Ярошевич, Я. С. Генкин, В. А. Верещагин. – Минск : Наука и техника, 1982. – 250 с.
3. Дорожкин, Н. Н. Получение покрытий методом припекания / Н. Н. Дорожкин, Т. М. Абрамович, В. И. Жорник. – Минск : Наука и техника, 1980. – 176 с.
4. Тихомиров, В. Б. Планирование и анализ эксперимента / В. Б. Тихомиров. – Москва : Легкая индустрия, 1974. – 262 с.

УДК 539.213.27+539.25

СОРБЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ MgO, ЛЕГИРОВАННЫХ НАНОЧАСТИЦАМИ МЕТАЛЛОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДОМ

С. М. Э. Эльшербини, М. Ф. С. Х. Аль-Камали, А. А. Бойко

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

Разработана технологическая схема формирования сорбентов для очистки сточных вод от нефтепродуктов на основе оксида магния с добавлением НЧ металлов. Исследовано влияние легирующих элементов – оксидов цинка и железа – на структурные особенности получаемых материалов. Результаты показывают, что каркас ксерогеля формируется из агрегированных первичных частиц, покрытых наночастицами оксидов легирующих элементов,

что способствует увеличению его сорбционных свойств. Представлены результаты сорбционной способности полученных композитов к сырой нефти и минеральному маслу.

Ключевые слова: оксид магния, композиционные материалы, золь-гель, наночастицы металлов.

SORPTION ABILITY OF MgO-BASED MATERIALS DOPED WITH METALS NANOPARTICLES PRODUCED BY THE SOL-GEL METHOD

S. M. E. Elsherbini, M. F. S. H. AL-Kamali, A. A. Boika

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The technological scheme of formation of sorbents for wastewater treatment from oil products on the basis of magnesium oxide with addition of metal particles has been developed. The influence of alloying elements – zinc and iron oxides – on the structural features of the obtained materials has been investigated. The results show that the xerogel framework is formed from aggregated primary particles covered with nanoparticles of oxides of alloying elements, which contributes to the increase of its sorption properties. The results of sorption ability of the obtained composites to crude oil and mineral oil are presented.

Keywords: magnesium oxide, composite materials, sol-gel, metallic nanoparticles.

На сегодняшний день проблема загрязнения водоемов нефтепродуктами является все более актуальной. Эффективная фильтрация и очистка воды от таких загрязнителей требуют разработки новых материалов с высокими сорбционными свойствами. В этом контексте керамические материалы, обладающие хорошей фильтрацией и адсорбцией, становятся многообещающим направлением для исследований. Одним из методов получения таких материалов является золь-гель синтез. Этот подход позволяет создавать композиционные материалы, включая оксид магния (MgO), с заданными физико-химическими свойствами и структурой на нано- и микроуровне. Золь-гель метод характеризуется высокой гибкостью, что позволяет варьировать состав и морфологию получаемых материалов в зависимости от условий синтеза.

Целью данного исследования является разработка керамических материалов на основе оксида магния, полученных с использованием золь-гель метода, для эффективной фильтрации воды, загрязненной нефтепродуктами.

Получение и методы исследования. Для исследования использовали образцы в виде дисков диаметром 12,5 мм, толщиной от 3 до 10 мм [1]. Процесс получения включал формирование золя на основе оксида магния. Для этого в 440 мл дистиллированной воды вводили 1 моль оксида магния, затем в полученный золь оксида магния вводили вещества-допанты в виде водорастворимых солей заданной концентрации (в нашем случае использовался нитрат цинка и хлорид железа). Полученный золь (чистый и содержащий цинк и железо) подвергали гелированию в открытых пластиковых формах на воздухе. Сушка сформировавшихся гелей проводилась в вентилируемом термощкафу при $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Полученные ксерогели подвергали термообработке на воздухе при $700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Термообработанные композиционные ксерогели состава $\text{MgO} : \text{ZnO}$ и $\text{MgO} : \text{Fe}_2\text{O}_3$ измельчали путем размолла до состояния высокодисперсных микропорошков. Из полученных порошков методом одноосного прессования формировали диски заданного размера (в качестве временной связки использовали 5%-й водный раствор ПВС) [2]. Финишную термообработку проводили на воздухе при температуре $700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Структуру материалов разработанных составов исследовали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Сорбци-

онную способность определяли путем анализа изменения массы образцов после их полного насыщения исследуемой жидкостью.

Результаты. Установлено, что оксид цинка и оксид железа формируют поверхностный слой на глобулах оксида магния, образуя так называемое покрытие по всей поверхности MgO – глобул (рис. 1). Наблюдаемый эффект, вероятно, связан с высокой концентрацией нитрата цинка или хлорида железа, вводимого в исходный MgO -золь (соотношение атомов $\text{Mg} : \text{Zn}/\text{Fe} = 1 : 0,05, 1 : 0,10, 1 : 0,15$ и т. д.), а также высокой сорбционной способностью самой ксерогельной матрицы [1–4].

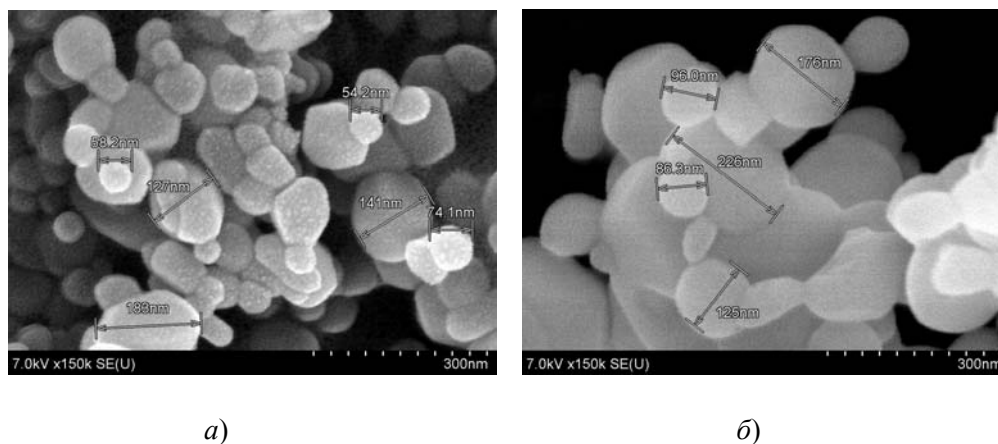


Рис. 1. СЭМ-изображение микропорошка ксерогеля, сформированного на основе золя из водной дисперсии MgO (ксерогель был обработан на воздухе при $t = 700^\circ\text{C}$ в течение 1 ч):

а – содержащего нитрат цинка концентрацией 0,05 моль на 1 моль золя;
б – содержащего хлорид железа концентрацией 0,05 моль на 1 моль золя

Из рис. 1 видно, что структура MgO -ксерогеля состоит из агломератов с размером до 300 нм.

На рис. 2 представлены результаты сорбционной способности по результатам изменения массы композиционного материала, содержащих различную концентрацию оксида цинка и оксида железа, к сырой нефти и минеральному маслу. Для этого образцы в виде дисков помещали в емкости с сырой нефтью (минеральным маслом) и выдерживали в течение 1 сут. После этого повторно их взвешивали.

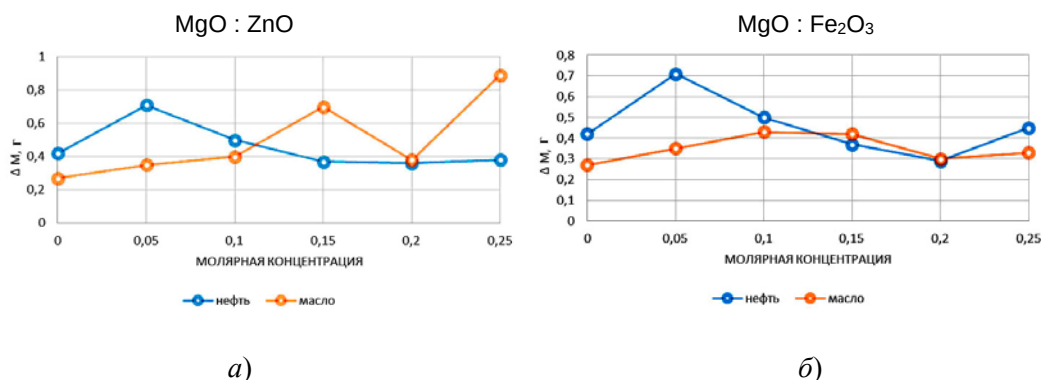


Рис. 2. Изменения массы таблеток в зависимости от впитывающей способности нефтяных материалов (сырая нефть и машинное масло):

а – $\text{MgO} : \text{ZnO}$; б – $\text{MgO} : \text{Fe}_2\text{O}_3$

По результатам измерений видно, что образцы, у которых ниже концентрация легирующих оксидов, имеют более высокую сорбционную способность по сравнению с образцами, имеющими высокие концентрации. При этом оптимальной концентрацией легирующих элементов является концентрация 0,05 мол. %.

Таким образом, установлено, что композиционные материалы на основе MgO, легированные ZnO и Fe₂O₃, обладают высокой сорбционной способностью к нефтепродуктам и могут быть использованы в качестве не только фильтров, но и для сбора разлившихся нефтепродуктов.

Литература

1. Аль-Камали, М. Ф. С. Х. Композиционные материалы на основе оксида магния для сорбции нефтепродуктов, полученные золь-гель методом / М. Ф. С. Х. Аль-Камали, А. А. Бойко, С. М. Э. Эльшербини // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2023. – № 3. – С. 28–35.
2. Аль-Камали, М. Ф. С. Х. Мишени SiO₂ : CuO (Cu⁰) для нанесения тонких пленок ионно-лучевого распыления, полученные золь-гель методом / М. Ф. С. Х. Аль-Камали, А. А. Бойко, Хамдан А. С. Аль-Шаамири // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 3. – С. 348–355.

УДК 620.178

СРАВНЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ НАУГЛЕРОЖЕННЫХ СЛОЕВ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ 18ХГТ И 16СRMNS5

Е. П. Поздняков, И. Н. Степанкин, А. Д. Левкина

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

Д. В. Куис

Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет», г. Минск

С. Н. Лежнев

Некоммерческое акционерное общество «Рудненский индустриальный институт», Республика Казахстан

Отображены результаты исследований цементованных слоев, сформированных на сталях 18ХГТ и 16CrMnS5 в процессе 8- и 12-часового насыщения с последующей закалкой и отпуском. Испытаниями на контактную усталость установлено, что при напряжениях 1100 МПа износостойкость стали 16CrMnS5 значительно выше, чем у стали 18ХГТ. При снижении напряжений до 950 МПа эта закономерность сохраняется. Установлено, что износостойкость слоев стали 16CrMnS5 увеличивается в 2,3 раза при снижении напряжений с 1100 до 950 МПа.

Ключевые слова: конструкционная сталь, цементация, износостойкость, износ.

COMPARISON OF WEAR RESISTANCE OF CARBONIZED LAYERS OF STRUCTURAL STEELS 18ХГТ AND 16CRMNS5

E. P. Pozdnyakov, I. N. Stepankin, A. D. Levkina

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

D. V. Kuis

Educational Institution “Belarusian State Technological University”, Minsk

S. N. Lezhnev

*Non-commercial joint stock company "Rudny Industrial Institute",
the Republic of Kazakhstan*

The paper presents the results of studies of carburized layers formed on 18HGT and 16CrMnS5 steels during 8- and 12-hour saturation with subsequent quenching and tempering. Contact fatigue tests have shown that at stresses of 1100 MPa, the wear resistance of 16CrMnS5 steel is significantly higher than that of 18HGT steel. This pattern remains the same when stresses are reduced to 950 MPa. It has been established that the wear resistance of 16CrMnS5 steel layers increases by 2.3 times when stresses are reduced from 1100 to 950 MPa.

Keywords: structural steel, carburizing, wear resistance, wear.

При конструировании техники, оборудования и штамповой оснастки инженер выбирает материалы для разных деталей по свойствам. Стойкостные характеристики таких деталей, как зубчатые колеса, шестерни, подшипники качения и других деталей зависят, в первую очередь, от твердости [1]. Максимальную твердость поверхностных слоев можно получить посредством проведения цементации. Наиболее распространенными являются низкоуглеродистые стали 20X, 18ХГТ, 20ХН3А и др. В настоящее время известна новая марка стали 16CrMnS5. Однако свойства этой стали мало изучены, поэтому инженеры ее не рассматривают в качестве заменителя.

Целью работы являлось установление влияния длительности цементации на износостойкость конструкционных сталей 18ХГТ и 16CrMnS5.

Методика проведения исследований. Объектом исследований являлись цементованные слои конструкционных сталей 18ХГТ и 16CrMnS5, химический состав которых приведен в табл. 1. Упрочнение поверхностного слоя проводилось цементацией в древесно-угольном карбюризаторе при температуре 920 °С с длительностью активного насыщения 8 и 12 ч с последующей закалкой в масле с температуры 860 °С и низкотемпературным отпуском при температуре 200 °С в течение 1 ч. Металлографические исследования проводили на оптическом микроскопе Метам-РВ22. Объемная доля карбидной фазы определялась в слое толщиной 0,1 мм от поверхности образцов. Перед исследованием проводилось травление по стандартной методике. Измерение микротвердости проводилось на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке на индентор 1,962 Н. Интенсивность накопления усталостных повреждений в поверхностном слое образцов при многократном контактом воздействии на материал исследовали на установке для испытаний на контактную усталость и износ [2] при напряжениях 950 и 1100 МПа.

Таблица 1

Химический состав сталей

Марка стали	Массовая доля элементов, %						
	C	Si	Mn	Cr	Ti	P	S
18ХГТ	0,22	0,21	1,15	1,29	0,070	0,015	0,028
16CrMnS5	0,20	0,25	1,20	1,22	0,003	0,014	0,031

Результаты исследований и их обсуждение. После проведения полного цикла упрочнения металлическая матрица всех исследованных слоев состоит из мартенсита отпуска и остаточного аустенита, в которой распределена карбидная фаза (рис. 1).

Видно, что в поверхностных слоях стали 18ХГТ формируется более развитая карбидная фаза, чем у стали 16CrMnS5. Параметры включений и микротвердость слоев приведены в табл. 2.

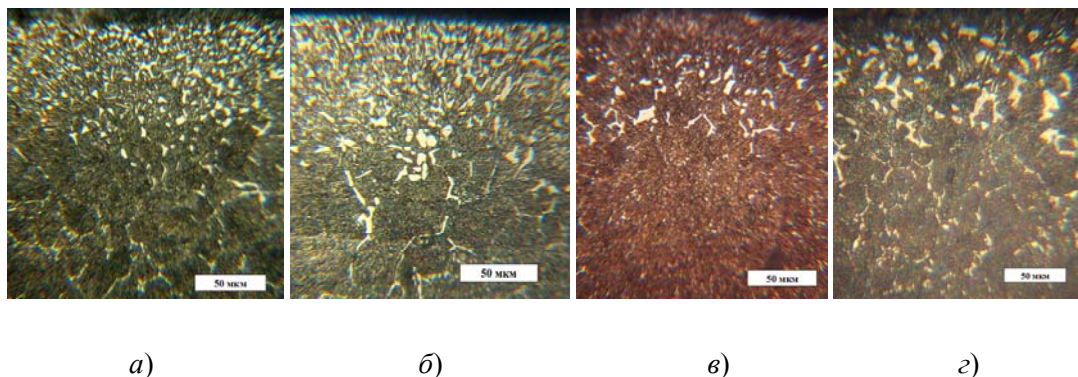


Рис. 1. Морфология карбидной фазы в заэвтектидных слоях сталей 18ХГТ (а, б) и 16CrMnS5 (в, з) после проведения цементации в течение 8 (а, в) и 12 (б, з) ч

Таблица 2

Объемная доля карбидной фазы и максимальный размер включений в науглероженных слоях

Длительность ХТО, ч	Марка стали					
	18ХГТ			16CrMnS5		
	Объемная доля, %	Максимальный размер включений, мкм	Микротвердость поверхности/сердцевины, ГПа	Объемная доля, %	Максимальный размер включений, мкм	Микротвердость поверхности/сердцевины, ГПа
8	35	20	8,0/4,6	18	40	7,1/3,8
12	50	30	8,4/4,6	26	50	7,5/4,2

Испытаниями на контактную усталость установлено, что у всех исследованных партий образцов зависимости изнашивания различны (рис. 2). У образцов стали 18ХГТ при напряжениях 1100 МПа зависимости изнашивания имеют линейный характер. Это явление объясняется тем, что уже при первых циклах нагружения формируются крупные питтинги по всей ширине контактной зоны, которые уменьшают толщину образца, приводящие к интенсивному изнашиванию (рис. 3, а). У слоев стали 16CrMnS5 имеется этап прецизионной стойкости из-за отсутствия интенсивного выкрашивания объемов упрочненного сплава (рис. 3, б). Этот этап сохраняется до 7500 циклов, после чего скорость изнашивания резко увеличивается вследствие накопления трещин контактной усталости и последующего формирования питтингов. При достижении глубины износа 0,6 мм максимальная стойкость (31 тыс. циклов) установлена у образцов стали 16CrMnS5 после 12-часовой цементации. У всех исследованных образцов на этом этапе обнаружено выкрашивание крупных частиц деформированного сплава (рис. 3, в).

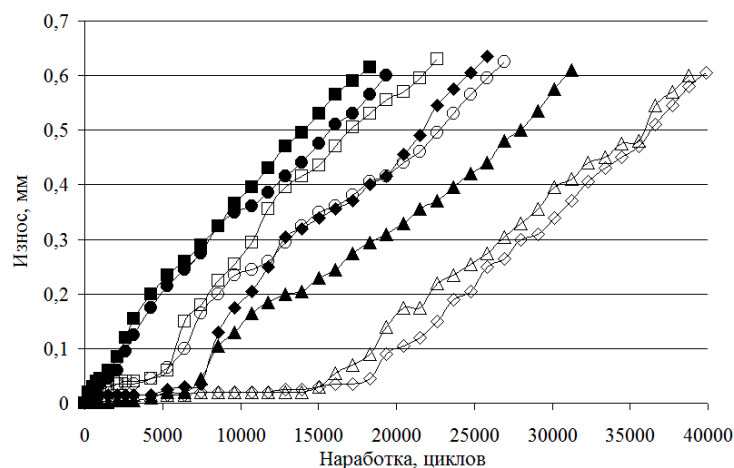


Рис. 1. Кривые износа науглероженных слоев стали 18ХГТ (●, ○ – 8 ч, ■, □ – 12 ч) и 16CrMnS5 (◆, ◇ – 8 ч, ▲, △ – 12 ч); светлые маркеры – 950 МПа; темные маркеры – 1100 МПа

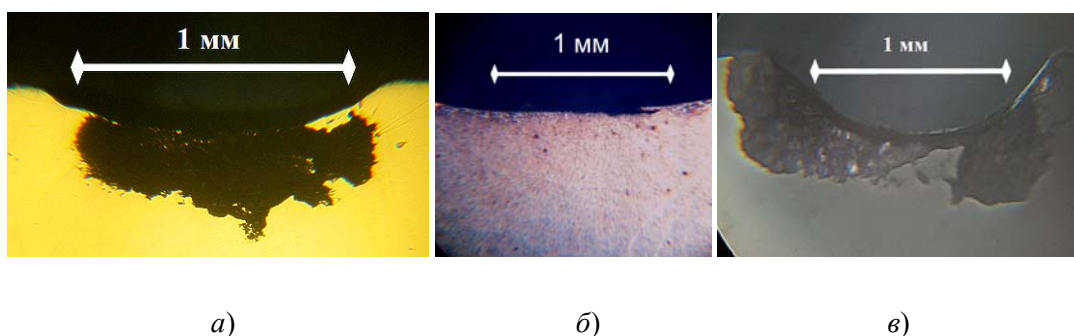


Рис. 3. Особенности разрушения сталей:
а – 18ХГТ (1000 циклов); б – 16CrMnS5 (1000 циклов); в – все стали

При снижении контактных напряжений до 950 МПа стойкость ожидаемо повысилась. У слоев стали 18ХГТ появился этап высокой износостойкости, который сохранился до 5300 циклов нагружения. Однако у стали 16CrMnS5 этот этап составил около 17500 циклов, что повысило стойкость в 3,3 раза. При достижении глубины лунки износа 0,6 мм максимальную износоустойчивость имеют слои после 8-часового насыщения. Их наработка составила 40 тыс. циклов.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Выявлено, что при одинаковых режимах упрочнения формируются значительно отличающиеся по объемной доле и размерам карбидов образцы стали.
2. Более высокая, чем слоев стали 16CrMnS5, микротвердость слоев стали 18ХГТ не привела к повышению их стойкости.
3. Установлено, что прецизионной стойкостью обладают образцы стали 18ХГТ. При снижении контактных напряжений с 1100 до 950 МПа их стойкость увеличилась в 2,3 раза. Образцы из стали 16CrMnS5 имеют значительно меньшую стойкость.
4. Полученные результаты позволяют рекомендовать сталь 16CrMnS5 в качестве заменителя стали 18ХГТ для изготовления цементуемых деталей.

Литература

1. Геллер, Ю. А. Инструментальные стали : справочник / Ю. А. Геллер. – Москва : Металлургия, 1984. – 584 с.
2. Полезная модель BY 8260, МПК G 01 N 3/00 (2006.01). Устройство для испытания на контактную усталость и износ : опубл. 30.06.2012 / Степанкин И. Н., Панкратов И. А., Кенько В. М., Поздняков Е. П., Степанкина Л. В. ; заявитель Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – URL: <https://elib.gstu.by/handle/220612/23227> (дата обращения: 04.10.2024).

УДК 546:54.057

**ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ НА СИНТЕЗ
ПОРОШКОВ $\text{MgO} : \text{CoO}$ И $\text{ZnO} : \text{CoO}$: СТРУКТУРА,
ВАЛЕНТНОЕ СОСТОЯНИЕ ИОНОВ КОБАЛЬТА
И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ В МАТРИЦЕ ОКСИДОВ**

М. Ф. С. Х. Аль-Камали, А. А. Бойко

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

Представлено исследование воздействия технологических режимов синтеза порошков $\text{MgO} : \text{CoO}$ и $\text{ZnO} : \text{CoO}$ на их структурные параметры и валентное состояние ионов кобальта. Установлено, что размеры частиц $\text{ZnO} : \text{CoO}$ варьируются от 390 до 800 нм, а размеры частиц $\text{MgO} : \text{CoO}$ находятся в диапазоне от 430 до 810 нм. В процессе прессования полученных порошков для формирования мишеней наблюдается трансформация валентного состояния ионов кобальта с образованием Co_2O_3 . Результаты EDX-анализа подтверждают интегральную однородность распределения ионов кобальта в матрицах оксидов цинка и магния, при этом концентрация кобальта соответствует расчетным значениям. Данные результаты подчеркивают важность контроля технологических параметров для достижения заданных свойств композитных материалов.

Ключевые слова: $\text{MgO} : \text{CoO}$, $\text{ZnO} : \text{CoO}$, структура, золь-гель метод, EDX-анализ, НЧ металлов, СЭМ.

**THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL MODES
ON THE SYNTHESIS OF $\text{MgO} : \text{CoO}$ AND $\text{ZNO} : \text{CoO}$ POWDERS:
STRUCTURE, VALENCE STATE OF COBALT IONS
AND DISTRIBUTION IN THE OXIDE MATRIX**

M. F. S. H. AL-Kamali, A. A. Boika

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

This paper presents a study of the impact of $\text{MgO} : \text{CoO}$ and $\text{ZnO} : \text{CoO}$ powder synthesis process modes on their structural parameters and the valence state of cobalt ions. It was found that the $\text{ZnO} : \text{CoO}$ particle sizes range from 390 to 800 nm, while the $\text{MgO} : \text{CoO}$ particle sizes are in the range from 430 to 810 nm. During the pressing of the obtained powders to form targets, a transformation of the valence state of cobalt ions is observed with the formation of Co_2O_3 . The results of EDX analysis confirm the integral uniformity of the distribution of cobalt ions in matrices of zinc and magnesium oxides, while the cobalt concentration corresponds to the calculated values. These results highlight the importance of controlling process parameters to achieve the desired properties of composite materials.

Keywords: $\text{MgO} : \text{CoO}$, $\text{ZnO} : \text{CoO}$, structure, sol-gel method, EDX-analysis, NPs, SEM.

Многофункциональные гибридные композиционные материалы на основе оксидов переходных металлов привлекают значительное внимание благодаря своим

уникальным свойствам, включая электрические, каталитические, магнитные, оптические характеристики и структурную стабильность [1, 2]. Эти комбинированные особенности делают многофункциональные композиты привлекательными для множества промышленных применений. Благодаря сложной структуре композита, способной аккумулировать высокие плотности энергии, такие материалы обещают перспективы в области преобразования и хранения энергии. Однако для эффективного применения методов вакуумного напыления необходимо поддерживать высокую степень плотности, сохранять первоначальный размер частиц и химический состав, а также обеспечивать однородность состава покрытия. В этом контексте золь-гель синтез представляет собой мощный инструмент, позволяющий вводить легирующие добавки в матрицу композита, распределяя их на молекулярном уровне или адсорбируя на поверхности частиц в виде тонкого, в том числе нанометрового слоя.

Целью данного исследования является изучение структурных, морфологических и фазовых параметров синтезируемых материалов, а также оценка их потенциала для разработки элементов микро- и нанoeлектроники. В рамках работы были разработаны и исследованы двухкомпонентные металлооксидные системы, легированные наночастицами оксида кобальта, сформированные на основе высокопористых кобальто-содержащих ксерогелей.

Методы исследования. Высокая однородность как гранулометрического, так и химического состава композиционного материала является ключевым условием для получения равномерных покрытий при вакуумном напылении. Для достижения молекулярно-однородного распределения легирующих добавок необходимо сорбировать их на поверхности ультрадисперсных глобул порошка, формируя тонкий слой нанометровой толщины. Это возможно при использовании компонентов химической чистоты не ниже марки «ОСЧ». Метод золь-гель был применен для синтеза порошков $\text{MgO} : \text{CoO}$ и $\text{ZnO} : \text{CoO}$, в которых использовались гексагидрат хлорида кобальта(II) $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (ХЧ; ГОСТ 4525-77), магний оксид MgO (ХЧ; ГОСТ 4526-75) и цинк оксид ZnO (ЧДА; ГОСТ 10262-73) в качестве исходных компонентов. Процесс формирования наночастиц методом золь-гель проиллюстрирован на рис. 1.

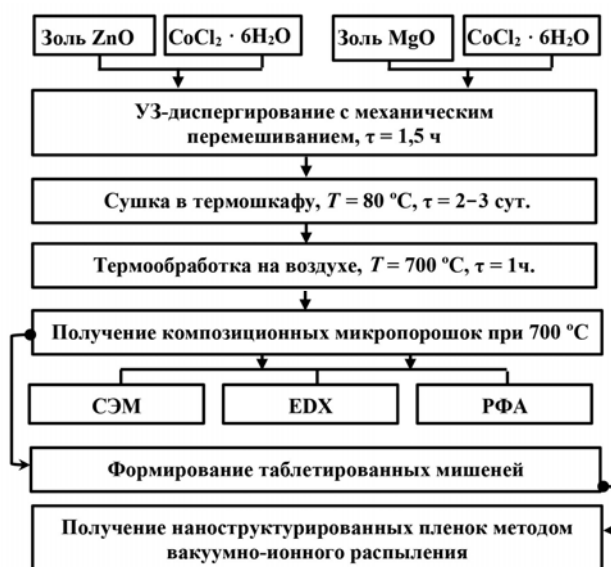
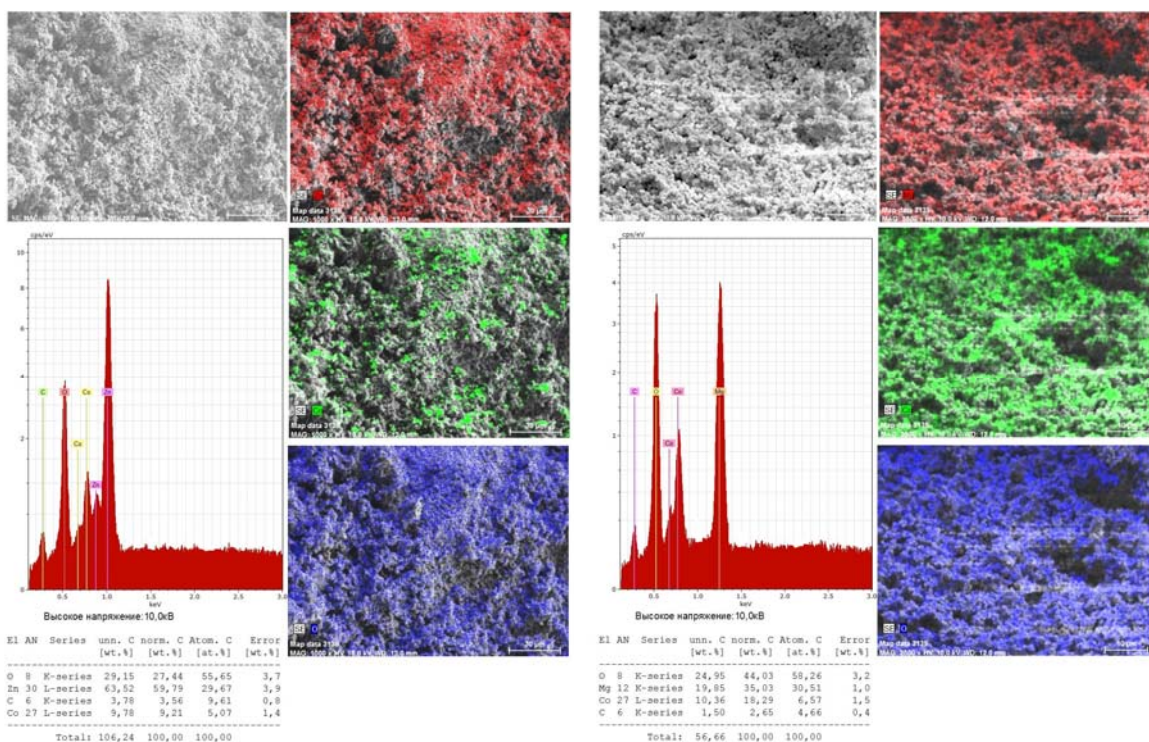


Рис. 1. Схема технологических этапов получения ксерогелевых матриц MgO или матриц ZnO , легированных CoO

Структура полученных материалов была исследована с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на приборе S-4800 (филиал НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «Интеграл») для анализа изменений морфологии поверхности синтезированных ксерогельных заготовок. Элементный состав был определен методом EDX (EDS) с использованием энергодисперсионного микроанализатора Quantex 200 (без азотного микроанализатора с XFlash Detector 5030) с разрешением 125 эВ (производство «Bruker», Германия). Исследования проводились сотрудниками НТЦ «Белмикросистемы», филиала «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющей компании холдинга «ИНТЕГРАЛ».

На рис. 2 представлены результаты EDX-анализа порошков $\text{ZnO} : \text{CoO}$ и $\text{MgO} : \text{CoO}$. Полученные данные указывают на интегральную однородность распределения ионов кобальта в матрице, причем расчетная концентрация добавленных компонентов соответствует фактически измеренной в порошке.

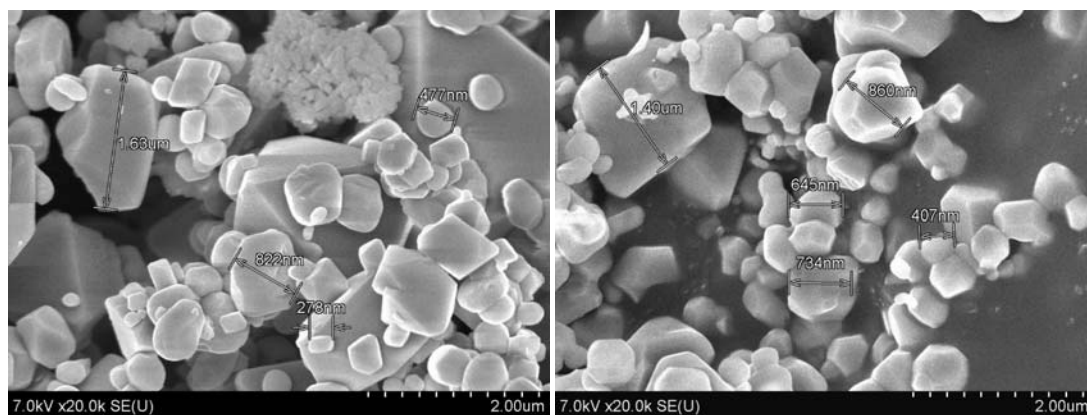


а)

б)

Рис. 2. EDX-анализ порошка состава после термической обработки на воздухе при 700 °C:
а – $\text{ZnO} : \text{CoO}$; б – $\text{MgO} : \text{CoO}$

Также установлено, что размеры частиц $\text{ZnO} : \text{CoO}$ варьируются от 390 до 800 нм, в то время как размеры частиц $\text{MgO} : \text{CoO}$ находятся в диапазоне от 430 до 810 нм (рис. 3). В ходе прессования полученных порошков для формирования мишеней наблюдается трансформация валентного состояния ионов кобальта с образованием Co_2O_3 .



а)

б)

Рис. 3. СЭМ-изображение микропорошка ксерогеля, сформированного на основе золя водной дисперсии MgO или ZnO. Ксерогели обрабатывали на воздухе при $t = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 1 ч:
а – ZnO : CoO; б – MgO : CoO

В результате исследования влияния технологических режимов синтеза порошков MgO : CoO и ZnO : CoO на их структуру и валентное состояние ионов кобальта установлено следующее: размеры частиц ZnO : CoO варьируются в диапазоне от 390 до 800 нм, в то время как размеры частиц MgO : CoO составляют от 430 до 810 нм. При прессовании полученных порошков для формирования мишеней наблюдается трансформация валентного состояния ионов кобальта с образованием Co_2O_3 . Результаты EDX-анализа подтверждают, что распределение ионов кобальта в матрицах оксидов цинка и магния обладает интегральной однородностью, при этом концентрация кобальта соответствует расчетным значениям.

Л и т е р а т у р а

1. Аль-Камали, М. Ф. С. Х. Мишени (MgO : CoO и ZnO : CoO), получаемые золь-гель методом для вакуумного напыления / М. Ф. С. Х. Аль-Камали, А. А. Бойко // Высокотемпературная химия оксидных систем и материалов : сб. тез. докл. X Всерос. конф. (с междунар. участием), посвящ. 75-летию ИХС РАН, Санкт-Петербург, 25–28 сент. 2023 г. / ИХС РАН. – Санкт-Петербург, 2023. – С. 142–144.
2. Аль-Камали, М. Ф. С. Х. Мишени SiO_2 : CuO (Cu^0) для нанесения тонких пленок ионно-лучевого распыления, полученные золь-гель методом / М. Ф. С. Х. Аль-Камали, А. А. Бойко, Хамдан А. С. Аль-Шаами // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 3. – С. 348–355.

СЕКЦИЯ 3. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ, МЕХАНИЧЕСКИХ И БИОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 621.762.001.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ ИНЖЕНЕРНОГО АНАЛИЗА

К. В. Ефимчик, Е. Ф. Кудина

*Учреждение образования «Белорусский государственный
университет транспорта», г. Гомель*

Отмечено, что разработка изделий, а также исследование физико-механических характеристик являются комплексом сложных и связанных задач. Установлено, что прогнозирование поведения получаемого изделия из разработанных композиционных материалов на стадии производства позволяет получить оптимальную конструкцию изделия с заданными физико-механическими характеристиками, что способствует ускоренному внедрению в производство.

Ключевые слова: системы инженерного анализа, композиционные материалы, моделирование, прогнозирование.

MODELING OF COMPOSITE MATERIAL PRODUCTS USING MODERN ENGINEERING ANALYSIS SYSTEMS

К. В. Ефимчик, Е. Ф. Кудина

Belarusian State University of Transport, Gomel

The development of products, as well as the study of their physical and mechanical characteristics, are a complex of complex and related tasks. Forecasting the behavior of the resulting product from the developed composite materials at the production stage allows us to obtain an optimal design of the product with specified physical and mechanical characteristics, which facilitates accelerated implementation in production.

Keywords: engineering analysis systems, composite materials, modeling, forecasting.

В развитии промышленного производства в настоящее время важно усовершенствование характеристик материалов. Как правило, при этом основные усилия направляют на снижение веса изделия, увеличение его прочности и повышение стойкости к агрессивным средам. На сегодняшний день внимание уделяется полимерным композиционным материалам (ПКМ). При получении изделий из ПКМ нужно учитывать их будущие высокие прочностные свойства, с одной стороны, а также специфику их переработки и утилизации, с другой [1].

Цель исследования – анализ современных систем инженерного анализа, а также возможность их применения в образовательном процессе.

Инженерный компьютерный анализ в процессе создания нового изделия позволяет спрогнозировать поведение системы и с минимальными затратами времени сопоставить ряд различных альтернативных конструкторских решений. В результате снижается объем экспериментальной отработки и доводки изделия, повышается его

качество, а сам процесс проектирования ускоряется и удешевляется. Роль компьютерного моделирования и инженерного анализа при разработке новых изделий растет и в конечном счете они должны стать неотъемлемой частью любого процесса проектирования.

Современные системы инженерного анализа (или системы автоматизации инженерных расчетов) – CAE (computer-aided engineering) обеспечивают решение задач линейного и нелинейного статистического анализа, анализа частоты, устойчивости, температурного анализа, усталости, испытаний на ударную нагрузку, линейного и нелинейного динамического анализа, анализа оптимизации и др. CAE применяются совместно с CAD-системами компьютерного геометрического моделирования (computer-aided design). Назначение CAD-систем – создание 3D-моделей и получение чертежей. Часто CAE интегрируются в CAD, образуя гибридные CAD/CAE системы.

CAE-системы включают расчетные модули, позволяющие оценить, как поведет себя компьютерная модель изделия в реальных условиях эксплуатации. Расчетные модули, используемые в CAE-системах, основаны на численных методах решения дифференциальных уравнений (метод конечных элементов, метод конечных объемов, метод конечных разностей и др.) [2]. В настоящее время системы инженерного анализа применяются во всех сферах деятельности. На рис. 1 представлены распределение CAE-систем по сферам деятельности, а также объем мирового использования ведущих компаний в области систем инженерного анализа.

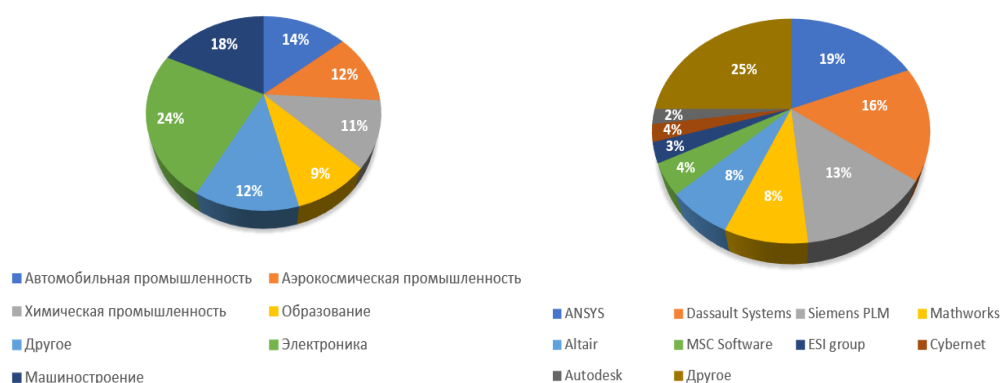


Рис. 1. Распределение CAE-систем и объем их использования

За последние 10 лет мировой рынок CAE платформ вырос с 2,2 до 5,3 млрд USD (+146 %). Согласно последним исследованиям, 9 ведущих компаний, занимающихся разработкой CAE-систем, занимают около 75 % мирового рынка.

Программное обеспечение вышеперечисленных компаний дает возможность путем проведения виртуальных исследований, не требующих натурных экспериментов, с высокой точностью определить физико-механические характеристики изделий из разрабатываемого материала [3].

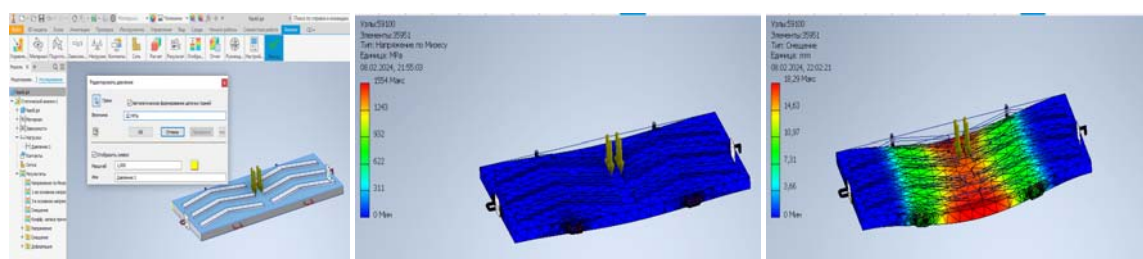
Использование программы ANSYS позволяет разработать методику исследования механических характеристик в твердых телах при деформациях на растяжение и сжатие. Модуль ANSYS/Mechanical предоставляет широкие возможности для выполнения проектных разработок, анализа и оптимизации: решение сложных задач прочности конструкций, теплопередачи и акустики. Эта программа, обеспечивающая проверку правильности проектных работ, является мощным инструментом для опре-

деления перемещений, напряжений, усилий, температур и давлений, а также других важных параметров [4].

Dassault Systemes (биржевой индекс DASTY) на рынке CAE занимает 2-ю позицию. Работы в области CAE-технологий ведутся под брендом SIMULIA. Инструменты для инженерного анализа содержатся также в пакетах CATIA и SOLID-WORKS. SOLIDWORKS – программный комплекс для автоматизации работ промышленного предприятия на этапах конструкторской и технологической подготовки производства. Обеспечивает проверку изделий из разработанного материала любой степени сложности и назначения, а также проверку правильности проектных работ, анализ конфликтов и поиск оптимального решения в эскизах, деталях и сборках, геометрическую оптимизацию порядка построения модели, скруглений и уклонов [5].

На военно-транспортном факультете в Белорусском государственном университете транспорта для 3D-моделирования и расчета прочностных характеристик изделий применяется программа Autodesk Inventor Professional. Примерный расчет приведен на базе сборно-разборного дорожного настила [6].

Для проведения инженерного анализа с помощью программы Autodesk Inventor Professional необходимо выбрать зависимость фиксации, а также установить давление, оказываемое на изделие в соответствии с расчетами, и разбить деталь на конечные элементы с помощью сетки (рис. 2).



а) б) в)

Рис. 2. Установка давления в соответствии с расчетами (а), разбиение изделия на конечные элементы (б) и проверка максимальной величины прогиба (в)

После проведения расчетов модель может быть оптимизирована до размеров, которые возможно изготовить на производстве.

Таким образом, из приведенных диаграмм видно, что к основным мировым лидерам рынка систем инженерного анализа относятся ANSYS, Dassault Systemes и Siemens PLM Software. Также примерные расчеты можно провести с применением программы Autodesk Inventor Professional, которая является бюджетным вариантом системы инженерного анализа и позволяет спрогнозировать поведение изделия при заданных нагрузках.

В результате применения систем инженерного анализа снижается время на изготовление нескольких экспериментальных образцов различных размеров, а сам процесс проектирования ускоряется и удешевляется. Вышеперечисленные программы дают возможность создавать анимацию деформации изделия с заданным давлением в различный период времени и формировать отчет по результатам эксперимента в виде .html файла.

Литература

1. Восточно-европейский журнал передовых технологий : сб. науч. ст. / Частное предприятие «Технологический Центр» ; редкол.: Д. А. Демин (гл. ред.) [и др.]. – Харьков : Технол. Центр, 2016. – 912 с.
2. Лукинских, С. В. Компьютерное моделирование и инженерный анализ в конструкторско-технологической подготовке производства : учеб. пособие / С. В. Лукинских. – Екатеринбург : Урал. ун-т, 2020. – 168 с.
3. Программный комплекс Fidesys / Cal- Fidesys.com. – URL: <http://www.sstc.spb.ru/upload/iblock/e76/06-ПакетFidesysдляпрочностногоинженерногоанализа.pdf> (дата обращения: 20.09.2024).
4. ANSYS / Офиц. сайт. – URL: <https://www.cadferm-cis.ru/products/ansys/structures/mechanical> (дата обращения: 20.09.2024).
5. Ефимчик, К. В. Моделирование изделий из порошковых материалов с использованием современных систем инженерного анализа / К. В. Ефимчик, Е. Ф. Кудина // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка : материалы Междунар. конф., посвящ. 50-летию основания ГНУ «Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа», г. Минск, 14–16 сент. 2022 г. / Ин-т порош. металлургии им. акад. О. В. Романа. – Минск, 2022, – С. 183–188.
6. Заявка № а 20230136. Сборно-разборный дорожный настил : заявлено 01.06.2023 / Ефимчик К. В., Кудина Е. Ф., Поддубный А. А.

УДК 629.44;629.4.027.5

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ
СОЕДИНЕНИЯ ВНУТРЕННИХ КОЛЕЦ БУКСОВЫХ
ПОДШИПНИКОВ С ШЕЙКОЙ ОСИ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ**

Р. И. Чернин

*Учреждение образования «Белорусский государственный
университет транспорта», г. Гомель*

Отмечено, что эксплуатационные факторы, оказывающие влияние на прочность прессовых соединений элементов колесных пар, не изучены в должной мере. Приведены результаты исследований влияния скорости движения на прочность прессовой посадки внутренних колец буксовых подшипников на шейке оси колесной пары на разработанной и верифицированной конечно-элементной модели.

Ключевые слова: колесная пара, соединения с натягом, напряженно-деформированное состояние, контактное давление, прочность, скорость движения.

**ASSESSMENT OF THE EFFECT OF THE SPEED OF MOVEMENT
ON THE STRENGTH OF THE CONNECTION OF THE INNER
RINGS OF THE AXLE BEARINGS WITH THE AXLE NECK
OF THE WHEELSET**

R. I. Chernin

Belarusian State University of Transport, Gomel

The operational factors affecting the strength of the press joints of the wheelset elements have not been adequately studied. The results of studies of the influence of the speed of movement on the strength of the pressing fit of the inner rings of axle bearings on the neck of the axle of the wheelset on the developed and verified finite element model are presented.

Keywords: wheelset, press-fit joints, stress-strain state, contact pressure, strength, speed of movement.

Обеспечение безопасности движения поездов во многом зависит от технического состояния подвижного состава. В свою очередь, одним из основных элементов, напрямую оказывающих на это влияние, является колесная пара. Вопросы прочности прессовых соединений элементов колесных пар вагонов вызвали и продолжают вызывать как научный, так и практический интерес и если технологические факторы довольно хорошо изучены, то эксплуатационные, к которым относится скорость движения подвижного состава, на сегодняшний день требуют изучения.

Для проведения исследований по оценке влияния скорости движения вагона на прочность прессовой посадки внутренних колец буксовых подшипников на шейку оси колесной пары создана конечно-элементная модель, которая соответствует нормативным документам [1, 2] и позволяет учитывать влияние макрогеометрии (конусность, овальность) поверхностей сопряжения на величину натяга, уровень загрузки и скорость движения. Модель состоит из конечных элементов видов Tet10 и Hex20 и насчитывает 44252 конечных элементов и 86300 узлов.

Верификация результатов с данными экспериментальных исследований [3] показала, что максимальная Δ составляет около 9 % (при натяге 0,045 мм) и снижается до 1,8 % при натяге 0,110 мм, а следовательно, разработанную модель возможно использовать для исследований.

Исследование разработанной модели проводилось с изменением скорости движения колесной пары от 0 до 200 км/ч, с шагом в 25 км/ч при значении натягов 0,045 и 0,110 мм, при нагрузке 1,5 и 16,5 т с принятым допущением, что перемещение колесной пары строго прямолинейное без торцевого воздействия на ось вследствие извилистого движения ее по колею.

На рис. 1 представлены результаты расчета модели при скорости 150 км/ч, нагрузке 1,5 и 16,5 т и натягах 0,045 и 0,110 мм.

При исследовании результатов моделирования было установлено, что максимальные НДС модели и значение контактного давления в зоне сопряжения при увеличении скорости движения снижаются для нижней границы зоны рекомендованных натягов (0,045 мм), а в случае для верхней границе зоны (0,110 мм) НДС снижается, а контактное давление растет, однако среднее значение НДС по сечениям возрастает как при нижней границе, так и при верхней, т. е. наблюдается картина, обратная результатам, полученным без нагрузки и при статической нагрузке, когда при росте НДС охватывающего кольца происходил рост контактного давления и было возможно, согласно разработанной и апробированной методике [3], определить действительную прочность сопряжения.

Для оценки прочности прессовых соединений колесных пар в динамике необходимо использовать значение контактного давления в зоне сопряжения.

На рис. 2 приведены результаты анализа полученных данных для оценки влияния скорости движения вагона на прочность прессовой посадки внутренних колец буксовых подшипников на шейку оси колесной пары в диапазоне рекомендованных натягов (0,045–0,110 мм) [2] и нагрузке приходящейся на шейку оси от 1,5 до 16,5 т, что в среднем соответствует порожнему (масса тары) и груженому вагону (масса брутто).

Как видно из рис. 2, увеличение скорости движения подвижного состава вызывает снижение контактного давления, и как следствие – снижается и прочность прессового соединения внутренних колец буксовых подшипников с шейкой оси колесной пары.

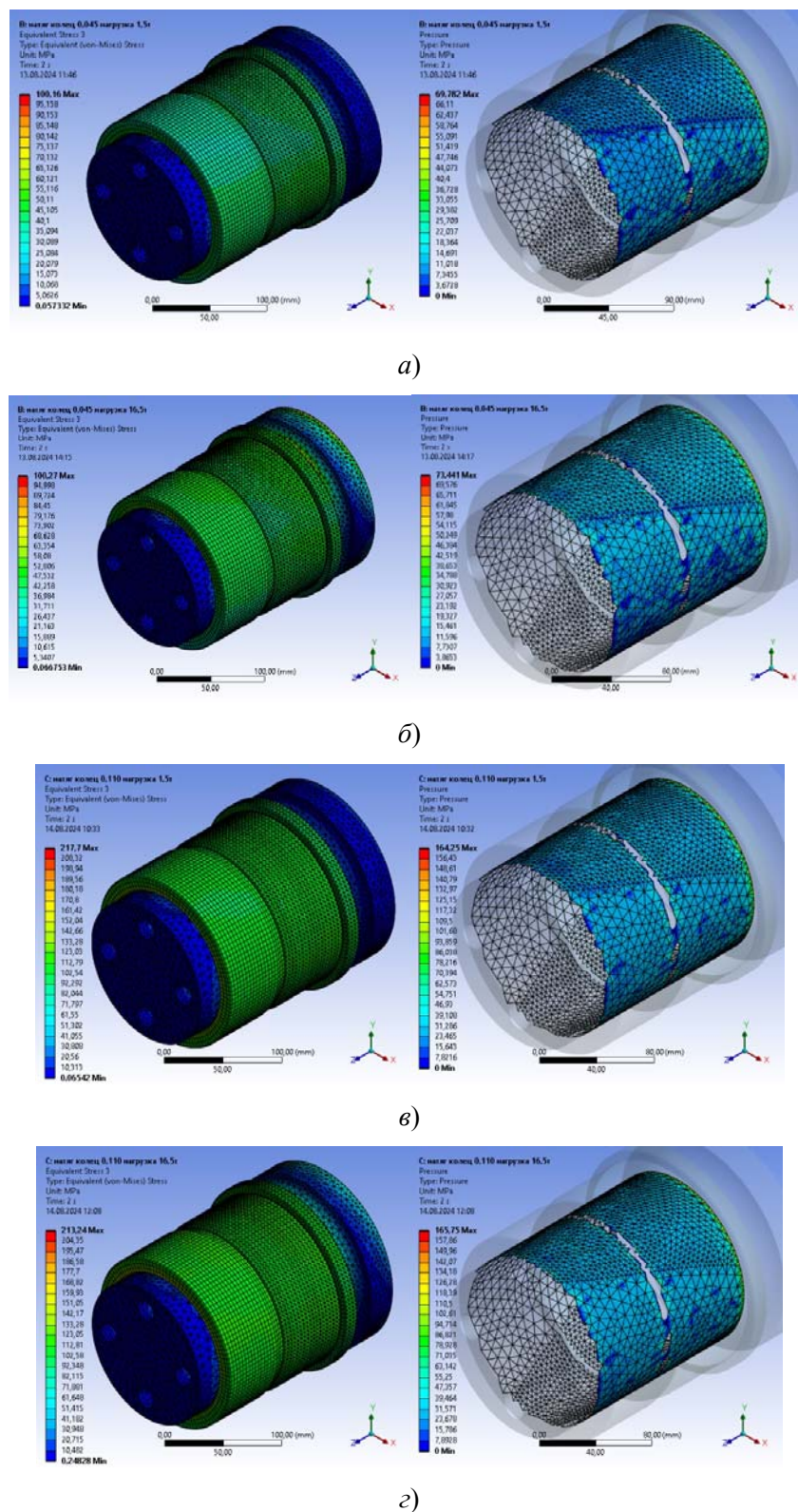


Рис. 1. Результаты расчета эквивалентных напряжений и контактного давления в сопряжении внутренних колец буксовых подшипников с шейкой оси колесной пары при скорости движения 150 км/ч:

а – при натяге 0,045 мм, нагрузке 1,5 т; *б* – при натяге 0,045 мм, нагрузке 16,5 т;
в – при натяге 0,110 мм, нагрузке 1,5 т; *г* – при натяге 0,110 мм, нагрузке 16,5 т

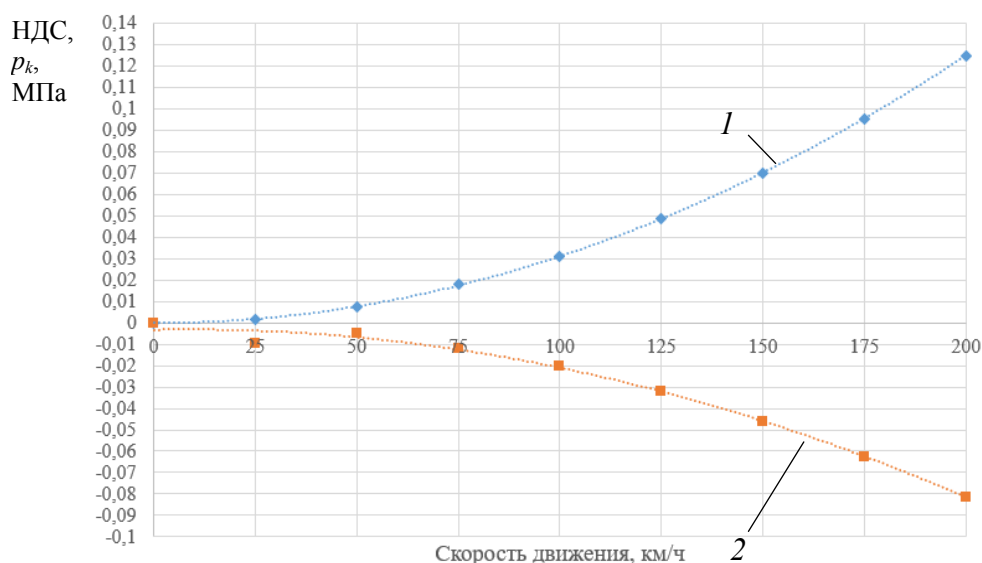


Рис. 2. Влияние скорости движения на НДС внутренних колец и прочность прессового соединения:

1 – НДС поверхности колец ($y = 0,000003x^2 - 0,000002x - 0,000037$);

2 – контактное давление в зоне сопряжения колец с осью
($y = -0,000002x^2 + 0,000036x - 0,003215$)

Следует отметить, что при принятых допущениях установленное снижение прочности не носит критического характера, однако влияние данного фактора необходимо учитывать при проведении дальнейших исследований с усложнением модели.

Литература

1. Оси колесных пар железнодорожного подвижного состава. Общие технические условия : ГОСТ 33200-2014. – Введ. 01.10.2016. – Москва : Науч.-исслед. ин-т ж.-д. трансп., 2014. – 50 с.
2. Руководящий документ по ремонту и техническому обслуживанию колесных пар с буксовыми узлами грузовых вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 (1524) мм : РД ВНИИЖТ 27.05.01-2017 : утв. Советом по ж.-д. транспорту государств-участников Содружества 19-20 окт. 2017 г. № 67. – Введ. 01.01.2018. – Москва : НИИЖТ, 2018. – 253 с.
3. О контроле прочности соединений с гарантированным натягом колец подшипников с шейками осей колесных пар / И. Л. Чернин, Р. И. Чернин, Н. Г. Сенько, В. А. Руденок // Вестник Белорусского государственного университета транспорта. Наука и транспорт. – 2010. – № 1 (20). – С. 5-9.

УДК 533.6.011:004.94

ВЛИЯНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ НА РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБТЕКАНИЯ ВОЗДУШНЫМ ПОТОКОМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ВАГОНА

О. В. Демьянчук

Учреждение образования «Белорусский государственный
университет транспорта», г. Гомель

Рассмотрено обтекание воздушным потоком железнодорожного вагона, моделируемого прямоугольным параллелепипедом. Приведены результаты компьютерного моделирования аэродинамики воздушного потока в программных комплексах ANSYS CFX и ANSYS FLUENT. Выполнено сравнение результатов определения давления потока воздуха на стен-

ки вагона и коэффициентов аэродинамического сопротивления для различных параметров граничных условий. Показано, что при моделировании обтекания воздушным потоком железнодорожного вагона возможно использование граничного условия открытой границы (Opening), а также жесткой стенки (Wall).

Ключевые слова: компьютерное моделирование, аэродинамика, граничные условия, аэродинамический коэффициент.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF BOUNDARY CONDITIONS ON THE RESULTS OF SIMULATION OF AIR FLOW MOVEMENT AROUND A CAR

V. U. Dzemyanchuk

Belarusian State University of Transport, Gomel

The air flow movement around a car modeled by a rectangular parallelepiped is considered. The results of computer modeling in the ANSYS CFX and ANSYS FLUENT software packages of air flow aerodynamics are given. The comparison of results of determining the air flow pressure on the car walls and the aerodynamic drag coefficients for various parameters of the boundary conditions is performed. It is shown that when modeling the air flow around a railway car, it is possible to use the boundary condition of an open boundary (Opening), as well as an rigid wall (Wall).

Keywords: computer modeling, aerodynamics, boundary conditions, aerodynamic coefficient.

В настоящее время для определения основного сопротивления движению железнодорожных вагонов, в том числе аэродинамического сопротивления, используются зависимости, полученные экспериментальным путем. Однако на сегодняшний день разработаны и эксплуатируются вагоны, особенности конструкции которых не учтены данными зависимостями, что требует дополнительных исследований. Высокая стоимость и сложность затрудняют проведение полномасштабных испытаний для определения ветровых нагрузок, а экспериментам на масштабируемых моделях в аэродинамической трубе необходима дополнительная обработка результатов для приведения их в соответствие с полномасштабными прототипами [1]. Получение достоверных аэродинамических характеристик вагонов возможно при использовании компьютерного моделирования аэродинамики железнодорожного подвижного состава, позволяющего обеспечить при сравнительно низких затратах быстрое получение результатов с высокой точностью [2]. Целью данной работы стал анализ влияния граничных условий на результаты компьютерного моделирования обтекания воздушным потоком железнодорожного вагона.

Моделирование обтекания воздушным потоком железнодорожного вагона выполнялось в программном комплексе ANSYS. Геометрическая модель, для создания которой использовалось приложение Design Modeler, включала упрощенную конструкцию полномасштабного крытого вагона в форме параллелепипеда и расчетную область, размеры которой установлены в ранее выполненных работах [3].

Генерирование расчетной сетки выполнялось с использованием метода «Hex Dominant Method», позволяющего строить сетки на основе гексаэдров. По результатам построения сетки количество элементов составило 700 тыс. ячеек при размере элемента 0,375 м и уменьшенном локальном размере в области вагона 0,187 м. Установлено, что дальнейшее измельчение сетки, вызывающее увеличение продолжительности расчета, не оказывает существенного влияния на точность получаемых результатов [3].

Моделирование течений жидкости и газа в применяемом программном комплексе возможно осуществлять с использованием широкого перечня модулей: Fluent, CFX, Icem CFD, TurboGrid и др. При выполнении моделирования обтекания воздушным потоком железнодорожного вагона применялись модули Fluid Flow CFX и Fluid Flow Fluent. Данные модули имеют близкий по содержанию функционал для решения задач гидродинамики и позволяют моделировать различные физические процессы газов и жидкостей.

Для замыкания осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса, на основе решения которых выполнялось компьютерное моделирование, использована модель турбулентности k – ϵ . Данная модель представляет собой систему двух дифференциальных уравнений относительно кинетической энергии турбулентности k и скорости диссипации кинетической энергии ϵ .

При расчете используемые уравнения необходимо дополнить граничными условиями, задающими значения искомых параметров течения на границах расчетной области. Граничные условия классифицируются в зависимости от их типа и того, какие параметры заданы на границе. При моделировании нужно учитывать, что выбор параметров расчетной области и постановка граничных условий оказывают существенное влияние на получение достоверных результатов численного решения.

На первом этапе моделирование осуществлялось в модуле ANSYS CFX при следующих граничных условиях: постоянная скорость воздушного потока ($v = 10$ м/с) задавалась на входе (Inlet), давление ($p = 0$) – на выходе (Outlet). Условие открытой границы (Opening) при заданном значении давления $p = 0$ использовалось для боковых и верхней поверхностей расчетной области и предполагало, что воздух может втекать и вытекать из расчетной области. Непроницаемые границы для потока были заданы с использованием условия жесткой стенки (Wall) на поверхности вагона и нижней поверхности расчетной области, равенство нулю скорости потока на границе задано с помощью установки условия прилипания (No Slip Wall).

На следующем этапе с целью рассмотрения случая нахождения железнодорожного вагона не на открытом пространстве для боковых поверхностей расчетной области применялось условие жесткой стенки (Wall).

На рис. 1 приведены графики зависимости коэффициента аэродинамического сопротивления вагона от угла атаки воздушного потока в диапазоне от 0 до 40°.

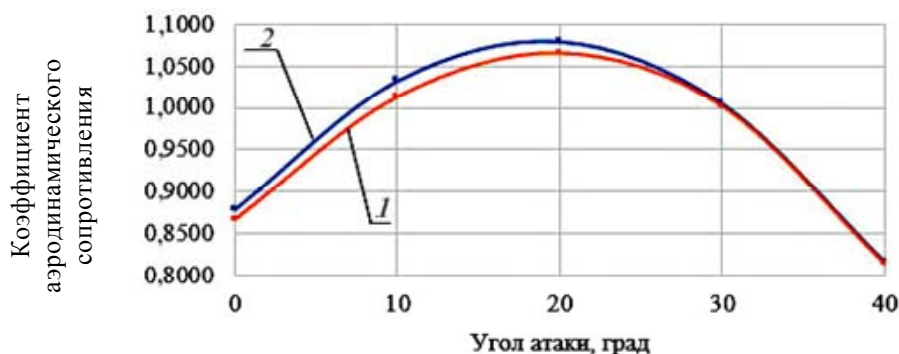


Рис. 1. Графики зависимости коэффициента аэродинамического сопротивления вагона от угла атаки воздушного потока:
1 – граничное условия Opening; 2 – граничное условие Wall

Из рис. 1 следует, что коэффициенты аэродинамического сопротивления для вариантов граничных условий на боковых стенках Opening и Wall отличаются незначительно. Значения при использовании граничного условия Wall превышают значения при граничном условии Opening не более чем на 2 %.

Анализ графиков распределения давления на лобовой поверхности вагона, соответствующих приведенным в ранее выполненных работах [3, 4], показал, что изменение граничных условий не оказывает существенного влияния на результаты расчета. Однако при величине угла атаки, равного 20° , использование граничного условия Wall вызывает увеличение значений давления на боковой поверхности вагона, что видно из представленных графиков (рис. 2).

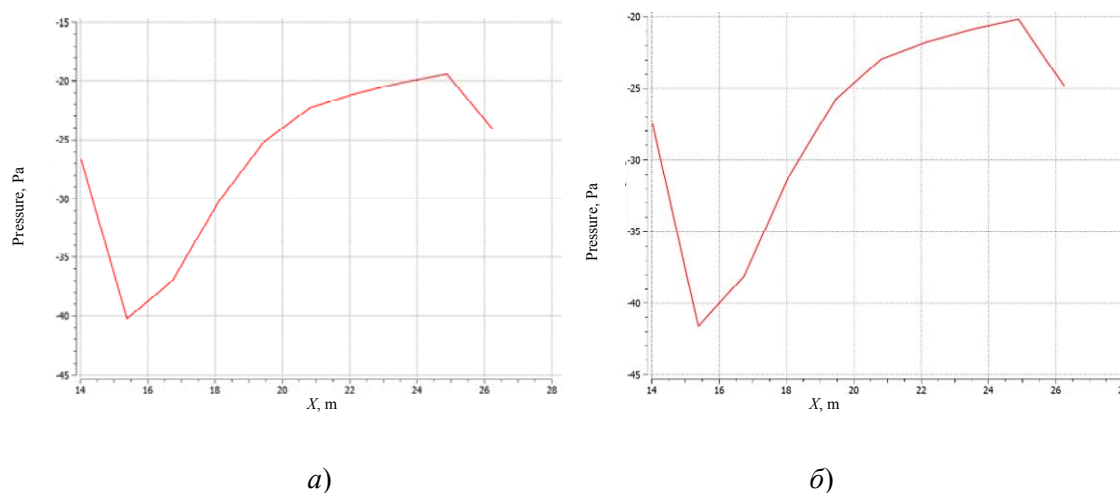


Рис. 2. Распределение давления на боковой поверхности вагона при значении угла атаки воздушного потока 20° при граничных условиях Opening (а) и Wall (б)

Также было выполнено аналогичное моделирование с использованием модуля Fluent, в котором для расчета применялся решатель Pressure-Based, разработанный для несжимаемых и слабо сжимаемых течений. Для решения были заданы граничные условия, аналогичные применяемым в модуле CFX, за исключением боковых и верхней поверхностей расчетной области, для которых задавалось условие жесткой стенки (Wall). Для сокращения продолжительности решения при моделировании был использован гибридный метод инициализации, который предполагает задание начальных данных всем расчетным величинам, а заданные граничные условия линейно интерполируются внутрь расчетной области. Моделирование выполнялось только для угла атаки, равного нулю градусов. Результаты моделирования показали, что значение коэффициента воздушного сопротивления превышает полученное с использованием модуля CFX на 7 %.

Таким образом, при моделировании обтекания воздушным потоком железнодорожного вагона возможно применение различных граничных условий, таких как Opening и Wall. Существенное различие в результатах моделирования наблюдается только для значений давления воздушного потока на боковой поверхности вагона. При использовании модуля Fluent для решения приведенной задачи значения коэффициента аэродинамического сопротивления увеличиваются на 7 % по сравнению со значениями, полученными в модуле CFX.

Литература

1. High-speed Rail Aerodynamic Assessment and Mitigation Report: technical report / P. Derkowski, S. Clark, R. Sturt [et al.]. – Washington : Transportation Technology Center, 2015. – 258 p.
2. Baker, C. J. A review of train aerodynamics. Part 1 – Fundamentals / C. J. Baker // The Aeronautical Journal. – 2014. – Vol. 118, iss. 1201. – P. 201–228. – DOI 10.1017/S000192400000909X
3. Демьянчук, О. В. Моделирование обтекания потоком воздуха прямоугольного параллелепипеда / О. В. Демьянчук // Механика. Исследования и инновации. – 2023. – Вып. 16. – С. 64–72.
4. Шимановский, А. О. Аэродинамика модели железнодорожного грузового вагона при разных углах атаки воздушного потока / А. О. Шимановский, О. В. Демьянчук // Механика машин, механизмов и материалов. – 2024. – № 2 (67). – С. 23–29.

УДК 004.891:338.242

**ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСКУССТВЕННОГО
ИНТЕЛЛЕКТА ПРИ ЦИФРОВИЗАЦИИ БИЗНЕС-ОПЕРАЦИЙ****О. Н. Сапарова, М. Ч. Курбансахатов***Государственный энергетический институт Туркменистана, г. Мары*

Рассмотрены ключевые аспекты использования искусственного интеллекта (ИИ) в процессе цифровизации бизнес-операций. Особое внимание уделено преимуществам, вызовам и перспективам внедрения ИИ в различных отраслях.

Ключевые слова: искусственный интеллект, цифровая трансформация, роботизация бизнес-процессов, анализ изображений.

**PECULIARITIES OF USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE
IN THE DIGITALIZATION OF BUSINESS OPERATIONS****O. N. Saparova, M. Ch. Gurbansahedov***State Energy Institute of Turkmenistan, Mary*

This paper discusses the key aspects of using artificial intelligence (AI) in the digitalization of business operations. Special attention is paid to the benefits, challenges and prospects of AI implementation in various industries.

Keywords: artificial intelligence, digital transformation, robotization of business processes, image analysis.

Цифровизация бизнес-операций представляет собой интеграцию цифровых технологий во все аспекты деятельности компании. Искусственный интеллект (ИИ) играет ключевую роль в этом процессе, обеспечивая автоматизацию, улучшение качества обслуживания клиентов и повышение эффективности.

Преимущества использования искусственного интеллекта включают:

1. Повышение эффективности: искусственный интеллект позволяет автоматизировать рутинные задачи, что снижает затраты времени и ресурсов при цифровизации бизнес-операций. Это освобождает сотрудников от выполнения однообразных действий и дает возможность сосредоточиться на более сложных задачах, требующих творческого подхода. ИИ анализирует большие объемы данных и выявляет закономерности, что помогает принимать обоснованные решения и прогнозировать

изменения в бизнес-среде. Это позволяет компаниям адаптироваться к изменениям на рынке и оптимизировать свои стратегии. Кроме того, ИИ улучшает логистику и цепочки поставок, оптимизируя маршруты доставки и управление запасами на основе реального времени и прогнозируемого спроса. Это помогает снизить издержки, улучшить сервис и повысить уровень удовлетворенности клиентов. В будущем развитие ИИ приведет к углубленной интеграции с Интернетом вещей (IoT), автономным операциям и прогнозированию и адаптации. Благодаря этому, компании смогут быть на шаг впереди конкурентов и оптимизировать свои операции, повышая общую производительность и конкурентоспособность.

2. Улучшение принятия решений: аналитические возможности ИИ действительно помогают принимать более обоснованные решения на основе больших данных в рамках цифровизации бизнес-операций:

- *Улучшение обслуживания клиентов:* ИИ используют для персонализации клиентского обслуживания на основе исторических данных о клиентах. Это повышает уровень удовлетворенности и лояльности клиентов.

- *Оптимизация логистики и цепочек поставок:* ИИ анализирует паттерны потребления и прогнозирует потребности в материалах, оптимизируя закупки и управление запасами.

- *Управление рисками:* ИИ предсказывает потенциальные риски и проблемы, позволяя предпринимать профилактические меры заранее.

- *Автоматизация подбора персонала:* ИИ автоматически анализирует данные и резюме, чтобы быстро идентифицировать наиболее подходящих кандидатов для работы.

3. Персонализация обслуживания: ИИ-технологии, такие как машинное обучение и обработка естественного языка, позволяют создавать персонализированные предложения для клиентов:

- *Прогнозирование и адаптация:* ИИ анализирует большие объемы данных и выявляет закономерности, что помогает компаниям адаптироваться к изменениям на рынке и оптимизировать свои стратегии.

- *Интеграция с интернетом вещей (IoT):* ИИ интегрируется с устройствами IoT, такими как датчики и сенсоры, для сбора данных и анализа информации в режиме реального времени. Это дает возможность компаниям получать более точную информацию о потребностях клиентов и оптимизировать свои продукты и услуги.

- *Автономные операции:* ИИ используется для разработки автономных систем, способных выполнять задачи без участия человека. Это снижает риск ошибок, связанных с человеческим фактором, и повышает эффективность операций.

4. Снижение затрат: автоматизация процессов с использованием ИИ помогает снижать затраты, так как освобождает сотрудников от рутинной работы и повышает производительность.

- *Улучшение качества продукции и услуг:* ИИ может быть использован для мониторинга и анализа отзывов клиентов, а также для выявления и устранения недостатков в продуктах и услугах. Это повышает удовлетворенность клиентов и улучшает репутацию компании.

- *Безопасность и защита данных:* ИИ применяется для обнаружения и предотвращения кибератак, мошенничества и других угроз безопасности. Это помогает защитить конфиденциальные данные клиентов и предотвратить финансовые потери для компании.

• *Развитие новых продуктов и услуг*: ИИ анализирует данные и выявляет новые возможности для развития бизнеса. Это помогает компаниям предлагать инновационные продукты и услуги, которые привлекут новых клиентов и увеличат прибыль.

Вызовы внедрения искусственного интеллекта в цифровизацию бизнес-операций представляют собой:

1. Технические сложности: внедрение ИИ требует значительных инвестиций в инфраструктуру, включая мощные вычислительные ресурсы и специализированное программное обеспечение. Кроме того, необходимо обучать персонал для работы с новыми технологиями, что также требует времени и ресурсов.

2. Этические вопросы: использование ИИ поднимает множество этических вопросов, таких как конфиденциальность данных, прозрачность алгоритмов и потенциальная дискриминация. Компании должны разрабатывать и внедрять этические нормы и стандарты для использования ИИ, чтобы избежать негативных последствий.

3. Сопротивление изменениям: сотрудники могут сопротивляться внедрению новых технологий из-за страха потери работы или изменения привычных рабочих процессов. Важно проводить обучение и разъяснительную работу, чтобы помочь сотрудникам адаптироваться к изменениям.

4. Качество данных: для эффективного функционирования ИИ необходимы большие объемы качественных данных. Недостаток или низкое качество данных может привести к ошибкам в работе ИИ-систем и снижению их эффективности.

5. Безопасность: ИИ-системы могут быть уязвимы для кибератак и других угроз безопасности. Компании должны обеспечивать надежную защиту своих ИИ-инфраструктур и данных, чтобы предотвратить возможные инциденты.

6. Регуляторные ограничения: в разных странах существуют различные регуляторные требования и ограничения, касающиеся использования ИИ. Компании должны учитывать эти требования при внедрении ИИ, чтобы избежать юридических проблем.

Будущие тенденции предполагают:

1. Развитие автономных систем: будущее ИИ связано с развитием автономных систем, способных принимать решения без вмешательства человека.

2. Интеграцию ИИ с другими технологиями: сочетание ИИ с технологиями Интернета вещей (IoT) и блокчейна откроет новые возможности для бизнеса.

3. Этичное использование ИИ: важным аспектом станет разработка этических норм и стандартов для использования ИИ.

Таким образом, использование искусственного интеллекта в цифровизации бизнес-операций открывает широкие возможности для повышения эффективности и конкурентоспособности компаний. Однако для успешного внедрения ИИ необходимо учитывать технические, этические и организационные аспекты.

УДК 620

ПРОМЫШЛЕННЫЕ СЕТИ В УСЛОВИЯХ КИБЕРУГРОЗ

Т. К. Эбердиева, Дж. Г. Агамырадова, А. Г. Реджебова

Государственный энергетический институт Туркменистана, г. Мары

Рассмотрены методы повышения безопасности промышленных сетей и систем управления. Отмечено, что один из основных шагов на пути к безопасной промышленной сети – ее сегментация, создание безопасных зон и определение защищенных путей передачи данных между ними. Показано, что при этом необходимо строго регламентировать, какие

данные должны передаваться, и кто имеет к ним доступ. Также выделен тот факт, что для обеспечения защиты промышленного сектора следует применять технологии и решения, специально разработанные именно для него.

Ключевые слова: кибербезопасность, Интернет, промышленные сети, Ethernet, АСУ ТП.

INDUSTRIAL NETWORKS IN THE CONTEXT OF CYBER THREATS

T. K. Eyeberdieva, J. G. Agamyradova, A. G. Redzhebova

State Energy Institute of Turkmenistan, Mary

This article discusses methods for improving the security of industrial networks and control systems. One of the main steps towards a secure industrial network is its segmentation, creation of secure zones and definition of protected data transmission paths between them. At the same time, it is necessary to strictly regulate what data should be transmitted and who has access to it. It is also necessary to highlight the fact that in order to ensure the protection of the industrial sector, it is necessary to use technologies and solutions specially developed for it.

Keywords: cybersecurity, Internet, industrial networks, Ethernet, APCS.

В условиях поточного производства промышленное оборудование работает в непрерывном режиме с минимальными периодами простоя и временем жизни от 10 до 20 лет. Для повышения уровня кибербезопасности сети технологического оборудования, используемого в поточном производстве, замена оборудования – невыгодный вариант. Важно применять технологии и решения, предназначенные именно для промышленного сектора.

Межсетевые экраны – необходимый элемент для сегментации сети. Для использования на промышленном предприятии устройства должны иметь промышленное исполнение и функции. По своему назначению промышленные межсетевые экраны можно разделить на два вида: устройства, применяемые на границе сети, и устройства для защиты производственных ячеек. Одни предназначены для отделения промышленного сегмента от офисной или корпоративной сети. Вторые позволяют сегментировать промышленную сеть и наделены специальными функциями, призванными обезопасить промышленные протоколы. Применяемая в них технология глубокого анализа пакетов DPI (Deep Packet Inspection) дает возможность обезопасить техпроцессы от вредоносного ПО, передаваемого в пакетах, разрешенных классическим брандмауэром.

В промышленных сетях особо важных объектов, требующих применения технологий резервирования, высокоточной синхронизации времени, контроля полосы пропускания и применения средств сетевой безопасности, должны использоваться управляемые коммутаторы. Однако существует много гораздо менее требовательных задач, решение которых можно возложить на неуправляемые устройства.

Большинство жилых зданий не имеет специально приспособленного помещения для установки коммуникационного оборудования, поэтому его размещение часто носит стихийный характер. Коммутаторы устанавливаются на чердаках, в подвалах, плохо отапливаемых помещениях. Вместе с тем компьютерное и сетевое оборудование для домашнего использования давно оснащается портами Gigabit Ethernet, поэтому вполне логично использовать для предоставления услуг широкополосного доступа к сети Интернет гигабитные каналы передачи данных. В коммутаторе применяется неблокируемая архитектура, что позволяет длительное время эксплуатировать его при полной загрузке каналов (например, если большинство жителей дома вдруг решат посмотреть по выделенному каналу футбольную трансляцию). Расширенный диапазон

рабочих температур дает возможность установить устройство в нежилом помещении. Коммутатор не требует настройки и удаленного администрирования. Выпускается версия с 16 комбинированными портами RJ-45/SFP, поэтому при необходимости сеть легко масштабируется на любые расстояния с применением оптических кабелей и сменных оптических модулей. Преимущество SFP-портов также в том, что они повышают ремонтпригодность и сокращают время простоя сетей: вышедший из строя модуль легко заменить новым.

Также данный коммутатор можно применять при автоматизации технологических процессов, нетребовательных ко времени восстановления сети после сбоя и не предъявляющих требований к безопасности сети и эффективному управлению потоками данных.

Для достижения быстрых результатов с минимальными затратами клиенты могут придерживаться пошагового подхода. Для этого необходимо следующее: идентифицировать пробел в системе обеспечения безопасности, который может привести к наиболее серьезным для предприятия последствиям; выявить конкретные производственные зоны, с которыми эти последствия связаны; описать наиболее серьезные уязвимости в данной области; минимизировать или устранить эти уязвимости.

Обеспечив безопасность наиболее критической зоны, компания сможет перейти к устранению уязвимостей в другой области. Такой сфокусированный пошаговый подход позволит избежать необходимости менять всю систему сразу и избавит от связанного с этой задачей «аналитического ступора». Он не только гарантирует, что немедленно будут устранены проблемы, ведущие к серьезным последствиям для деятельности предприятия, но и не даст «распылять» силы и средства, т. е. добиться максимального результата от инвестиций.

Реализация системы информационной безопасности АСУ ТП представляет собой комплексную задачу. Ее решение зависит от выполнения правил на всех уровнях: административный – формирование руководством программы работ по информационной безопасности; процедурный – определение норм и правил для персонала, обслуживающего сеть; программно-технический – управление доступом; обеспечение целостности; обеспечение безопасного межсетевого взаимодействия; антивирусная защита; анализ защищенности; обнаружение вторжений; непрерывный мониторинг состояния, выявление инцидентов, реагирование.

Системы контроля уязвимостей – один из эффективных методов противодействия промышленным киберугрозам. Это узкопрофильные программы, разработанные специально для промышленных систем автоматизации. Они позволяют определить целостность внутренней среды устройства, зафиксировать все попытки изменить прикладную программу контроллера, изменения в конфигурации сетевых устройств защиты и управления в энергосетях.

Появление новых стандартов, таких как МЭК 61850 в области энергетики, отражает необходимость приведения нормативной базы в соответствие с новыми реалиями и техническими решениями, а также проникновение технологий Ethernet в эту область. Новые стандарты резервирования (IEC 62439), позволяющие обеспечить нулевое время восстановления после сбоя и гарантированную доставку информации, применяются для построения сетей промышленных предприятий и, в частности, внедряются на объектах энергетики. Появление новых коммутаторов с поддержкой технологии PoE и рост бюджета мощности обеспечивают расширение сфер их применения и функциональности систем управления и безопасности. Увеличение скоростей передачи данных расширяет области применения коммутационной техники, повышает качество обслуживания объектов и пользователей и дает возможность

масштабировать сети без потерь и задержек данных. Также гигабитные сети стали, очевидно, доступнее. Появление новых технических решений и устройств для защиты сетевой инфраструктуры АСУ ТП, улучшение методик и подходов к сетевой безопасности, их стандартизация и сертификация позволяют создать системы, устойчивые к негативным внешним и внутренним воздействиям. Постоянное совершенствование программной и технической составляющей сетевых устройств, выпуск новых версий ПО, его регулярное обновление и установка патчей способствуют повышению безопасности и расширяют функциональные возможности устройств связи.

Успешная кибератака на промышленную систему может повлечь за собой производственные потери, урон системе безопасности и окружающей среде, кражу интеллектуальной собственности, включая информацию из корпоративной сети предприятия. Также взлом промышленного сегмента сети образует «дверь» в общую корпоративную сеть предприятия.

Организациям стоит изучить свои информационные активы, определить слабые места и возможные угрозы. В первую очередь, необходимо установить возможные события, которые недопустимы для функционирования бизнеса, и регулярно проводить верификацию таких событий на практике с помощью тестирования на проникновение или размещения цифровых двойников на киберполигонах. Такой подход поможет выстроить систему комплексной защиты и мониторинга, которые не позволят злоумышленникам нанести ущерб организации и ее клиентам. Из-за тенденции к нарушению основной деятельности промышленных организаций с помощью различного ВПО (шифровальщики, вайперы) решения резервного копирования позволят быстро восстановиться, если атака все-таки достигла своей цели. Важно помнить о влиянии человеческого фактора на успешность кибератак и проводить мероприятия для повышения бдительности и осведомленности в сфере кибербезопасности, а также обучение по противодействию атакам методами социальной инженерии.

Результативная кибербезопасность в электроэнергетике. Системы кибербезопасности следует увязывать с технологическими системами управления и ИТ-системами. На промышленных предприятиях нужно разработать процессную модель и регламенты взаимодействия специалистов по ИБ и оперативно-диспетчерского персонала. Они должны видеть единую картину, в которой коррелируются данные об инцидентах в ИТ-инфраструктуре, поведение основного оборудования и события с системой управления. При таком подходе можно добиться того, что недопустимые для индустриального объекта и энергосистемы события станут действительно неосуществимыми.

Л и т е р а т у р а

1. Фаронов, А. Е. Основы информационной безопасности при работе на компьютере / А. Е. Фаронов. – Москва : ИНУИТ, 2016. – 155 с.
2. Добротун, Е. Б. Построение модели угроз безопасности информации в автоматизированной системе управления критически важными объектами на основе сценариев действия нарушителя / Е. Б. Добротун // Программные продукты и системы. – 2016. – № 3. – С. 42–50.
3. Шишов, О. В. Конфигурирование, программирование и работа в сети базовых компонентов систем промышленной автоматизации / О. В. Шишов. – Саранск : ИП В. С. Афанасьев, 2014. – 160 с.

УДК 004.942:612.76

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ЧЕЛОВЕКА

С. Я. Шемсетдинов, М. Ч. Курбансахатов

Государственный энергетический институт Туркменистана, г. Мары

Рассмотрены методы и подходы к компьютерному моделированию двигательных аппаратов человека. Основное внимание уделено разработке и применению математических моделей для анализа и симуляции биомеханических процессов, связанных с движением. Представлены результаты моделирования различных типов движений, включая ходьбу, бег и выполнение сложных координационных задач. Описаны алгоритмы и программные средства, используемые для создания моделей, а также методы верификации и валидации полученных данных. Отмечено применение компьютерного моделирования в медицине и реабилитации, что позволяет улучшить диагностику и лечение заболеваний опорно-двигательного аппарата. Обсуждены перспективы дальнейших исследований и возможные направления развития в данной области.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, биомеханика, двигательные аппараты, математические модели.

COMPUTER MODELING OF HUMAN MOTOR APPARATUS

S. Y. Shemsetdinov, M. Ch. Gurbansahedov

State Energy Institute of Turkmenistan, Mary

In this article methods and approaches to computer modeling of human motor apparatus are considered. The main attention is paid to the development and application of mathematical models for the analysis and simulation of biomechanical processes related to movement. The results of modeling various types of movements, including walking, running and performance of complex coordination tasks are presented. The algorithms and software tools used to create the models, as well as methods of verification and validation of the obtained data are described. Special attention is paid to the application of computer modeling in medicine and rehabilitation, which allows improving the diagnosis and treatment of musculoskeletal diseases. In conclusion, the prospects for further research and possible directions of development in this field are discussed.

Keywords: computer modeling, biomechanics, motor apparatus, mathematical models.

Компьютерное моделирование стало мощным инструментом для изучения сложной системы, которой является человеческий организм, особенно его двигательный аппарат. Благодаря развитию вычислительной техники и появлению специализированного программного обеспечения, ученые получили возможность создавать виртуальные модели, имитирующие движения человека и анализирующие нагрузки на кости, суставы и мышцы. Биомеханика двигательного аппарата человека является важной областью исследований, направленной на понимание механических аспектов движения. Компьютерное моделирование позволяет создавать точные и детализированные модели, которые помогают в изучении и анализе биомеханических процессов.

Основы компьютерного моделирования в биомеханике. Компьютерная модель – это упрощенное представление реального объекта или процесса. В случае с двигательным аппаратом модель представляет собой совокупность математических уравнений, описывающих движение сегментов тела, взаимодействие суставов и работу мышц.

Компьютерное моделирование в биомеханике – это мощный инструмент, позволяющий ученым создавать виртуальные копии человеческого тела или его частей для изучения движения, взаимодействия тканей и воздействия различных нагрузок. Это дает возможность глубже понять функционирование опорно-двигательного аппарата, разрабатывать новые методы лечения и протезирования, а также оптимизировать спортивные тренировки.

Этапы создания модели включают:

1. *Сбор данных*: для создания модели необходимы данные о геометрии тела (размеры костей, расположение суставов), свойствах материалов (костная ткань, хрящ, мышцы) и кинематике движений (траектории суставов во времени). Эти данные получают с помощью различных методов визуализации (МРТ, КТ) и биомеханических измерений.

2. *Создание геометрической модели*: на основе полученных данных создается трехмерная модель скелета, мышц и других тканей.

3. *Разработка математической модели*: разрабатываются уравнения, описывающие движение сегментов тела, взаимодействие суставов и работу мышц.

4. *Проведение симуляции*: модель запускается на компьютере, и ученые могут наблюдать за движением виртуального человека и анализировать результаты.

Применение компьютерного моделирования представляет собой:

- *Анализ движения*: модели позволяют анализировать различные движения человека (ходьба, бег, прыжки) и выявлять причины возникновения травм и заболеваний.

- *Проектирование ортезов и протезов*: компьютерное моделирование используется для разработки индивидуальных ортезов и протезов, оптимизирующих функциональность и комфорт пациента.

- *Оценку биомеханической совместимости имплантатов*: модели позволяют оценить, как имплантаты взаимодействуют с окружающими тканями и предсказать их долговечность.

- *Исследование заболеваний*: компьютерное моделирование помогает изучать механизмы развития различных заболеваний опорно-двигательного аппарата, таких как артрит, остеопороз.

- *Оптимизацию спортивной тренировки*: модели анализируют технику выполнения упражнений и разрабатывают индивидуальные программы тренировок.

Применение в биомеханике. В биомеханике компьютерное моделирование используется для изучения механических свойств биологических тканей и органов, анализа движений и разработки медицинских устройств. Программные пакеты, такие как ADAMS™ и ANSYS™, широко применяются для создания детализированных моделей и проведения вычислительных экспериментов:

- *медицинские устройства*: оптимизация дизайна протезов и ортезов.

- *спортивная наука*: анализ и улучшение спортивных техник.

- *реабилитация*: разработка программ реабилитации для пациентов с двигательными нарушениями.

К основным преимуществам компьютерного моделирования в биомеханике относятся:

- Повышенная точность и детальность, которые подразумевают:

- возможность создания детальных цифровых моделей органов, тканей и систем организма;

- изучение внутренних процессов, недоступных при прямых экспериментах;

- количественную оценку биомеханических параметров (напряжений, деформаций, скоростей).

- Экономичность и безопасность, которые включают:
 - сокращение числа дорогостоящих и трудоемких экспериментов на животных или людях;
 - изучение опасных и экстремальных условий, невозможных в реальной жизни;
 - минимизацию риска для пациентов при планировании хирургических вмешательств.
 - Гибкость и многократное использование моделей, которые подразумевают:
 - возможность быстрого изменения параметров модели и проведения множества симуляций;
 - изучение влияния различных факторов на биомеханические процессы;
 - оптимизацию конструкций медицинских изделий и спортивного инвентаря.
- К визуализации и интерпретации данных относятся:
- наглядное представление сложных биомеханических процессов;
 - упрощение интерпретации результатов моделирования;
 - возможность создания анимаций и видеороликов для обучения и презентации.

Современные тенденции. Современные исследования в области компьютерного моделирования двигательного аппарата человека направлены на следующее:

- *увеличение реалистичности моделей:* учет нелинейных свойств тканей, влияние температуры и влажности на их механические характеристики;
- *разработку многомасштабных моделей:* сочетание моделей на уровне тканей, органов и всего организма;
- *интеграцию с другими методами исследования:* комбинирование компьютерного моделирования с экспериментальными данными, полученными с помощью различных методов визуализации и измерения;
- *использование искусственного интеллекта:* применение методов машинного обучения для автоматизации анализа данных и создания адаптивных моделей.

Компьютерное моделирование открывает новые горизонты в изучении биомеханики человека. Оно позволяет более глубоко понять сложные механизмы движения, разрабатывать новые методы лечения заболеваний и создавать инновационные технологии для улучшения качества жизни людей. Компьютерное моделирование биомеханики двигательного аппарата человека является мощным инструментом для исследования и оптимизации различных биомеханических процессов. В будущем можно ожидать дальнейшего развития этого направления и его интеграции с другими областями науки и техники. Дальнейшие исследования в этой области могут привести к значительным достижениям в медицине, спорте и других областях. Компьютерное моделирование играет все более важную роль в биомеханике, позволяя исследователям получать новые знания о функционировании живых организмов и разрабатывать инновационные решения в различных областях медицины и спорта.

УДК 517.3+004

НАГЛЯДНОСТЬ НА ЗАНЯТИЯХ МАТЕМАТИКИ

М. А. Гундина, Н. А. Кондратьева

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Рассмотрена реализация некоторых встроенных возможностей компьютерной системы Wolfram Mathematica для решения математических задач. Отмечено, что для студентов первого курса раздел «Поверхности второго порядка» является одним из важных

в курсе «Математика» и трудно поддающимся для глубокого усвоения и понимания. В связи с этим представлены примеры использования компьютерной системы на занятиях по дисциплине «Математика».

Ключевые слова: поверхность, компьютерная система Wolfram Mathematica.

VISUALITY IN MATH PRACTICAL LESSONS

M. A. Hundzina, N. A. Kondratyeva

Belarusian National Technical University, Minsk

This article discusses the implementation of some built-in capabilities of the Wolfram Mathematica computer system for solving mathematical problems. The section "Second-order surfaces" is one of the most important in the "Mathematics" course for study by first-year students, which is difficult for deep assimilation and understanding of the material being studied. Examples of using a computer system in a mathematics lesson at school are given.

Keywords: surface, computer system Wolfram Mathematica.

Обучение сопровождается непрерывным творческим поиском со стороны преподавателя новых технологий и новых подходов к презентации учебного материала.

Методы обучения претерпевают непрерывное изменение, широкую роль на занятии начинают играть информационные технологии. Консервативные методы заменяются технологиями, которые позволяют максимально раскрыть потенциал обучающихся.

Для обучения студентов математике одним из наиболее важных принципов является наглядность как определенная форма представления учебного материала. В таком случае в сознании обучающихся образуются определенные образы исследуемого объекта.

Принцип наглядности обучения реализуется при помощи средств наглядности, под которыми понимаются способы, с помощью которых педагог демонстрирует обучающимся объект познания.

К визуальным средствам наглядности относятся иллюстрации, схематические изображения, фотографии.

Так, при изучении темы «Поверхности второго порядка» часто для построения фигур используется метод сечений. Поверхности второго порядка могут быть построены в компьютерной системе Wolfram Mathematica с помощью следующей команды (рис. 1):

```
Plot3D[{x^2+y^2==1,1},{x,-2,2},{y,-2,2}]
```

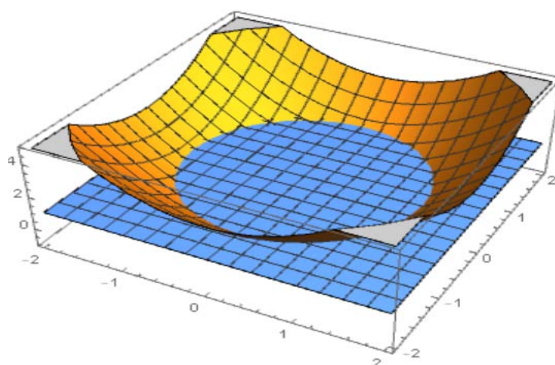


Рис. 1. Пересечение поверхностей

Для наглядности также можно использовать анимированные объекты. Для создания анимации используется встроенная функция `Manipulate` (рис. 2):

```
Manipulate[Plot3D[{x^2+y^2,-x^2-y^2,t},{x,-2,2},{y,-2,2},BoxRatios->Automatic,PlotStyle->{Opacity[0.5],Opacity[0.5],Opacity[0.9]}],{t,-10,10}]
```

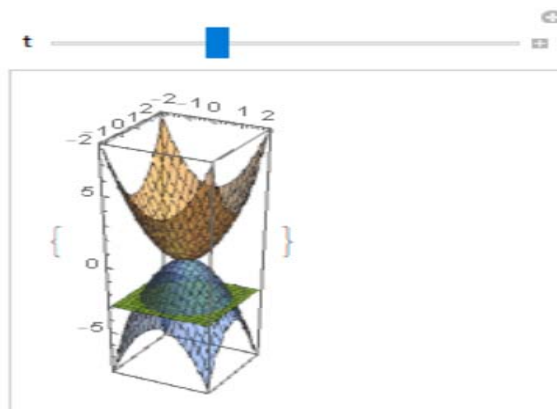


Рис. 2. Анимированные поверхности

Также можно применять интерактивные элементы интерфейса. Рассмотрим следующий пример:

```
PopupView[Table[Plot[Evaluate[f[n]],{t,0,10}],{n,3}]].
```

Результат выполнения команды представлен на рис. 3.

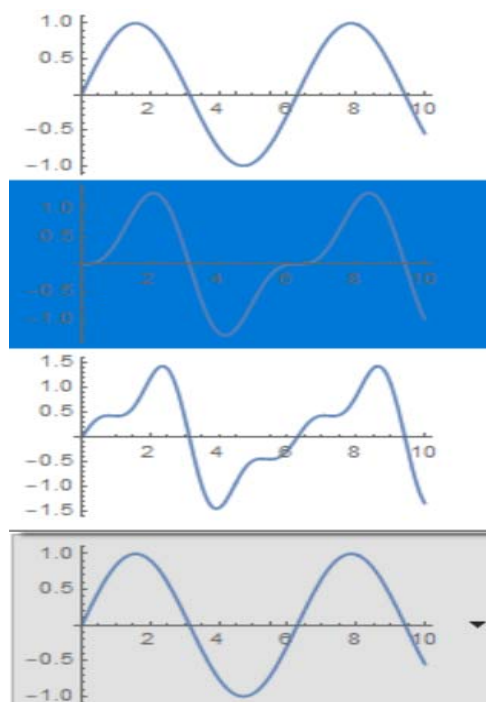


Рис. 3. Графики функций

Использование элементов меню осуществляется с помощью следующей команды:

```
{PopupView[Range[15], Dynamic[n]], Dynamic@Plot[Evaluate[f[n]], {t,-2,2}]}
```

Результат выполнения команды приведен на рис. 4.

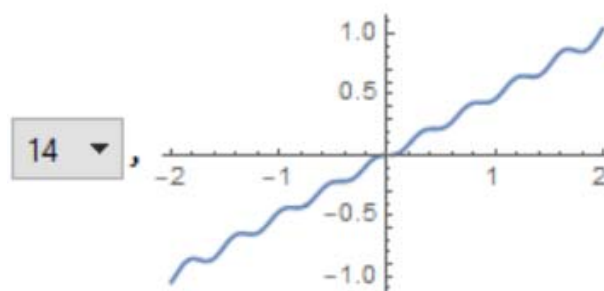


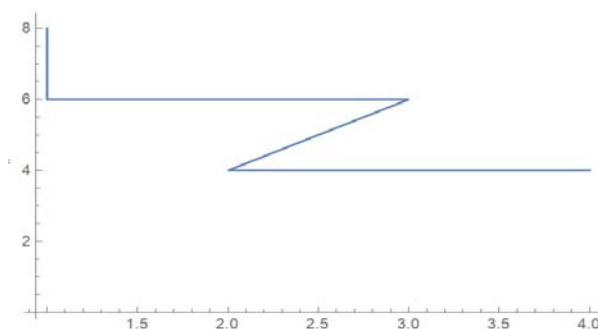
Рис. 4. Графики с использованием элементов меню

В процессе изучения математики наглядные средства образуют фундамент, на основе которого происходит познавательная деятельность обучающихся.

Среди наглядных методов в преподавании математики выделяется метод иллюстрации, позволяющий обучающемуся детально познать объект изучения.

Рассмотрим пример представления по координатам изображения созвездий в системе Wolfram Mathematica. Результат выполнения команд показан на рис. 5.

```
ListPlot[{{1,8},{1,6},{3,6},{2,4},{4,4}},Joined->True,PlotLabel->"Cassiopeia"]
```



```
ListPlot[{{10,1},{8,4},{8,8},{11,6},{12,3}},Joined->True,PlotLabel->"Cepheus"]
```

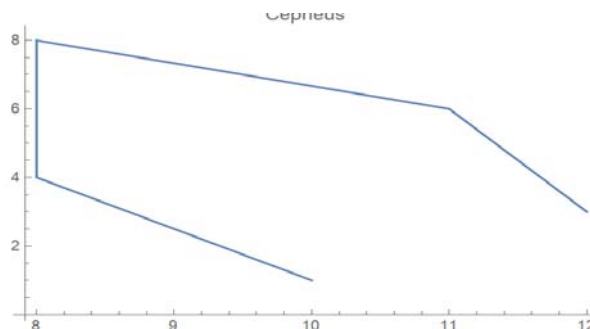


Рис. 5. Код и графическое представление созвездий Cassiopeia и Cepheus

Таким образом, благодаря наглядности в преподавании дисциплины «Математика» у обучающихся формируются конкретные образы воспринятого объекта, повышается мотивация к познавательной деятельности.

Реализация наглядности на основе использования информационных технологий способствует активизации познавательной деятельности учащихся. Использование таких средств обучения на лекционных и практических занятиях облегчает образовательный процесс за счет более понятного, яркого и наглядного представления материала.

УДК 004.42

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ WEB-ПРИЛОЖЕНИЙ ДЛЯ ЗАДАННОЙ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

О. Д. Асенчик, В. Ю. Леоненко

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

Описана структура и алгоритмы работы программного комплекса для автоматизированного формирования серверных ASP .NET Core приложений с задаваемой архитектурой на базе настраиваемых шаблонов.

Ключевые слова: Web-приложения, архитектура программного обеспечения, ASP .NET Core, RESTful API, low code.

AUTOMATED FORMATION OF THE WEB-APPLICATIONS FOR A GIVEN SUBJECT AREA

O. D. Asenchik, V. Yu. Leonenko

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The structure and algorithms of software for automatic formation of server ASP.NET Core applications with a specified architecture based on adjustable templates are described.

Keywords: Web applications, software architecture, ASP .NET Core, RESTful API, low code.

Развитие экономики постоянно вызывает рост спроса на сложные программные системы, обеспечивающие надежную и эффективную работу приложений в различных предметных областях. В настоящее время значительная часть используемых в реальном секторе приложений – это Web-приложения. Их разработка, как правило, осуществляется с использованием языков программирования высокого уровня и может быть значительно ускорена с помощью различных фреймворков и библиотек.

Универсальные фреймворки и библиотеки для ускоренного создания web-приложений, предназначенные для использования профессиональными IT-специалистами, можно разделить в зависимости от их назначения на три большие категории. Приведем примеры основных из них с указанием соответствующих языков программирования: фреймворки для web-разработки широко профиля: Spring Boot (язык Java), ASP.NET Core (язык C#, платформа .NET), Ruby on Rails (язык Ruby), Django (язык Python), Laravel (язык PHP); фреймворки для разработки графических интерфейсов пользователя: React (язык JavaScript/TypeScript), Angular (язык TypeScript), Vue.js (язык JavaScript), Blazor (язык C#, платформа .NET); инструменты для работы с базами данных и API: Entity Framework Core (язык C#, платформа .NET), Hasura (платформа GraphQL), Strapi (Node.js).

Существует также отдельная категория продуктов, применение которых не предполагает постоянное участие IT-специалистов. Они помогают осуществлять визуальное проектирование и автоматическую генерацию приложений. Это так называемые no-code и low-code платформы, позволяющие создавать приложения и автоматизировать бизнес-процессы в заданной предметной области с минимальным или нулевым программированием. Примерами таких платформ являются OutSystems, Mendix, Bubble и др.

Несмотря на преимущества, у no-code и low-code платформ есть ряд проблем и ограничений, таких как техническая и экономическая зависимость от платформы; ограниченная функциональность, производительность и масштабируемость; отсутствие контроля над кодом; ограниченные возможности по безопасности и соответствию ее требованиям; сложность интеграции с более сложными и нестандартными системами, особенно, если они имеют уникальные API или устаревшие технологии.

Поэтому необходимо привлечение IT-специалистов для разработки ряда сложных Web-приложений. Однако многие разработчики, использующие универсальные фреймворки, сталкиваются с проблемами, связанными с созданием сложных серверных приложений на начальных этапах реализации выбранной программной архитектуры и создания базовой оснастки. Создание и настройка приложений, как правило, сопровождаются трудоемкими процессами и многократно повторяющимися однотипными задачами.

Разработка специальных инструментов для более полной автоматизации формирования приложений с заданной архитектурой и заданной предметной области позволит существенно ускорить процесс разработки программного обеспечения (ПО) и повысить его качество.

Цель данной работы – разработка программного комплекса для автоматизированного формирования серверных ASP .NET Core приложений в заданной предметной области и с задаваемой архитектурой. Стек технологий ASP .NET Core в настоящее время благодаря кроссплатформенности, высокой производительности и гибкости стал одним из лидирующих решений для разработки серверных web-приложений и web-сервисов.

Опишем структурные и алгоритмические основы функционирования разработанного программного комплекса (ПК).

Для настройки шаблонов генераторов программных архитектур используется система конфигурационных файлов в формате JSON. При этом осуществлена реализация следующих шаблонов: 3-слойной, «чистой» (clean) и гибридной программных архитектур [1].

Конфигурационные файлы (КФ) для каждой из архитектур содержат настройки и параметры создаваемого Web-приложения [2], что позволяет разработчикам изменять параметры приложения без изменения исходного кода и последующей повторной сборки, компиляции и развертывания приложения. Настройки конфигурации решения располагается в трех секциях: директории решения (solutionFolders); проекты (projects); название проекта, хранящего миграции в БД (migrationProjectName).

Секция solutionFolders КФ сохраняет информацию о директориях, находящихся на уровне решения и хранящих в себе проекты. Данная секция является необязательной. Каждая сущность директории проекта содержит идентификатор (id) и название (name). Идентификатор используется для установления принадлежности определенного проекта к заданной директории.

Секция projects КФ включает список проектов приложения. Каждая сущность проекта состоит из следующих свойств: название (name); тип (type); директории

проекта (directories); зависимости (dependencies); тип корневого контента (rootContentType); идентификатор директории решения (solutionFolderName). Поддерживаются два типа проектов: webapi – серверное ASP .NET Core приложение и classlib – .NET библиотека классов.

Сущность директории проекта включает в себя название (name), родительский каталог (parentPath) и тип контента директории (contentType). В каждой директории могут находиться разные типы контента. Поддерживаются следующие типы контента директорий: класс сущности (EntityClass); класс репозитория (RepositoryClass); интерфейс репозитория (RepositoryInterface); контекст базы данных (DbContext); класс объекта передачи данных (DtoClass); класс конфигурации сопоставления сущностей (MappingProfile); класс сервиса (ServiceClass); интерфейс сервиса (ServiceInterface); Program класс (ProgramClass, ProgramClassWithMediatr); контроллер (Controller, ControllerWithMediatr); расширения сервисов (ServiceExtensions, ServiceExtensionsWithServices); запрос на получение всех сущностей определенной модели (GetAllQuery); запрос на получение сущности по идентификатору (GetByIdQuery); команда создания сущности (CreateCommand); команда обновления сущности (UpdateCommand); команда удаления сущности (DeleteCommand); обработчики запросов (GetAllQueryHandler, GetByIdQueryHandler); обработчики команд (CreateCommandHandler, UpdateCommandHandler, DeleteCommandHandler).

Сущность зависимостей проекта разделяется на пакеты (packages) и ссылки на проекты (projectReferences).

С учетом данных, имеющихся в конфигурационных файлах, ПК запускает и выполняет следующие процедуры: создание проектов и директорий, формирование необходимых проектных зависимостей, формирование классов, добавление строки подключения к СУБД и автоматическое формирование и применение миграций для создания соответствующей базы данных на сервере выбранной СУБД.

Специальная процедура создает настройки шаблона класса и возвращает отформатированную строку, представляющую собой код класса. Для различных типов контента, таких как DTO, репозитории, сервисы и контроллеры, алгоритм использует специфические шаблоны. Например, для классов сущностей вызывается метод, который формирует строку с определениями свойств сущности, основываясь на шаблоне и параметрах сущности. В завершение процесса сгенерированные строки записываются в соответствующие файлы.

Создан таким образом и на тестовых примерах апробирован программный комплекс для автоматизированного формирования серверных приложений на платформе ASP .NET Core с возможностью задания архитектуры. Для разработки ПК были использованы язык программирования C# и платформа ASP .NET.

Разработанный ПК предназначен для настраиваемой генерации проектов (решений) среды разработки Microsoft Visual Studio, реализующих различные современные программные архитектуры, для создания серверных Web-приложений на платформе ASP .NET Core. Он обеспечивает возможность задания описания базовых сущностей (классов) предметной области в визуальном режиме, реализует возможность хранения информации об экземплярах сущностей в база данных Microsoft SQL Server или PostgreSQL, а также генерацию классов для реализации бизнес-логики в виде выполнения типовых операций выборки, вставки, удаления и обновления данных об этих экземплярах. ПК генерирует соответствующие прикладные интерфейсы RESTful API и клиентские средства с использованием инструментов Swagger для доступа к реализации этих операций.

Таким образом, разработанный инструмент автоматизации разработки позволяет специалистам сосредоточиться на решении специфических задач проекта, минимизируя рутинные операции. Кроме того, он может послужить ядром low-code платформы, которая будет генерировать приложения с открытым исходным кодом.

Л и т е р а т у р а

1. Документация Microsoft: Common web application architectures / Microsoft.com. – URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/dotnet/architecture/modern-web-apps-azure/common-web-application-architectures> (дата обращения: 16.09.2024).
2. Репозиторий ApiBuilder на GitHub / GitHub.com. – URL: <https://github.com/Olgasn/ApiBuilder> (дата обращения: 16.09.2024).

УДК 004.942

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ ПЕСКА В ПОТОКЕ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ

М. С. Половцев, В. И. Токочаков

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

Обсуждена важность сушки песка в различных отраслях промышленности и предложено использование компьютерного моделирования для оптимизации этого процесса и повышения его эффективности. Описаны различные этапы создания модели, начиная от определения входных параметров и заканчивая разработкой числовых и вычислительных моделей. Отмечено, что разработанная компьютерная программа позволяет моделировать сушку песка с использованием различных видов топлива. Доступный графический интерфейс дает возможность пользователю управлять моделью и получать статистические результаты для исследования.

Ключевые слова: сушка песка, компьютерное моделирование, оптимизация, математическая модель, компьютерная модель, графический интерфейс.

COMPUTER SIMULATION OF THE SAND DRYING PROCESS IN THE EXHAUST GAS STREAM

M. S. Polovtsev, V. I. Tokochakov

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The report discusses the importance of sand drying in various industries and suggests using computer modeling to optimize this process and increase its efficiency. The paper describes the various stages of model creation, starting from the definition of input parameters and ending with the development of numerical and computational models. The developed computer program allows to simulate sand drying using various types of fuels. An accessible graphical interface allows the user to control the model and obtain statistical results for the study.

Keywords: sand drying, computer modeling, optimization, mathematical model, computer model, graphical interface.

Сушка песка является необходимым этапом подготовки песка для дальнейшего его использования в таких отраслях промышленности, как строительство, нефтегазовая отрасль, металлургия. Оптимизация и повышение эффективности процесса сушки песка позволяют существенно сократить время и затраты на производственные

операции, а также минимизировать негативные воздействия на окружающую среду, связанные с выбросами отходящих газов. Время и затраты на проведение экспериментальных исследований процесса сушки песка могут быть значительными. Компьютерное моделирование помогает промышленным организациям существенно сократить время проведения исследований и предлагает более гибкий и быстрый способ анализа процесса сушки.

Сушка песка осуществляется в специальных установках, называемых сушилками. Существует несколько типов сушилок, различающихся технологией сушки: сушилка кипящего слоя, сушилка виброкипящего слоя, барабанная сушилка. Самым распространенным видом сушилок на сегодняшний день является барабанная сушилка – сушильная установка, в которой удаление влаги происходит за счет использования потока отходящих газов. Сам барабан представляет собой устройство цилиндрической формы с бандажми и лопастями внутри.

Цель работы – компьютерное моделирование процесса сушки песка в потоке отходящих газов. Для моделирования процесса сушки необходимо построить сначала математическую, а затем и компьютерную модели. Построенную модель можно будет использовать для изучения изменения характеристик объектов, участвующих в процессе сушки.

Процесс моделирования любой системы начинается с определения входных параметров. В случае моделирования сушки песка в качестве входных параметров выступают начальная и конечная влажность песка, допустимая температура нагрева песка, относительная влажность атмосферного воздуха, температура атмосферного воздуха, различные характеристики сушилки и топлива [1].

Следующим этапом при моделировании процесса сушки песка является построение математической модели. Основой для создания математической модели процесса сушки песка в потоке отходящих газов становятся два физических закона: закон сохранения энергии и закон сохранения массы [2].

После построения математической модели процесса сушки песка строится компьютерная модель. Компьютерная модель представляет собой систему классов и включенных в них методов, реализующих вычисления, необходимые для моделирования процесса сушки песка [3].

Все классы приложения условно можно разделить на две группы: группа классов, которое представляет собой некий объект, участвующий в процессе сушки, и группа статических классов, представляющих собой совокупность методов для расчета значений разнообразных физических величин, которые применяются для расчета сушки. Процесс моделирования заключается в том, что на основе входных данных происходит расчет характеристик песка, атмосферного воздуха, сушильного агента, сушилки и топлива.

Для комфортной работы с приложением необходимо создать графический интерфейс. Через графический интерфейс пользователь должен иметь возможность управлять процессом моделирования. Также нужно обеспечить приложение справочной информацией, благодаря которой пользователь может получить инструкции для работы с компьютерной моделью. Графический интерфейс приложения представлен на рис. 1.

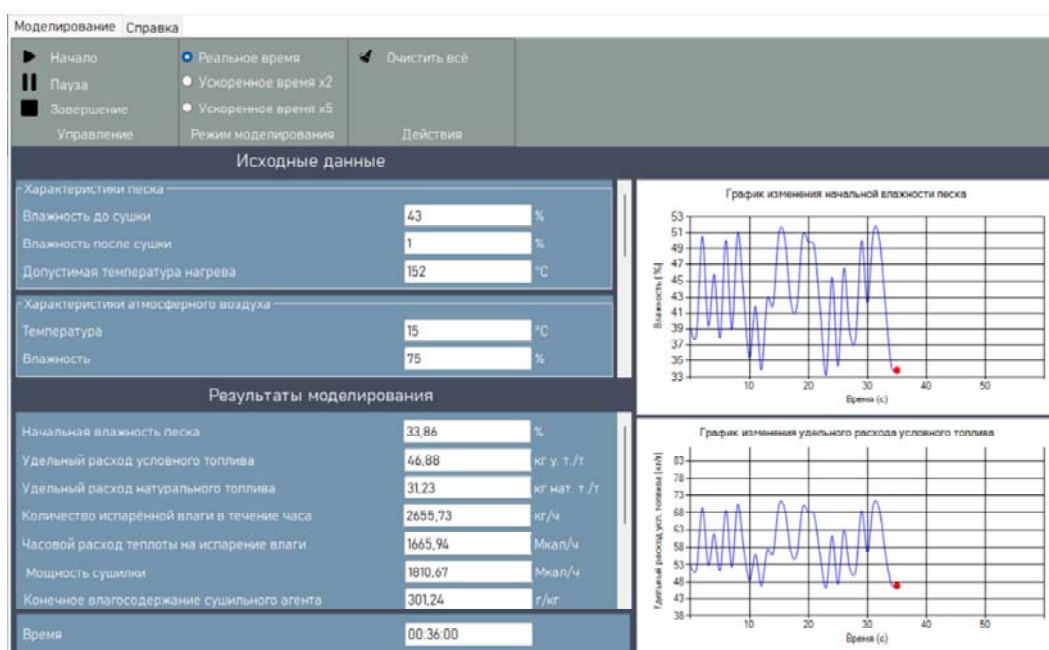


Рис. 1. Графический интерфейс приложения

Результатом выполнения работы является программа компьютерного моделирования процесса сушки песка в потоке отходящих газов. Программа позволяет построить модель сушки песка на основе трех различных видов топлива. Пользователь имеет возможность вводить значения параметров различных объектов, участвующих в процессе сушки, и получать результаты расчета для их последующего изучения. Программа помогает вводить начальную влажность песка в виде динамической переменной с нормальным законом распределения, и на выходе появляется график расхода условного топлива на сушку песка. У пользователя появляется возможность изменять коэффициент масштабирования процесса сушки по времени.

Литература

1. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – Москва : Энергия, 1968. – 472 с.
2. Зализняк, В. Е. Введение в математическое моделирование : учеб. пособие для вузов / В. Е. Зализняк, О. А. Золотов. – Москва : Юрайт, 2023. – 133 с.
3. Албахари, Дж. С# 9.0. Справочник. Полное описание языка / Дж. Албахари. – Санкт-Петербург : Диалектика, 2021. – 1056 с.

УДК 004.89

АДАПТАЦИЯ МЕТОДА ГРАНИЦ КАННИ ДЛЯ ПОДСЧЕТА КОЛИЧЕСТВА БАКТЕРИЙ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ, ПОЛУЧАЕМЫХ С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВОГО МИКРОСКОПА

К. С. Курочка, Ю. С. Башаримов

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

Предложен модифицированный алгоритм Канни для обнаружения и подсчета бактерий на микроскопических изображениях. Подход включает предварительную обработку с контрастной адаптивной эквализацией гистограммы, применение алгоритма Канни, морфологические операции для удаления шумов и артефактов, а также поиск замкнутых

контуров и вычисление центров бактерий для их подсчета. На основе предложенного метода продемонстрирована улучшенная точность обнаружения и подсчета бактерий.

Ключевые слова: обработка изображений, алгоритм Канни, обнаружение границ, подсчет бактерий, микроскопические изображения, CLAHE, морфологические операции, поиск контуров.

ADAPTATION OF THE CANNY BOUNDARY METHOD FOR BACTERIAL COUNTS IN DIGITAL MICROSCOPE IMAGES

K. S. Kurochka, Yu. S. Basharymau

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

A modified Canny algorithm is proposed for detecting and counting bacteria in microscopic images. The approach includes preprocessing with contrast limited adaptive histogram equalization, applying the Canny algorithm, morphological operations for noise and artifact removal, as well as finding closed contours and calculating bacteria centers for counting. The proposed method demonstrates improved accuracy in detecting and counting bacteria.

Keywords: image processing, Canny algorithm, edge detection, bacterial counting, microscopic images, CLAHE, morphological operations, contour detection.

При производстве сельскохозяйственных культур необходима обработка бактериальными препаратами, что требует значительных финансовых затрат. Неэффективная обработка, например, использование неверной концентрации бактерий, может привести к потере урожая и необходимости повторной обработки, что влечет дополнительные расходы и временные потери. Для предотвращения таких ситуаций крайне важно иметь методику для экспресс-оценки эффективности препаратов в полевых условиях без привлечения специалистов.

Автоматизация процесса подсчета бактерий с помощью современных цифровых технологий позволит быстро и точно оценивать концентрацию жизнеспособных бактерий в препарате перед обработкой. Это обеспечит правильное применение бактерий, максимизирует их положительное влияние на урожай и минимизирует риски, связанные с неэффективной обработкой [1].

Для автоматизации предлагается использовать метод на основе сегментации изображений, получаемых с помощью цифрового микроскопа. Сегментация – это процесс разделения изображения (рис. 1) на несколько сегментов или областей, каждая из которых представляет отдельный объект или часть объекта [2]. Это важный шаг в различных приложениях, таких как распознавание объектов, отслеживание объектов, анализ медицинских изображений [3] и многих других.

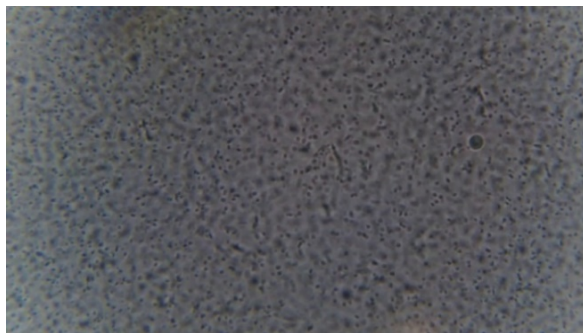


Рис. 1. Исходное изображение

Сегментаторы на основе контуров выделяют границы или контура объектов на изображении, используя операторы обнаружения контуров, затем границы связываются для формирования замкнутых областей, представляющих объекты.

Детекторы контуров (Edge detectors) – одни из самых ранних и широко используемых методов сегментации изображений [4]. Они основаны на поиске резких перепадов интенсивности пикселей, которые могут соответствовать границам объектов.

Алгоритм Канни состоит из следующих основных шагов:

- сглаживание изображения с помощью фильтра Гаусса $G(x, y)$ в точке (x, y) ;
- вычисление градиентов яркости по горизонтали и вертикали с помощью оператора Собеля, G_x и G_y – градиенты по осям x и y соответственно;
- вычисление модуля градиента G и направления градиента θ .

Подавление немаксимумов: для каждого пикселя (x, y) проверяется, является ли его значение модуля градиента $G(x, y)$ максимальным вдоль направления градиента $\theta(x, y)$. Если это не так, то значение $G(x, y)$ обнуляется.

Для повышения эффективности метода границ Канни для подсчета бактерий были внесены соответствующие доработки алгоритма, которые обозначены светло-серым цветом на рис. 2.

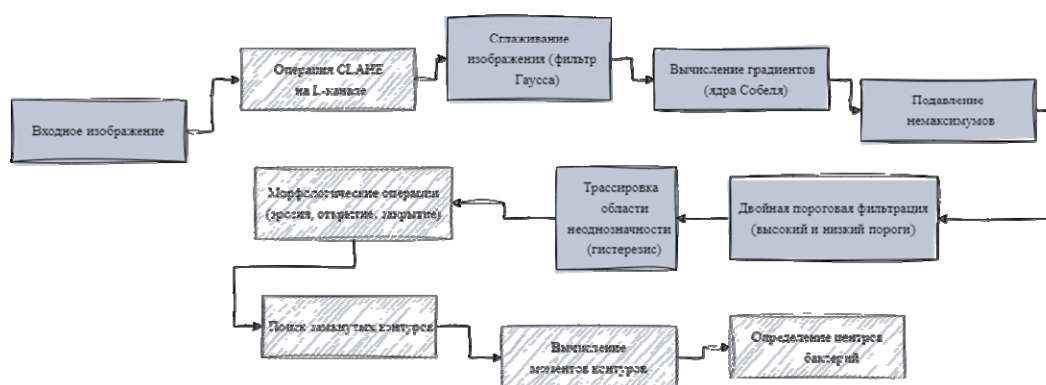


Рис. 2. Доработанный алгоритм Канни

Двойная пороговая фильтрация использует два порога (T_{high}) и (T_{low}) ($T_{high} > T_{low}$). Пиксели с градиентом выше (T_{high}) считаются границами, ниже (T_{low}) – отбрасываются. Пиксели между порогами сохраняются, если связаны с пикселями выше.

Перед применением алгоритма Канни исходное RGB изображение преобразовывалось в LAB пространство для улучшения контраста. На L-канале применялась CLANE для локального увеличения контраста.

Затем использовался алгоритм Канни: изображение сглаживалось, вычислялись градиенты, применялось подавление немаксимумов и двойная пороговая фильтрация для выделения границ.

Далее бинарное изображение обрабатывалось морфологическими операциями (эрозия, открытие, закрытие) для устранения шумов и заполнения разрывов.

После этого находились замкнутые контуры, вычислялись их центры масс и определялось количество бактерий. На рис. 3 показано сравнение стандартного и доработанного алгоритма Канни.

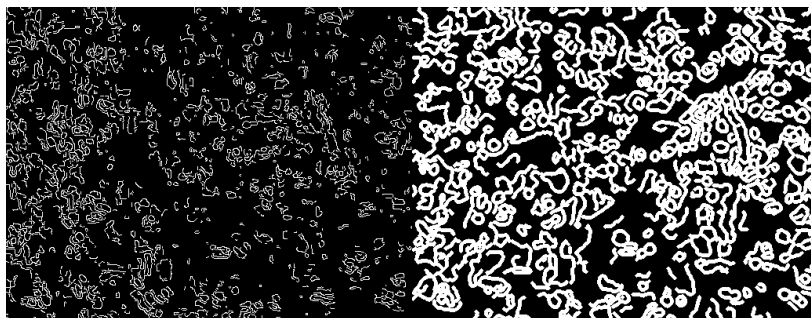


Рис. 3. Сравнение стандартного и доработанного алгоритма Канни

Таким образом, предобработка, алгоритм Канни, морфологические операции и поиск контуров позволили повысить качество выделения границ, убрать шумы и артефакты, а также точно подсчитать число бактерий на изображении.

Литература

1. Определение количества бактерий *Bacillus thuringiensis* на изображениях, полученных с помощью цифрового микроскопа / Современные проблемы математики и вычислительной техники : сб. материалов XIII Республ. науч. конф. молодых ученых и студентов, Брест, 23–24 нояб. 2023 г. / Брест. гос. техн. ун-т ; редкол.: В. А. Головки (гл. ред.) [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2023. – 126 с.
2. Романов, С. А. Анализ методов сегментации изображений / С. А. Романов, О. М. Лепешкин, Ю. П. Стоянов // Молодой ученый. – 2010. – № 6 (17). – С. 26–28.
3. Kurochka, K. S. An algorithm of segmentation of a human spine X-ray image with the help of Mask R-CNN neural network for the purpose of vertebrae localization / K. S. Kurochka, K. A. Panarin // 56th International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies, Sozopol, Bulgaria, 2021. – Sozopol, 2021. – P. 55–58. – DOI 10.1109/ICEST52640.2021.9483467
4. Метод обнаружения контуров на основе весовой модели изображения / З. М. Гизатуллин, С. А. Ляшева, О. Г. Морозов, М. П. Шлеймович // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 3. – С. 393–400.

УДК 004.925.84:62-33

СТАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НА ПРОЧНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОТОТИПА РЕГУЛИРУЮЩЕГО КЛАПАНА «ШТОК» И «ПЛУНЖЕР»

А. Д. Лёвкина

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

В связи с введением на современном этапе развития инженерии и технологий термина системной инженерии, обозначающего направление создания неразборных узловых соединений, предложено использование программного обеспечения SolidWorks, его модулей Simulation, отвечающего за создания файлов анализа, и PropertyManager, предназначенного для определения видов контактов между моделями, для решения статического анализа сборочного узла на примере связи компонентов «шток» и «плунжер» прототипа регулирующего клапана. Отмечено, что полученные в ходе изучения вопроса показатели являются удовлетворительными для исследуемых деталей. Сделан вывод о том, что сложный статический анализ для комплекса деталей можно проводить при помощи используемого в работе программного обеспечения.

Ключевые слова: SolidWorks, статический анализ, компоненты узла, Simulation, PropertyManager.

STATIC ANALYSIS OF THE STRENGTH OF THE ELEMENTS OF THE PROTOTYPE CONTROL VALVE “STEM” AND “PLUNGER”

A. D. Levkina

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

In connection with the introduction of the term system engineering at the present stage of engineering and technology development, denoting the direction of creating non-removable nodal connections, it is proposed to use the SolidWorks software, its Simulation modules responsible for creating analysis files, and PropertyManager, designed to determine the types of contacts between models, to solve the static analysis of an assembly assembly using the example of a bundle of components “stem” and “plunger” of the prototype control valve. The indicators obtained during the study of the issue are satisfactory for the studied parts, which allows us to conclude that a complex static analysis for a complex of parts can be carried out using the software used in the work.

Keywords: SolidWorks, static analysis, node components, Simulation, PropertyManager.

На этапе развития современного мира инженерная индустрия переживает революцию благодаря многим технологическим инновациям, в частности, такой, как компьютерное моделирование, которое открывает множество перспектив в проектировании деталей и изделий. Упрощает технологию изготовления деталей, позволяя избежать многих ошибок при помощи использования различных модулей и программ, помогающих смоделировать в виртуальной среде саму деталь, работающий узел, их движения, различные анализы (статический, динамический).

Статический анализ используется для определения перемещений, напряжений, деформаций и усилий, возникающих в конструкции или ее составных частях при действии нагрузок, не сопровождающихся процессами рассеяния энергии или появлением существенных инерционных эффектов. Это один из основных анализов, проводимых для любых проектируемых деталей.

В инженерии на последних этапах развития все чаще стал употребляться термин системная инженерия, что обусловлено получением популярности у направления создания неразборных узловых соединений. Такой подход поставил под вопрос необходимость проведения анализов и вычислений для сборки нескольких компонентов в одном файле.

Цель работы – в связи с комплексным подходом к решению конструкторских задач необходимо проведение статического анализа комплекса деталей в одном файле.

Методы исследований. Для проведения различных анализов трехмерных моделей деталей используются такие программы, как ANSYS и STAR-CD[4], SolidWorks.

SolidWorks [1] – программный комплекс САПР для автоматизации работ промышленного предприятия на этапах конструкторской и технологической подготовки производства. Обеспечивает разработку изделий любой степени сложности и назначения. Работает в среде Microsoft Windows.

Одной из используемых для проведения анализов оценки прочности разработанной конструкции по допускаемым напряжениям, определения наиболее уязвимых мест конструкции является программа SolidWorks, в частности, модуль Simulation.

Данный модуль позволяет создать файл анализа любого вида для рассматриваемого объекта. Для того чтобы начать статический анализ детали, задается материал, характеристики которого предварительно занесены в виртуальную библиотеку материалов. Затем в модели задаются участки характерного закрепления в местах мнимого присоединения элементов и добавляются внешние нагрузки в местах действия сил, обусловленных условиями эксплуатации и положением детали в механизме.

После задания необходимых параметров в программном модуле задается сетка и ее точность, непосредственно влияющая на точность расчета и дальнейшего анализа. Разбиение модели детали сеткой – наглядная демонстрация применения метода конечных элементов в программе.

Метод конечных элементов (МКЭ) представляет собой численный метод приближенного решения краевых (граничных) задач, имеющих место в технике и математической физике.

Программное обеспечение, которое было рассмотрено ранее, позволяет производить анализ не только одной определенной модели детали, но и системы деталей с прямым зацеплением.

Результаты исследований. Для проведения статического анализа на прочность элементов прототипа регулирующего клапана «шток» и «плунжер» [3] были разработаны трехмерные модели [5] каждой из данных деталей.

Между данными деталями регулирующего клапана образуется глухое (несквозное) сопряжение, получаемое при помощи соединения деталей резьбой.

Сопряжения создают геометрические взаимосвязи между компонентами сборки. При добавлении сопряжений следует определить допустимые направления линейного или вращательного движения компонентов. Можно перемещать компонент в пределах его степеней свободы, наблюдая за поведением сборки.

Сопряжения решаются вместе системно. Последовательность, в которой добавляются сопряжения в группу, значения не имеет; все сопряжения решаются одновременно. Можно погасить сопряжение так же, как и погасить элемент.

Объединение моделей дает основание рассматривать нагружение деталей в одном статическом анализе [2].

Для этого создается отдельный файл сборки двух моделей деталей, которая производится путем добавления различных сопряжений между соприкасаемыми компонентами (в частности, совпадение осей цилиндров отверстия и ответной детали, совпадение оснований деталей и совпадение поверхностей резьбы) (рис. 1).

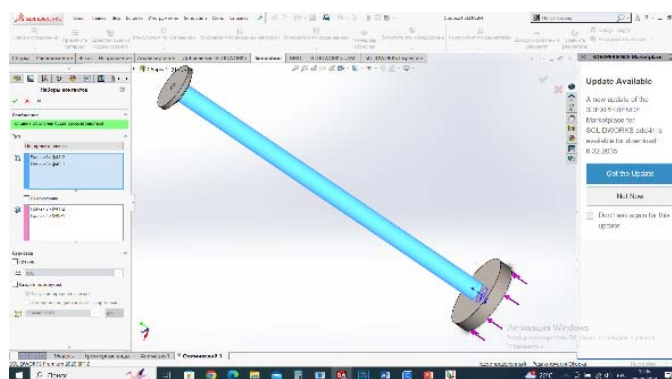


Рис. 1. Создание набора контактов между деталями, приложение нагрузки

Тело, когда к нему применяются нагрузки, деформируется и воздействие нагрузок передается через все тело. Внешние нагрузки включают в себя внутренние силы и реакции, которые компенсируют воздействие и возвращают тело в состояние равновесия. Линейный статический анализ рассчитывает силы перемещений, напряжения, нагрузки и реакции при воздействии приложенных нагрузок.

При задании данных нагрузки в случае проведения анализа сборки дополнительно учитываются типы и параметры контактов между деталями, так как это влияет на распределение нагрузки и последующую деформацию трехмерной модели.

Исходя из данных регулировочного клапана, можно сделать вывод о том, что на корпус действует давление, значение которого равняется 1,6 МПа, оказываемое скапливающимся газом (жидкостью) на внутренние стенки нижнего рукава корпуса.

Такое же давление оказывает газ (жидкость) на плунжер, выталкивая его и приводя механизм в действие (100 Н).

Так как между плунжером и штоком глухое сопряжение, за счет чего они рассматриваются в одном анализе как сборка, на шток передается та же сила, что прикладывается к плунжеру (100 Н).

Для определения видов контактов между двумя деталями используется такой модуль программы SolidWorks, как PropertyManager. Если сборка моделей деталей была создана правильно, с соблюдением всех условий соединения компонентов, то данный модуль самостоятельно ищет возможные места контактов, из которых можно выбрать необходимые. Если модуль не зафиксировал необходимое место создания контакта, его можно выбрать при помощи дополнительной команды с учетом ограничений привязки (рис. 1).

После добавления контактов для компонентов анализа и определения уровня их взаимодействия задаются условия нагружения (в данном случае давление газа (жидкости) будет осуществляется на плунжер, который передает нагрузку на шток).

После задания нагрузок на модель накладывается сетка с заданной точностью разбиения. На рис. 2 представлены результаты проведенного статического анализа.

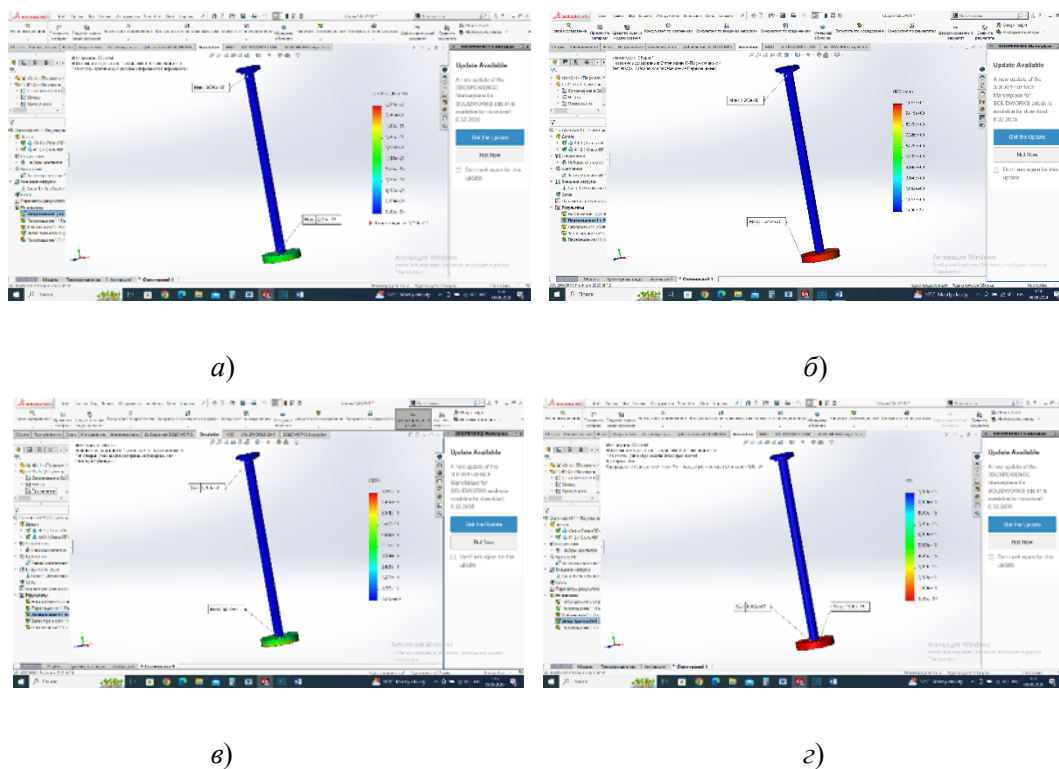


Рис. 2. Результаты НДС поверхности сборки деталей «Шток» и «Плунжер»:

а – напряжения по Мизесу, Па; б – перемещение, мм; в – относительная деформация, %; з – коэффициент запаса прочности

Таким образом, принимаемое значение коэффициента запаса прочности составляет $6,1 \cdot 10^7$ единиц (рис. 2, з); наибольшие напряжения и деформация сосредоточены на детали «Плунжер» (непосредственное место приложения нагрузки); максимальное значение перемещений равно 10,47 мм. Данные показатели являются удовлетворительными для исследуемых деталей. Это позволяет сделать вывод о том, что сложный статический анализ для комплекса деталей можно проводить при помощи программного обеспечения SolidWorks, модуль Simulation.

Автор выражает признательность научному руководителю старшему преподавателю Позднякову Е. П. за оказанную помощь при проведении данного исследования.

Литература

1. Алямовский, А. А. SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи / А. А. Алямовский. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2012. – 448 с.
2. Солдатов, А. В. Статический анализ детали «вал» с применением программы твердотельного моделирования Solidworks / А. В. Солдатов // Взгляд молодых на проблемы региональной экономики – 2015 : материалы Всерос. открытого конкурса студентов вузов и молодых исследователей, Тамбов, окт. 2015 г. / ФГБОУ ВПО «ТГТУ». – Тамбов, 2015. – С. 211.
3. Трубопроводная арматура с автоматическим управлением: Т77 : справочник / Д. Ф. Гуревич, О. Н. Заринский, С. И. Косых [и др.] ; под общ. ред. С. И. Косых. – Ленинград : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. – 320 с.
4. Шимановский, А. О. Моделирование перетекания жидкости в резервуаре с использованием программных комплексов ANSYS и STAR-CD / А. О. Шимановский, А. В. Пулято // Вестник Уральского государственного технического университета–УПИ. – 2005. – № 11. – С. 103–110.
5. 3D-модель как основной источник данных при организации совместной работы при проектировании, технологической подготовке производства, изготовлении, эксплуатации / И. А. Кольцова, В. И. Козлов, Н. В. Грудина, Е. П. Поздняков // Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра : сб. тез. докл. 4-й Междунар. науч.-практ. конф., Гомель, 4 нояб. 2020 г. / НТЦК ОАО «Гомсельмаш». – Гомель, 2021. – С. 81–90.

УДК 004.93'11

АЛГОРИТМ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА КТ-ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОЗВОНОЧНИКА ЧЕЛОВЕКА С ПРИМЕНЕНИЕМ ВАРИАЦИОННОГО АВТОКОДИРОВЩИКА

К. С. Курочка, А. С. Житко

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

Предложен алгоритм улучшения качества КТ-изображений позвоночника человека с применением модели машинного обучения на основе вариационного автокодировщика (VAE). Модель VAE разработана для уменьшения шума и артефактов, повышения контрастности и четкости изображений. Описаны этапы подготовки данных, архитектура модели и результаты тестирования. Апробация показала, что предложенный подход обеспечивает улучшение качества изображений с высокой скоростью обработки.

Ключевые слова: КТ-изображения, вариационный автокодировщик, машинное обучение, улучшение изображений, позвоночник.

ALGORITHM FOR IMPROVING THE QUALITY OF HUMAN SPINE CT IMAGES USING VARIATIONAL AUTOENCODER

K. S. Kyrochka, A. S. Zhitko

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The thesis proposes an algorithm for improving the quality of human spinal CT images using a machine learning model based on a variational autoencoder (VAE). The VAE model is designed to reduce noise and artifacts while enhancing the contrast and clarity of images. The article outlines the data preparation stages, the model architecture, and the results of system testing. Experiments have shown that the proposed approach improves image quality with high processing speed.

Keywords: CT images, variational autoencoder, machine learning, image enhancement, spine.

Компьютерная томография (КТ) является одним из основных методов визуализации позвоночника, позволяя получать детализированные изображения анатомических структур. Однако КТ-изображения часто страдают от наличия шумов и артефактов, что затрудняет диагностику. Использование нейронных сетей для постобработки изображений, включая снижение уровня шума и повышение четкости, позволяет существенно повысить визуальное качество данных, обеспечивая более точные и надежные результаты в задачах медицинской визуализации и диагностики.

Помимо улучшения двумерных изображений качественная очистка данных позволяет использовать результаты для более сложных задач, таких как трехмерная реконструкция позвоночника [1]. После того как шумы и «артефакты» устранены, улучшенные КТ-изображения можно использовать для построения точных 3D-моделей анатомических структур позвоночника, что особенно важно для планирования хирургических операций и проведения сложных медицинских манипуляций.

В рамках работы выполнено несколько этапов, направленных на создание системы улучшения качества КТ-изображений позвоночника человека. В первую очередь, был сформирован набор данных для обучения, который включал более 1500 КТ-изображений позвоночника в формате DICOM. Эти изображения были преобразованы в формат PNG для удобства дальнейшей обработки и анализа. Для обеспечения разнообразия представленных данных проводился тщательный отбор изображений, содержащих различные типы патологий позвоночника. Данные были получены из медицинских архивов пациентов, которые проходили лечение, что позволило создать репрезентативный набор для обучения модели.

Следующим шагом являлась предобработка данных, которая включала несколько ключевых процедур. Все изображения были нормализованы и отмасштабированы до разрешения 256×256 пикселей. Этот этап был необходим для обеспечения единообразия входных данных, что способствует более эффективному обучению модели. В процессе предобработки также был применен пороговый фильтр, который позволял улучшить видимость важных структур на КТ-изображениях. Фильтр снижал уровень шума и увеличивал контрастность, что делало изображения более пригодными для анализа. Такой подход позволял автоматически выделить ключевые области на изображениях, что впоследствии оказывало положительное влияние на результаты работы модели.

Для решения задачи улучшения качества КТ-изображений существует множество архитектур машинного обучения, таких как сверточные нейронные сети (CNN), генеративно-сопоставительные сети (GAN) и вариационные автокодировщики (VAE) [2]. На этапе разработки была выбрана архитектура модели, схема которой приведена на рис. 1.

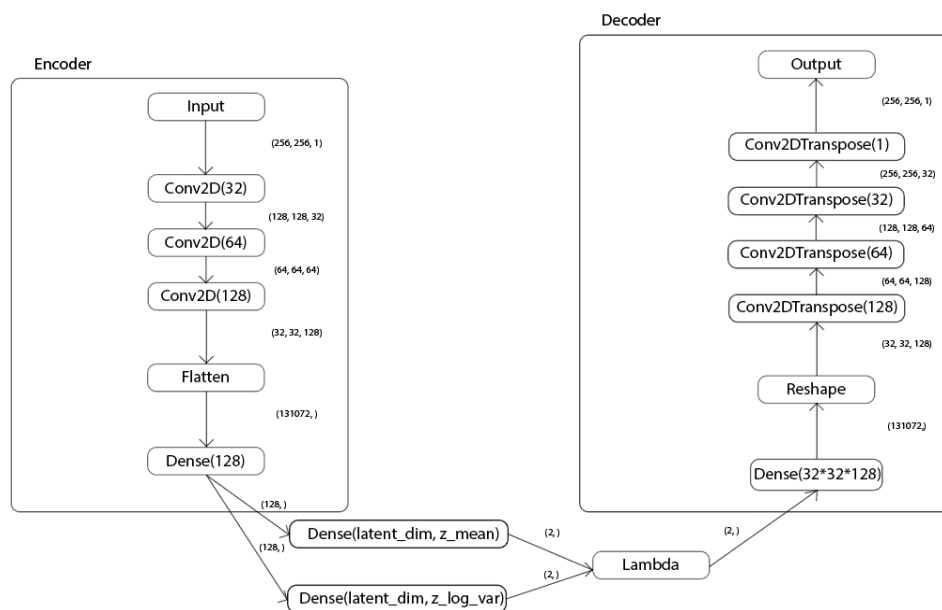


Рис. 1. Архитектура нейросетевой модели вариационного автоэнкодера

Архитектура автокодировщика состоит из двух основных компонентов: энкодера и декодера. Энкодер предназначен для преобразования входных изображений в скрытое латентное пространство, где ключевые признаки изображений кодируются в виде компактных представлений. Это пространство позволяет моделировать вероятностное распределение данных и находить скрытые закономерности. Декодер, в свою очередь, отвечает за восстановление изображения из этого латентного пространства. Он создает новые изображения на основе скрытых представлений, при этом улучшая их визуальные характеристики, такие как четкость и контрастность. Этот подход дает возможность существенно уменьшить шумы и артефакты, что особенно важно для медицинской диагностики.

Обучение модели проводилось с использованием фреймворка машинного обучения TensorFlow [3]. Для корректного обучения модели были сформированы три набора данных: обучающий, валидационный и тестовый. Процесс обучения ориентирован на минимизацию расхождений между желаемым и фактическим выходом модели.

В ходе анализа метрик выявлено значительное снижение ошибок при обработке данных. Среднеквадратичное отклонение (MSE) и Kullback-Leibler (KL) дивергенция являются ключевыми показателями в задачах восстановления изображений, и их улучшение подтверждает способность модели эффективно справляться с задачей очистки медицинских изображений. Визуальный анализ результатов (рис. 2) также показал положительные изменения: улучшенные изображения стали обладать более высокой контрастностью и четкостью по сравнению с исходными данными.

Однако при более глубоком визуальном анализе выходных изображений можно заметить эффект чрезмерной обобщенности, когда модель иногда добавляет несущественные детали, такие как отростки на позвоночных телах, даже если их не было на оригинальных изображениях. Это происходит потому, что вариационные автокодировщики (VAE) стремятся обобщить информацию и заполнить пробелы, что иногда приводит к созданию новых артефактов и чрезмерному сглаживанию изображений.

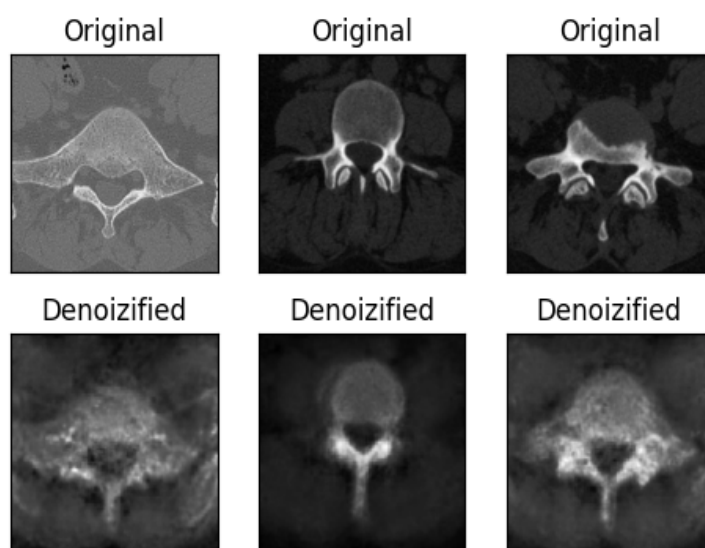


Рис. 2. Результат обработки изображений автокодировщиком

Разработанная система на основе вариационного автокодировщика значительно улучшает качество КТ-изображений позвоночника, что может существенно повысить точность диагностики в клинической практике. В перспективе планируется оптимизация модели для увеличения скорости обработки и улучшения результатов на больших объемах данных. Следует также подчеркнуть, что использование предобученных моделей может быть более эффективным подходом для достижения поставленных задач.

Литература

1. Курочка, К. С. Адаптированные алгоритмы Dual Contouring и Marching Cubes для 3D-реконструкции поясничного отдела позвоночника человека = Adaptation of Dual Contouring and Marching Cubes Algorithms for 3D Reconstruction of the Human Lumbar Spine / К. С. Курочка, Т. С. Семенченя // Доклады БГУИР. – 2023. – Т. 21, № 6. – С. 99–105.
2. Sadia, R. T. CT image denoising methods for image quality improvement and radiation dose reduction / R. T. Sadia, J. Chen, J. Zhang // Journal of Applied Clinical Medical Physics. – 2024. – Vol. 25, N 2. – P. e14270.
3. An Open Source Machine Learning Framework for Everyone / GitHub.com. – URL: <https://github.com/tensorflow/tensorflow> (date of access: 20.09.2024).

УДК 004.932.72'1:74.049

ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ПО ДАННЫМ ПОДВОДНОЙ ВИДЕОСЪЕМКИ

К. С. Горбунов, И. В. Дорощенко

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

Представлено приложение для обнаружения объектов по данным, полученным в результате подводной видеосъемки, в котором пользователь сможет определять объекты при помощи нейронной сети, реализованной на основе модели YOLO.

Ключевые слова: идентификация объектов, определение объектов, нейронная сеть, подводная видеосъемка.

APPLICATION FOR DETECTING OBJECTS FROM UNDERWATER VIDEO DATA

K. S. Gorbunov, I. V. Doroshchenko

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

An application for detecting objects based on data obtained from underwater video filming, in which the user will be able to identify objects using a neural network implemented based on the YOLO model.

Keywords: object identification, object detection, neural network, underwater video filming.

Работа с подводными объектами представляет собой сложную и многогранную задачу, требующую глубоких знаний в области гидрологии, морской биологии и информационных технологий. Обнаружение и идентификация подводных объектов необходимы во многих сферах, включая безопасность судоходства, исследование морских экосистем, охрану окружающей среды и разведку полезных ископаемых. Их изучение и мониторинг требуют точных методов и инструментов, однако работа с подводными объектами остается достаточно ресурсоемкой для человека [1, 2].

Нейронные сети являются одним из наиболее популярных и доступных инструментов для обнаружения, идентификации и анализа подводных объектов с высокой точностью, что помогает этим технологиям конкурировать с традиционными методами гидролокации и съемки. Разработка системы поиска, обнаружения и идентификации подводных объектов требует комплексного подхода, объединяющего знания в области компьютерного зрения, машинного обучения и технологий обработки видео [3–5].

Целью работы является создание приложения для обнаружения и классификации объектов под водой с использованием нейронной сети, которое анализирует собранные данные и визуализирует результаты на изображении.

Разработанное приложение проектировалось на базе алгоритма YOLO [2]. Использование данного алгоритма позволило получить ряд преимуществ: способность обрабатывать изображения и видеопотоки с высокой скоростью и точностью в реальном времени, упрощенный интерфейс для работы с нейронными сетями. При помощи нейронной сети мы можем обучать модели, которые автоматически выделяют и детектируют объекты на изображении.

В результате обработки отдельного кадра нейронной сетью YOLO получается изображение, на котором выделены и сегментированы обнаруженные объекты. Разработанное приложение дает возможность пользователю загружать видео, которое будет использоваться для дальнейшей обработки и подключать камеру для обработки видео в реальном времени. В приложении происходит трансляция видеопотока, получаемого с камеры в реальном времени, а также запись потока данных с экрана приложения камеры. Приложение позволяет сохранять оригинальное и обработанное видео. После анализа кадра с помощью нейронной сети YOLO данные отправляются обратно в приложение, где изображение и информация о количестве подсчитанных объектах сохраняется. Пользователю отображаются полученные данные. Визуализация результатов происходит в отдельном окне, где каждое новое обработанное изображение сменяет предыдущее. Пример данных, визуализированных в приложении, представлен на рис. 1.



Рис. 1. Пример визуализации данных после обработки

Когда установленное время обработки видеопотока заканчивается или когда в видео последний кадр считается обработанным, процесс не только завершается, но и при необходимости включает в себя дополнительные шаги для обеспечения целостности и доступности обработанных данных. В частности, если необходимо, изображения, полученные в результате обработки каждого кадра, объединяются обратно в видеопоток. Этот видеопоток сохраняется на локальном устройстве пользователя для дальнейшего просмотра или использования. Также пользователь получает сообщение о среднем количестве определенных объектов на видео.

В результате реализовано приложение, где происходит основное взаимодействие с пользователем, а затем обработка кадров с объектами. Разработанное программное обеспечение отличается от существующих решений уникальным сочетанием классических методов обнаружения объектов и инновационных подходов к обработке подводных изображений. В частности, реализована эффективная система предобработки изображений и прогнозирования объектов, что позволяет более точно выявлять объекты в условиях ограниченной видимости и плохой освещенности. Также была создана высокоэффективная и адаптивная модель нейронной сети, которая предлагает пользователям точные и быстрые результаты обнаружения.

Оценка адекватности, надежности и эффективности разработанного программного обеспечения показала, что оно отвечает всем поставленным требованиям и обеспечивает стабильную работу в различных подводных сценариях. Благодаря оптимизации и адаптации существующих технологий и методик, приложение обеспечивает высокую производительность и точность обнаружения. Результаты этой работы могут быть использованы для дальнейшего развития и улучшения системы, а также для разработки новых приложений в области подводного обнаружения.

Литература

1. Горбунов, К. С. Нейронная сеть для определения под водой / К. С. Горбунов, И. В. Дорошенко // Е.Р.А – Современная наука: электроника, робототехника, автоматизация : материалы I Междунар. науч.-техн. конф, студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 29 февр. 2024 г. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого [и др.] ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель, 2024. – С. 222–224.
2. Редмонд, Дж. Изучаем YOLO: Современные методы обнаружения объектов / Дж. Редмонд. – Санкт-Петербург : Питер, 2020. – 304 с.
3. Герасимов, А. Машинное обучение и глубокое обучение / А. Герасимов. – Санкт-Петербург : Питер, 2020. – 450 с.

4. Крон, Дж. Глубокое обучение в картинках. Визуальный гид по искусственному интеллекту / Дж. Крон, Гр. Бейлевельд, Б. Аглаэ. – Санкт-Петербург : Питер, 2020. – 400 с.
5. Николенко, С. Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей / С. Николенко, А. Кадури, Е. Архангельская. – Санкт-Петербург : Питер, 2020. – 476 с.

УДК 004.9:616.724

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ НАВЫКОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭНДОПРОТЕЗОВ ВИСОЧНО-НИЖНЕЧЕЛЮСТНОГО СУСТАВА

Ж. В. Кадолич, А. А. Кашперов

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

А. П. Бобович

*Агентство развития и содействия инвестициям, г. Гомель,
Республика Беларусь*

Представлены результаты испытания на нагружение мыщелкового отростка нижней челюсти и суставной ямки височной кости височно-нижнечелюстного эндопротеза. На основании испытаний в качестве материала для изготовления первого элемента данного эндопротеза рекомендовано использовать титановый сплав, а для изготовления второго элемента – сверхвысокомолекулярный полиэтилен, что согласуется с наработками в этой области.

Ключевые слова: височно-нижнечелюстной сустав, индивидуальное эндопротезирование, трехмерные технологии.

EXPERIENCE IN APPLYING ENGINEERING SKILLS FOR THE PRODUCTION OF TEMPOROMANDIBULAR JOINT ENDOPROSTHESES

Zh. V. Kadolich, A. A. Kashperov

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

A. P. Bobovich

*Development and Investment Promotion Agency, Gomel,
the Republic of Belarus*

The article presents the results of loading tests were carried out of the condylar process of lower jaw and the articular fossa of temporal bone of temporomandibular joint. Based on tests it is recommended to use titanium alloy as a material for the manufacture of the first element of this endoprosthesis, and ultra-high molecular weight polyethylene for the manufacture of the second element, which is consistent with the best practices in this area.

Keywords: temporomandibular joint, individual endoprosthetics, three-dimensional technologies.

Височно-нижнечелюстной сустав (ВНЧС) – сустав, позволяющий человеку открывать и закрывать нижнюю челюсть [1]. Конструкция тотальных эндопротезов ВНЧС состоит из таких структурных элементов, как суставная ямка височной кости, мыщелковый отросток нижней челюсти и элементы крепления. Следует отметить, что в медицинской практике проводятся альтернативные эндопротезированию операции – удаление пораженной части костной структуры и последующее сращивание.

Очевидно, что подобная методика лечения даже при условии положительного исхода операции существенно ухудшает качество жизни пациента, что повышает актуальность работ, связанных с новыми методами производства имплантатов [2].

В настоящее время эндопротез ВНЧС возможно изготовить двумя способами, один из которых связан с использованием 3D-печати и согласуется с идеей индивидуального эндопротезирования, поскольку в различные возрастные периоды ВНЧС имеет свои особенности строения. Как следствие, различия в строении сустава в разный период жизни и определяют внешний вид требуемого для имплантации эндопротеза ВНЧС [2]. Трехмерная печать решает этот вопрос, позволяя создать индивидуальный эндопротез в кратчайшие сроки.

Изготовление тотальных эндопротезов ВНЧС на практике включает в себя несколько этапов. В частности, в последнее время используют технологию CAD/CAM, которая позволяет на основе компьютерного изображения или стереолитографической модели изготовить индивидуальные эндопротезы ВНЧС [2, 3]. Следует отметить, что любой эндопротез не должен добавлять массы тела больному. Современные программы помогают узнать массу эндопротеза (рис. 1), превышение которой – аргумент для последующей оптимизации модели. Важно отметить, что результаты работы должны обязательно быть согласованы с лечащим врачом.

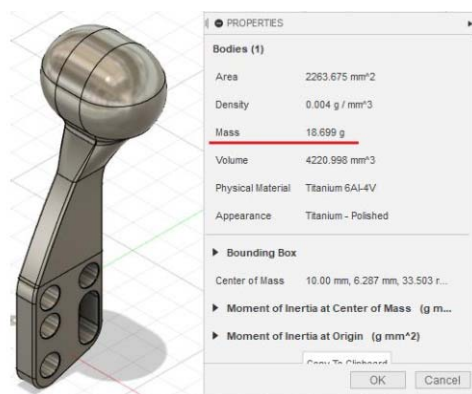


Рис. 1. Определение массы мыщелкового отростка нижней челюсти из титанового сплава в программе Fusion 360

Легкость и прочность эндопротеза являются характеристиками, которые инженер может подвергнуть проверке самостоятельно. Опишем более подробно данный этап. При оценке прочности эндопротеза в программе Fusion 360 к частям эндопротеза, пребывающим под нагрузкой, прикладывается определенная сила и оценивается итоговый результат. Максимальная функциональная нагрузка в ВНЧС возникает при смыкании моляров и составляет в среднем 265 Н (около 27 кг), при смыкании резцов – 160 Н (около 16 кг). Такая разница обуславливает необходимость использования для эндопротезов ВНЧС материалов с низким коэффициентом трения. При выборе материалов для проверки эндопротеза на прочность в работе был применен вариант пары трения «металл–полимер». Для мыщелкового отростка нижней челюсти в выборку материалов для проверки вошли титановый сплав и нержавеющая сталь. Для суставной ямки нижней челюсти выбраны сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) и силиконовый каучук. Коэффициент запаса прочности приняли равным 2–2,1. Области приложения нагрузок показаны на рис. 2, а результаты

испытаний обобщены в таблице ниже. На основании проведенных испытаний с учетом запаса прочности в качестве экспериментального материала для изготовления мышечного отростка нижней челюсти рекомендовано использовать титановый сплав Ti6Al4V, для суставной ямки височной кости – СВМПЭ, что согласуется с данными работы [4]. Возможен вариант использования композиционного материала на основе СВМПЭ.

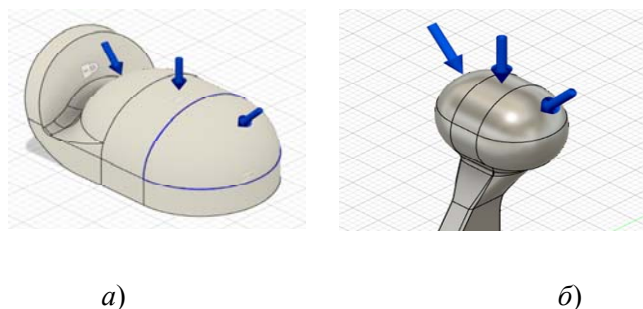


Рис. 2. Область приложения нагрузок для мышечного отростка (а) и суставной ямки (б) в процессе моделирования

Результаты испытаний на нагружение мышечного отростка нижней челюсти и суставной ямки височной кости ВНЧС

Материал	Нагрузка, Н	Напряжения, МПа		Максимальные перемещения, мм	Коэффициент запаса прочности	Вывод
		min	max			
Титановый сплав	100	0,0029	81,990	0,040	10,760	подходит
	150	0,0044	123,000	0,060	7,176	подходит
	200	0,0059	164,000	0,080	5,382	подходит
	265	0,0079	217,300	0,100	4,062	подходит
	300	0,0089	246,000	0,120	3,588	подходит
Нержавеющая сталь	100	0,0038	115,100	0,020	2,515	подходит
	150	0,0057	172,700	0,030	1,677	не подходит
	200	0,0076	230,300	0,040	1,258	не подходит
	265	0,0102	305,100	0,060	0,949	не подходит
	300	0,0114	345,400	0,060	0,838	не подходит
СВМПЭ	100	$3,6 \cdot 10^{-5}$	6,172	0,005	3,402	подходит
	150	$5,4 \cdot 10^{-5}$	7,399	0,007	2,838	подходит
	200	$6,7 \cdot 10^{-5}$	8,661	0,009	2,425	подходит
	265	$8,5 \cdot 10^{-5}$	9,887	0,012	2,124	подходит
	300	$9,6 \cdot 10^{-5}$	11,100	0,013	1,893	не подходит
Каучук (силиконовый)	100	$5,5 \cdot 10^{-5}$	5,392	1,752	1,918	не подходит
	150	$1,1 \cdot 10^{-5}$	6,465	2,420	1,599	не подходит
	200	$2,1 \cdot 10^{-5}$	7,562	3,100	1,367	не подходит
	265	$2,6 \cdot 10^{-5}$	8,633	3,954	1,198	не подходит
	300	$2,9 \cdot 10^{-5}$	9,696	4,469	1,066	не подходит

Завершающий этап работы в технологической цепочке производства индивидуальных эндопротезов ВНЧС – печать оптимизированной модели на 3D-принтере. Тот факт, что с 2016 г. в Республике Беларусь началось бурное развитие работ в области 3D-печати, позволяет надеяться, что индивидуальное эндопротезирование со временем найдет собственную нишу.

Работа выполнена в рамках договора о сотрудничестве (договор № 2 от 14.06.2021 г.), подписанного при создании филиала кафедры «Материаловедение в машиностроении» Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого на базе филиала «Технопарк «Коралл» РУСП «Агентство развития и содействия инвестициям».

Л и т е р а т у р а

1. Пивченко, П. Г. Анатомия опорно-двигательного аппарата : учеб. пособие / П. Г. Пивченко, Н. А. Трушель. – Минск : Новое знание, 2014. – 147 с.
2. Епифанов, С. А. Протезирование височно-нижнечелюстного сустава / С. А. Епифанов, А. П. Поляков, В. Д. Скуредин // Вестник Национального медико-хирургического центра имени Н. И. Пирогова. – 2014. – № 4. – С. 17–22.
3. Особенности трехмерного моделирования анатомических структур человека для повышения эффективности оперативного лечения в ортопедии и нейрохирургии / Е. В. Ковалев, Д. А. Довгало, А. В. Ковалевич, С. В. Стельмашонок // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XXI Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 22–23 апр. 2021 г. : в 2 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель, 2021. – Ч. 1. – С. 125–127.
4. Пинчук, Л. С. Эндопротезирование суставов: технические и медико-биологические аспекты / Л. С. Пинчук, В. И. Николаев, Е. А. Цветкова. – Гомель : ИММС НАН Беларуси, 2003. – 308 с.

УДК 004.415.2

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ГОЛОСОВОГО ИНТЕРФЕЙСА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Т. А. Трохова, И. В. Емельяненко

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

Обоснована необходимость применения технологии голосового интерфейса в ERP-системах при программировании производственных процессов предприятий. Разработано программное приложение, позволяющее выполнить оперативный ввод информации о выпуске продукции производственного цеха с использованием голосового интерфейса.

Ключевые слова: ERP-системы, голосовой интерфейс, интегрированная база данных, мобильные приложения, архитектура приложения.

APPLICATION OF VOICE INTERFACE METHODS TO SOLVING PRODUCTION PROGRAMMING PROBLEMS

T. A. Trokhova, I. V. Emelianenko

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The necessity of using voice interface technology in ERP systems when programming production processes of enterprises is substantiated. A software application has been developed that allows for the prompt entry of information about the output of a production workshop using a voice interface.

Keywords: ERP systems, voice interface, integrated database, mobile applications, *application architecture*.

Производственные предприятия в настоящее время, как правило, используют универсальные ERP-системы для решения большинства информационных задач, автоматизирующих все направления планирования и учета на предприятии. Но эти системы, имея несомненные преимущества, не в полной мере позволяют решать плохо формализуемые задачи, особенно если при их решении необходимо прибегать к Web-программированию или к программированию с использованием систем искусственного интеллекта. Внедрение новых IT-технологий значительно расширяет возможности интегрированных автоматизированных систем предприятия (ИАС), повышает качество учета и дает значительную экономию времени.

Актуальным направлением при разработке новых приложений, дополняющих возможности ИАС, становится внедрение Web-технологий и привлечение мобильных устройств для повышения скорости обмена информацией. В качестве подсистемы для исследования выбрана подсистема учета выпуска готовой продукции в производственных цехах предприятия. Цеха предприятий, имеющие неблагоприятные для установки стационарных компьютеров условия (большая влажность, низкая температура), нуждаются в особом подходе к разработке компьютерного интерфейса. Для решения этой проблемы предлагается применение голосового интерфейса при вводе данных о выпуске готовой продукции. Внедрение разработанного программного комплекса значительно сокращает временные затраты на процесс занесения в базу данных информации о выпуске готовой продукции, повышает качество и улучшает оперативный обмен информацией между подразделениями предприятия.

Программный комплекс включает несколько компонент, каждая из которых является, по сути дела, автоматизированным рабочим местом пользователя. При проектировании функциональной модели программного комплекса были выделены шесть ролей, наиболее значимые из которых – роли мастера цеха и кладовщика склада готовой продукции. Именно для мастера цеха разработано мобильное приложение с голосовым интерфейсом. В качестве процессов для автоматизации были выбраны следующие процессы:

- процесс открытия смены с получением сменного задания на выпуск;
- процесс оперативного ввода информации о заполнении поддона готовой продукцией с применением голосового интерфейса;
- процесс формирования паспорта поддона и QR-кода поддона;
- процесс фиксации получения отгруженного из цеха поддона на склад готовой продукции.

Архитектура программного комплекса приведена на рис. 1.

Голосовой интерфейс использует технологии распознавания речи и синтеза речи для преобразования голосовых команд пользователя в понятный компьютеру формат и обратно. Компьютерная система интерпретирует голосовые команды и выполняет соответствующие действия или предоставляет ответ в голосовой форме.

При подготовке компоненты голосового интерфейса были выделены сущности, которые являются носителями информации, извлекаемой из запроса. Данные сущности могут быть как в форме паттернов, так и в форме синонимов, на основе которых и строится извлечение информации из запросов. Сущности – это часть интенгов, представляющих собой формы запросов, произносимые пользователем в голосовом вводе. Все интенги содержат фразы, по которым они могут определяться анализато-

ром натурального языка. Именно в этих фразах анализатор распознает сущности, необходимые для выполнения запроса.

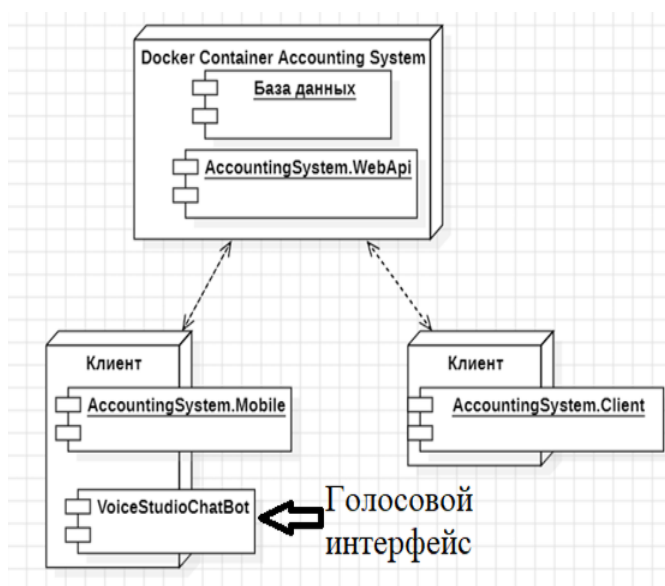


Рис. 1. Архитектура программного комплекса

Алгоритм фрагмента сценария работы бота (голосового помощника) следующий: бот инициализирует действие, для которого должны быть получены данные; бот выбирает вид окна, которое нужно открыть; бот формирует данные, полученные из сущностей; сформированные данные отправляются навыку в мобильном приложении; навыки мобильного приложения формируют разметку, которая должна быть обработана в форме JSON.

На рис. 2 приведены примеры навыков голосового интерфейса для программного комплекса.

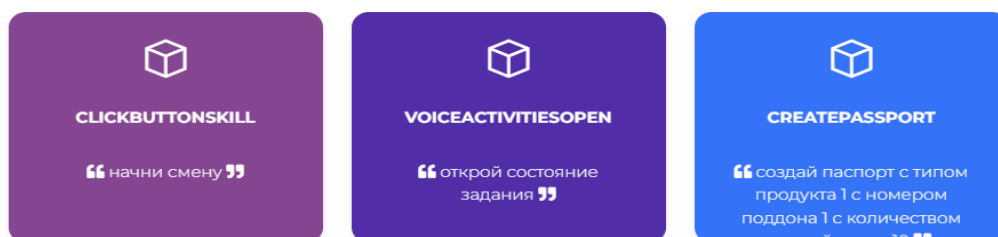


Рис. 2. Навыки голосового интерфейса

Голосовой помощник был оттестирован на реальных тестовых примерах. Мастер цеха, выполняя процесс открытия смены, включает голосовой интерфейс и произносит фразу, инициирующую ввод информации о выпуске готовой продукции.

Если произнесенная фраза является корректной в рамках шаблона фразы, то происходит ее успешное распознавание и открытие формы создания паспорта поддона, однако, если сказанная фраза сказана неправильно, то система голосового ввода сообщает об этом.

Если же сказанная фраза соответствует общему шаблону, но некоторые части отличаются, то система задает уточняющий вопрос и открывает форму создания паспорта поддона для готовой продукции (рис. 3).

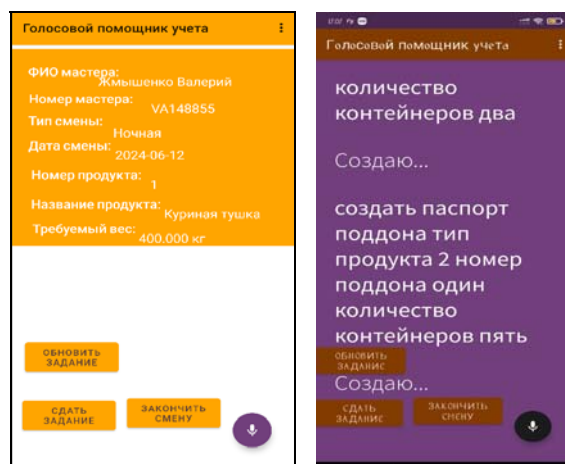


Рис. 3. Процесс занесения информации о выпуске готовой продукции

В режиме закрытия сменного задания мастер формирует QR-код поддона для ведения оперативного учета на складе готовой продукции (рис. 4).

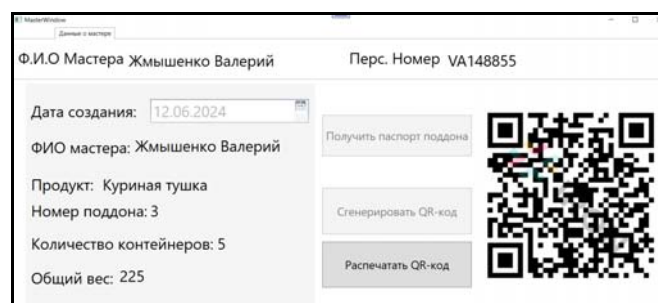


Рис. 4. Формирование QR-кода поддона с готовой продукцией

Разработанный многофункциональный программный комплекс учета готовой продукции производственного цеха предприятия благодаря применению голосового интерфейса значительно облегчит ведение учета в неблагоприятных для установки стационарных компьютеров условиях, упростит занесение информации в централизованную базу данных предприятия, повысит качество обмена данными между производственным цехом и складом готовой продукции.

УДК 621.0

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТОРЦОВОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ

В. С. Мурашко

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

Показано, что разработанное в открытой системе Scilab программное приложение на основе центрального композиционного ротатбельного планирования второго порядка строит трехфакторную математическую модель тангенциальной составляющей силы резания, которую можно использовать для установки рациональных значений элементов геометрии зуба при конструировании торцовых фрез для обработки высокопрочного чугуна.

Ключевые слова: ротатбельное планирование второго порядка, уравнение регрессии, торцовая фреза, элементы геометрии зуба, система Scilab.

COMPUTER SIMULATION OF THE END MILLING PROCESS

V. S. Murashko

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

A software application developed in the open Scilab system based on the central composite rotatable planning of the second order builds a three-factor mathematical model of the tangential component of the cutting force, which can be used to set rational values of tooth geometry elements in the design of end mills for processing high-strength cast iron.

Keywords: rotatable second-order planning, regression equation, end mill, tooth geometry elements, Scilab system.

Процессы обработки материалов резанием являются сложными многофакторными процессами. В этих процессах исследуемая величина часто – это случайная величина, зависящая от большого числа контролируемых и неконтролируемых факторов. Поэтому процессы резания все чаще стали рассматривать с вероятностно-статистических позиций, а при экспериментальных исследованиях применять методы планирования эксперимента, базирующиеся на идеях математической статистики.

Цель данной работы – разработать программное приложение для построения многофакторной математической модели, характеризующей зависимость максимальной тангенциальной составляющей силы резания $P_T = f(\varphi, \lambda, \gamma)$ от элементов геометрии зуба торцовой фрезы при фрезеровании высокопрочного чугуна.

Эксперимент необходимо провести по программе центрального композиционного ротатбельного планирования второго порядка [1]. В качестве влияющих факторов следует выбрать элементы геометрии зуба фрезы: главный угол φ в плане, угол наклона λ режущей кромки и передний угол γ .

В качестве инструментария разработки программного приложения «Многофакторная математическая модель сил резания при фрезеровании торцовой фрезой (МММСРприФТФ)» выбрали пакет компьютерной математики Scilab.

Система Scilab работает в режиме интерпретатора, а также позволяет обрабатывать программы, написанные на встроенном языке. Система очень удобна для автоматизации инженерных расчетов, помогая создавать не только обычные, но и визуальные приложения.

В Scilab используется динамический способ создания интерфейсных компонентов. Он заключается в том, что на стадии выполнения программы могут создаваться (и удаляться) те или иные элементы управления (кнопки, текст, поля ввода, таблицы, флажки) и их свойствам приписываются соответствующие значения.

Для получения математической зависимости максимальной тангенциальной составляющей силы резания от элементов геометрии зуба торцевой фрезы при фрезеровании высокопрочного чугуна данные результатов эксперимента были взяты из [1].

Обработка данных с помощью программы «МММСПриФТФ» проводится в следующей последовательности:

1. Установить на компьютере систему Scilab.
2. Запустить программу МММСПриФТФ.sce. Появится графическое окно «Многофакторная математическая модель сил резания при фрезеровании торцевой фрезой (МММСПриФТФ)».
3. Ввод исходных данных (рис. 1) состоит из трех шагов. Шаг 1: используя интерфейсные компоненты edit, ввести значения главного угла наклона, угла наклона режущей кромки, переднего угла на уровнях -1 и $+1$ или оставить значения по умолчанию. Шаг 2: нажать на кнопку «Ввод результатов опытов». Шаг 3: появится диалоговое окно «Введите элементы массива построчно».
4. Для отображения рабочей таблицы нажать на кнопку «Показать рабочую таблицу».
5. Когда данные введены, нажать на кнопку «Расчет коэффициентов регрессии» (рис. 2, 3). В результате появится новая таблица, в которой находится следующая информация: рассчитанные значения коэффициентов регрессии, доверительные интервалы для них, признак значимости (1) или незначимости (0) коэффициентов. Внизу графического окна отобразится уравнение регрессии и уравнение математической зависимости максимальной составляющей силы резания, зависящей от элементов геометрии зуба торцевой фрезы при обработке высокопрочного чугуна.

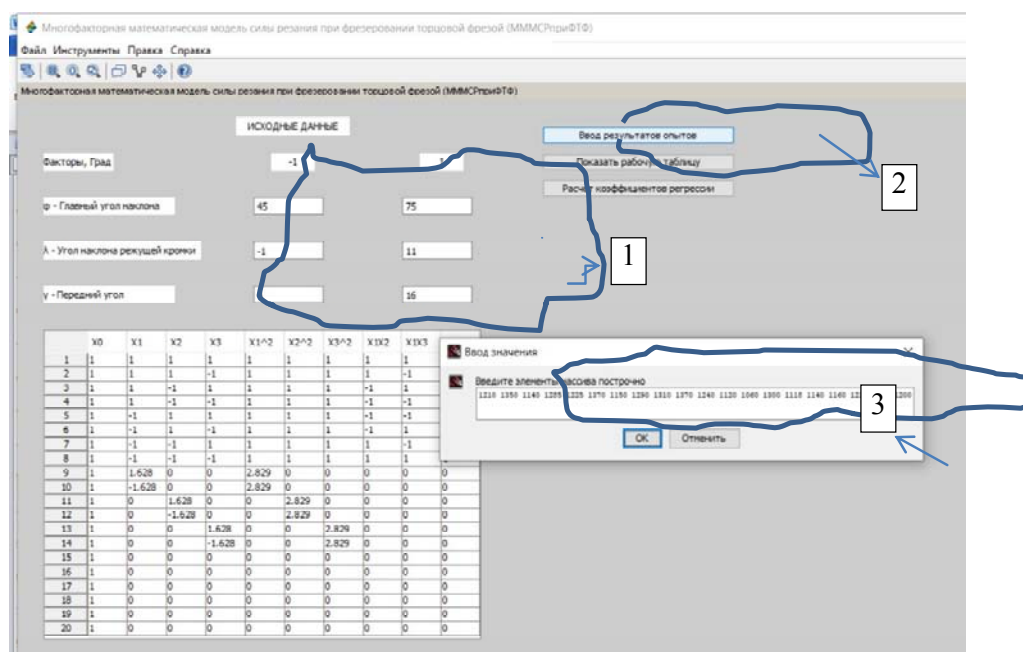


Рис. 1. Ввод исходных данных

Многофакторная математическая модель силы резания при фрезеровании торцевой фрезой (МММСРприФТФ)

Исходные данные

Факторы: Град

Ф - Главный угол наклона

А - Угол наклона режущей кромки

У - Передний угол

Ввод результатов опытов

Показать рабочую таблицу

Расчет коэффициентов регрессии

	b0	b1	b2	b3	b12	b13	b23	b11	b22	b33
Коэф...	1179.4215	-11.049952	36.012331	-71.29243	-2.5021044	0	0	62.208251	6.9394941	6.9394941
Интер...	38.128083	25.27286	25.27286	25.27286	33.024478	33.024478	33.024478	24.622446	24.622446	24.622446
Знач...	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0

	X0	X1	X2	X3	X1^2	X2^2	X3^2	X1X2	X1X3	X2X3
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1
4	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1
5	1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	1
6	1	-1	1	-1	1	1	1	-1	1	-1
7	1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1
8	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1
9	1	1.628	0	0	2.629	0	0	0	0	0
10	1	-1.628	0	0	2.629	0	0	0	0	0
11	1	0	1.628	0	0	2.629	0	0	0	0
12	1	0	-1.628	0	0	2.629	0	0	0	0
13	1	0	0	1.628	0	0	2.629	0	0	0
14	1	0	0	-1.628	0	0	2.629	0	0	0
15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Математическая модель составлена из значимых коэффициентов регрессии: $Y = 1179.4215 + 36.012331 \cdot X_2 - 71.29243 \cdot X_3 + 62.208251 \cdot X_{11}$

Интерполяционная формула: $P_t = 1179.4215 + 36.012331 \cdot ((\lambda - 5)/6) - 71.29243 \cdot ((\gamma - 10)/6) + 62.208251 \cdot ((\varphi - 60)/15)^2$

Модель адекватна

Рис. 2. Результат нажатия кнопки «Расчет коэффициентов регрессии»

Математическая модель составлена из значимых коэффициентов регрессии: $Y = 1179.4215 + 36.012331 \cdot X_2 - 71.29243 \cdot X_3 + 62.208251 \cdot X_{11}$

Интерполяционная формула: $P_t = 1179.4215 + 36.012331 \cdot ((\lambda - 5)/6) - 71.29243 \cdot ((\gamma - 10)/6) + 62.208251 \cdot ((\varphi - 60)/15)^2$

Модель адекватна

Рис. 3. Уравнения регрессии и математической зависимости максимальной составляющей силы резания

Полученные результаты. Решена задача – отделить реализацию алгоритма проведения полнофакторного эксперимента [1] от интерфейса, т. е. оставить за пользователем только возможность ввода исходных и экспериментальных данных. Рассмотрена и исследована соответствующая алгоритмическая модель, которая была реализована в виде визуального приложения «МММСРприФТФ» с дружественным пользовательским интерфейсом, позволяющим построить математическую модель зависимости максимальной тангенциальной составляющей силы от элементов геометрии зуба торцевой фрезы и проверить ее на адекватность, а также выяснено, что ее можно использовать для установки рациональных значений элементов геометрии зуба при конструировании торцевых фрез для обработки высокопрочного чугуна.

Таким образом, применение визуальных компонентов не только во много раз сокращает сроки разработки программ, но и существенно снижает вероятность случайных программных ошибок, от которых не защищен ни один крупный программный проект.

Литература

1. Спиридонов, А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. – Москва : Машиностроение, 1981. – 184 с.

СЕКЦИЯ 4. РАДИОТЕХНИКА, МЕХАТРОНИКА, ТЕХНИЧЕСКИЕ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

УДК 621.396

ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С ЗАДАННЫМ УРОВНЕМ РАССЕЯННОГО ПОЛЯ

А. П. Преображенский, И. А. Тихонов

Воронежский институт высоких технологий, Российская Федерация

Рассмотрена задача, связанная с оптимизацией рассеивающих свойств дифракционных структур. Расчет полей рассеяния проводился на основе метода интегральных уравнений. Оптимизационный подход основывался на генетическом алгоритме. Были определены размеры дифракционной структуры, определяющие заданный уровень рассеянного поля при определенном угле наблюдения.

Ключевые слова: рассеяние радиоволн, генетический алгоритм, оптимизация, дифракция, проектирование.

MODERN METHODS OF ASSESSING THE RELIABILITY OF MACHINES

A. P. Preobrazhenskiy, I. A. Tikhonov

Voronezh institute of high technologies, Russian Federation

The paper examines the problem associated with optimizing the scattering properties of diffraction structures. The calculation of stray fields was carried out based on the method of integral equations. The optimization approach was based on a genetic algorithm. The dimensions of the diffraction structure were determined, which determine the given level of the scattered field at a certain observation angle.

Keywords: radio wave scattering, genetic algorithm, optimization, diffraction, design.

Дифракционные структуры входят в состав различных объектов. Для обеспечения требуемой электромагнитной обстановки, формирования необходимых характеристик электромагнитной совместимости важно, чтобы в ходе проектирования дифракционные структуры имели соответствующие размеры.

Цель работы состоит в разработке методики создания электродинамических объектов с заданными размерами на основе требований к уровню рассеянных полей.

Методика анализа. На рис 1. приведен пример дифракционной структуры. Расчет рассеянных полей проводился на основе метода интегральных уравнений [1].

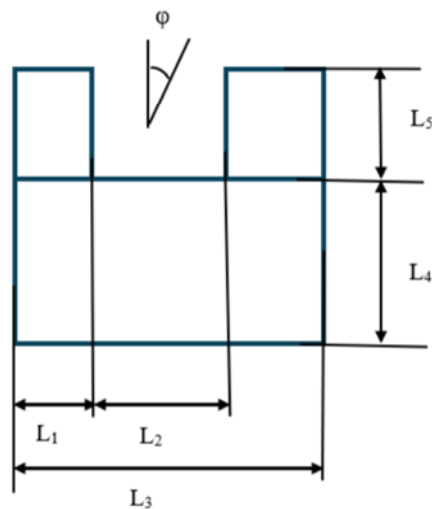


Рис. 1. Пример дифракционной структуры

Требуется обеспечить определенные ограничения по рассеянной мощности для дифракционной структуры в заданных направлениях, при этом необходимо в ходе моделирования и проектирования найти требуемые размеры такой структуры. В качестве основной характеристики рассматривается эффективная площадь рассеяния (ЭПР). Представляет интерес использование генетического алгоритма (ГА), чтобы провести решение оптимизационной задачи, связанной с определением характеристик дифракционной структуры [2]. В ГА требуется применять хромосому, представленную на рис. 1, в которой выделяется несколько генов: h , m , s и g . Анализ показывает, что 5 бит дают возможности для реализации процессов кодирования.

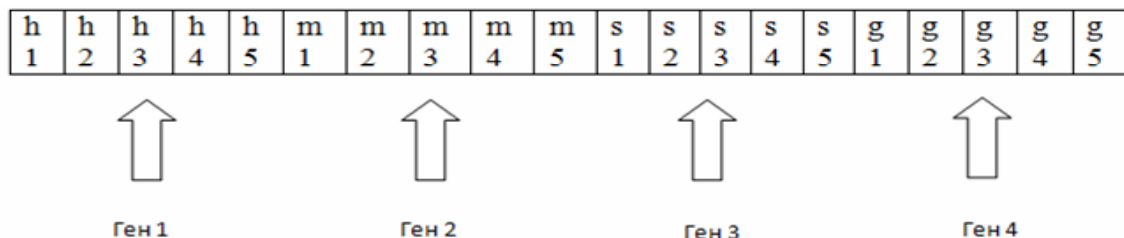


Рис. 2. Иллюстрация структуры хромосомы

Рассмотрим пример того, как применяются 5 хромосом, формирующих популяцию, что дает возможности для поиска искомого решения. Будем считать, что по возможным вариантам решений генерируются 5:

$$F = (q, x, c, d), q, x, c, d \in \{1, 2, 3 \dots 30\},$$

Проведем соотношение ошибки по решению с каждым из вариантов:

$$\delta = |F(q, x, c, d) - FD(q, x, c, d)|.$$

В табл. 1 на основе того, что применяется десятичный код, варианты решения проиллюстрированы.

Таблица 1

Пример получения вариантов по решениям

Номер хромосомы	Вид варианта (x1, x2, x3, x4)	Значение ошибки, δ	Значение ОП
1	(1, 28, 12, 4)	85	0,017
2	(11, 7, 2, 5)	25	0,045
3	(12, 4, 6, 2)	22	0,047
4	(22, 8, 15, 18)	123	0,0091
5	(8, 12, 4, 1)	28	0,054

Если в решении будет меньшее значение ошибки по хромосомам, то они должны выживать. Генетический алгоритм строится на этом принципе. Тогда для хромосомы относительная пригодность будет определяться таким способом: $ОП = 1/\delta$. В ходе рассмотрения последующей популяции для хромосомы вероятность того, что она будет отобрана определяется на основе следующего выражения:

$$P_i = \frac{ОП_i}{\sum_{i=1}^5 ОП_i}.$$

В табл. 2 представлены результаты оценок, которые получены на базе этого выражения. Хромосомы могут отбираться с привлечением разных подходов. Предлагается использовать метод колеса рулетки. Тогда колесо будет разделено на секторы Z_i . Они будут соотноситься с соответствующими хромосомами (рис. 3). Задается число вращений рулетки. Например, их 13. Для каждого из них происходит фиксация соответствующего сектора и связанной с ним хромосомы. Так, в результате совокупности вращений были обозначены 15 хромосом. Для реализации процессов скрещивания по ним был проведен выбор пяти пар. После проведения указанного отбора есть возможность для формирования табл. 3.

Таблица 2

Пример определения вероятности того, как отбираются хромосомы

Номер i	P_i	U_i , %
1	$0,017/0,721 = 0,99$	9,9
2	$0,045/0,721 = 0,614$	26,14
3	$0,047/0,721 = 0,731$	27,31
4	$0,0091/0,721 = 0,528$	5,28
5	$0,054/0,721 = 0,137$	31,37

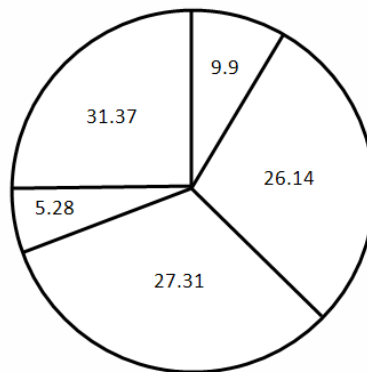


Рис. 3. Пример разделения рулетки по секторам

Таблица 3

Пример выбранных хромосом в ГА

Номер i , который соответствует матери	Номер i , который соответствует отцу
3	1
2	3
4	2
5	2
5	4

Анализ показал, что лишь один раз была выбрана хромосома 1, что соответствует небольшому значению ОП. Частый выбор был по хромосомам 2, 3 и 5, тогда значение ОП было большое. А вот хромосома 4 вообще не подвергалась рассмотрению. Процесс скрещивания происходит на последующем этапе. В ходе рассмотрения популяции потомков в решении значение средней ошибки было равно 57. Когда проводилось рассмотрение начальной популяции, то значение средней ошибки было равно 59.

Для рассматриваемой структуры, которая указана на рис. 1, были определены такие результаты для угла наблюдения $\varphi = 30^\circ$ и уровня ЭПР 5 дБ: $L_1 = 2,1\lambda$, $L_2 = 3,2\lambda$, $L_3 = 7,4\lambda$, $L_4 = 3,13\lambda$, $L_5 = 2,24\lambda$, где λ – длина волны.

Таким образом, представленный подход является достаточно универсальным. Он может быть использован для проектирования дифракционных структур с различной формой.

Литература

1. Преображенский, А. П. Моделирование и алгоритмизация анализа дифракционных структур в САПР радиолокационных антенн : монография / А. П. Преображенский. – Воронеж : Науч. кн., 2007. – 248 с.
2. Готишан, А. А. Применение методов искусственного интеллекта и машинного обучения в системах автоматизации / А. А. Готишан, А. В. Линкина // Молодежь в науке: экономика, технологии и инновации : материалы Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Воронеж, 2023. – С. 100–103.

УДК 681.518.5

РАЗРАБОТКА WEB-ИНТЕРФЕЙСА КОНТРОЛЛЕРА АВТОМАТИЗАЦИИ УСТАНОВОК ШТАНГОВЫХ ГЛУБИННЫХ НАСОСОВ

М. А. Проскуряков

*БелНИПИнефть РУП Производственное объединение
«Белоруснефть», г. Гомель*

Рассмотрены актуальность и практическая значимость разработки контроллера автоматизации установок штанговых глубинных насосов, а также программного обеспечения к нему. Представлена тестовая версия Web-интерфейса, разработанного контроллера автоматизации УШГН.

Ключевые слова: контроллер, автоматизация, программное обеспечение, Web-интерфейс, приложение, динамограмма, параметр.

DEVELOPMENT OF A WEB INTERFACE FOR A ROD PUMPING UNIT AUTOMATION CONTROLLER

M. A. Proskuryakov

BelNIPIneft RUE "Production Association "Belorusneft", Gomel

The article discusses the relevance and practical significance of the development of the rod pumping unit automation controller. A test version of the Web interface of the developed rod pumping unit automation controller is presented.

Keywords: controller, automation, software, Web-interface, application, dynamogram, parameter

Одним из наиболее распространенных способов механизированной добычи нефти при небольших дебитах является применение установок штанговых глубинных насосов (УШГН). В настоящее время УШГН оснащены около половины фонда скважин на нефтепромыслах РУП «Производственное объединение «Белоруснефть», что обуславливает необходимость своевременного диагностирования и автоматизации контроля их технического состояния и режимов работы. Оснащенность УШГН средствами диагностирования и автоматизации оказывает существенное влияние на количество отказов и наработку на отказ погружного и наземного оборудования.

Известен целый ряд разработчиков и производителей контроллеров УШГН. Среди зарубежных компаний можно отметить «Lufkin Automation» (США), «ABB» (США), «Naftamatika» (Словакия) и др. В последнее время на промыслах НГДУ «Речицанефть» РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» внедряются контроллеры WellSim Marathon компании ООО «Нафтаматика». Применение контроллеров УШГН зарубежных фирм повышает стоимость обслуживания и ремонта оборудования, в санкционных условиях, кроме того, накладывает ограничения на модернизацию ввиду зависимости аппаратных и программных модулей от строго определенного производителя. Таким образом, разработка собственного контроллера автоматизации УШГН является актуальной задачей для РУП «Производственное объединение «Белоруснефть».

Внедрение разработанного собственными силами контроллера автоматизации УШГН позволяет:

- повысить оперативность и качество обслуживания оборудования;

– снизить капитальные затраты на автоматизацию УШГН (стоимость контроллера WellSim Marathon – 12285,6 бел. руб., разработанного контроллера УШГН – 9597,96 бел. руб.);

– обеспечить возможность модернизации аппаратного и программного обеспечения под нужды работников нефтепромыслов РУП «Производственное объединение «Белоруснефть»» с меньшими финансовыми затратами;

– уменьшить зависимость от внешних поставок, обеспечивая импортозамещение;

– сохранить конфиденциальность корпоративной информации из-за отказа от привлечения сторонних специалистов;

– повысить удобство просмотра данных и настройки режимов работы оборудования технологами нефтепромыслов непосредственно на скважине или удаленно.

Личный вклад автора – поиск решения и разработка Web-интерфейса контроллера автоматизации УШГН и внедрение его в существующую программно-аппаратную среду.

Контроллер автоматизации УШГН предназначен:

– для управления работой наземного и подземного оборудования скважины в режиме реального времени,

– передачи данных на верхний уровень или пульт оператора;

– удаленного управления оборудованием.

Структурная схема контроллера автоматизации УШГН представлена на рис. 1.

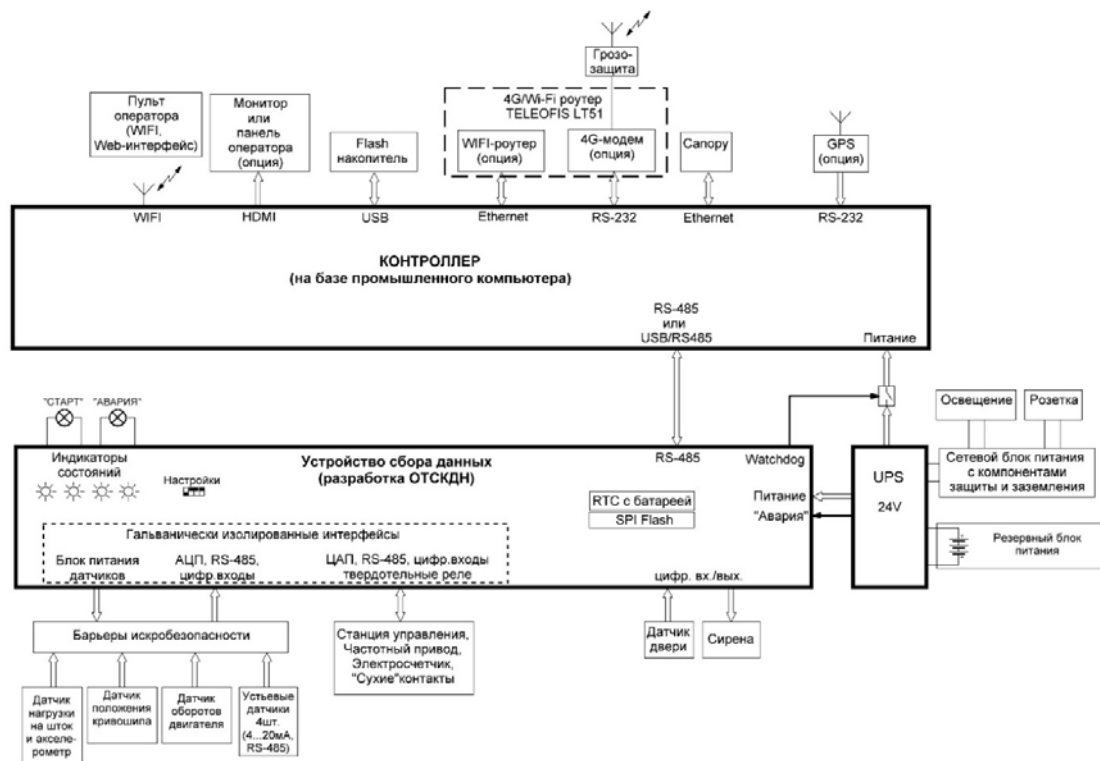


Рис. 1. Структурная схема контроллера УШГН

Устройство сбора данных обеспечивает преобразование аналоговых электрических сигналов, поступающих от внешних датчиков, в цифровой код – их обработку, а также передачу по интерфейсам связи в блок контроллера.

Блок контроллера является основным элементом, в котором реализован управляющий функционал и решаются задачи связи с удаленным сервером. Он представляет собой одноплатный промышленный компьютер, на котором установлено программное обеспечение (ПО), управляющее главными процессами (ГП) и функциями контроллера.

Web-интерфейс контроллера автоматизации УШГН является ПО верхнего уровня и представляет собой Fullstack Web-приложения, разработанного при помощи React (frontend – клиентская часть, web-браузер), Node.js (backend – серверная часть), SQLite (локальная база данных).

Разрабатываемое Web-приложение осуществляет подключение к ГП посредством установки TCP/IP-соединения и на данный момент имеет следующий функционал:

1) авторизация пользователей с разграничением их доступа по ролям: администратор, технолог, гость;

2) отображение пяти последних динамограмм с отображением параметров текущей динамограммы и точек отбора и неисправности, а также уставок максимальной и минимальной нагрузок;

3) отображение списка уставок конфигурации скважины, уставок заполнения, максимальной/минимальной нагрузки, жидкостной нагрузки и точки неисправности с возможностью их редактирования;

4) отображение параметров скважины, таких как состояние и режим работы, темп качания, текущие параметры (нагрузка, заполнение, давление), параметры времени работы, дебит и т. д.

Внешний вид Web-интерфейса контроллера автоматизации УШГН представлен на рис. 2.

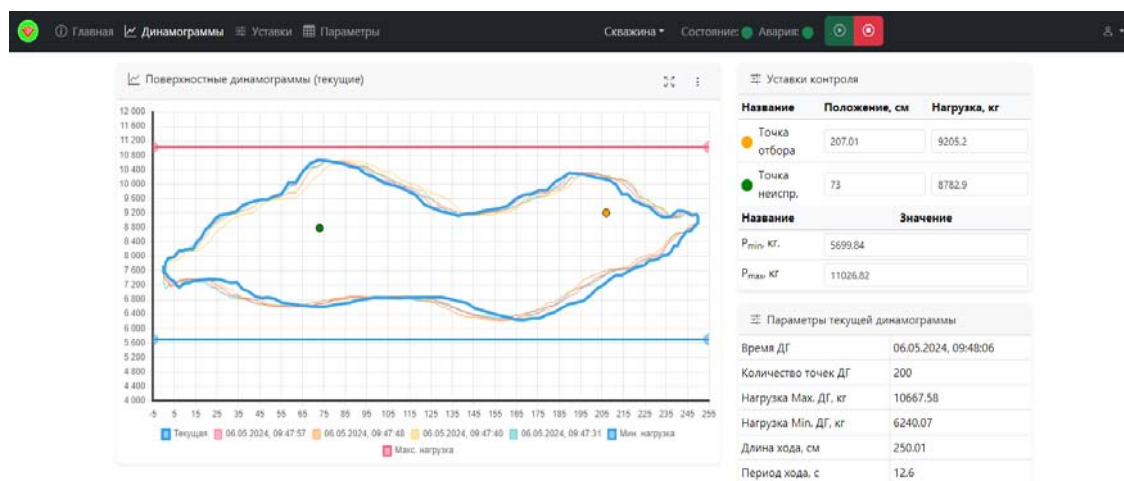


Рис. 2. Страница «Динамограммы» разрабатываемого Web-приложения

Внешний вид мобильной версии Web-приложения представлен на рис. 3.

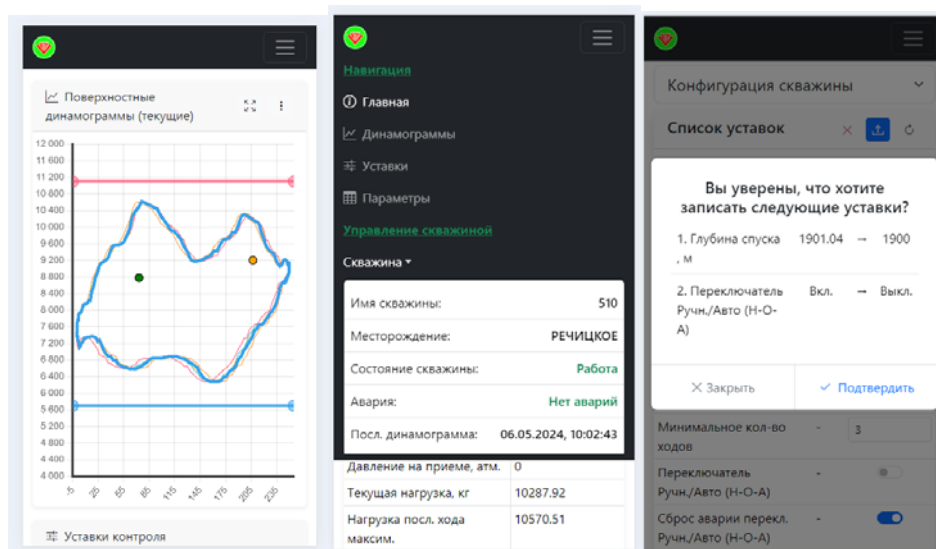


Рис. 3. Внешний вид мобильной версии Web-приложения

На данном этапе разработки Web-приложение предназначено для локального развертывания на промышленном компьютере контроллера автоматизации УШГН.

УДК 629.4:620.179.1:004.032.26

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ ДЕТАЛЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

О. В. Холодилов, Д. В. Шкороедов

Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель

Проанализированы перспективы автоматизации неразрушающего контроля технических объектов, связанные с использованием технологий на основе обработки изображений, машинного зрения. Особый интерес представляет применение искусственных нейронных сетей, позволяющих обнаруживать и классифицировать дефекты и прогнозировать отказы оборудования.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, дефект, обнаружение дефектов, классификация дефектов, искусственные нейронные сети.

THE USE OF NEURAL NETWORKS IN NON-DESTRUCTIVE CONTROL OF ROLLING STOCK PARTS

O. V. Kholodilov, D. V. Shkoroedov

Belarusian State University of Transport, Gomel

The prospects of automation of non-destructive testing of technical facilities related to the use of technologies based on image processing and machine vision are analyzed. Of particular interest is the use of artificial neural networks to detect and classify defects and predict equipment failures.

Keywords: non-destructive testing, defect, defect detection, defect classification, artificial neural networks.

Целью неразрушающего контроля (НК) технических объектов является не только обнаружение дефектов, но и оценка потенциальной опасности последних. Распознавание дефектов разного типа существенно повышает информативность контроля, позволяет оптимизировать технологические процессы за счет реализации так называемого активного контроля.

В настоящее время наиболее динамично развивающимся направлением при решении задач НК является анализ дефектоскопической информации в виде изображений, причем распознавание дефектов сводится к визуальному распознаванию полутонного изображения обнаруженного дефекта человеком-оператором. Такое распознавание имеет ряд естественных недостатков: субъективизм, малая надежность, зависимость от компетентности оператора и т. д.

Достоверность и объективность оценки полученных результатов непосредственно зависят от используемых средств и способов регистрации, правильный выбор которых обеспечивает технико-экономическую эффективность контроля. Применение телевизионных и фотографических средств для регистрации результатов НК с высокой точностью повышает надежность и достоверность обнаружения имеющихся на поверхности изделия дефектов, а также позволяет получить данные о степени опасности дефектов.

В настоящее время в задачах НК применяются автоматизированные системы обработки изображений, машинного зрения. В качестве приемника изображения используются различные видеоконтрольные устройства. Программное обеспечение, входящее в состав этих систем, позволяет с разной степенью объективности проводить количественный анализ изображения дефектов.

Применение специализированных методов и алгоритмов автоматического распознавания изображений для систем при реализации различных методов НК позволяет существенно повысить их эффективность. Одними из таких алгоритмов в настоящее время являются алгоритмы, основанные на использовании искусственных нейронных сетей (ИНС).

Области применения ИНС весьма разнообразны. Нейронные сети нашли применение в следующих сферах деятельности [1]:

- экономика и бизнес: прогнозирование временных рядов (курсов валют, объемов продаж, спроса, цен на сырье и т. д.), выявление недооцененных и переоцененных фирм, предсказание банкротств, оптимизация денежных и товарных потоков;
- медицина и здравоохранение: диагностика заболеваний, обработка медицинских изображений; уменьшение шумов показаний приборов, прогнозирование результатов применения разных методов лечения;
- робототехника: распознавание объектов и препятствий перед роботом, прокладка маршрута движения роботов;
- безопасность, охранные системы: распознавание лиц; идентификация личности по отпечаткам пальцев, лицу, голосу, подписи; распознавание автомобильных номеров;
- промышленность химическая, нефтеперерабатывающая, энергетика: анализ технического состояния оборудования, прогнозирование электропотребления.

Как правило, ИНС применяются при решении трудно формализуемых задач, для которых сложно найти точный алгоритм решения.

Целью настоящей работы является анализ современного состояния и опыта практического применения искусственных нейронных сетей в НК.

Традиционные методы НК, такие как радиационный, ультразвуковой, магнитный и др., имеют свои особенности и ограничения и требуют при интерпретации результатов участия опытных специалистов. В этой связи возникает потребность в но-

вых методах, которые могут снизить роль человеческого фактора и повысить точность и эффективность НК.

Искусственные нейронные сети в НК могут быть использованы для решения таких задач, как обнаружение и классификация дефектов, анализ сигналов или изображений, прогнозирование отказов и т. д.

Методы НК, основанные на ИНС, имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами. Они позволяют автоматизировать процесс контроля, повышают точность и скорость обнаружения дефектов, а также могут обрабатывать большие объемы данных. При этом они способны адаптироваться к различным типам материалов и образцов, что расширяет их применимость.

В настоящее время ИНС используются применительно к таким видам НК, как радиационный [1, 2], акустический (ультразвуковой, акустико-эмиссионный) [3, 4], вихретоковый [5], тепловой [6], капиллярный [7].

Использование ИНС в НК позволяет решить ряд задач:

– *автоматизация и скорость контроля.* Искусственные нейронные сети могут работать в автоматическом режиме, что упрощает процесс контроля и значительно сокращает время, затрачиваемое на обнаружение и классификацию дефектов. Это особенно важно при контроле больших объемов деталей или в процессах непрерывного контроля;

– *повышенная точность.* Нейронные сети способны обрабатывать большие объемы данных и извлекать из них скрытые функции. Это позволяет повысить точность обнаружения и классификации дефектов, а также уменьшить количество ложноположительных и ложноотрицательных результатов;

– *возможность обрабатывать различные типы данных.* Нейронные сети могут быть обучены обрабатывать различные типы сигналов или изображений, таких как акустические, тепловые, оптические и др. Это расширяет возможности неразрушающего контроля и позволяет обнаруживать дефекты в различных материалах и конструкциях;

– *обучение на основе данных.* Нейронным сетям требуется большое количество помеченных данных для обучения, что может быть достигнуто путем создания обучающих наборов с использованием различных методов НК. Обучая сеть на основе таких данных, ее можно научить распознавать особенности различных типов дефектов и аномалий.

Таким образом, нейронные сети, являясь мощным и универсальным инструментом распознавания дефектов, содержат в себе опыт и знания специалиста и в конечном счете только человек должен нести ответственность за результаты контроля, полученные с применением нейронной сети.

Использование нейронных сетей в НК открывает новые возможности для совершенствования НК. Технологии, основанные на ИНС, позволят повысить точность НК, автоматизировать производственные процессы.

Л и т е р а т у р а

1. Назаренко, С. Ю. Применение искусственных нейронных сетей в радиационном неразрушающем контроле / С. Ю. Назаренко, В. А. Удод // Дефектоскопия. – 2019. – № 6. – С. 54–70.
2. Поляков, А. В. О применении сверточных нейронных сетей при решении задачи неразрушающего контроля изделий / А. В. Поляков // Успехи современной науки. – 2017. – Т. 1, № 5. – С. 200–210.
3. Стенюшкин, В. В. Применение искусственных нейронных сетей в задачах ультразвукового неразрушающего контроля / В. В. Стенюшкин, Г. Ю. Гуськов, В. В. Шишкин //

- Теоретические и практические аспекты развития отечественного авиастроения : тез. Всерос. науч.-техн. конф. – Ульяновск : УлГТУ, 2012. – С. 76.
4. Фомичев, С. К. Возможность применения искусственных нейронных сетей для распознавания АЭ образов / С. К. Фомичев, А. Е. Пирумов, М. А. Яременко // J. of Mech. Eng. NTUU «Kyiv Polytechnic Institute». – 2011. – Т. 1, № 61. – С. 199–203.
 5. Применение нейронных сетей для распознавания конструктивных элементов рельсов на магнитных и вихретоковых дефектограммах / Е. В. Кузьмин, О. Е. Горбунов, П. О. Плотников [и др.] // Моделирование и анализ информационных систем. – 2018. – № 25 (6). – С. 667–679.
 6. Вавилов, В. П. Активный тепловой контроль композиционных материалов с использованием нейронных сетей / В. П. Вавилов, Д. А. Нестерук // Дефектоскопия. – 2011. – № 10.
 7. Холичев, Д. Д. Исследование возможности применения нейронных сетей для решения задач капиллярной дефектоскопии / Д. Д. Холичев, Хоназаров Анваржон Ганижон угли // Ресурсосберегающие технологии в контроле, управлении качеством и безопасности : сб. науч. тр. XI Междунар. конф. школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых «Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле: взгляд в будущее», Томск, 8–10 ноября 2022 г. – Томск : Изд-во ТПУ, 2023. – С. 259–263.

УДК 620

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В МОДЕЛЯХ ТЕПЛОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

А. Джанмырадов, И. Атдаев, Ф. Урунов, Ш. Мамедов

Государственный энергетический институт Туркменистана, г. Мары

Приедены результаты работы по использованию микропроцессорной техники для регулирования подачи природного газа в котел. Результаты показали, что с использованием автоматизации системы подачи газа в зависимости от температуры окружающей среды экономия природного газа в сутки составила 22440 м³.

Ключевые слова: теплоснабжение, природный газ, температура окружающей среды, автоматизация подачи газа.

EFFICIENCY OF DIGITAL TECHNOLOGIES IN THERMAL RESEARCH MODELS

A. Janmyradov, I. Atdaev, F. Urunov, Sh. Mamedov

State Energy Institute of Turkmenistan, Mary

This scientific article presents the results of the work on the use of microprocessor technology to regulate the supply of natural gas to the boiler, and the results showed that with the use of automation of the gas supply system depending on the ambient temperature, the savings of natural gas per day amounted to 22440 m³.

Keywords: heat supply, natural gas, ambient temperature, automation of gas supply.

В стране природный газ, питьевая вода, электроэнергия, отопление и горячая вода предоставляются пользователям по доступным ценам. Строятся и вводятся в эксплуатацию современные объекты, обеспечивающие бесперебойную поставку этих энергоресурсов. В результате руководства уважаемого Президента введенные в эксплуатацию вновь построенные объекты соответствуют мировым стандартам. В этих учреждениях используются передовые приборы, основанные на последних

научных результатах. Встроенные системы полностью автоматизированы с помощью этих передовых устройств.

На сегодняшний день в автоматизации центров теплоснабжения можно выделить разные виды технических средств. Вместо обычных устройств, использовавшихся в прошлом, внедряются программируемые технические системы, состоящие из микропроцессорных устройств. Первичные датчики, используемые для передачи данных и информации, обеспечиваются микропроцессорными устройствами в современных системах облачных вычислений. С помощью этих устройств данные могут передаваться на большие расстояния, передаваться на компьютеры и сохраняться в памяти.

Эти высокотехнологичные объекты являются центрами теплоснабжения, которые обеспечивают наших граждан горячей водой. В городе Ашхабаде, в областных и районных центрах подача теплой воды жителям осуществляется от строящихся или модернизируемых узлов теплоснабжения, сезонно, т. е. в холодное время года. Основной составляющей этих центров теплоснабжения является котельная установка и ее вспомогательное оборудование. В них нагрев чистой воды автоматически регулируется по температуре наружного воздуха, и она используется для обогрева квартир и других зданий. Взаимосвязь между водяным нагревом и окружающим воздухом показана на рис. 1.

Как видно из рис. 1, если температура окружающего воздуха превышает $+10^{\circ}\text{C}$, работа объектов автоматически прекращается.

Автоматизированная система управления и контроля теплоснабжения на базе программных комплексов позволяет показывать состояние всей котельной установки и ее различных компонентов на экране компьютера и предупреждает об изменении контролируемых параметров.

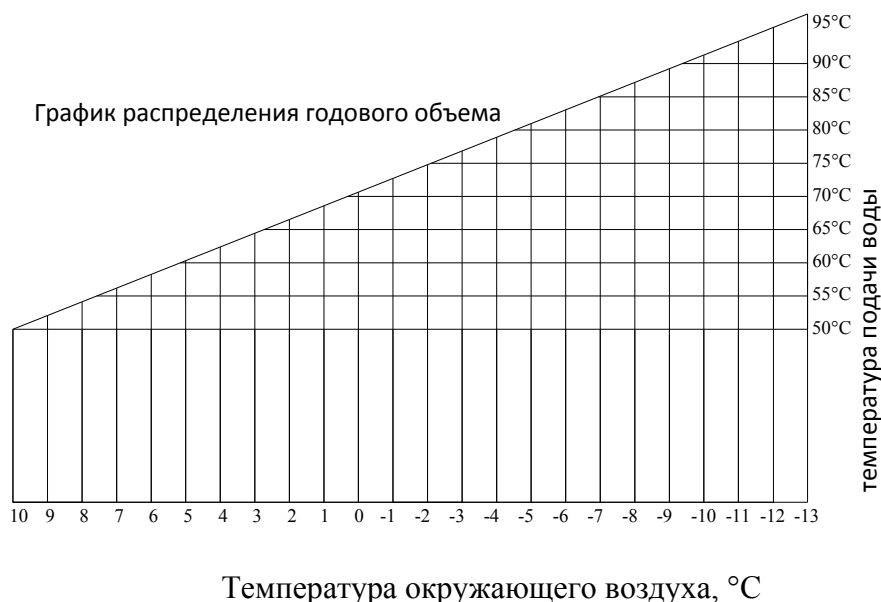


Рис. 1. Соотношение нагрева воды относительно наружного воздуха

Котельная установка может управляться дистанционно и автоматически в течение всего периода эксплуатации — от пуска до останова. Параметры (давление, расход, уровень и т. д.) автоматически настраиваются в данной ситуации, включая защиту и ограничение.

Получаемый сигнал от датчиков и программных пакетов постоянно контролируется. В нем хранится вся информация о статусе сотрудника, изменениях, внесенных сотрудником, и другая информация.

Благодаря современной организации систем водоснабжения и работе грамотных и квалифицированных специалистов наш народ живет современной жизнью. В рамках данной статьи аналитическая работа была проведена при содействии специалистов отдела «Марышахерйылылык», расположенного в городе Мары. В ходе исследования были проведены замеры в первом тепловом центре по улице Гороглы в городе Мары и втором тепловом центре по улице Битараплык города Мары:

– в первом тепловом центре расход газа измерялся счетчиком. В этом тепловом центре мы установили датчик и автоматически регулировали количество газа, подаваемого на котельную установку, в зависимости от температуры окружающей среды;

– во втором тепловом центре осуществлялся подогрев воды на основе операторской корректировки подаваемого в котельные помещения природного газа по температуре окружающего воздуха, производился замер часового расхода газа (рассчитывался по мощности котла).

На рис. 2 показано изменение температуры окружающего воздуха во время измерения.

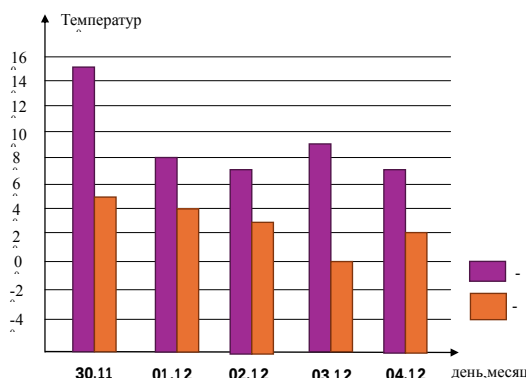


Рис. 2. Изменение температуры окружающего воздуха во время измерения

Получаем количество газа, потребленного в тепловых центрах (м^3) в период с 30.11.2022 г. по 04.12.2022 г. по счетчику расхода.

В период измерений осуществлялась автоматическая регулировка количества газа, подаваемого в котельную, путем снятия информации с датчика, размещенного снаружи в первом тепловом центре. Поскольку счетчика расхода газа (м^3) во втором тепловом центре нет, то расход газа за время T (1 сутки = 24 ч) рассчитывался по мощности потребления газа на основании данных котельной. В этих тепловых центрах размещена котельная Vitomax 200-LW. Расход газа данной установки составляет $935 \text{ м}^3/\text{ч}$. Затем производился расчет:

$$935 \cdot 24 = 22440 \text{ м}^3/\text{сутки}.$$

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Природный газ был сэкономлен за счет автоматизации с использованием датчика температуры в тепловом центре 1.

2. Вычисление природного газа, исходя из мощности котельной, приводит к неточностям.

УДК 621.38

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И МОНИТОРИНГА УМНОГО ДОМА

М. Г. Атаев, Д. Б. Меледжаев, А. Ч. Овлиягулыева

Государственный энергетический институт Туркменистана, г. Мары

Разработана система управления и мониторинга умного дома. Для этого к микроконтроллеру Arduino Uno был подключен Ethernet модуль, который отвечает за интернет-соединение. К контроллеру были подключены датчики и релейный модуль, которые выполняли функцию управления электрическими нагрузками и мониторинга. После программирования микроконтроллера с веб-браузера можно следить за показаниями и состоянием системы, а также управлять ей.

Ключевые слова: микроконтроллер, Ethernet модуль, релейный модуль, датчик.

DEVELOPMENT OF SMART HOUSE CONTROL AND MONITORING SYSTEM

M. G. Atayev, D. B. Melejayeve, A. C. Ovliyagulyyeva

State energy institute of Turkmenistan, Mary

In this work smart house control and monitoring system was designed. For this Ethernet shield was connected to Arduino Uno microcontroller, which responsible for internet connection. Also to controller was connected sensors and relay shield. They were responsible for controlling electrical loads and monitoring. After programming microcontroller, system can be controlled and monitored from web browser.

Keywords: microcontroller, Ethernet shield, relay shield, sensor.

Автоматические системы и технологии облегчают жизнь человека. Поэтому в настоящее время очень большое внимание уделяют автоматизированным умным системам, которые могут обеспечить комфорт и безопасность для людей.

В статье рассмотрена система автоматизации дома, включающая в себя централизованное управление внутренним и внешним освещением, кондиционированием воздуха, вентиляцией, противопожарной защитой, подогревом воды и сигнализацией.

Система автоматизации умного дома состоит из двух основных блоков: микроконтроллера Arduino Uno и Ethernet модуля. Другие важные компоненты устройства умного устройства – это реле для управления электрическими нагрузками, датчики для измерения и устройства, такие как персональные компьютеры или смартфоны, с которых владелец может управлять и контролировать систему умного дома.

Структура автоматизированной системы. В этом исследовании плата Arduino Uno подключена к Ethernet модулю. Релейный многоканальный модуль подключен с Ethernet модулем и датчиками. После этого микроконтроллер Arduino программируется для доступа к системе из любой точки мира через IP-адрес, настроенный на Ethernet модуль. После доступа к системе все устройства, подключенные к релейному модулю, могут управляться и контролироваться. В исследовании использовались датчики света, газа, движения, пламени, температуры и влажности, которые мы подключили к системе. На рис. 1 показана структура системы.

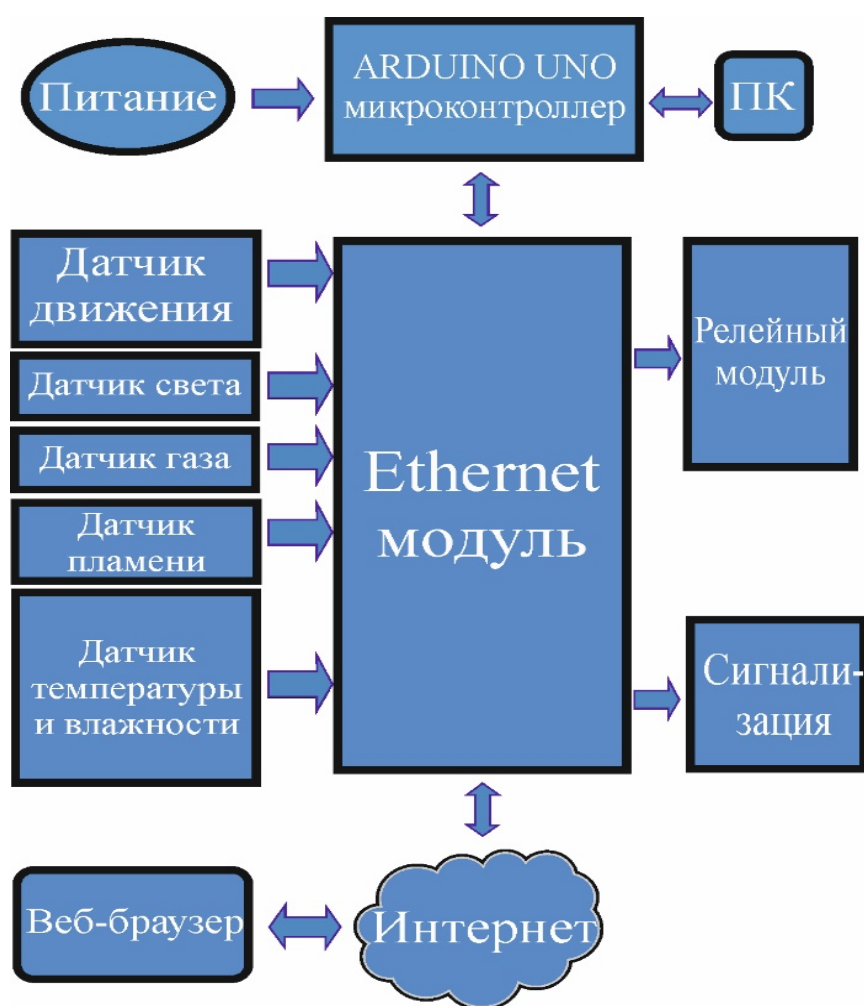


Рис. 1. Структура системы

Ethernet модуль подключен к Arduino микроконтроллеру и отвечает за интернет-соединение между микроконтроллером и сервером. Все датчики, релейный модуль и сигнализация подключены к микроконтроллеру. Микроконтроллер – это часть, которая непрерывно обрабатывает данные. Все действия и события можно контролировать и отслеживать с помощью веб-браузера любого устройства, такого как персональный компьютер, смартфон или планшет. Датчик DHT11 отвечает за измерение температуры и относительной влажности, датчик движения отвечает за обнаружение движения на основе пассивного инфракрасного света, фоторезистор служит датчиком для наружного освещения. Датчики пламени и газа выполняют функцию безопасности и служат для обнаружения утечки газа и пожара. С помощью релейного модуля можно управлять электрическими нагрузками через веб-браузер.

Таким образом, система была реализована на платформе Arduino Uno. В системе использовался Ethernet модуль для подключения с интернетом. Arduino Uno был запрограммирован с помощью персонального компьютера в среде программирования Arduino IDE. Спроектированная умная система мониторинга и управления показана на рис. 2.

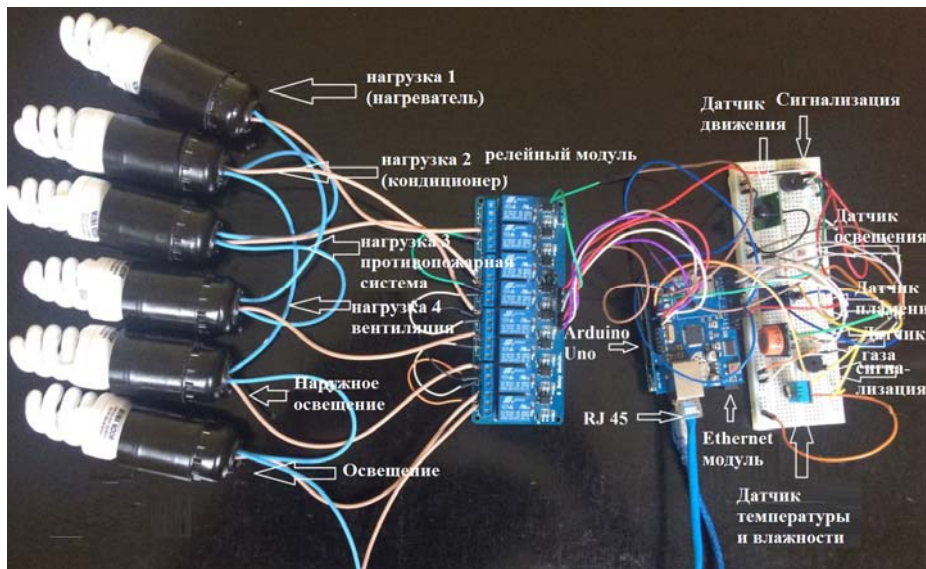


Рис. 2. Умная система мониторинга и управления

Чтобы все устройства работали бесперебойно, каждое устройство отдельно тестировалось и проверялось. После этого все устройства были подключены и вся система была протестирована. На рис. 3 показан алгоритм работы Ethernet модуля.

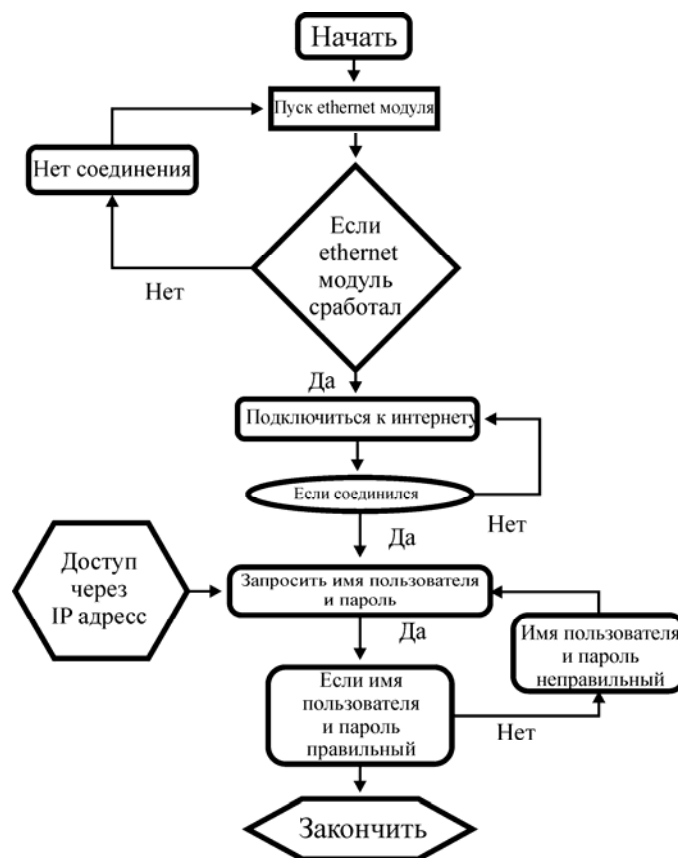


Рис. 3. Алгоритм работы Ethernet модуля

Система следит за показаниями датчиков, если значение достигнуто до предельного, тогда реле включаются и на нагрузку подается питание. С помощью датчика температуры и влажности можно следить за состоянием воздуха дома. Через веб-браузер можно увидеть, какая температура и влажность воздуха. На рис. 4 показан алгоритм для правильной работы датчиков.



Рис. 4. Алгоритм для правильной работы датчиков

Два релейных канала подключены к кондиционеру и нагревателю. Через веб-браузер можно управлять этими двумя нагрузками.

Целью данного исследования было разработать и реализовать систему автоматизации умного дома. Преимущество этой системы заключается в том, что ею можно управлять с помощью устройств через веб-браузер в любом месте и в любое время. Наконец, разработанная система предлагает гибкую, экономичную и дистанционно управляемую систему автоматизации умного дома.

УДК 311.21

СИСТЕМА УДАЛЕННОГО МОНИТОРИНГА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В. А. Савельев, А. В. Рябый

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

Рассмотрено программное обеспечение, позволяющее производить удаленный мониторинг параметров технологического оборудования с использованием технологии интернета вещей, с целью последующего анализа полученной информации.

Ключевые слова: удаленный мониторинг, система сбора данных, интернет вещей, программное обеспечение, технологическое оборудование, импортозамещение.

REMOTE MONITORING SYSTEM FOR TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

V. A. Saveliev, A. V. Rjabyj

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The article considers software that allows remote monitoring of technological equipment parameters using the Internet of Things technology for the purpose of subsequent analysis of the obtained information.

Keywords: remote monitoring, data acquisition system, Internet of Things, software, technological equipment, import substitution.

Система удаленного мониторинга позволяет получать и архивировать данные о параметрах работы технологического оборудования в реальном времени. Существует несколько основных причин, по которым производители станков, например, внедряют системы удаленного мониторинга.

Во-первых, удаленный мониторинг позволяет производителю отслеживать состояние станков, выявлять и предупреждать потенциальные неисправности. Это дает возможность быстро реагировать на проблемы, предоставлять своевременную техническую поддержку и проводить профилактическое обслуживание.

Во-вторых, удаленный мониторинг предоставляет производителю данные о производительности, энергопотреблении и других параметрах работы станков. Это помогает оптимизировать процессы производства, выявлять области для улучшения и повышать общую эффективность.

В-третьих, накопленные данные об использовании станков помогают производителям анализировать их работу, понимать потребности клиентов и разрабатывать более совершенные модели.

В-четвертых, удаленный мониторинг позволяет производителю быстро реагировать на проблемы, поддерживать связь с клиентами и предоставлять более качественное обслуживание.

В-пятых, данные, собранные с помощью удаленного мониторинга, могут использоваться для предоставления дополнительных услуг, таких как прогнозное обслуживание или аренда оборудования по подписке.

Среди наиболее известных систем удаленного мониторинга параметров технологического оборудования можно назвать Siemens MindSphere, Rockwell Automation FactoryTalk Cloud, GE Digital Predix, Emerson Plantweb [1–4].

В течение длительного времени интерес к вопросу разработки собственной импортозамещающей, недорогой системы удаленного мониторинга проявляет один из ведущих производителей станочного оборудования в Республике Беларусь – ОАО «СтанкоГомель».

Разработанная система, использующая возможности IoT для удаленного мониторинга технологического оборудования, имеет архитектуру, состоящую из нескольких ключевых частей: датчика, микроконтроллера, брокера и клиента (рис. 1).

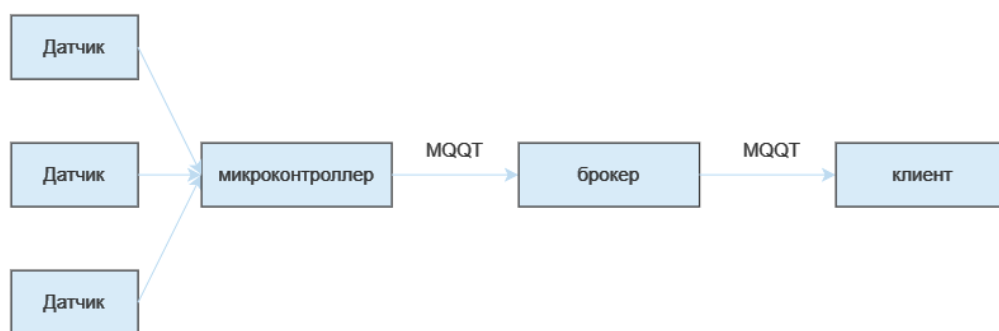


Рис. 1. Схема системы удаленного мониторинга

Датчик – собирает информацию о работе технологического оборудования. Это могут быть датчики вибрации, температуры, давления, положения, оборотов, уровня, газов и т. п. Датчики передают данные на микроконтроллер для дальнейшей обработки.

Микроконтроллер – выполняет сбор данных от датчиков и других источников информации. Он анализирует и обрабатывает данные, выполняет предварительную фильтрацию или агрегацию данных, а также принимает решения на основе полученной информации.

Брокер протокола MQTT является центральным компонентом в архитектуре MQTT и отвечает за пересылку сообщений между клиентами, подписчиками и издателями. Он принимает сообщения, опубликованные издателями, и маршрутизирует их к подписчикам, которые заинтересованы в получении этих сообщений. Брокер принимает запросы клиента и обрабатывает их. Он сохраняет полученные данные с микроконтроллера и клиента. Брокер также может обрабатывать сообщения с учетом фильтрации или преобразования данных, в зависимости от конфигурации системы. Преимуществами протокола MQTT является легковесность; гарантированная доставка сообщений; безопасность; асинхронный обмен сообщениями.

Клиент – отвечает за пользовательский интерфейс и получение запросов через IoT протокол MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) на сервер и представляет собой пользовательское приложение, через которое пользователи могут получать доступ к данным и управлять системой мониторинга. Клиентская часть позволяет пользователям настраивать параметры мониторинга в соответствии с их потребностями.

Такая архитектура системы удаленного мониторинга позволяет эффективно собирать, передавать и анализировать данные от различных датчиков, обеспечивая контроль и управление удаленными объектами или процессами в реальном времени.

Система мониторинга позволяет представить собранную информацию с датчиков технологического оборудования в виде графиков за определенный интервал времени (рис. 2).

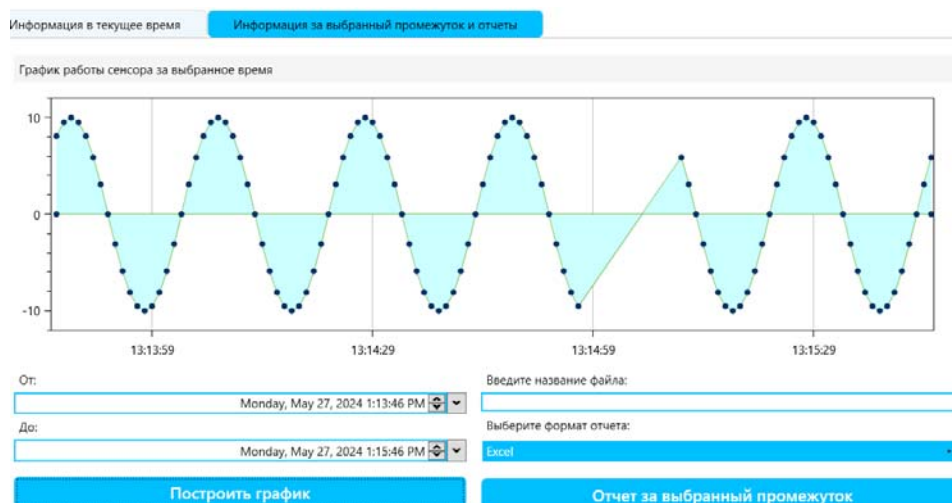


Рис. 2. Отображение информация за выбранный промежуток времени

Таким образом, разработанная система удаленного мониторинга, обладая низкой стоимостью и простотой реализации, успешно решает поставленные задачи:

- получение данных с датчиков оборудования;
- архивирование полученных данных;
- мониторинг и визуализацию;
- формирование отчетов;
- уведомление о сбоях в работе оборудования.

Л и т е р а т у р а

1. Siemens MindSphere – URL: <https://www.siemens-pro.ru/articles/siemens-articles-98.html> (дата обращения: 25.05.2024).
2. FactoryTalk Hub Cloud Manufacturing Portal. – URL: <https://www.rockwellautomation.com/en-us/products/software/factorytalk/factorytalk-hub.html> (дата обращения: 25.05.2024).
3. Predix Platform. – URL: <https://www.ge.com/digital/iiot-platform> (дата обращения: 25.05.2024).
4. Plantweb Insight. – URL: <https://www.emerson.com/en-us/automation/measurement-instrumentation/industrial-wireless-technology/about-plantweb-insight> (дата обращения: 25.05.2024).

УДК 621.31

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПЛАВНОГО ПУСКА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В. А. Савельев, Е. Д. Грицков

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

Разработанное устройство относится к области электротехники и может быть использовано для реализации электропривода с плавным пуском. При разработке устройства ставилась задача снизить установленную мощность, а также стоимость системы асинхронного электропривода с устройством плавного пуска.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, устройство плавного пуска, установленная мощность, функциональная схема.

DEVICE FOR SOFT START OF AN ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE

V. A. Savelyev, E. D. Gritskov

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The developed device pertains to the field of electrical engineering and can be used to implement an electric drive with a soft start. When developing the device, the task was to reduce the installed capacity, as well as the cost of the asynchronous electric drive system with a soft starter.

Keywords: asynchronous electric drive, soft starter, installed capacity, functional diagram.

Типовая схема асинхронного электропривода с устройством плавного пуска (УПП) содержит асинхронный электродвигатель М1 с короткозамкнутым ротором (рис. 1), тиристорный регулятор напряжения А1 с системой управления, а также сетевой КМ1 и шунтирующий КМ2 пускатели [1].

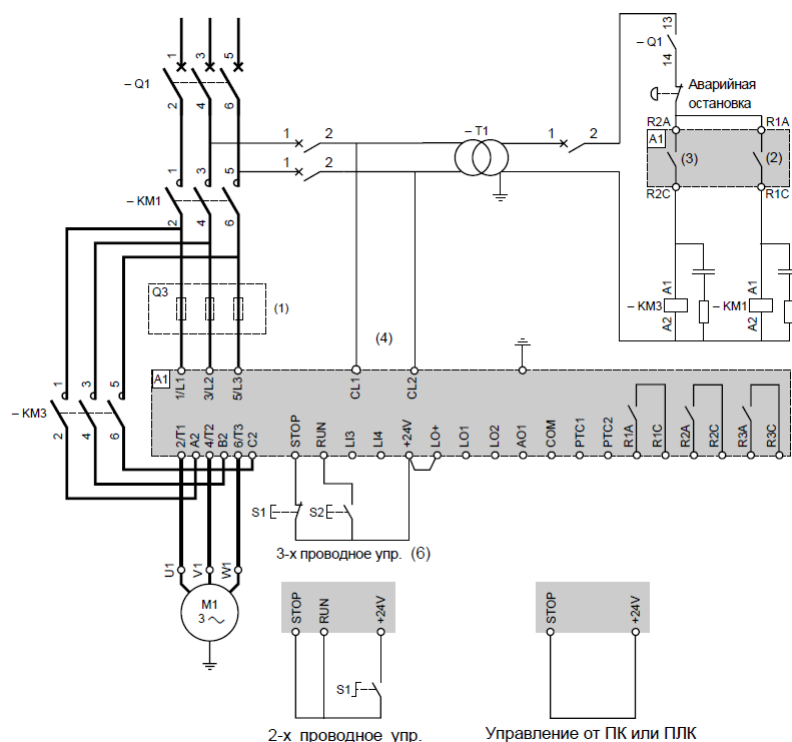


Рис. 1. Типовая схема асинхронного электропривода с устройством плавного пуска

Недостатком такого УПП является необходимость выбора мощности тиристорного преобразователя, соизмеримой с мощностью асинхронного электродвигателя, что существенно повышает стоимость электропривода при большой мощности электродвигателя.

В настоящей работе была поставлена задача снизить установленную мощность и стоимость системы асинхронного электропривода с плавным пуском.

Данная задача решается тем, что в описанном выше типовом асинхронном электроприводе с УПП применен асинхронный электродвигатель, содержащий две

трехфазные обмотки статора, не имеющие электрической связи между собой [2]. Такая конструкция электродвигателя позволяет получить механическую характеристику в виде суммы механических характеристик отдельных обмоток. При этом первая обмотка статора соединена с трехфазной сетью переменного тока через первый сетевой пускатель и тиристорный регулятор напряжения, а вторая обмотка статора соединена с той же трехфазной сетью переменного тока через второй сетевой пускатель.

На рис. 2, а приведена функциональная схема предлагаемого асинхронного электропривода с УПП.

Устройство содержит асинхронный электродвигатель М с трехфазным статором и короткозамкнутым ротором. Полусные обмотки статора электродвигателя разделены на две электрически не связанные обмотки. Первая обмотка статора асинхронного электродвигателя М подключена к трехфазной сети переменного тока через последовательно соединенные тиристорный регулятор напряжения ТРН и первый сетевой пускатель СП1. Вторая обмотка статора двигателя М подключена к той же трехфазной сети переменного тока через второй сетевой пускатель СП2.

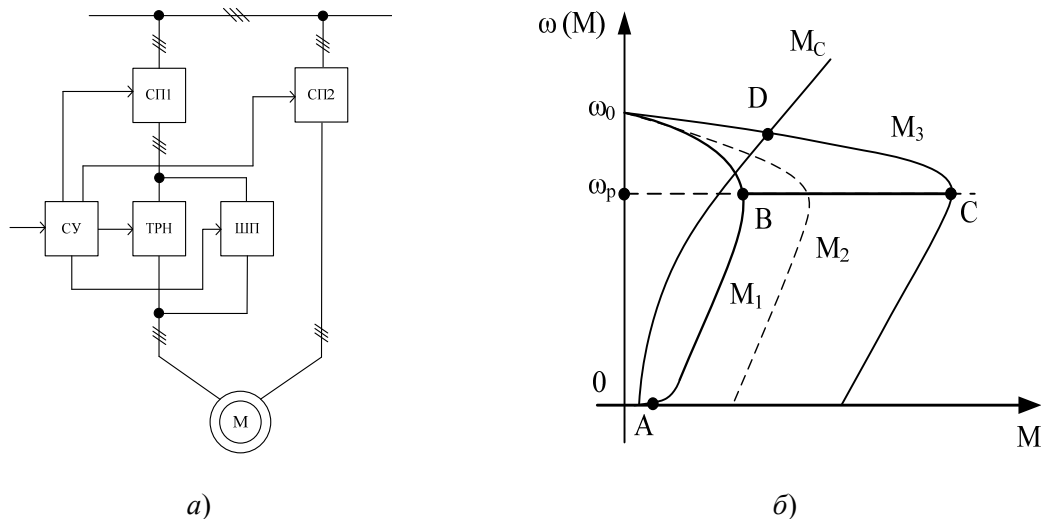


Рис. 2. Функциональная схема предлагаемого асинхронного электропривода с УПП (а) и его механические характеристики (б)

Тиристорный регулятор напряжения ТРН предназначен для регулирования напряжения на статоре асинхронного электродвигателя М.

Первый сетевой пускатель СП1 предназначен для подачи напряжения на тиристорный регулятор ТРН. Кроме того, пускатель СП1 имеет вывод для подключения к системе управления СУ.

Второй сетевой пускатель СП2 предназначен для подачи напряжения на вторую обмотку статора электродвигателя М и также имеет вывод для подключения к системе управления СУ.

Система управления СУ предназначена для формирования сигналов управления и имеет четыре вывода: для подключения к тиристорному регулятору ТРН, первому сетевому пускателью СП1, второму сетевому пускателью СП2 и к шунтирующему пускателью ШП.

Шунтирующий пускатель ШП предназначен для шунтирования тиристорного регулятора и подключен к нему параллельно. Кроме того, ШП имеет вывод для подключения к системе управления СУ.

Устройство работает следующим образом. Перед пуском асинхронного электродвигателя М все пускатели разомкнуты.

После замыкания первого сетевого пускателя СП1 напряжение питающей сети подается на первую обмотку статора асинхронного электродвигателя М. При этом электродвигатель будет работать на механической характеристике М1 (рис. 1, б). Электродвигатель начинает разгоняться от точки А до скорости ω_p по траектории АВ.

По достижении скорости ω_p , что соответствует точке В, система управления СУ одновременно подает сигнал включения на второй сетевой пускатель СП2 и шунтирующий пускатель ШП. Пускатель ШП шунтирует тиристорный регулятор ТРН, а пускатель СП2 разрешает подачу напряжения питающей сети на вторую обмотку статора электродвигателя М. В результате этого обе обмотки статора электродвигателя оказываются подключенными к питающей сети переменного тока. Происходит переход двигателя с характеристики М1 по траектории ВС на естественную характеристику М3.

Далее двигатель продолжает разгон по естественной характеристике М3, что соответствует траектории CD, до установившейся скорости в точке D.

Таким образом, предлагаемое УПП позволяет плавно произвести пуск асинхронного электродвигателя при помощи одной обмотки статора, а затем по достижении заданной скорости подключить вторую обмотку, после чего асинхронный электродвигатель выйдет на установленную скорость. За счет пуска двигателя по одной обмотке статора асинхронного электродвигателя, с последующим подключением второй обмотки, выбор мощности УПП производится только по половине мощности двигателя, что позволяет снизить стоимость системы асинхронного электропривода, а также снизить установленную мощность асинхронного электродвигателя.

Л и т е р а т у р а

1. Устройство плавного пуска и торможения Altistart 48. – URL: https://www.elec.ru/viewer?url=/files/2019/09/16/rukovodstvo_polzovatelya_ats48.pdf&ysclid=lqmdpx17jk806932835 (дата обращения: 24.12.2023).
2. Патент ВУ 12022 U, МПК Н 02Р 23/03 (2006.01), Н 02К 17/16 (2006.01). Асинхронный электродвигатель : опубл. 30.06.2019 / Тодарев В. В., Савельев В. А., Беликова А. И., Мигдаленок А. А. ; заявитель ГГТУ им. П. О. Сухого.

УДК 621.382:625.083.5

СПОСОБ ОРГАНИЗАЦИИ ИНТЕРФЕЙСА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОПЕРАТОРА С ПУЛЬТОМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЕМ АВТОГУДРОНАТОРА

А. В. Ковалев, Д. А. Литвинов, О. М. Ростоккина

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

Рассмотрены структура и особенности работы с оборудованием автогудронатора с использованием электронных систем управления. Предложен вариант реализации панели пульта управления оборудованием автогудронатора, обеспечивающим контроль основных параметров работы и интуитивно понятный интерфейс взаимодействия с оператором спецоборудования.

Ключевые слова: интерфейс, индикатор, панель управления, функционал.

THE METHOD OF ORGANIZING THE INTERFACE OF THE OPERATOR'S INTERACTION WITH THE CONTROL PANEL OF THE ELECTRONIC CONTROL SYSTEM FOR THE EQUIPMENT OF THE AUTOGUDRONATOR

A. V. Kavaleu, D. A. Litvinau, V. M. Rastokina

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The article discusses the structure and features of working with the equipment of an autogudronator using electronic control systems. A variant of the implementation of the control panel of the autogudronator equipment is proposed, which provides control of the main operating parameters and an intuitive interface for interaction with the operator of special equipment.

Keywords: Interface, indicator, control panel, functionality.

Автогудронатор – это специальная дорожная машина, предназначенная для транспортировки, нагрева, перекачки и распределения эмульсии или битума.

Оценка эффективности рабочего процесса автогудронатора представляет собой анализ различных показателей (критериев), определяющих характеристики объекта в конкретных эксплуатационных условиях [1, 2]. Современные автогудронаторы представляют собой сложный комплекс различных агрегатов и систем, связанных между собой кинематическими, электрическими и пневматическими связями.

Электрооборудование автогудронатора предназначено для дистанционного включения из кабины шасси световой сигнализации и светотехнических приборов, а также управления работой исполнительных механизмов (КОМ, гидроблока управления битумным насосом, распределителя битума, жидкотопливной горелки, открытием/закрытием форсунок рамп и т. д).

Современные системы управления, в отличие от установок с ручным управлением кранами регулировки распределения эмульсии, содержат модули опроса датчиков температуры, давления эмульсии, окончания эмульсии в резервуаре и др.

Оператору автогудронатора для удобства работы и повышения производительности труда необходим удобный пульт управления с выверенной эргономикой и надежностью. Рассмотрим основные подходы для реализации интерфейса между оператором и системой управления.

Одним из лидеров в производстве автогудронаторов – фирмой MASSENZA был предложен следующий вариант исполнения пульта управления (см. рис. 1)



Рис. 1. Внешний вид пульта управления MASSENZA

Как видно, пульт имеет мембранную клавиатуру без фоновой подсветки. Функционал ограничен основными функциями. Отсутствуют функции управления светотехникой, КОМ, горелкой. Половина поверхности пульта не занята органами управления.

На рис. 2 представлены экраны современного пульта планшетного типа управления автогудронатором, разработанный под различных производителей спецтехники [3].



Рис. 2. Внешний вид экранов пульта управления от RG-ROBOTICS

Основу системы управления составляет планшет – пульт управления, реализованный на базе планшета. Он имеет сенсорный экран и возможность переключения между ними. Однако оператору не всегда удобно искать органы управления и контроля, перелистывая экраны. Сенсорным панелям с цветными дисплеями также присущи недостатки в виде плохого тактильного эффекта нажатия клавиши, отсутствия эффекта памяти настроек функций при повторном включении системы и плохая читаемость при ярком солнечном свете. Если потребуется вывод оперативной информации другого вида, то необходимо серьезное вмешательство инженера-программиста и временные затраты.

В статье рассматривается вариант исполнения системы управления, которая реализована в пульте с интегрированными в него функцией ночной фоновой подсветки и силовым модулем контроля и управления (рис. 3).

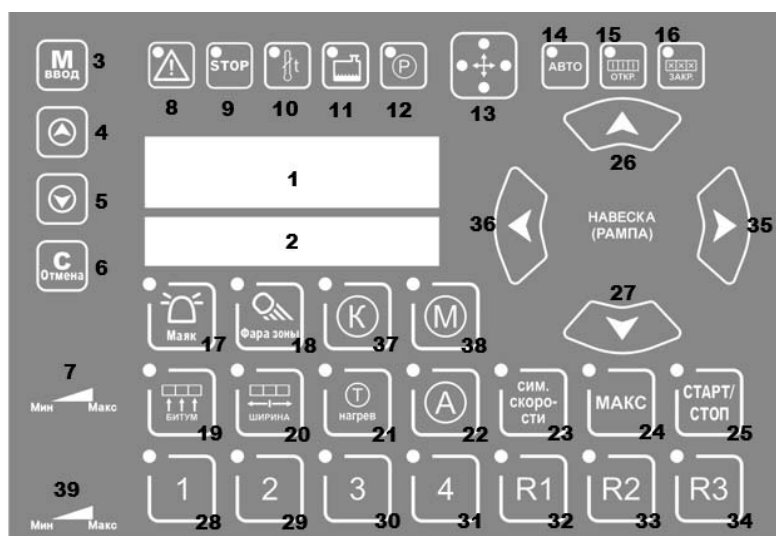


Рис. 3. Внешний лицевой панели системы управления типа КДМ-6

На передней части пульта предложено расположить мембранную клавиатуру с ярко выраженным тактильным эффектом, которая функционально разделена на пять полей: (1) индикатор, на который в символьном виде выводятся необходимые оператору параметры; (2) прозрачное поле для размещения версии изделия и программного обеспечения, которая необходим в случае замены изделия в случае его выхода из строя у потребителя; (3, 4, 5, 6) элементы для корректировки параметров работы системы и переключения вида информации, выводимой на индикатор; (7, 39) область для подключения потенциометров задания параметров с эффектом энергонезависимой памяти; (8...16) поля вывода индикации выполняемых действий, срабатывания датчиков безопасности работы системы и сигналы для привлечения внимания оператора при выходе определенных параметров работы системы из допуска; (17...38) кнопки оперативного включения операций или выборов режима работы.

Достоинством подобной реализации является расположение всех органов контроля и управления на одном поле с группировкой по функциональному назначению кнопок, что позволит оператору не отвлекаться от процесса работы на выбор требуемого вида оперативных действий. В систему будет интегрирован модуль управления жидкотопливной горелкой поддержания требуемой температуры эмульсии.

Еще важным отличием от прототипов является вывод на дисплей диапазона скоростей движения шасси для водителя, текущей скорости и индикации отклонения от рекомендуемых параметров. Эта опция, в отличие от конкурентов, позволяет оператору соблюсти норму разлива эмульсии в автоматическом режиме работы (с привязкой к скорости шасси) и повысить качество выполняемой работы.

Л т е р а т у р а

1. Машины по содержанию и ремонту автомобильных дорог и аэродромов : учеб. пособие / А. В. Вавилов, А. М. Шевелев, Д. И. Бочкарев ; под ред. А. В. Вавилова. – Минск : БИТУ, 2003. – 408 с.
2. Вербицкий, Г. М. Основы оптимального использования машин в строительстве и горном деле : учеб. пособие / Г. М. Вербицкий. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2006. – 105 с.
3. Система управления для гудронатора от RG-RABOTICS. – URL: https://truckmix.ru/news/sistema-upravleniya-dlya-gydronatora-ot-rg-robotics?from=rel-ap_right (дата обращения: 10.09.2024).

УДК 621.382:625.083.5

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ И НАСТРОЙКИ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЕМ АУТОГУДРОНАТОРОВ

А. В. Ковалев, Д. А. Литвинов, О. М. Ростокينا

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

Рассмотрены конструкции автогудронаторов, способы регулирования органов, обеспечивающих требуемую плотность распределения битума. Предложена методика настройки параметров рабочего оборудования распределения битума в зависимости от конструкции рампы.

Ключевые слова: автогудронатор, насос, регулятор, плотность распределения, методика настройки.

FEATURES OF OPERATION AND CONFIGURATION OF ELECTRONIC CONTROL SYSTEMS FOR THE EQUIPMENT OF AUTOGUDRONATORS

A. V. Kavaleu, D. A. Litvinau, V. M. Rastokina

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The article considers the designs of autogudronators, methods of regulating bodies that ensure the required density of bitumen distribution. A method for setting the parameters of the bitumen distribution working equipment depending on the ramp design is proposed.

Keywords: Autogudronator, pump, regulator, distribution density, adjustment method.

Автогудронатор – это универсальный автомобиль, предназначенный для равномерного распределения битума и битумных эмульсий при ремонте и строительстве дорог, аэродромов, мостовых сооружений. Наиболее распространены три конструкции гудронаторов [1, 2]:

- самоходные, где стальная цистерна с оборудованием монтируется на раму шасси грузового авто и используется его энергия или полностью (сжатый воздух, энергоснабжение, механический отбор мощности), или частично, в случае наличия автономной силовой установки;

- полуприцепные, где конструкция с оборудованием прицепляется к тягачу вместо грузового кузова с частичным использованием энергии шасси тягача;

- прицепные, где прицеп, оснащенный емкостью и соответствующим оборудованием, используется на буксире трактора либо грузовика. Как правило, это оборудование для малых объемов ремонта дорожного полотна и имеющие на своем борту автономную систему энергоснабжения различного вида.

Для автоматизации процесса нанесения гудрона или битума на дорожное полотно наиболее часто и экономически целесообразно применять самоходные гудронаторы – автогудронаторы с электронными система управления, которые обеспечивают:

- точное дозирование нормы розлива эмульсии в зависимости от скорости шасси и ширины розлива;

- отображение текущей нормы розлива эмульсии. Учет и ведение статистики расхода эмульсии;

- контроль и отображение скорости шасси, оборотов насоса;

- автоматическое поддержание заданной температуры эмульсии;
- управление кранами рециркуляции;
- управление открытием, закрытием ramпы.

Известны два подхода к организации разлива битума или эмульсии в соответствии с заданными параметрами:

а) использование регулируемого насоса эмульсии [3] (рис. 1, а). Расход эмульсии регулируется насосом, который приводит в движение гидромотор, управляемый регулятором потока. Источником энергии является гидравлический насос, приводимый в движение либо от вала коробки отбора мощности (КОМ) или от автономного двигателя. Электронная система управляет пропорциональным электромагнитом регулятора потока;

б) использование насоса эмульсии постоянной производительности [4] (рис. 1, б). Расход эмульсии через ramпу регулируется давлением, которое создает поворотная задвижка (затвор) с системой управления на возвратном трубопроводе. Между ramпой и задвижкой присутствует датчик давления в трубопроводе, информация с которого используется для системы управления задвижкой согласно заданному алгоритму. В качестве привода насоса эмульсии, создающего давление в ramпе, используется автономный двигатель установки.



а)



б)

Рис. 1. Внешний вид задней части автогудронатора с регулируемым насосом эмульсии (а) и с насосом эмульсии постоянной производительности (б)

У каждого из способов есть свои достоинства и недостатки.

При использовании регулируемого насоса конструктивно система дешевле и проще, однако:

1) оборудованию предъявляются высокие требования по повторяемости параметров и их стабильности в течение времени, что проблематично обеспечить в связи с износом оборудования в ходе работы и при производстве шестеренчатых насосов для эмульсии;

2) при работе на малых нормах разлива регулятор потока при перераспределении потока гидрожидкости будет ее греть, что приведет соответственно к перегреву рабочей среды и нестабильности ее характеристик;

3) в случае использования пропорционального регулятора потока с электромагнитом с большим гистерезисом в систему управления придется ввести датчик оборотов насоса эмульсии, что усложняет конструкцию и систему управления автоматики.

4) в случае использования КОМ на работу автоматики будет влиять производительность насоса гидрооборудования в зависимости от скорости движения шасси, количества оборотов двигателя и выбранной передачи коробки передач автомобиля (не обеспечится максимальная норма разлива).

При использовании насоса постоянной производительности на работу автоматики может оказать влияние только неисправность какого-то из узлов системы. К недостатку можно отнести достаточно высокую стоимость комплектации.

Для первого и второго варианта при испытаниях на нормы разлива было выяснено, что существенное значение оказывает на производительность форсунки ее способ изготовления и идентичность параметров.

При использовании гудронаторов с регулируемым насосом, настройку норм разлива можно оперативно скорректировать средствами системы управления, изменив начальный и конечный ток диапазона электромагнита регулятора потока, если производитель заложил эту возможность для потребителя в пульт управления.

Для гудронаторов с насосом постоянной производительности в пульт управления вносится математическая модель зависимости давления в рампе, от угла открытия задвижки, нормы разлива и ширины разлива. При этом на параметры математической модели оказывают влияние форма выборки отверстия в форсунках ramпы и их количество. Оказывает влияние на динамику изменения давления в рампе и тип используемой задвижки (конструкция лепестка затвора и скорость позиционирования по поступившей команде).

Проверено, что для обеспечения работы автогудронатора с автоматическим поддержанием норм разлива в зависимости от скорости движения шасси время полного хода открытия/закрытия задвижки должно быть менее 10 с.

В статье рассмотрены результаты влияния на параметры математической модели формы и размеров сечения форсунок. Предложена методика настройки автоматики системы управления на примере автогудронатора АРБ-8 производства опытно-механического завода ОАО «Дорстройиндустрия» (г. Фаниполь, Беларусь).

В результате испытаний по скорректированным параметрам математической модели системы управления АРБ-8 нормы разлива в автоматическом режиме распределения эмульсии были обеспечены в соответствии с требованиями при использовании форсунок ramпы, изготовленных с отклонением от эталонной модели.

Л и т е р а т у р а

1. Машины по содержанию и ремонту автомобильных дорог и аэродромов : учеб. пособие / А. В. Вавилов, А. М. Шевелев, Д. И. Бочкарев ; под ред. А. В. Вавилова. – Минск : БИТУ, 2003. – 408 с.
2. Вербицкий, Г. М. Основы оптимального использования машин в строительстве и горном деле : учеб. пособие / Г. М. Вербицкий. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2006. – 105 с.
3. Каталог проукции от ООО ЗДТ Регион 45. – URL: https://online-expo2020.exkavator.ru/company/ooo_zdt_region45/lots. – Дата обращения: 08.09.2024.
4. Автогудронатор АРБ-8. – URL: <https://fomz.by/offeritem/avto-gudronatorarb-8/> (дата обращения: 08.09.2024).

Рис. 1. Структурная схема инвариантной к скорости вращения САУ АВК

На структурной схеме (рис. 1) обозначено: K_{PM} – коэффициент передачи регулятора момента; T_n , K_n – постоянная времени и коэффициент передачи управляемого преобразователя в роторной цепи; $T_3 = \frac{L_1 L_{2\Sigma} - L_{12}^2}{R_{2\Sigma} L_1}$ – эквивалентная постоянная времени; $K_{\Sigma} = \frac{L_{12}}{L_1} \cdot \frac{U'_{1m}}{\omega_{0\text{эл.н}}}$ – коэффициент передачи; $\beta = \frac{P_A}{R_{2\Sigma}} K_{\Sigma}^2$ – модуль жесткости линеаризованной механической характеристики АВК; $K_{\text{ом}}$ – коэффициент передачи усилителя в канале обратной связи по моменту; T_ϕ – постоянная времени датчика момента и фильтра в канале обратной связи; K_c – коэффициентом передачи усилителя в канале обратной связи по скорости.

В качестве переменных состояния принимаем изменение скорости ($\Delta\omega = \omega_{0\text{эл}} - \omega_{\text{эл}}$) и значение момента M . Выражение для замкнутого ЭП, будет иметь вид:

$$M \left[T_3 T_n T_\phi p^3 + (T_\phi (T_n + T_3) + T_3 T_n) p^2 + (T_n + T_3 + T_\phi) p + 1 + K_{\text{ом}} \beta \frac{K_{PM} K_n}{K_{\Sigma}} \right] = \\ = \beta (T_\phi p + 1) \left[-\Delta\omega (T_n p + 1) + \frac{K_n}{K_{\Sigma}} (U_{3M} K^{PM} + K_c \Delta\omega) \right]. \quad (1)$$

Из выражения (1) получим характеристическое уравнение

$$D_0 p + D_1 p + D_2 p + D = \\ = \beta (T_\phi p + 1) \left[-\Delta\omega (T_n p + 1) + U_{3M} \frac{U_{PM} K_n}{K_{\Sigma}} + K_c \frac{K_n}{K_{\Sigma}} \Delta\omega \right], \quad (2)$$

где $D_0 = T_3 T_n T_\phi = d_0 T$; $D_1 = T_\phi (T_n + T) + T_3 T_n = d_1 T_\phi + d_0$; $D_2 = (T_n + T_3 + T_\phi) = d + T_\phi$;
 $D_3 = 1 + K_{\text{ом}} K_{PM} \frac{\beta K_n}{K_{\Sigma}} = d_2 + K_{\text{ом}} K_{PM} \frac{\beta K_n}{K_{\Sigma}}$.

Желаемые показатели качества характеристического уравнения определяли, исходя из нормированного уравнения третьего порядка (по Баттерворту), при условии минимума интеграла. Определим базовую частоту (среднегеометрический корень):

$$\omega_6 = \frac{D_1}{D_0 c_1} = \frac{1}{2} \left(\frac{T_\phi (T_n + T_3) + T_3 T_n}{T_3 T_n T_\phi} \right). \quad (3)$$

Определяем параметры модального регулятора момента из системы уравнений (4):

$$\begin{cases} D_3 = D_0 c_3 (\omega_6)^3; \\ c_3 = 1; \\ D_3 = 1 + K_{\text{ом}} \beta \frac{K_{PM} K_n}{K_{\Sigma}}. \end{cases} \quad (4)$$

Из системы (4) получаем выражение для произведения коэффициента обратной связи и регулятора момента:

$$K_{\text{ом}} K_{\text{рм}} = \left(D_0 (\omega_6)^3 - 1 \right) \frac{K_{\text{эм}}}{\beta K_{\text{п}}}. \quad (5)$$

Из уравнения статической характеристики замкнутого ЭП на основе АВК, определяем коэффициент передачи усилителя в канале обратной связи по скорости:

$$K_{\text{с}} = \frac{K_{\text{эм}}}{K_{\text{п}}}. \quad (6)$$

Для обеспечения заданного значения момента инвариантной САУ по управлению, необходимо, чтобы выполнялось равенство

$$\frac{M_{\text{н}}}{U_{\text{зм. н}}} = \frac{\beta K_{\text{рм}} K_{\text{п}}}{K_{\text{эм}} + K_{\text{ом}} K_{\text{рм}} \beta K_{\text{п}}}, \quad (7)$$

где $M_{\text{н}}, U_{\text{зм. н}}$ – номинальные значения момента и сигнала задания момента.

Подставив в (7) уравнение (5), выразим значение регулятора момента $K_{\text{рм}}$:

$$K_{\text{рм}} = \frac{M_{\text{н}}}{U_{\text{зм. н}}} \frac{K_{\text{эм}} D_0 (\omega_6)^3}{\beta K_{\text{п}}} = \left[\frac{(T_{\phi} (T_{\text{п}} + T_{\text{э}}) + T_{\text{э}} T_{\text{п}})^3}{8 (T_{\text{э}} T_{\text{п}} T_{\phi})^2} - 1 \right] \frac{M_{\text{н}} K_{\text{эм}}}{U_{\text{зм. н}} \beta K_{\text{п}}}. \quad (8)$$

Используя выражения (5) и (8), получим выражение для определения коэффициента передачи усилителя в канале обратной связи по моменту при модальном регуляторе:

$$K_{\text{ом}} = \frac{U_{\text{зм. н}}}{M_{\text{н}}} \frac{(D_0 (\omega_6)^3 - 1)}{D_0 (\omega_6)^3} = \frac{U_{\text{зм. н}}}{M_{\text{н}}} \left[1 - \frac{8 (T_{\text{э}} T_{\text{п}} T_{\phi})^2}{(T_{\phi} (T_{\text{п}} + T_{\text{э}}) + T_{\text{э}} T_{\text{п}})^3} \right]. \quad (9)$$

Таким образом, полученные выражения (6), (8), (9) будут определять значения параметров модального регулятора момента инвариантной САУ ЭП на основе АВК. Данную методику синтеза можно использовать при проектировании и наладке инвариантных к скорости вращения САУ ЭП на основе АВК.

Литература

1. Дорощенко, И. В. Динамика инвариантного испытательного стенда на основе асинхронно-вентильного каскада / И. В. Дорощенко, В. С. Захаренко // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322, № 4. – С. 25–33.
2. Дорощенко, И. В. Математическая модель нагрузочной части испытательного стенда инвариантного к скорости вращения на основе асинхронно-вентильного каскада / И. В. Дорощенко, В. С. Захаренко, В. А. Савельев // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2013. – № 3. – С. 63–72.
3. Дорощенко, И. В. Исследование гармонического состава тока асинхронно-вентильного каскада / И. В. Дорощенко, М. Н. Погуляев, В. С. Захаренко // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2015. – № 1. – С. 51–57.
4. Дорощенко, И. В. Электромагнитная совместимость электромеханического испытательного стенда на основе асинхронно-вентильного каскада / И. В. Дорощенко //

- Электромеханические преобразователи энергии : материалы VII Междунар. науч.-техн. конф., Томск, 14–16 окт. 2015 г. / Том. политехн. ун-т. – Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2015. – С. 70–75.
5. Дорошенко, И. В. Механические характеристики автоматизированного электромеханического испытательного стенда на основе асинхронно-вентильного каскада/ И. В. Дорошенко // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2011. – № 2. – С. 68–72.
6. Simulation model of an asynchronous machine with wound rotor in matlab simulink / I. Doroshchenko, V. Zakharenko, M. Pohulayev, N. Miftakhova // E3S Web of Conferences 288, 01110 (2021) SUSE-2021. – DOI 10.1051/e3sconf/202128801110

УДК 62-519

ВЫБОР СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИНТЕГРИРОВАНИЯ С ОБРАБАТЫВАЮЩИМ ЦЕНТРОМ

М. В. Матвеевцева

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

Рассмотрен выбор системы управления для робототехнического комплекса, состоящего из промышленного робота РГШ-40.02 и обрабатывающего центра ГДС 500. Установлено, что данное оборудование является совместимым и может быть объединено общей системой управления Siemens Simatic S7-1500.

Ключевые слова: система управления РТК, промышленный робот РГШ-40.02, Sinumerik, обрабатывающий центр ГДС 500.

SELECTION OF THE CONTROL SYSTEM OF THE ROBOTIC COMPLEX FOR INTEGRATION WITH THE PROCESSING CENTER

M. V. Matveyentsava

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

In this paper, the choice of a control system for a robotics complex consisting of an industrial robot RGS-40.02 and a processing center GDS 500 is considered. It has been established that this equipment is compatible and can be combined with a common Siemens Simatic S7-1500 control system.

Keywords: RTC control system, industrial robot RGS-40.02, Sinumerik, processing center GDS 500.

Роботизация производственных процессов является одним из ключевых направлений развития современной промышленности. Внедрение робототехнических комплексов (РТК) позволяет повысить производительность, качество и гибкость производства, а также сократить затраты на рабочую силу. Однако эффективная работа РТК невозможна без грамотного проектирования системы управления.

Для РТК выбираем централизованное или сетевое управление. Основная разница между ними заключается в архитектуре и распределении функций.

Централизованное управление осуществляется из единого центрального контроллера (ПЛК). Он обрабатывает всю информацию, принимает решения и формирует управляющие воздействия для всех компонентов комплекса. Связь между центральным контроллером и исполнительными устройствами (роботом, ОЦ) осуществляется по выделенным линиям.

Преимуществами являются простота реализации и программирования, лучшая синхронизация и координация работы компонентов, централизованный мониторинг и управление всем комплексом.

Недостатками являются высокая нагрузка на центральный контроллер, уязвимость к отказам центрального контроллера, ограниченная гибкость и возможность расширения.

При сетевом (распределенном) управлении каждый компонент комплекса (робот, ОЦ) имеет свой локальный контроллер. Они обрабатывают информацию и управляют своими устройствами. Контроллеры взаимодействуют между собой по промышленной сети (Ethernet, Profinet, Modbus и др.). Координация работы всего комплекса осуществляется через обмен данными между контроллерами.

Преимуществами являются более высокая отказоустойчивость, возможность расширения и модернизации системы, распределение вычислительной нагрузки.

Недостатками являются более сложная реализация и программирование, необходимость надежной промышленной сети, более сложная синхронизация работы компонентов.

Выбор между централизованным или сетевым управлением зависит от требований к производительности, гибкости, надежности и масштабируемости конкретного робототехнического комплекса.

Исходя из того, что промышленный робот РГШ-40.02 [2] совместим с системами управления ПРУ-1 и Siemens Sinumerik, а обрабатывающий центр ГДС 500 [4] использует систему управления Sinumerik выбираем Siemens Simatic S7-1500 [1] в качестве централизованной системы управления комплексом.

Siemens Simatic S7-1500 – это высокопроизводительная серия ПЛК, которая идеально подходит для управления сложными промышленными процессами, включающими роботов и станки с ЧПУ.

Sinumerik – это собственная система ЧПУ от Siemens, которая хорошо интегрируется с ПЛК Simatic S7-1500. Это обеспечит надежное и эффективное управление обрабатывающим центром ГДС 500. Для управления промышленным роботом РГШ-40.02, Simatic S7-1500 также предоставляет возможность интеграции с системой ПРУ-1 через соответствующие функциональные блоки и программное обеспечение.

Simatic S7-1500 поддерживает широкий спектр коммуникационных протоколов, включая Profinet, Profibus, OPC UA, что обеспечит надежную связь между ПЛК, роботом и обрабатывающим центром.

Программное обеспечение Totally Integrated Automation Portal (TIA Portal) от Siemens упростит интеграцию, программирование и настройку всего робототехнического комплекса в единой среде.

Таким образом, использование Siemens Simatic S7-1500 в качестве централизованной системы управления позволит эффективно интегрировать промышленный робот РГШ-40.02 и обрабатывающий центр ГДС 500 в единый робототехнический комплекс с надежным и гибким управлением.

Рассмотрим технические характеристики Siemens Simatic S7-1500 [3].

В качестве процессорных модулей имеется широкая линейка с различными характеристиками по производительности, объему памяти и количеству I/O-точек;

Например, CPU 1515-2 PN:

- производительность до 120 мкс/логическая операция;
- 1,5 Мб памяти программ, 5 Мб памяти данных;
- до 1024 точек дискретного ввода/вывода;
- встроенные интерфейсы Profinet/Ethernet, Profibus;

- возможность расширения модулями ввода/вывода.
 - Модули ввода/вывода:
 - широкий выбор модулей дискретного и аналогового ввода/вывода;
 - модули для подключения датчиков, исполнительных механизмов, сигнальной аппаратуры;
 - например, модуль SM 1523 с 32 дискретными входами и 32 дискретными выходами;
 - возможность горячей замены модулей без остановки процесса.
 - Коммуникационные возможности:
 - встроенные интерфейсы Profinet (до 4 портов), Profibus, PtP, Industrial Ethernet;
 - поддержка протоколов Modbus TCP/RTU, OPC UA, EtherNet/IP;
 - обмен данными с HMI-панелями, SCADA-системами, ПК.
 - Функции управления:
 - встроенные библиотеки для управления приводами, позиционирования, регулирования;
 - поддержка технологических функций, таких как управление перемещениями, синхронизация, контроль скорости и крутящего момента;
 - возможность интеграции систем управления станками (NC, CNC) и роботами (KUKA, Yaskawa и др.).
 - Программное обеспечение:
 - единая среда инженерного проектирования TIA Portal;
 - интуитивно понятное программирование в соответствии со стандартами IEC 61131-3;
 - диагностика, мониторинг и визуализация процессов.
 - Надежность и безопасность:
 - степень защиты IP20, устойчивость к вибрациям и ударам;
 - возможность резервирования CPU, сетей, питания;
 - встроенные функции обеспечения безопасности (Safety Integrated).
- В результате данного исследования можно заключить, что использование Siemens Simatic S7-1500 в качестве централизованной системы управления и программного обеспечения Totally Integrated Automation Portal (TIA Portal) от Siemens является наиболее оптимальным решением для управления робототехническим комплексом, представленным в виде промышленного робота РГШ-40.02 и обрабатывающего центра ГДС 500.

Автор выражает признательность научному руководителю канд. техн. наук доц. З. Я. Шабакаевой за оказанную помощь при проведении данного исследования.

Л и т е р а т у р а

1. Дьяконов, В. П. Siemens Simatic S7-1500. Программирование, проектирование, конфигурирование / В. П. Дьяконов. – Москва : ДМК Пресс, 2017. – 832 с.
2. Промышленные роботы РГШ-40.02: техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Москва : ВНИИТЭМР, 2016. – 78 с.
3. Siemens Sinumerik S7-1500 sl / S7-1500: руководство по эксплуатации. – Мюнхен : Siemens AG, 2020. – 1265 с.
4. Обрабатывающий центр ГДС 500: техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Санкт-Петербург : ГДС, 2018. – 112 с.

УДК 621.313

ГАРМОНИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВЫХОДНЫХ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА УСТРОЙСТВА НАГРУЖЕНИЯ РЕЗЕРВНЫХ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРОВ

М. Н. Погуляев

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

С помощью имитационного моделирования проведен расчет и анализ гармонического состава выходных напряжения и тока устройств нагружения резервных электрогенераторов, выполненных на основе тиристорных преобразователей. Установлено, что при номинальной нагрузке коэффициент искажений синусоидальности кривой выходного напряжения составляет 3,5–4,8 %, что указывает на низкий уровень гармонических искажений и соответствует нормам. В то же время коэффициент искажений синусоидальности кривой тока составляет 25–27 %, что требует внимания, так как это может негативно сказаться на работе питающей сети и самого генератора.

Ключевые слова: резервный электрогенератор, устройство нагружения, управляемый выпрямитель, ведомый инвертор, тиристорный преобразователь.

HARMONIC COMPOSITION OF OUTPUT VOLTAGE AND CURRENT OF THE LOADING DEVICE OF STANDBY ELECTRIC GENERATORS

M. N. Pogulyaev

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

In this work, using simulation modeling, the calculation and analysis of the harmonic composition of the output voltage and current of the loading devices of backup power generators based on thyristor converters was carried out. It was found that at rated load, the distortion coefficient of the sinusoidal curve of the output voltage is 3.5–4.8 %, which indicates a low level of harmonic distortion and corresponds to the norms. At the same time, the distortion coefficient of the sinusoidal current curve is 25...27%, which requires attention, since this can negatively affect the operation of the supply network and the generator itself.

Keywords: backup power generator, loading device, controlled rectifier, driven inverter, thyristor converter.

Необходимым условием поддержания резервных электрогенераторов (РЭГ) в рабочем состоянии являются их периодические испытания под нагрузкой с помощью специальных устройств нагружения (УН), имитирующих различные режимы работы. В настоящее время наиболее перспективными являются УН, построенные на базе статических преобразователей [1, 2]. Такие устройства являются энергосберегающими, позволяют создавать требуемые режимы нагружения и проводить испытания с высокой точностью. В то же время вентильные преобразователи являются источниками высших гармоник тока и напряжения, которые оказывают негативное влияние на питающую сеть.

Цель работы заключается в расчете и анализе гармонических составляющих выходных напряжения и тока энергосберегающего устройства нагружения резервных электрогенераторов с использованием имитационной модели, разработанной в программной среде MatLab и его приложениях Simulink и SimPowerSystems (рис. 1) [3]. Использование имитационной модели в среде MatLab позволяет визуа-

лизировать и анализировать поведение системы при различных нагрузках, моделировать разнообразные сценарии загрузки и режимы работы генераторов, включая крайние условия, вычислять коэффициенты гармонических искажений и оценивать влияние устройства на питающую сеть.

В качестве параметров, характеризующих влияние устройства на питающую сеть и испытуемый генератор, будем использовать суммарный коэффициент гармонических составляющих тока (коэффициент искажений синусоидальности кривой тока) K_I и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (коэффициент искажений синусоидальности кривой напряжения) K_U .

На имитационной модели для генератора мощностью $8,1 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, при различных значениях коэффициента мощности K_m , были получены численные значения коэффициентов несинусоидальности напряжения K_U и тока K_I , а также величины активной P и полной S мощностей на выходе устройства нагружения (см. таблицу).

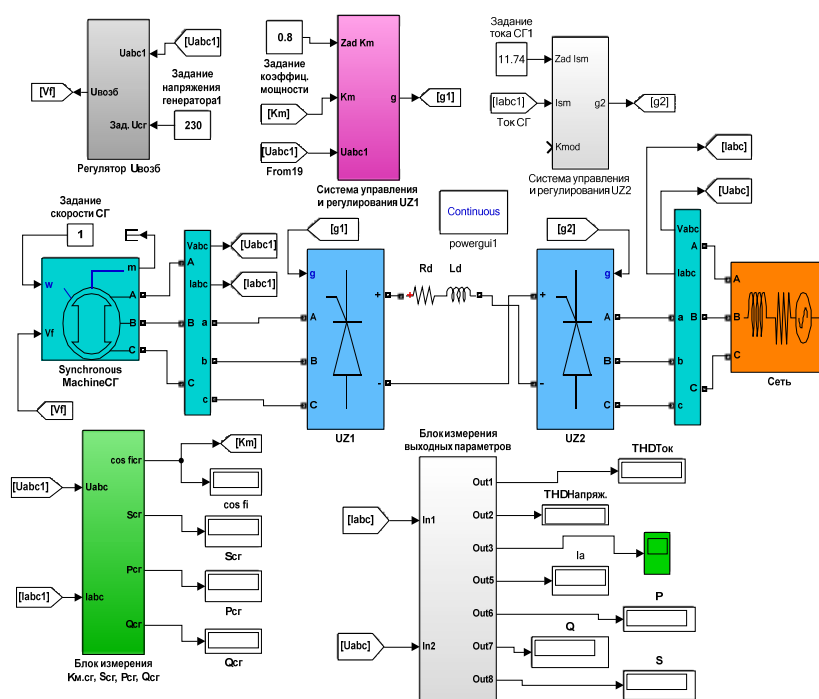


Рис. 1. Имитационная модель устройства нагружения резервных электрогенераторов

Значения коэффициентов несинусоидальности напряжения и тока

Параметры на выходе устройства нагружения				
K_m	P , Вт	S , В · А	K_U , %	K_I , %
0,9	–6728	8726	3,57	27,1
0,8	–5859	8831	4,03	26,82
0,7	–5065	8970	4,39	26,59
0,6	–4262	9076	4,54	26,33
0,5	–3457	9164	4,73	26,08
0,4	–2657	9238	4,72	25,81

Из таблицы следует, что при номинальной нагрузке коэффициент искажений синусоидальности кривой выходного напряжения составляет 3,57–4,72 %, что указывает на низкий уровень гармонических искажений и соответствует нормам. В то же время коэффициент искажений тока составляет 25,8–27,1 %, что требует внимания, так как это может негативно сказаться на работе питающей сети и самого генератора. Анализ значений коэффициентов искажений позволит определить, насколько энергосберегающее устройство влияет на качество электроэнергии и работу генератора. Полученные результаты подчеркивают необходимость дальнейшего анализа и возможных мер по снижению искажений тока для повышения общей эффективности и снижения влияния на питающую сеть.

Данное исследование поможет в разработке рекомендаций по оптимизации работы резервных электрогенераторов, улучшению качества электроэнергии и снижению потерь, связанных с гармоническими искажениями.

Л и т е р а т у р а

1. Энергоэффективные испытательные стенды / М. Н. Погуляев, И. В. Дорошенко, В. А. Савельев, В. В. Тодарев // Энергоэффективность. – 2018. – № 9. – С. 26–30.
2. Погуляев, М. Н. Энергосберегающее устройство нагружения резервных электрогенераторов на основе статических преобразователей / М. Н. Погуляев // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2022. – № 3 (90). – С. 96–103.
3. Simulation model of an asynchronous machine with wound rotor in matlab simulink / M. Pohulyayev, J. Doroshenko, V. Zakharenko, M. Pohulyayev, N. Mitrahkova // SUSE-2021 : E3S Web of Conferences, Kazan, 18–20 Feb. 2021 / Kazan Federal University. – Kazan, 2021. – Vol. 288. – P. 0110.

УДК 621.313

РЕГУЛИРОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ В УСТРОЙСТВАХ НАГРУЖЕНИЯ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНЫХ УСТАНОВОК

М. Н. Погуляев, В. Е. Назарчук

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

Рассмотрена возможность регулирования коэффициента мощности в устройствах нагружения дизель-генераторных установок, выполненных на основе статических преобразователей. Показано, что изменением угла управления тиристорным преобразователем в диапазоне 15–60° можно задавать коэффициент мощности генератора в пределах 0,4–0,9.

Ключевые слова: дизель-генераторная установка, синхронный генератор, устройство нагружения, управляемый выпрямитель, ведомый инвертор, тиристорный преобразователь.

POWER FACTOR REGULATION IN THE LOADING DEVICES OF DIESEL GENERATOR SETS

M. N. Pogulyayev, V. E. Nazarchuk

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The possibility of regulating the power factor in the loading devices of diesel generator sets based on static converters is considered. It is shown that by changing the control angle of the thyristor converter in the range of 15–60°, the generator power factor can be set in the range of 0,4–0,9.

Keywords: diesel generator set, synchronous generator, loading device, controlled rectifier, driven inverter, thyristor converter.

Дизель-генераторные установки (ДГУ) используются в качестве резервных источников питания и обеспечивают функционирование наиболее ответственных потребителей при исчезновении центрального электроснабжения. Такие установки обычно длительно находятся в неактивном состоянии (холодном резерве). Чтобы гарантировать, что генераторные установки безотказно сработают при аварийных ситуациях необходимо регулярно проводить их техническое обслуживание и испытания под нагрузкой с помощью устройств нагружения (УН). При этом одновременно производятся испытания как приводного двигателя, так и синхронного генератора (СГ).

Нагружающее устройство должно создавать нагрузку от минимальной равной 10 % до максимальной равной 110 % номинальной мощности генератора при коэффициенте мощности 0,8, с возможностью его регулирования. Помимо известных устройств нагружения ДГУ в настоящее время перспективными являются устройства нагружения, выполненные на статических преобразователях [1]. В традиционных устройствах регулирование коэффициента мощности производится изменением соотношения активного и индуктивного сопротивлений нагрузки, что требует применение коммутационных аппаратов, снижающих надежность устройства.

Цель работы – исследование возможности регулирования коэффициента мощности устройства нагружения ДГУ, выполненного на управляемых выпрямителях (тиристорах) [2]. Функциональная схема такого УН представлена на рис. 1. В ее состав входят: СУ – система управления; Д – двигатель; СГ – нагружаемый синхронный генератор; УВ – управляемый выпрямитель; ВИ – инвертор, ведомый сетью; L – реактор; Т – трансформатор согласования (при необходимости).

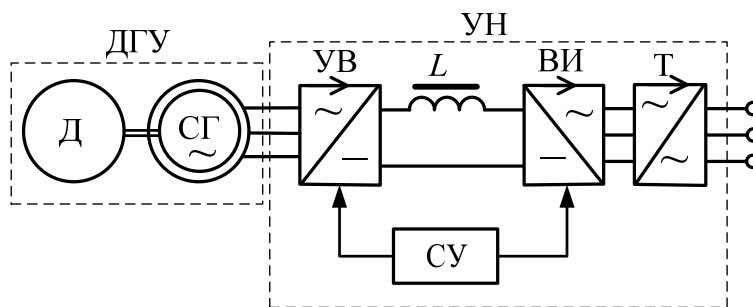


Рис. 1. Блок-схема устройства нагружения на управляемых выпрямителях

В тиристорных преобразователях при задержки подачи управляющего импульсов на тиристоры на угол α первая гармоника тока I_1 отстает по фазе от основной гармонике напряжения на угол φ :

$$\varphi = \alpha + \frac{\gamma}{2},$$

где γ – угол межвентильной коммутации.

$$\gamma = \arccos \left(\cos \alpha - \frac{2X_r I_d}{\sqrt{2}U_r} \right) - \alpha,$$

где X_r – индуктивное сопротивление генератора в режиме коммутации; I_d – выпрямленный ток; U_r – линейное напряжения генератора.

Коэффициент мощности нагрузки генератора K_m :

$$K_m \approx \cos\varphi = \cos\left(\alpha + \frac{\gamma}{2}\right). \quad (1)$$

Таким образом, коэффициент мощности генератора можно задавать углом α управляемого выпрямителя.

Работа данной схемы нагрузителя была проверена на имитационной модели, созданной в программе Matlab и его приложениях [3]. В модели коэффициент мощности рассчитывается по формуле

$$K_{m1} = \frac{P_1}{S_1}, \quad (2)$$

где P_1 , S_1 – активная и полная мощности генератора соответственно.

В таблице представлены значения коэффициента мощности генератора мощностью 30 кВА при номинальных значениях напряжения 0,4 кВ и тока нагрузки 43,3 А, полученные с использованием формулы (1) и при численном моделировании по формуле (2).

Сравнение расчетов значений коэффициента мощности генератора

α , град	60	45	30	15
Значения K_m по формуле (1)	0,412	0,615	0,793	0,918
Значения K_{m1} по формуле (2)	0,4	0,61	0,78	0,903

Полученные близкие результаты свидетельствует о возможности регулирования коэффициента мощности в диапазоне 0,4–0,9 при данной схемной реализации УН. В ходе исследования также было установлено, что, управляя ведомым инвертором, можно задавать необходимый ток нагрузки генератора, а само устройство является энергосберегающим, рекуперировав в сеть до 82 % вырабатываемой энергии. Таким образом, нагрузители на основе управляемых полупроводниковых выпрямителей являются перспективными устройствами для испытания синхронных генераторов под нагрузкой.

Л и т е р а т у р а

1. Энергоэффективные испытательные стенды / М. Н. Погуляев, И. В. Дорощенко, В. А. Соловьев, В. В. Тодарев // Энергоэффективность. – 2018. – № 9. – С. 26–30.
2. Погуляев, М. Н. Энергосберегающее устройство нагружения резервных электрогенераторов на основе статических преобразователей / М. Н. Погуляев // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2022. – № 3 (90). – С. 96–103.
3. Simulation model of an asynchronous machine with wound rotor in matlab simulink / J. Doroshchenko, V. Zakharenko, M. Pohulayev, N. Miftakhova // SUSE-2021 : E3S Web of Conferences, Kazan, 18–20 Feb. 2021 / Kazan Federal University. – Kazan, 2021. – Vol. 288. – P. 0110.

УДК 621.313

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

В. В. Логвин, Л. В. Веппер

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

Дан анализ схем создания автоколебательных режимов с получением максимальной магнитодвижущей силы в электроприводах колебательного движения без использования механических преобразователей энергии.

Ключевые слова: автоколебательный режим, асинхронный электродвигатель, энергоэффективность.

ENERGY-EFFICIENT ELECTRIC DRIVE OF OSCILLATORY MOTION

V. V. Logvin, L. V. Vepper

Sukhoi State Technical University Gomel, the Republic of Belarus

During the research, an analysis of the schemes for creating self-oscillatory modes was carried out with obtaining the maximum magnetomotive force in electric drives of oscillatory motion without using mechanical energy converters.

Keywords: self-oscillatory mode, asynchronous electric motor, energy efficiency.

Наиболее распространенным электроприводом возвратно-вращательного движения, является электропривод вращательного движения, в котором используются либо механические преобразователи (редукторы), либо переключатели полярности или фазы напряжения питания электродвигателя для реверсирования направления вращения.

В данной работе предлагается принцип построения колебательного электропривода, основанный на обеспечении условий возникновения устойчивого автоколебательного режима работы его силового электромеханического узла «асинхронный электродвигатель – упругий элемент».

В таком варианте автоколебательный электропривод чрезвычайно просто исполняется, поскольку для его реализации достаточно обмотки общепромышленного асинхронного электродвигателя подключить к однофазной электросети, а на валу разместить пружину или маятник (дисбаланс).

Следовательно, для развития и внедрения автоколебательных электроприводов, как нового перспективного класса безредукторных приводов колебательного движения, актуальным становится исследование автоколебаний его силового элемента, состоящего из однофазного асинхронного электродвигателя и размещенных на его валу пружины или маятника, а также использование устройств для повышения энергоэффективности автоколебательного электропривода.

Использование автоколебательного режима общепромышленных трехфазных асинхронных электродвигателей, включенных в трехфазную сеть, упрощает реализацию, но не дает существенного выигрыша по мощности из-за малой величины колебательной составляющей электромагнитного момента по сравнению с постоянной составляющей, работающей на сдвиг нейтрали колебаний, т. е. на одностороннее поджатие пружины.

Предлагаемое пересоединение обмоток общепромышленного трехфазного асинхронного электродвигателя для подключения к однофазной электрической цепи,

с целью перевода его в однофазный режим работы, и замена механической пружины маятником, имитирующим «упругость», позволит предельно упростить реализацию и повысить надежность автоколебательных систем.

Наиболее перспективным по простоте и эффективности реализации автоколебательных режимов является трехфазный электродвигатель с пересоединением статорных обмоток для подключения к однофазной электрической сети, имеющий на валу маятник (дисбаланс).

Предлагается вместо маятника или дисбаланса использовать электропривод с возможностью рекуперации энергии в сеть, что достижимо при питании от управляемого инвертора [1]. Тогда на участке торможения энергия, запасенная в механизме, будет использоваться не в дисбалансе, а возвращаться в сеть.

Таким образом, за счет рекуперации энергии в сеть мы повысим КПД установки и уменьшим затраты на электроэнергию. Данная система регулирования позволит экономить электроэнергию не только на участке торможения (генераторном режиме), но и в двигательном режиме за счет отсутствия маятника.

В результате предложенной реализации схемы, за счет рекуперации энергии в сеть, мы повысим КПД установки и уменьшим затраты на электроэнергию. Данная система регулирования позволит экономить электроэнергию не только на участке торможения (генераторном режиме), но и в двигательном режиме за счет отсутствия дисбаланса.

Л и т е р а т у р а

1. Патент РБ 22642. Способ управления колебательным электроприводом с асинхронным двигателем № а 20170496 / Тодарев В. В., Логвин В. В., Зайцев А. С., Беликова А. И. // Официальный бюллетень № 4/2019 : опубл. 30.08.2019.

УДК 62-83-52

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЧАСТОТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ С БЕСПРОВОДНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ДЛЯ ТРЕХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Л. В. Веппер, В. В. Логвин

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

*Объектом исследования является частотный преобразователь с беспроводным
управлением для трехфазных асинхронных двигателей.*

Ключевые слова: частотный преобразователь, электродвигатель, выпрямитель, инвертор, фильтр, широтно-импульсная модуляция, микропроцессор.

DESIGNING A FREQUENCY CONVERSION SYSTEM C WIRELESS CONTROL FOR THREE-PHASE ASYNCHRONOUS ENGINES

L. V. Vepper, V. V. Logvin

Sukhoi State Technical University Gomel, the Republic of Belarus

The object of the study is a frequency converter with wireless control for three-phase asynchronous motors.

Keywords: frequency converter, electric motor, rectifier, inverter, filter, pulse width modulation, microprocessor.

Несмотря на то что преобразователи частоты (ПЧ) нашли применение в задачах управления электродвигателями, а также их защиты относительно недавно – с 1980-х гг., сегодня они не просто широко распространены, а необходимы для большинства технологических процессов на производствах.

В связи с повсеместным использованием частотных преобразователей появилась необходимость в реализации беспроводного управления. Перед нами были поставлены следующие задачи:

- подобрать подходящий микроконтроллер и описать используемую периферию;
- выбрать протокол удаленного управления;
- описать принцип работы системы и реализовать функциональную схему управления;
- описать достоинства и недостатки системы.

Частотный преобразователь (ЧП) представляет собой электронный прибор, преобразующий сетевой ток в режиме реального времени в целях адаптации его под параметры электродвигателя. Векторные частотные преобразователи позволяют тонко регулировать и поддерживать обороты асинхронных двигателей (АД) и приводов, благодаря чему появляется возможность с высокой точностью настраивать алгоритм их работы в зависимости от требуемого режима. Используя различные математические модели, векторные преобразователи частоты могут не только контролировать работу статора и ротора АД, но и учитывать их взаимодействие, обеспечивая адаптацию момента и скорости вращения к требуемому режиму управления, гарантируя при этом двигателю наивысший КПД. Сохранение высокого крутящего момента во всем диапазоне скоростей, в том числе при малых оборотах, в свою очередь, дает возможность максимально использовать динамические свойства асинхронного двигателя.

В конструкции каждого частотного преобразователя есть несколько узлов, которые отвечают за функциональные возможности данного оборудования:

- силовой импульсный инвертор;
- звено постоянного тока, которое состоит из выпрямителя и фильтрующего устройства;
- система управления.

Первым узлом, куда подается напряжение, является выпрямительное устройство, которое преобразует переменный ток в постоянный. После выпрямителя ток протекает через транзисторные ключи, которые поочередно подключают обмотку асинхронного двигателя к плюсовому и минусовому контакту выпрямителя. Система из нескольких коммутационных транзисторов образует силовой импульсный инвертор, который является промежуточным узлом любого частотного преобразователя. В современных силовых инверторах используются биполярные транзисторы, которые позволяют вырабатывать достаточно высокую частоту переключения, что дает возможность получать синусоиду с минимальными искажениями.

Всего лишь несколько лет назад для регулировки двигателей использовались механические устройства, которые не могли предотвратить ударно-пусковые нагрузки на оборудование. В результате срок эксплуатации асинхронных двигателей был небольшим, к тому же использование механической системы управления приводило к существенным энергопотерям. Для исключения негативного воздействия на промышленное оборудование специалисты разработали электронные устройства регулировки частоты, которые позволяют осуществлять широтно-импульсное управление асинхронными двигателями. В результате пусковой ток стал ниже в 4–5 раз, что делает возможным плавный пуск оборудования.

Кроме отсутствия большого пускового тока, преобразователи частоты сокращают энергопотери, а также позволяют создавать обратную связь между смежными приводами, поэтому оборудование может работать в режиме автонастройки.

Управлением преобразователя частоты будет заниматься система на базе кристалла ESP8266, которая изображена на рис. 1. Использование данного микроконтроллера обуславливается наличием нескольких факторов:

- 1) радио модуля на борту;
- 2) необходимой периферии для общения по интерфейсам RS422/485.

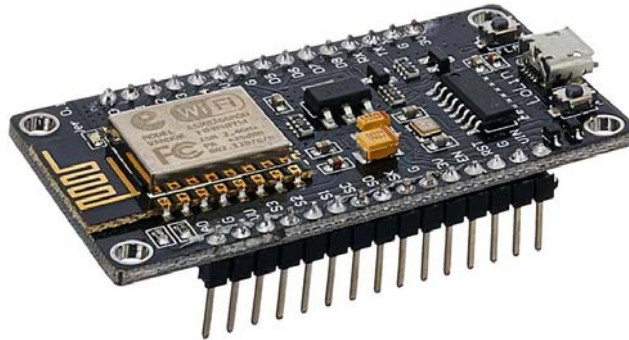


Рис. 1. Внешний вид системы на базе кристалла ESP8266

Для реализации общения нашего микроконтроллера и преобразователя частоты необходимо использовать USART(Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) и несколько GPIO(General-Purpose Input/Output) пинов. Usart и Gpio будут использоваться для реализации физического протокола, по которому общается наш преобразователь частоты. Также опционально Gpio пины можно использовать для управления дискретными входами ПЧ. Прошивка микроконтроллера будет реализовываться на базе SDK(Software Development Kit) Espressif-idf. Espressif-idf – это бесплатный набор инструментов для работы с ESP8266.

Для реализации беспроводного управления было решено использовать протокол MQTT. MQTT – это протокол обмена сообщениями по шаблону издатель-подписчик (pub/sub). Издатель публикует сообщение в заданный топик брокера, а подписчик в свое время проверяет периодически, опубликовал ли сообщение издатель. В качестве брокера можно использовать локальный сервер или облачное приложение. Издатель не требует каких-либо настроек по количеству или расположению подписчиков, получающих сообщения. Кроме того, подписчикам не требуется настройка на конкретного издателя. В системе может быть несколько брокеров, распространяющих сообщения.

Функциональная схема управления устройством изображена на рис. 2.

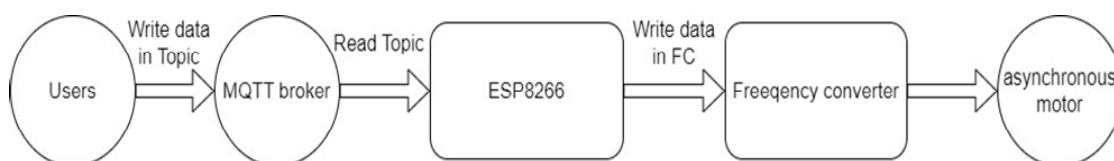


Рис. 2. Функциональная схема управления устройством

На схеме изображено:

- Users – пользователи, подключаемые к брокеру;
- MQTT broker – сервер, хранящий приходящие команды от пользователей;
- ESP8266 – система на базе кристалла с радио модулем;
- Frequency converter – преобразователь частоты;
- Asynchronous motor – асинхронный двигатель.

По нашим предположениям такая система сможет найти ряд применений в различных сферах жизни, так как она универсальна и способна реализовать комфортное управление преобразователем частоты. В ходе дальнейшей работы над проектом планируется выполнить стендовые исследования удаленного управления преобразователем частоты, а также произвести пробный запуск данной системы управления.

Л и т е р а т у р а

1. Преобразователи частоты «СИРИУС». – URL: <https://isup.ru/articles/47/18131/> (дата обращения: 17.03.2023).
2. Espressif-idf. – URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp8266-rtos-sdk/en/latest/get-started/index.html> (дата обращения: 17.03.2023).
3. Беспроводной протокол MQTT. – URL: <https://mqtt.org/> (дата обращения: 17.03.2023).

УДК 621.382

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ БЕСКЛЮЧЕВОГО ДОСТУПА

Л. А. Захаренко, В. А. Карпов, Е. Д. Цикунов, В. В. Змиевский

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

Представлены результаты работы по разработке системы бесключевого доступа, в результате которой были разработаны схемы электрические принципиальные с применением приемопередатчика CC2500 и программное обеспечение для микроконтроллеров PIC18F25K80.

Ключевые слова: бесключевой доступ, приемопередатчик CC2500, микроконтроллер PIC18F25K80, диалоговое кодирование, симметричное шифрование, SHA-256.

DEVELOPMENT OF A KEYLESS ACCESS SYSTEM

L. A. Zakharanka, U. A. Karpau, E. D. Tsykunou, V. V. Zmieski

Sukhoi State Technical University Gomel, the Republic of Belarus

The article presents the results of the work on the development of a keyless access system, as a result of which electrical circuit diagrams were developed using the CC2500 transceiver and software for PIC18F25K80 microcontrollers.

Keywords: keyless access, CC2500 transceiver, PIC18F25K80 microcontroller, dialog coding, symmetric encryption, SHA-256.

Целью настоящей разработки является создание системы бесключевого доступа, предназначенной для контроля и ограничения доступа в автомобилях МАЗ.

Изделие состоит из пульта дистанционного управления ПДУ (2 шт.), блока управления (БУ) и внешней антенны. Система бесключевого доступа обеспечивает дистанционную блокировку и разблокировку замков дверей автомобиля при нажатии соответствующих кнопок на ПДУ;

Основные технические параметры и характеристики:

- изделие (БУ) должно обеспечивать выдачу команд по CAN интерфейсу на блокировку и разблокировку замков дверей автомобиля при нажатии соответствующих кнопок на ПДУ;

- время срабатывания – не более 1 с;

- БУ и ПДУ должны обеспечивать устойчивую связь на расстоянии не менее 5 м;

- полоса радиочастот по ERC/REC 70-03: 2400,0-2483,5 МГц;

- электропитание БУ должно осуществляться от источника питания постоянного тока с номинальным напряжением 24 В;

- блок управления должен нормально функционировать в пределах изменения напряжения от 18 до 32 В;

- потребляемая мощность БУ при номинальном напряжении должна быть не более 2 Вт;

- электропитание пульта дистанционного управления должно осуществляться от источника питания постоянного тока CR2032 с номинальным напряжением 3 В;

- ток потребления пульта дистанционного управления при номинальном напряжении должна быть не более 5мкА в режиме ожидания;

- изделие должно быть выполнено в общеклиматическом исполнении О2 по ГОСТ 15150-69;

- изделие должно быть работоспособным при температуре окружающей среды от -40°C до $+55^{\circ}\text{C}$;

- изделие должно сохранять работоспособность после пребывания в нерабочем состоянии при температуре от -60°C до $+65^{\circ}\text{C}$.

В ходе выполнения работ были разработаны схемы электрические принципиальные БУ и ПДУ с применением микроконтроллера со встроенным CAN модулем PIC18F25K80 и приемопередатчика с низким потреблением CC2500.

Приемопередатчик CC2500 является недорогим и полностью однокристальным устройством для частоты 2,4 ГГц, разработанным для маломощных беспроводных приложений с очень низким энергопотреблением. Его схемотехника предназначена для применения в диапазонах ISM (Industrial, Scientific and Medical – промышленные, научные и медицинские) и SRD (Short Range Device – устройства ближней связи) на частотах 2400 – 2483,5 МГц.

Данный радиоприемопередатчик интегрирован с гибко конфигурируемым модемом основной частоты связи. Модем поддерживает различные виды модуляции и имеет конфигурируемую скорость данных до 500 бит/с.

Основные рабочие параметры и 64-байтные FIFO-буферы приема/передачи CC2500 могут управляться при помощи интерфейса SPI. В типичной системе CC2500 используется вместе с микроконтроллером и несколькими дополнительными пассивными элементами.

Основные параметры приемопередатчика CC2500:

- 1) диапазон частот: 2400 – 2483,5 МГц;

- 2) высокая чувствительность: -101 дБм на 10 Кбит/с, 1%-й уровень ошибок пакета;

- 3) программируемая скорость данных до 500 Кбит/с;

- 4) низкое энергопотребление: 13,3 мА в режиме RX, 250 Кбит/с, входной уровень 30 дБ выше порога чувствительности;

- 5) программируемая выходная мощность до 0 дБм;

На рис. 1 изображена схема включения трансивера CC2500.

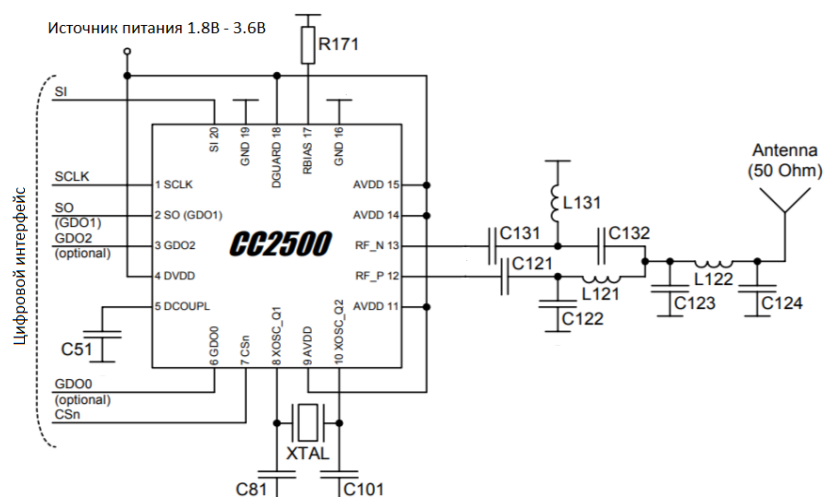


Рис. 1. Схема приемопередатчика CC2500

Для реализации алгоритма работы системы было разработано программное обеспечение для микроконтроллеров ПДУ и БУ. Блок-схема алгоритма работы программы представлена на рис. 2.

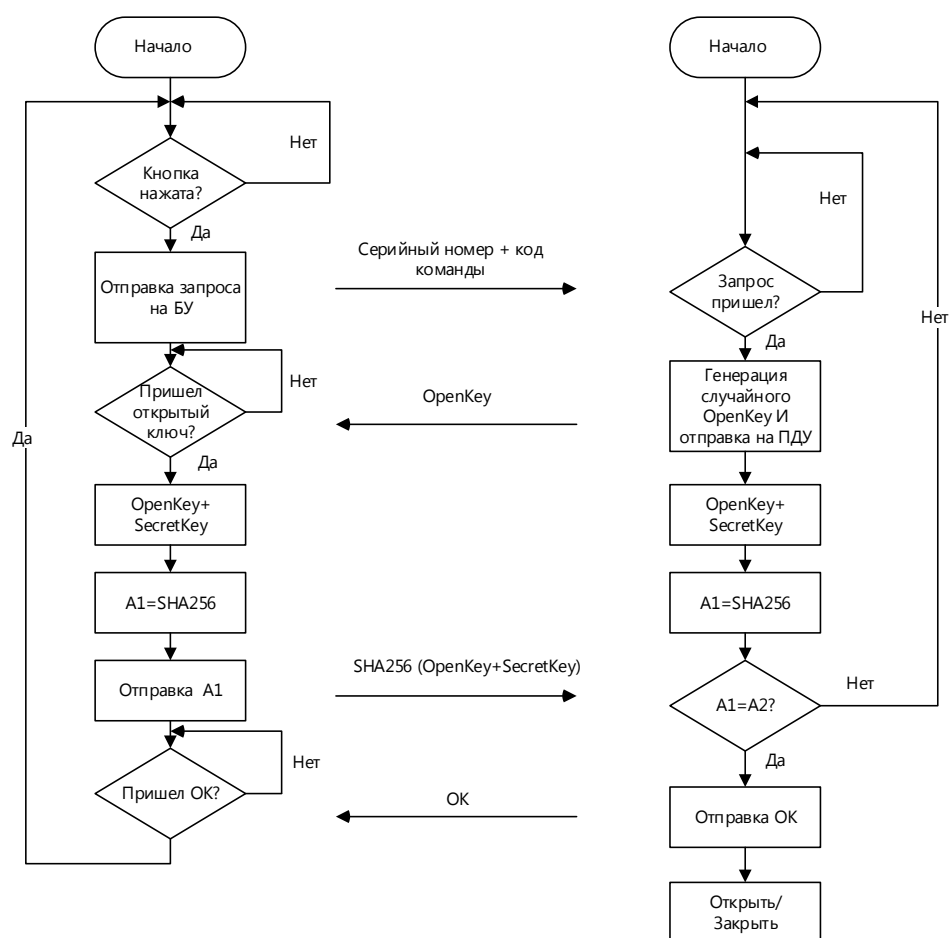


Рис. 2. Блок-схема алгоритма работы программы

Описание алгоритма работы программы:

- при нажатии соответствующей кнопки на ПДУ, ПДУ отправляет запрос на БУ. Запрос содержит Серийный номер изделия и Код команды (Блокировать/Разблокировать);
- БУ при получении запроса проверяет Серийный номер;
- при совпадении серийного номера ПДУ и БУ, БУ генерирует случайным образом, Открытый ключ (OpenKey) размером 16 байт, и отправляет его на ПДУ;
- БУ после отправки Открытого ключа дополняет его Секретным ключом (SecretKey) размером 32 байта и рассчитывает хеш – функцию SHA-256 (256 бит 32 байта);
- ПДУ, получив Открытый ключ, дополняет его Секретным ключом размером 32 байта и рассчитывает хеш – функцию SHA-256 (256 бит 32байта), которую отправляет на БУ;
- БУ при получении значения хеш-функции от ПДУ, проверяет полученное значение хеш-функции с рассчитанным, и при совпадении выполняет полученную команду (отправляет по CAN интерфейсу команду).

По разработанной конструкторской документации была изготовлена опытная партия и проведены приемочные испытания, которые показали правильность принятых решений. В настоящее время готовится серийный выпуск данного изделия.

УДК 621.382.33

РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА «ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ РАДИАТОРА ТЕПЛОАГРУЖЕННОГО ЭЛЕМЕНТА»

Л. А. Захаренко, О. М. Ростокينا

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

Представлены результаты работы по разработке лабораторного стенда «Проектирование и расчет радиатора теплонагруженного элемента» для экспериментальной проверки расчетов теплового режима работы полупроводниковых приборов.

Ключевые слова: охлаждение электронной аппаратуры, расчет радиаторов полупроводниковых приборов.

DEVELOPMENT OF A LABORATORY STAND "DESIGN AND CALCULATION OF A RADIATOR OF A HEAT-LOADED ELEMENT"

L. A. Zakharanka, V. M. Rastokina

Sukhoi State Technical University Gomel, the Republic of Belarus

The results of the work on the development of the laboratory stand "Design and calculation of the radiator of the heat-loaded element" for the experimental verification of the calculations of the thermal mode of operation of semiconductor devices are presented.

Keywords: cooling of electronic equipment, calculation of radiators of semiconductor devices.

Целью данной лабораторной работы является экспериментальная проверка расчетов теплового режима работы полупроводникового прибора без радиатора и с радиатором. В ходе выполнения лабораторной работы студенты рассчитывают температуру кристалла полупроводникового прибора при заданной мощности выделяемой в нем.

Исходными данными для расчета теплового режима полупроводникового прибора являются:

$t_{\max}$ – максимальная температура перехода (из справочника);

$R_{\text{ПК}}$ – внутреннее тепловое сопротивление переход-корпус (из справочника);

P – мощность, рассеиваемая прибором (задается преподавателем);

t_c – температура окружающей среды;

Чтобы рассчитать температуру кристалла полупроводникового прибора, необходимо осуществить его тепловой расчет, основанный на анализе тепловой модели (рис. 1) источника, тепловой энергии и радиатора.

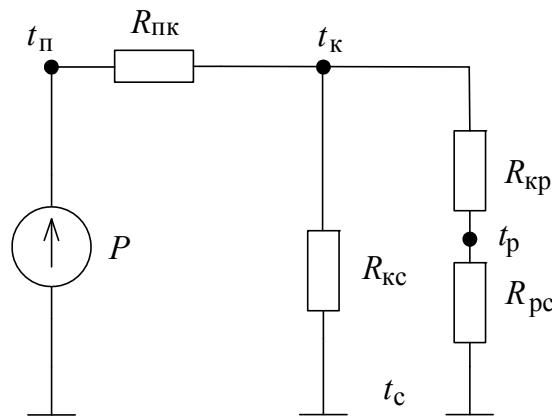


Рис. 1. Тепловая модель:

P – мощность, выделяемая ППП; t_c , $t_п$, $t_к$, $t_р$ – температуры окружающей среды, коллекторного перехода, корпуса прибора и радиатора соответственно;

$R_{\text{ПК}}$, $R_{\text{КС}}$, $R_{\text{КР}}$, $R_{\text{РС}}$ – тепловые сопротивления между переходом и корпусом, корпусом и средой, корпусом и радиатором, радиатором и средой соответственно

Так как поверхность радиатора практически всегда значительно больше поверхности ППП, то можно считать, что $R_{\text{КС}} \gg (R_{\text{КР}} + R_{\text{РС}})$. Тогда общее тепловое сопротивление между переходом и окружающей средой определяется следующим образом:

$$R_{\text{ПС}} = R_{\text{ПК}} + R_{\text{КР}} + R_{\text{РС}}, \frac{K}{\text{Вт}}.$$

По данной модели, зная температуру окружающей среды и значения тепловых сопротивлений, можно рассчитать температуру кристалла полупроводникового транзистора $t_п$.

Основную сложность представляет собой экспериментальное определение температуры кристалла. Было принято решение определять изменение температуры кристалла по изменению напряжения $U_{\text{БЭ}}$.

Исходя из вышеизложенного, была разработана схема лабораторного стенда, представленная на рис. 2.

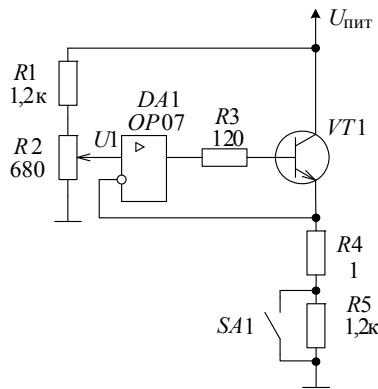


Рис. 2. Схема лабораторного стенда:
VT1 – гнездо для подключения макетных образцов

Ток, протекающий через транзистор при замкнутом переключателе SA1, определяется выражением

$$I = \frac{U_1}{R_4}.$$

Тогда мощность, выделяемая в транзисторе VT1 при замкнутом переключателе SA1, определяется по формуле

$$P = (U_{\text{пит}} - U_1)I = (U_{\text{пит}} - U_1) \frac{U_1}{R_4}.$$

Ход работы предполагает следующие действия:

1. Для заданной преподавателем мощности рассеивания рассчитывается температура коллекторного перехода транзистора КТ819 без радиатора по формуле

$$t_{\text{п}} = P(R_{\text{пк}} + R_{\text{кс}}) + t_{\text{с}}.$$

2. Рассчитываются и устанавливаются необходимые значения тока и напряжения для обеспечения заданной мощности.

3. Замыкается переключатель SA1 и измеряется напряжение $U_{\text{БЭнач.н}}$ при нагреве и каждые 5 мин фиксируются значения напряжения $U_{\text{БЭ}}$. При установлении стационарного теплового режима измеряется напряжения $U_{\text{БЭкон.н}}$ при нагреве.

4. Размыкается переключатель SA1 и измеряется напряжение $U_{\text{БЭнач.о}}$ при охлаждении и каждые 5 мин фиксируются значения напряжения $U_{\text{БЭ}}$. При установлении стационарного теплового режима измерьте напряжение $U_{\text{БЭкон.о}}$ при охлаждении.

5. Рассчитывается температура перехода при нагреве по формуле

$$t_{\text{Пизм}} = \frac{U_{\text{БЭнач.н}} - U_{\text{БЭкон.н}}}{-0,0022} + t_{\text{с}}.$$

6. Рассчитывается температура перехода при охлаждении по формуле

$$t_{\text{Пизм}} = \frac{U_{\text{БЭкон0}} - U_{\text{БЭнач0}}}{-0,0022} + t_{\text{С}}.$$

По результатам измерений заполняется таблица и строится график изменения температуры перехода при нагреве и охлаждении от времени. Сравнивается расчетное и измеренное значение температуры перехода. График изменения напряжения $U_{\text{БЭ}}$ представлен на рис. 3.

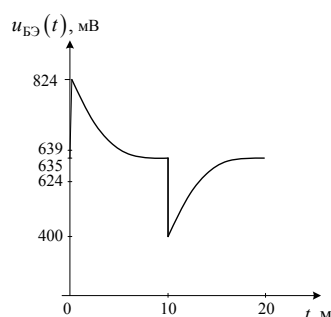


Рис. 3. График изменения напряжения $U_{\text{БЭ}}$

Эксперименты показали, что измеренное косвенным методом значение температуры кристалла с достаточной точностью совпадает с расчетным значением.

УДК 621.643:621.3.083.6

АДАПТИВНЫЙ РЕЖЕКТОРНЫЙ ФИЛЬТР В ЗАДАЧЕ ОБНАРУЖЕНИЯ ВНУТРИТРУБНОГО ТРАНСМИТТЕРА В НЕФТЕПРОВОДЕ

В. В. Щуплов, С. Н. Кухаренко, Н. А. Красовская

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

Рассмотрен вариант подавления наиболее сильной мешающей частоты помехи в задаче обнаружения сигнала внутритрубного трансмиттера при использовании адаптивного режекторного фильтра.

Ключевые слова: адаптивный фильтр, частотный режекторный фильтр, цифровой фильтр, анализатор спектра.

ADAPTIVE NOTCH FILTER IN THE PROBLEM OF DETECTING AN IN-PIPE TRANSMITTER IN AN OIL PIPELINE

V. V. Shchuplou, S. M. Kukharenska, N. A. Krasouskaya

Sukhoi State Technical University Gomel, the Republic of Belarus

The article considers a variant of suppressing the strongest interfering frequency of interference in the problem of detecting an in-pipe transmitter signal using an adaptive notch filter

Keywords: adaptive filter, frequency notch filter, digital filter, spectrum analyzer.

Внутритрубный трансмиттер работает по радиоканалу и основной его функцией является передача сигнала для обнаружения внутритрубного устройства. Канал связи работает на частоте 22 Гц при использовании фазоманипулированного сигнала. Основной проблемой в этом частотном диапазоне прежде всего является высокий уровень промышленных помех, а также низкая скорость передачи информации.

Для повышения помехоустойчивости и минимального искажения полезного сигнала в работе [1] рассмотрен вариант использования полоснопропускающего фильтра 18-го порядка с полосой пропускания в диапазоне частот от 8 до 35 Гц (рис. 1).

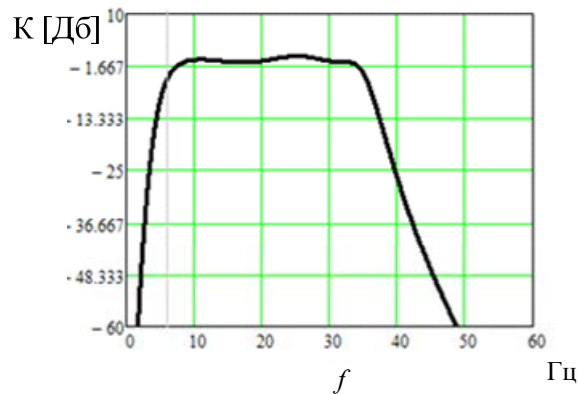


Рис. 1. Амплитудно-частотная характеристика фильтра

Практическая реализация такого подхода борьбы с помехами показала, что могут присутствовать достаточно сильные узкополосные помехи в частотном диапазоне сигнала, и полосовая фильтрация не обеспечивает уверенного приема.

Для подавления узкополосной помехи в данной работе рассматривается использование адаптивного режекторного фильтра, рассмотренного в [2]. Для его работы необходимо знание частоты и фазы помехи. В рассматриваемой задаче частота и фаза помехи заранее не известны. Поэтому их необходимо оценить. На рис. 2 приведена структурная схема следящего за частотой помехи адаптивного режекторного фильтра.

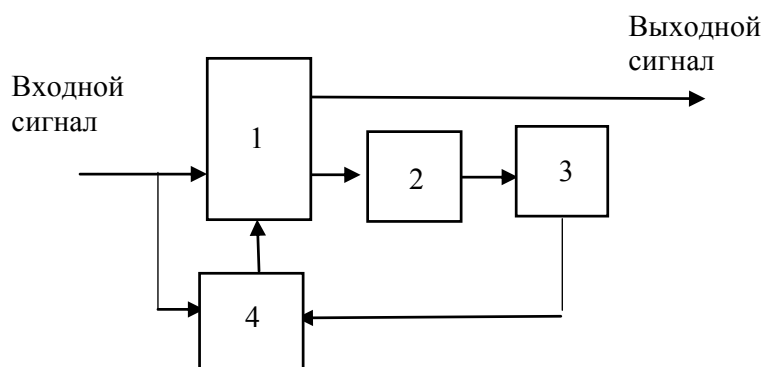


Рис. 2. Структурная схема следящего адаптивного режекторного фильтра:
 1 – адаптивный режекторный фильтр; 2 – блок БПФ; 3 – анализатор спектра;
 4 – перестраиваемый цифровой фильтр

Блок 2 вычисляет с использованием быстрого преобразования Фурье спектр входной помехи. Это выполняется до приема сигнала от трансмиттера. Блок 3 определяет частоту гармоники с наибольшей амплитудой и управляет цифровым фильтром. Блок 4 – это узкополосный цифровой фильтр, который настраивается на частоту гармоники.

Сигнал помехи выделяется фильтром из входного сигнала и подается в качестве эталона на адаптивный режекторный фильтр I , который вырезает эту частоту из входного сигнала.

Рассмотренный способ борьбы с помехой позволяет повысить дальность обнаружения трансмиттера. А цифровая обработка сигналов с использованием современных микроконтроллеров не представляет особой трудности.

Л и т е р а т у р а

1. Щуплов, В. В. Материалы конференции: Выбор полосы пропускания фильтра для канала низкочастотной связи / В. В. Щуплов, С. Н. Кухаренко, Н. А. Красовская // Современные проблемы машиноведения : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П. О. Сухому), Гомель, 22–23 нояб. 2018 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Филиал ПАО «Компания «Сухой» ОКБ «Сухого»; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – С. 180–182.
2. Уидроу, Б. Адаптивная обработка сигналов / Б. Уидроу, С. Д. Стириз ; перевод с англ. Ю. К. Сальникова ; под ред. В. В. Шахгильдяна. – Москва : Радио и связь, 1989.

УДК 621.313.333

СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВЫМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТАМИ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИКИ

В. В. Брель

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

Представлены схемы управления силовыми электромагнитами в системах автоматизации. Целью данной работы является определение достоинств и недостатков известных схем управления, а также разработка и исследование новых схем управления силовыми электромагнитами малой мощности для клапанов дымоудаления, в схемах работы гидродвигателей и в асинхронных двигателях малой мощности с тормозным устройством.

Ключевые слова: электромагниты малой мощности, схемы управления, системы автоматизации.

CONTROL CIRCUITS FOR POWER ELECTROMAGNETS IN AUTOMATION SYSTEMS

V. V. Brel

Sukhoi State Technical University Gomel, the Republic of Belarus

Control schemes of power electromagnets in automation systems are presented. The purpose of this work is to determine the advantages and disadvantages of known control schemes, as well as the development and research of new control schemes for low-power power electromagnets for smoke extraction valves, in hydraulic drive operation schemes and in asynchronous motors with a low-power braking device.

Keywords: low-power electromagnets, control circuits, automation systems.

Силовые электромагниты малой мощности (до 200 Вт) находят применение в системах автоматики: клапанов дымоудаления, гидравлического привода, переключающих устройств (для управления разъединителями и заземлителями), использующих в качестве привода асинхронные двигатели малой мощности с тормозным устройством.

В данных устройствах часто применяются схемы управления силовым электромагнитами. Схема управления должна быть компактна, проста, надежна и, кроме того, должна обеспечивать необходимое время срабатывания силового электромагнита.

Использование специальных схем форсировки пускового тока позволяет на короткий промежуток времени создать большой магнитный поток и существенно увеличить начальное тяговое усилие в электромагните.

Обычно силовые электромагниты малой мощности обладают большим активным и индуктивным сопротивлением, что устанавливает определенные ограничения на использование их в различных конструкциях и устройствах.

Целью данной работы является определение достоинств и недостатков известных схем управления для маломощных силовых электромагнитов в системах автоматики, а также разработка и исследование новых схем управления силовыми электромагнитами малой мощности для клапанов дымоудаления, в схемах работы гидропривода и в асинхронных двигателях малой мощности с тормозным устройством.

Одним из способов построения схем управления силовыми электромагнитами малой мощности является переключение напряжения, приложенного к катушке электромагнита, с более высокого на более низкое. Данные схемы не подходят для электромагнитов клапанов дымоудаления. Причина в том, что в случае возникновения пожарной ситуации в здании, количество одновременно включаемых клапанов дымоудаления может достигать более 50 шт., что приводит к большим токам в цепях автоматики. Поэтому силовые электромагниты клапана дымоудаления должны быть маломощными (до 70 Вт), при значительном тяговом усилии в 80Н и ходе якоря до 8 мм. Требуется разработка и исследование новых схем для данных электромагнитов.

Находят распространение схемы управления с фазовым регулированием, которые не содержат токоограничивающего конденсатора, а форсировка осуществляется изменением угла отпирания тиристора. Данные схемы ухудшают качество сетевого напряжения, требуют дорогой системы управления, либо получаются менее надежными, чем известные схемы управления. Однако для клапанов дымоудаления, данные схемы являются хорошим решением. При этом необходимо учитывать максимальное количество одновременно подключенных электромагнитов.

Необходима разработка схем управления для управляющих маломощных электромагнитов гидроприводов как для стационарных установок (пресса, станки, зажимы и т. д.), так и автономных (гидропривод комбайнов, тракторов, экскаваторов, погрузчиков и т. д.).

На рис. 1 автором предлагается новая схема управления, которая содержит три катушки одного силового электромагнита малой мощности в каждой из фаз. Здесь время срабатывания силового электромагнита меньше по сравнению с известными схемами, а влияние на симметрию электродвигателя нет, но присутствует влияние взаимоиндуктивности обмоток.

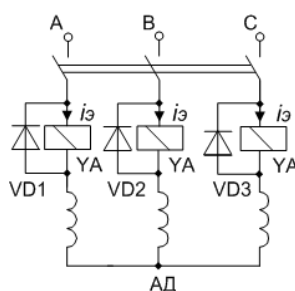


Рис. 1. Схема управления трехобмоточная

Данные схемы хорошо себя показали в АД малой мощности, где активно-индуктивное сопротивление двигателя намного больше, чем активное сопротивление маломощного силового электромагнита. Это приводит к тому, что влияние катушки силового электромагнита минимально на работу АД.

Экспериментальные исследования схем управления подтвердили правильность полученных выводов.

Л и т е р а т у р а

1. Клименко, Б. В. Форсированные электромагнитные системы / Б. В. Клименко. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 160 с.
2. Соленков, В. В. Асинхронный электродвигатель со встроенным комбинированным тормозным устройством на базе электромеханического тормоза и электромагнитной муфты / В. В. Соленков, В. В. Брель // Энергетика: Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2011. – № 6. – С. 20–26.

УДК 531.746.088.2(045)(476)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ ИНКЛИНОМЕТРОВ ПРИ ПОДКЛЮЧЕНИИ К НИМ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СХЕМЫ

В. А. Карпов, О. М. Ростоккина, Ю. Е. Котова

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

Представлены две измерительные схемы для электролитических чувствительных элементов и показано, что разделительная CR-цепочка является их обязательной частью. Даны эквивалентные схемы замещения электролитических ЧЭ, на основе которых получены выражения для погрешностей.

Ключевые слова: электролитический инклинометр, одноосевой и двухосевой чувствительные элементы, поляризационная емкость.

INVESTIGATION OF THE MEASUREMENT ERROR OF ELECTROLYTIC INCLINOMETERS WHEN A MEASURING CIRCUIT IS CONNECTED TO THEM

U. A. Karpau, V. M. Rastokina, Y. Y. Kotava

Sukhoi State Technical University Gomel, the Republic of Belarus

The article presents two measuring circuits for electrolytic sensitive elements and shows that the separating C, R chain is their obligatory part. Equivalent circuits of electrolytic SCs are

presented, on the basis of which expressions are obtained for errors due to the use of a separating chain.

Keywords: electrolytic inclinometer, single-axis and dual-axis sensing elements, polarization capacitance.

Электролитические инклинометры (ЭЛИ) широко используются в технических приложениях, требующих информацию об отклонениях конструктивных элементов от горизонта.

Функционирование ЭЛИ основано на электролитическом измерительном элементе (ИЭ), представляющем собой конструктив, в котором сопротивление столба электролита изменяется при отклонении его положения от горизонтального уровня. Для технической реализации измерения электрического сопротивления столба электролита используются металлические электроды, расположенные эквидистантно относительно центрального – для одноосевого, и – вдоль двух взаимно перпендикулярных прямых – для двухосевого датчиков. В результате в горизонтальном положении электрические сопротивления между центральным и соседними электродами одинаковы, а при отклонении датчика от горизонта эти сопротивления изменяются. Степень их изменения служит мерой наклона (отклонения от горизонта). Особенности способов измерения электрического сопротивления между центральным и соседними электродами заключаются в следующем:

1. Измерения осуществляются только на переменном токе, поскольку постоянная составляющая тока через электроды приводит к появлению значительных, плохо контролируемых, поляризационных потенциалов, к электролизу и, как следствие, к недопустимым погрешностям.

2. Из-за значительного температурного дрейфа электролита ИЭ включают в измерительную схему в виде делителя напряжения, выходом которого является центральный электрод. Тогда входным параметром ИЭ является коэффициент деления образованного делителя, не зависящий от температурного дрейфа электрического сопротивления электролита.

3. При включении ИЭ под переменное напряжение электрическое сопротивление столба электролита между электродами становится реактивным. Появляются поляризационные емкости, последовательно включенные с активным сопротивлением столба электролита между электродами.

4. Усилитель измерительной схемы подключается к центральному электроду через разделительный конденсатор для предотвращения попадания на электрод постоянного входного тока или/и напряжения смещения усилителя.

На рис. 1 представлена измерительная схема одно- и двухосевого инклинометра на основе электролитического ИЭ.

При отклонении ИЭ от горизонта в рабочем диапазоне углов изменение сопротивления R незначительно, а значение поляризационной емкости практически не изменяется (эта величина определяется материалами и геометрией электродов, а также типом электролита). В дальнейшем будем считать, что ИЭ находится в горизонтальном положении.

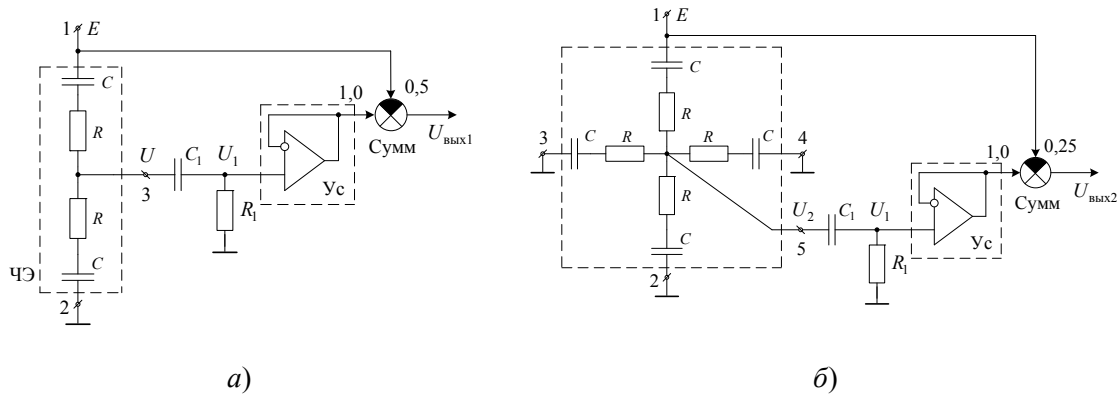


Рис. 1. Измерительная схема инклинометра на основе электролитического ЧЭ:
 а – одноосевого; б – двухосевого: E – источник переменного напряжения, предназначенный для питания ИЭ с электродами: 1÷3 (одноосевой) и 1÷5 (двухосевой). Электроды 3 и 5 являются центральными, при этом ИЭ включен как делитель напряжения; R – электрическое сопротивление столба электролита между соответствующими электродами; C – эквивалентная поляризационная емкость между соответствующими электродами; R_1, C_1 – разделительная цепочка, предназначенная для предотвращения попадания в цепь ИЭ входного тока и напряжения смещения усилителя; Y_c – усилитель, который для простоты представлен в виде повторителя напряжения на основе операционного усилителя; Сумм – сумматор, предназначенный для формирования входного сигнала при горизонтальном положении ИЭ; U_1, U_2 – выходные напряжения разделительной R_1C_1 -цепочки для одно- и двухосевого ИЭ соответственно; $U_{\text{вых1}}, U_{\text{вых2}}$ – выходные напряжения измерительной схемы для одно- и двухосевого ИЭ соответственно

Тогда в отсутствии разделительной R_1C_1 -цепочки (в условиях холостого хода) расчетные цепи для соответствующих ИЭ можно представить так, как это показано на рис. 2, а, б. Напряжения U_1 и U_2 можно представить в следующем виде:

$$U_1 = 0,5E \frac{R_1}{z_i + R_1 - jx_{C_1}} = 0,5E \frac{R_1}{(0,5R + R_1) - j(0,5x_C + x_{C_1})};$$

$$U_2 = 0,25E \frac{R_1}{z_i + R_1 - jx_{C_1}} = 0,25E \frac{R_1}{(0,25R + R_1) - j(0,25x_C + x_{C_1})}.$$

Полагаем, что $z = R - jx_C$. Тогда для одноосевого ИЭ $z_i = 0,5R - j0,5x_C$, а для двухосевого ИЭ – $z_i = 0,25R - j0,25x_C$.

Эквивалентные схемы одноосевого и двухосевого чувствительных элементов (ЧЭ) можно представить так, как это отражено на рис. 2, в, г.

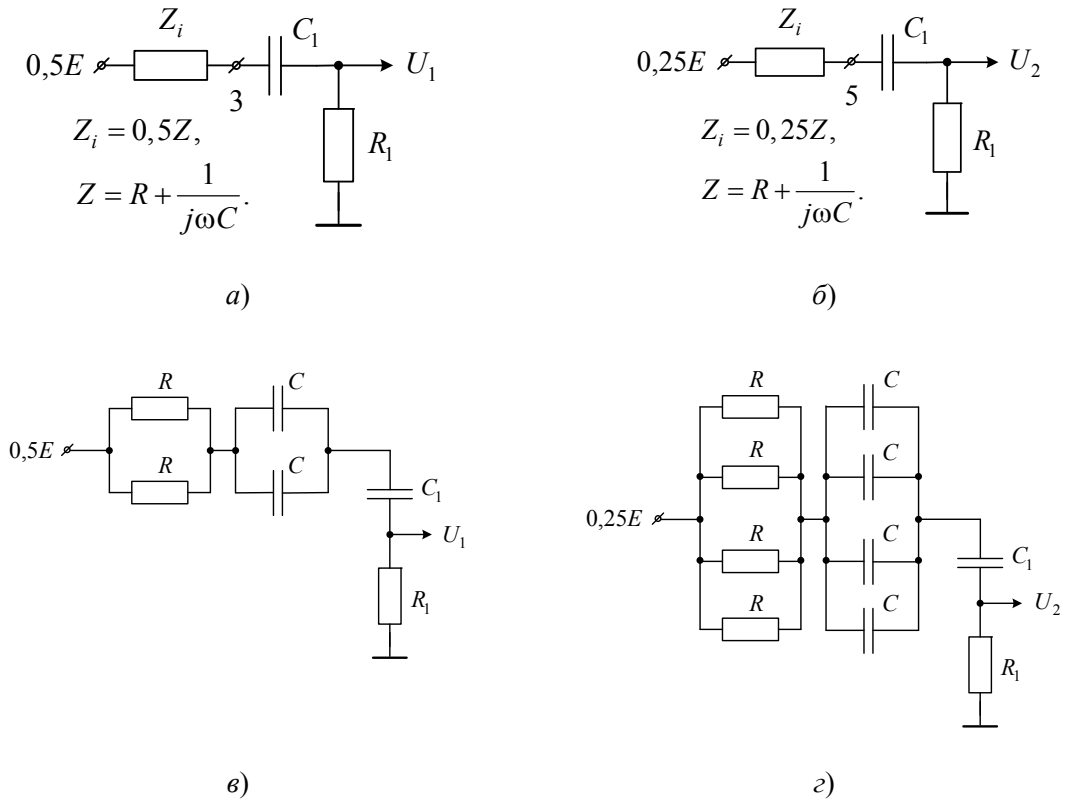


Рис. 2. Расчетные и эквивалентные схемы для ЧЭ:
а, в – одноосевого; б, г – двухосевого

Из выражений, полученных для комплексных коэффициентов передачи, было получено, что отличие модулей $|W_1(j\omega)|$ от 0,5 и $|W_2(j\omega)|$ от 0,25 и фазовых сдвигов φ_1 и φ_2 от нуля вносят погрешности, обусловленные элементами разделительной R_1C_1 -цепочки. Найдем относительную погрешность модуля коэффициента передачи:

$$\delta_1 = \frac{0,5 - |W_1(j\omega)|}{0,5}; \quad \delta_2 = \frac{0,25 - |W_2(j\omega)|}{0,25},$$

или после упрощения:

$$\delta_1 = 1 - \frac{R_1}{R_{01}} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega T_{01}}\right)^2}}; \quad \delta_2 = 1 - \frac{R_1}{R_{02}} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega T_{02}}\right)^2}},$$

где $R_{01} = 0,5R + R_1$; $R_{02} = 0,25R + R_1$.

Таким образом, выражения для относительной погрешности модуля коэффициента передачи можно упростить и представить в виде:

$$\delta_1 \approx 1 - \frac{R_1}{R_{01}} = \frac{0,5R + R_1 - R_1}{R_{01}} \approx \frac{0,5R}{R_1}, \quad \delta_2 \approx 1 - \frac{R_1}{R_{02}} = \frac{0,25R + R_1 - R_1}{R_{02}} \approx \frac{0,25R}{R_1}.$$

Очевидно, что с точностью до $\sim 0,01$ % значение разделительной емкости C_1 практически не оказывает влияния на модуль коэффициента, а определяется сопротивлением R_1 разделительной цепочки. Значение разделительной емкости C_1 выбирается заведомо больше поляризационной емкости, поэтому небольшое уменьшение эквивалентной емкости C_0 значительно не повлияет на представленные выше рассуждения.

УДК 621.396.94:620.197.5

**РЭАЛІЗАЦЫЯ КАНАЛА СУВЯЗІ
ДЛЯ КАНТРОЛЬНА-ВЫМЯРАЛЬНАГА ПУНКТА СТАНЦЫІ
КАТОДНАЙ АБАРОНЫ ПАДЗЕМНЫХ ТРУБАПРАВОДАЎ
З ПРЫМЯНЕННЕМ КАРОТКАХВАЛЕВАГА ДЫЯПАЗОНУ**

А. Я. Запольскі, А. У. Сахарук, А. С. Мурач, К. А. Пляскач, М. А. Вышыньскі

*Установа адукацыі «Гомельскі дзяржаўны тэхнічны ўніверсітэт
імя П. В. Сухого», Рэспубліка Беларусь*

Прааналізаваны магчымасці прымянення радыёсувязі з выкарыстаннем кароткахвалевага дыяпазону для кантрольна-вымяральных пунктаў станцый катоднай абароны падземных трубаправодаў.

Ключавыя словы: станцыя катоднай абароны, кантрольна-вымяральны пункт, радыёсувязь, канал сувязі, КХ, кароткія хвалі.

**IMPLEMENTATION OF A COMMUNICATION CHANNEL
FOR A CONTROL AND MEASURING POINT OF A CATHODIC
PROTECTION STATION FOR UNDERGROUND PIPELINES
USING A SHORT-WAVE RANGE**

A. Y. Zapolski, A. U. Sakharuk, A. S. Murach, K. A. Plyaskach, M. A. Vyshynski

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

In this work, the possibilities of using short-wave radio communication for control and measuring stations of cathodic protection of underground pipelines are analyzed.

Keywords: cathodic protection station, control and measuring point, radio communication, communication channel, SW, short waves.

Агульнае ўладкаванне станцыі катоднай абароны (СКА) падземнага магістральнага трубаправода складаецца з некалькі асноўных вузлоў. Сярод іх катодная ахоўная прылада (КАП), кантрольна-вымяральны пункт (КВП), электрод параўнання і анодны зазямляльнік [1, 2].

Галоўная задача КАП – фармаванне адмоўнага патэнцыялу (палярывацыі) ад крыніцы пастаяннага току трубаправода, які падлягае абароне, каб у канчатковым выніку ссунуць патэнцыял аб'екта да значэння, пры якім працэс карозіі зводзіцца да мінімуму або цалкам спыняецца.

Таксама важную задачу выконваюць кантрольна-вымяральныя пункты. Галоўная іх задача – прыём і апрацоўка вымярэнняў велічыні ахоўнага патэнцыялу ў зададзеных кропках, а таксама кантроль за дадзеным узроўнем. Няправільная работа сістэмы катоднай абароны можа прывесці да зваротнага эфекту, у выніку якога будзе назірацца паскоранае электракаразійнае паражэнне аб'екта блукаючымі токамі, а

таксама частковая эрозія глебы на ўчастку трубаправода [2]. Дадзеныя акалічнасці абгрунтоўваюць важнасць пастаяннага кантролю работы СКА.

Пералічаныя вузлы сумесна з электродамі параўнання і аноднымі заземляльнікамі забяспечваюць эфектыўную абарону металічных аб'ектаў ад каразійнай паразы [1, 2].

У сучасных КВП маецца магчымасць перадачы інфармацыі з дапамогай розных спосабаў дыстанцыйнага абмену данымі, а таксама з ужываннем правадных оптава-лакновых ліній сувязі. Напрыклад, існуюць КВП з тэлеметрыяй, работа якой забяспечваецца дзякуючы высокахуткаскаму бесправадному стандарту сувязі 4G LTE. Пры ўсіх плюсах дадзенай тэхналогіі, галоўны з якіх – хуткасць абмену, маюцца і недахопы, галоўны з якіх – залежнасць ад інфраструктуры і аператараў сувязі. А ў пытаннях рэалізацыі праваднага злучэння галоўным пытаннем з'яўляецца кошт работ па будаўніцтве і абслугоўванні такой архітэктуры [2].

Для прадукілення аварыйных сітуацый і рэалізацыі аварыйнага каналу абмену данымі, можна выкарыстоўваць перадачу з дапамогай лічбавай радыесувязі на кароткіх хвалях (КХ-сувязь). Дадзены тып сувязі дазваляе перадаваць розныя даныя на вялікія адлегласці, мае гнуткія магчымасці, а таксама дазваляе стварыць цалкам аўтаномны канал сувязі.

Якасць і далекасць радыесувязі залежаць ад мноства параметраў, ключавымі з якіх з'яўляюцца дыяпазон выкарыстоўваных частот (частотныя характарыстыкі электрамагнітных хваляў), магутнасць перадаванага сігнала, эфектыўнасць антэн і вышыня іх месцавання. Нароўні з гэтымі тэхнічнымі характарыстыкамі, значны ўплыў аказваюць прыродныя фактары, якія вызначаюць канкрэтныя ўмовы распаўсюджвання радыехваляў. Да такіх фактараў адносяцца геаграфічнае размяшчэнне радыестанцыі, вышыня над узроўнем мора, тапаграфія мясцовасці і ўласцівасці падсцілаючай паверхні (напрыклад, тып глебы), пара года і сутак, а таксама стан атмасферы і іёнасферы, наяўнасць геамагнітных абурэнняў і іншыя прыродныя з'явы.

Электрамагнітныя хвалі, якія генеруюцца перадаючай антэнай, распаўсюджваюцца двума асноўнымі шляхамі: праз паверхневыя хвалі, якія рухаюцца ўздоўж зямной паверхні, і прасторавыя хвалі, якія распаўсюджваюцца пад кутом да гарызонту.

Павярхоўныя хвалі перамяшчаюцца ўздоўж мяжы падзелу двух асяроддзяў – паветра і зямной паверхні, якая, з'яўляючыся праводзячым асяроддзем, выклікае значныя страты энергіі. Пры сустрэчы з перашкодамі, такімі як горы ці лясныя масівы, паверхневыя радыехвалі ахінаюць іх з прычыны з'явы дыфракцыі, пры гэтым частка энергіі хвалі адлюстроўваецца і частка – паглынаецца. У дзённы час, асабліва ў летнія месяцы, сонечнае выпраменьванне іянізуе прыпаверхневыя пласты паветра, што дадаткова павялічвае паглынне электрамагнітных хваляў, пераважна ў доўгахвалевым дыяпазоне.

Прасторавыя хвалі, якія распаўсюджваюцца пад кутом да гарызонту, пранікаюць у пласты трапасферы і іёнасферы, якія аказваюць рознае ўздзеянне на хвалі караткахвалевага дыяпазону. З вышыней шчыльнасць атмасферы памяншаецца, а інтэнсіўнасць іянізавальнага сонечнага выпраменьвання павялічваецца. Іёнасфера, якая ўяўляе сабой сукупнасць пластоў з рознымі дыэлектрычнымі характарыстыкамі, знаходзіцца на вышынях ад 50 да 400 км над паверхняй Зямлі і ўключае пласты D, E, F₁ і F₂, якія маюць асаблівае значэнне для распаўсюджвання кароткіх хваляў [3]. Прасторавыя караткахвалевыя радыехвалі, дасягаючы іёнасферных пластоў, падвяргаюцца пераламленню і адлюстроўваюцца зваротна да

паверхні Зямлі. Гэтыя хвалі шматразова адлюстроўваюцца паміж іёнасферай і зямной паверхняй, што дазваляе падтрымліваць далекую радыесувязь пры адносна нізкай магутнасці перадатчыка, дзякуючы здольнасці караткахвалевых сігналаў эфектыўна распаўсюджвацца на вялікія адлегласці.

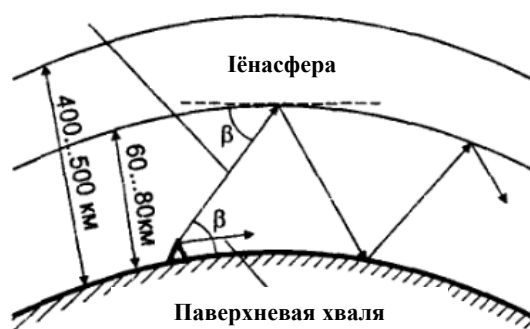
Для прасторавых хваляў, за кошт характару іх распаўсюджвання, характэрныя мертвыя зоны, якія залежаць ад частаты, пары года і шэрагу прыродных фактараў [3].

Апісанне працы КВ-сувязі паказана на мал. 1, а апісанне асноўных караткахвалевых дыяпазонаў для рэалізацыі перадачы інфармацыі адлюстравана ў табліцы.

Зыходзячы з табліцы, можна вылучыць 40-метровы дыяпазон як найболей падыходны. Яго перавагамі з'яўляецца тое, што ён практычна не мае мертвай зоны, і пры гэтым яго ўжыванне дазваляе па-за залежнасцю ад часу сутак перадаваць інфармацыю на значныя адлегласці.

Ужыванне лічбавай радыесувязі дазваляе стварыць эфектыўную і надзейную сістэму абмену інфармацыяй для станцый катоднай абароны. Напрыклад, можна перадаваць, як сігналы кіравання і кантролю (сачэнне за ўбудаванымі абаронамі і іх адпрацоўкай, магчымасць пераходу ў ручное кіраванне, сачэнне за несанкцыянаваным доступам у ахоўную прыладу), так і сігналы вымярэнняў (сачэнне за ўзроўнем ахоўнага патэнцыялу, сачэнне за станам электрода параўнання і кантролем яго пераходнага супраціву, аналіз і прыняцце мер у выпадку абрыву кантрольных праваднікоў). Асобна можна вынесці адсочванне за такімі параметрамі, як сумарнае спажыванне сістэмы, знікненне агульнага сілкавання ў выпадку энергааварый і пераход (пры такой магчымасці) на рэзервае сілкаванне.

Прасторавая хваля



Мал. 1. Распаўсюджванне радыехвалі

Характарыстыка участкаў КХ-дыяпазону на прыкладзе радыеаматарскіх паддыяпазонаў

Дыяпазон	Характарыстыка
80 метраў (3,500–3,800 МГц)	Прыдатны для далёкай сувязі ў начны час. У дзённы час далёкасць сувязі не перавышае 150–300 км
40 метраў (7,000–7,200 МГц)	Характарыстыкі гэтага дыяпазону шмат у чым падобныя да характарыстык 80-метровага дыяпазону з тым адрозненнем, што забеспячэнне далёкіх радыесувязяў меней ускладнена. У дзённы час тут чутныя станцыі бліжэйшых раёнаў (улетку – да 500–800 км, узімку – да 1000–1500 км), мертвая зона пры гэтым адсутнічае або складае некалькі дзясяткаў кіламетраў

Дыяпазон	Характарыстыка
30 метраў (10,100–10,150 МГц)	Размешчаны паміж дыяпазонамі 40 і 20 м дыяпазон 30 метраў валодае падобнымі з імі асаблівасцямі праходжання.
20 метраў (14,000–14,350 МГц)	Уначы магчымы толькі далекія радыесувязі, бо мертвая зона дасягае 2 тыс. км. Удзень мертвая зона памяншаецца да 500–1000 км
17 метраў (18,068–18,168 МГц)	Па характары праходжання падобны да 20-метровага дыяпазону, з большай залежнасцю ад узроўню сонечнай актыўнасці і часу сутак
15 метраў (21,000–21,450 МГц)	Характарызуецца вялікай залежнасцю умоў ад сонечнай актыўнасці
12 метраў (24,890–24,990 МГц)	Мае падобныя з 10-метровым дыяпазонам характарыстыкі: актыўны толькі ў перыяды высокай сонечнай актыўнасці, пераважна ў дзенны час
10 метраў (28,000–29,700 МГц)	Найбольш нестабільны з усіх КХ-дыяпазонаў. Ён прыдатны для далёкай сувязі ў дзенны гадзіны. Мертвая зона дасягае 2000–2500 км

Літаратура

1. Умовы фарміравання ахоўнага тока ў сістэмах электрахімічнай абароны / Ю. В. Крышнеў [і інш.] // Современные проблемы машиноведения : сб. науч. тр. В 2 ч. Ч. 1 / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, ПАО «ОАК» ОКБ Сухого, Таиз. ун-т (Йеменская Республика) ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2023. – С. 190–193.
2. Катодная защита – Производство оборудования для ЭХЗ – Белстройремналадка. – URL: <https://belnaladka.com/> (дата обращения: 03.09.2024).
3. Основы любительской радиосвязи : справ. пособие для начинающих коротко-волновиков. – 5-е изд., перераб. и доп., 2012. – 249 с. : ил.

УДК 620.197.5

АНАЛІЗ УМОЎ УЗНІКНЕННЯ КАРОЗІІ ПАДЗЕМНЫХ ТРУБАПРАВОДАЎ І МЕТАДАЎ ЯЕ ПРАДУХІЛЕННЯ

Ю. В. Крышнеў, А. Я. Запольскі, М. А. Рогаў, Ю. Я. Котава

*Установа адукацыі «Гомельскі дзяржаўны тэхнічны ўніверсітэт
імя П. В. Сухого», Рэспубліка Беларусь*

*Прааналізаваны віды каразійнага пашкоджання металаканструкцый магістральных
трубаправодаў, іх прырода і прычыны ўзнікнення.*

Ключавыя словы: карозія, каразійнае паражэнне, металічныя канструкцыі,
магістральныя трубаправоды, электрахімічная абарона.

ANALYSIS OF CORROSION CONDITIONS OF UNDERGROUND PIPELINES AND METHODS OF ITS PREVENTION

Y. V. Kryshneu, A. Y. Zapolski, M. A. Rohau, Y. Y. Kotava

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

*In this work, the types of corrosion damage to metal structures of main pipelines, their
nature and causes of occurrence are analyzed.*

Keywords: corrosion, corrosion damage, metal structures, main pipelines, electrochemical
protection.

Карозія ўяўляе сабой паступовы працэс разбурэння металаў і сплаваў з-за розных відаў узаемадзеяння з аграэіўным навакольным асяроддзем. Пры гэтым агульныя страты ад карозіі разлічваюцца як страты ад разбурэння непасрэдна зборных металаканструкцый і страты на абарону гэтых канструкцый ад гэтага разбурэння (антыкаразійная абарона). Акрамя гэтага асобна трэба разглядаць страты ад прастаю абсталявання, якое адбылося пасля аварыі, выкліканай крытычным зносам элементаў абсталявання ад карозіі.

Пры разглядзе пытання ўзнікнення карозіі (хімічны ці электрахімічны працэс) трэба адрозніваць яе ад працэсу эрозіі (фізічнага разбурэння металаў). Вядомым прыкладам карозіі з'яўляецца ўтварэнне іржы – акіслення жалеза ў вадзе з утварэннем гідраксиду жалеза $\text{Fe}(\text{OH})_3$.

Эксперыментальным шляхам была адкрыта прамая залежнасць хуткасці праходжання карозіі ад тэмпературы. Падвышэнне тэмпературы можа істотна павялічыць хуткасць працякання карозіі. Акрамя таго, карозія мае ўласцівасць распаўсюджвання з адной павярхоўні на іншую.

Галоўная прычына ўзнікнення карозіі – тэрмадынамічная няўстойлівасць металаў. Па гэтай прычыне яны заўсёды знаходзяцца ў акісленым стане ў натуральным асяроддзі, а для абароны ад карозіі выкарыстоўваюць метады палярызавання акісленага стану (катодная абарона) або ўжываюць адмысловыя ізаляцыйныя матэрыялы.

Для класіфікацыі карозіі выкарыстоўваюць розныя крытэры: умовы і механізм праходжання працэсу, характар разбурэння металу, тып навакольнага асяроддзя. Пры гэтым галоўным з іх з'яўляецца механізм праходжання, які падзяляе карозію на хімічны і электрахімічны падвіды.

Адносна навакольнага асяроддзя вылучаюць газавы, марскі, біялагічны, падземны падтыпы карозіі. Адносна ўмоў праходжання – наступныя падтыпы карозіі: кантактная, міжкрышталева, пры частковым пагрузэнні, пры поўным пагрузэнні.

Адносна характару разбурэння металу вылучаюць тры галоўныя падтыпы карозіі – поўная, агульная (уключае ў сабе раўнамерны, нераўнамерны, выбарачны варыянты), лакальная карозія (плямавая, кропкавая, язавая).

Галоўны крытэр для класіфікацыі – механізм праходжання каразійнага працэсу. Металы па сваёй прыродзе аддаюць свае электроны без моцнага супраціву і ўтвараюць дадатна зараджаныя іёны. Па сваёй хімічнай актыўнасці і становішчы ў шэрагу стандартных патэнцыялаў, металы можна падзяліць на тры ўмоўныя групы: актыўныя (да прыкладу, літый), сярэднеактыўныя (нікель) і неактыўныя (медзь). Ступень актыўнасці пры гэтым вызначаецца здольнасцю выцясняць вадарод з вады і раствораў кіслот [3].

Адносна таго, як працякае карозія, яна можа быць хімічнай ці электрахімічнай.

Хімічная карозія вызначаецца як узаемадзеянне паверхні металу з каразійна-актыўным асяроддзем. Пры гэтым само асяроддзе не з'яўляецца электралітам у выглядзе сухога газу ці вадкасці. У дадзеным працэсе акісленне металу і аднаўленне акісляльнага кампанента з навакольнага асяроддзя адбываюцца амаль адначасова. Хуткасць праходжання рэакцыі пры гэтым залежыць ад плямы кантакту, тэмпературы металу і навакольнага асяроддзя, тыпу апрацоўкі паверхні металу і яго структуры [3].

Электрахімічная карозія ўяўляе з сябе разбурэнне металу ці сплава пад уздзеяннем гальванічных элементаў, якія ўзнікаюць у каразійна-актыўным асяроддзі. Пры ёй заўсёды павінен прысутнічаць электраліт – рэчыва, якое праводзіць электрычны ток з дапамогай адмоўна ці дадатна зараджаных іонаў (дажджавая вада з разведзеным у ёй вуглякіслым газам CO_2 , кандэнсатарная вадкасць). Пры кантакце некалькіх

металаў (сплаваў) або аднаго, але рознаструктурнага, цалкам або часткова змешчаных у электраліце, узнікае замкнены гальванічны элемент, які праводзіць іённы ток. Гэты ток паступова разбурае метал, які мае меншы акісляльна-аднаўленчы патэнцыял; пры гэтым другі метал захоўваецца [2].

Важна адзначыць, што хімічная карозія, як правіла, працякае пры даволі высокай тэмпературы і/або ціску, з прычыны чаго яе прынята называць высока-тэмпературнай. У адрозненне ад яе электрахімічная карозія – нізкатэмпературная, бо ў асноўным закранае металы пры нізкіх тэмпературах. Карозія падземных трубаправодаў і рэзервуараў з'яўляецца электрахімічнай карозіяй. Асноўныя кінэтычныя заканамернасці рэакцый, якія праходзяць па хімічных і электрахімічных механізмах, адрозніваюцца, з прычыны чаго на практыцы не ўдаецца затармазіць або прадукціць карозію, не вызначыўшы, як працякаюць рэакцыі, якія ляжаць у яе аснове [1].

Умовы праходжання каразійных працэсаў могуць быць абсалютна рознымі. Памылковым з'яўляецца прыраўноўванне ўмоў яе праходжання толькі да навакольнага асяроддзя. Вылучаюць, адносна ўмоў праходжання і навакольнага асяроддзя, наступныя яе тыпы: атмасферная; грунтавая (падземная); карозія ў электралітах; кантактная; пад напругай, фрэтынг-каррозія (пры адначасовым уздзеянні каразійнага асяроддзя і сіл трэння); электракаррозія (працякае пад уздзеяннем блукаючых токаў); біякаррозія; газавая каррозія; неэлектрычная каррозія (каррозія ў не электралітах) [4].

Разбурэнне металу можа насіць розны характар і быць усеагульным (поўным), агульным і частковым (ці лакальным). Першыя 2 тыпу карозіі робяць немагчымай эксплуатацыю аб'ектаў [3].

Поўная (усеагульная) карозія суправаджаецца поўным разбурэннем металаканструкцыі аб'екта, ахопліваючы ўсю яе паверхню, якія знаходзяцца пад уздзеяннем агрэсіўнага асяроддзя, і можа быць як раўнамернай, так і нераўнамернай. Яе галоўная небяспека – памяншэнне таўшчыні сценкі металаканструкцыі (трубаправода), што павялічвае яе знос і апорную здольнасць.

Лакальнае разбурэнне ад карозіі адбываецца на асобных участках – гэта мясцовая (лакальная) каррозія. Язвавая каррозія належыць да выпадку лакальнай карозіі, пры якім у сценцы металу ўзнікаюць сітавіны розных памераў (звычайна да 1–2 см), што часцяком прыводзіць да скразнога паражэння канструкцыі. Пры гэтым, з-за нязначнай вобласці пашкоджання, такія ўчасткі складана выявіць.

Парэпанне металаў пад напружаннем назіраецца пры сумесным уздзеянні на паверхню агрэсіўнага асяроддзя са статычнымі або цыклічнымі расцягваючымі напружаннямі, што прыводзіць да ўтварэння мноства расколін. Асноўныя прычыны – нераўнамернае растварэнне участкаў паверхні з утварэннем канцэнтратараў напружання; адсорбцыя актыўных кампанентаў асяроддзя на паверхні і актывацыя вадароднага працэсу; павялічэнне крохкасці металу пры ўздзеянні вадарода.

Падземная каррозія – найбольш частая і небяспечная для магістральных падземных трубаправодаў і рэзервуараў. Вылучаюць некалькі відаў падземнай карозіі: непасрэдная падземная каррозія; падземная біякаррозія; падземная электракаррозія [1].

У грунце прысутнічае вільгаць і розныя хімічныя рэагенты, з прычыны чаго ён мае іённую праводнасць, што спрыяе праходжанню электрахімічнай карозіі. Да найбольш частых катодных працэсаў, якія адбываюцца пад зямной паверхняй, належыць кіслародная дэпалярызацыя. У кіслых грунтах можа працякаць карозія і з вадароднай дэпалярызацыяй [3, 4].

Пры гэтым працякаючыя анодныя і катодныя працэсы часцяком адбываюцца на розных участках прылягання металічнай канструкцыі з рознай інтэнсіўнасцю. Гэта прыводзіць да зносу канструкцыі на кожным з участкаў з рознай хуткасцю [4].

Такім чынам, можна зрабіць наступныя высновы:

1. Карозія з'яўляецца складаным працэсам, канчатковым вынікам якога з'яўляецца разбурэнне металаканструкцый, да якіх таксама належаць і падземныя магістральныя трубаправоды.

2. На працэс праходжання карозіі аказваюць уздзеянне як фізічныя фактары, так і, у першую чаргу, узаемадзеянне з агрэсіўным асяроддзем.

3. У залежнасці ад умоў і асяроддзі карозія падзяляецца на мноства падвідаў, кожны з якіх па-свойму небяспечны.

4. Падземная карозія з'яўляецца адным з самых небяспечных відаў карозіі.

5. Пры недастатковым узроўні мер па абароне канструкцый трубаправодаў, могуць узнікнуць пагрозы экалагічнага бедства і эканамічных страт з прычыны парушэння герметычнасці трубаправода.

Правядзенне антыкаразійных мерапрыемстваў павінна ахопліваць усе ўчасткі падземнага трубаправода і мець комплексны характар – пасіўнымі метадамі (ужыванне гідраізаляруючых пакрыццяў на вонкавай сценцы трубаправода) і актыўнымі метадамі (ужыванне сістэм электрахімічнай абароны на аснове сістэм аўтаматычнага падтрымання ахоўнага патэнцыялу).

Літаратура

1. Васильев, В. В. Коррозия металлов : метод. указания для студентов всех специальностей / В. В. Васильев, А. В. Кольчугин ; под общ. ред. И. Н. Худякова. – Иваново : ИГТА, 2010. – 28 с.
2. Умовы фарміравання ахоўнага тока ў сістэмах электрахімічнай абароны / Ю. В. Крышнеў, У. І. Собалеў, А. Я. Запольскі, М. В. Дравіца // Современные проблемы машиноведения : сб. науч. тр.: в 2 ч. Ч. 1 / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, ПАО «ОАК» ОКБ Сухого, Таиз. ун-т (Йеменская Республика) ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2023. – С. 190–193.
3. Химия : учеб. пособие / А. В. Нечаев. – Екатеринбург : УрФУ, 2016. – Ч. II. – 112 с.
4. Теория и технология электрохимических методов защиты от коррозии : учеб.-метод. пособие / О. В. Ярославцева, В. М. Рудой, Н. И. Останин [и др.] ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. – Екатеринбург : Изд-во Урал. Ун-та, 2016. – 96 с.

УДК 531.746.088.2(045)(476)

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ИНКЛИНОМЕТРА

В. А. Карпов, О. М. Ростокينا, Ю. Е. Котова

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

Представлены уравнения преобразования для электролитических чувствительных элементов с учетом поляризационной емкости и выражения температурной погрешности коэффициента передачи чувствительных элементов.

Ключевые слова: электролитический инклинометр, температурная погрешность, одноосевой и двухосевой чувствительные элементы, поляризационная емкость.

TEMPERATURE ERRORS OF THE ELECTROLYTIC SENSING ELEMENT OF THE INCLINOMETER

U. A. Karpau, V. M. Rastokina, Y. Y. Kotava

Sukhoi State Technical University Gomel, the Republic of Belarus

The transformation equations for electrolytic sensitive elements are obtained in the article, taking into account the polarization capacitance and the expression of the temperature error of the SE transmission coefficient.

Keywords: electrolytic inclinometer, temperature error, single-axis and dual-axis sensing elements, polarization capacitance.

Электролитические чувствительные элементы (ЭЧЭ) – инклинометры на основе жидкостных датчиков наклона – распространены в тех областях техники, где требуется информация об отклонениях различных элементов конструкции от горизонтального уровня.

Существуют одноосевые и двухосевые ЭЧЭ. Принцип их действия основан на изменении импеданса между металлическими электродами, помещенными в раствор электролита, при отклонении основания ЧЭ от горизонтального уровня. В одноосевом ЭЧЭ импеданс изменяется между центральным и соседними, равноудаленными от центрального и расположенными вдоль прямой, электродами. В двухосевых ЭЧЭ импеданс изменяется между центральным и двумя парами электродов, равноудаленных от центрального и расположенных вдоль двух взаимно перпендикулярных прямых.

В горизонтальном положении ЧЭ импедансы между центральным и соседними электродами одинаковы. При отклонении основания ЧЭ от горизонтального уровня, например, относительно одной оси, импедансы между электродами, расположенными вдоль противоположной оси, изменяются. При этом в рабочем диапазоне углов наклона ЧЭ импеданс между центральным и одним из электродов увеличивается на некоторую величину, а импеданс между центральным и другим электродом на такую же величину уменьшается. Относительное изменение импеданса при этом является мерой наклона ЧЭ.

Известно, что межэлектродный импеданс определяется омическим сопротивлением столба электролита и последовательно соединенной с ним поляризационной емкостью. Значение сопротивления столба электролита определяется степенью погруженности электродов в электролит, т. е. наклоном ЧЭ, при этом значение поляризационной емкости определяется составом электролита и материалом, из которого изготовлены электроды, т. е. не зависит от угла наклона ЧЭ. Таким образом, межэлектродный импеданс можно представить в виде эквивалентного последовательно соединенного омического сопротивления (сопротивления столба электролита) и эквивалентной поляризационной емкости, которая представляет собой последовательное соединение поляризационных емкостей электродов.

На рис. 1 представлена эквивалентная схема одноосевого и двухосевого ЭЧЭ с учетом поляризационных межэлектродных емкостей. На рис. 1 приняты следующие обозначения:

- для рис. 1, а: электроды 1, 2 – соседние, а электрод 3 – центральный;
- для рис. 1, б: электроды 1–4 – соседние, а электрод 5 – центральный – общий;
- C – эквивалентная межэлектродная емкость, значение которой равно значению

последовательно соединенных поляризационных емкостей соседних электродов;

R – электрическое сопротивление столба электролита между соседними электродами при горизонтальном положении ЧЭ;

ΔR , Δr – изменение сопротивления между соседними электродами при отклонении ЧЭ от горизонтального уровня.

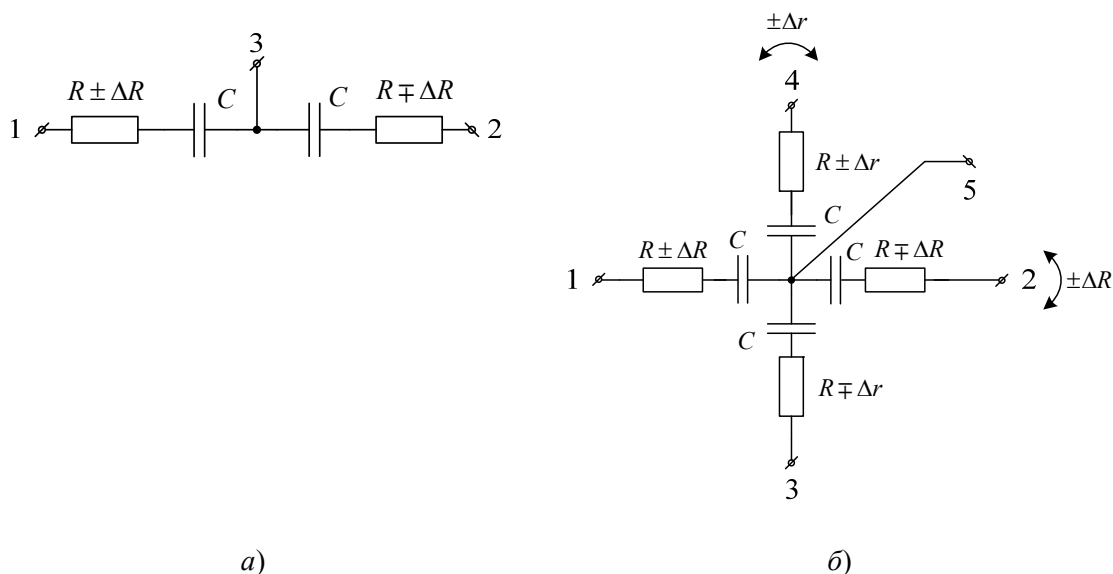


Рис. 1. Эквивалентные схемы замещения ЭЧЭ
с учетом эквивалентной межэлектродной емкости C для ЧЭ:
 a – одноосевого; b – двухосевого

Особенностью формирования полезного выходного напряжения ЭЧЭ является то, что соседние импедансы включаются не в мостовую схему, а в качестве делителя напряжения, выходом которого является средний электрод, или общий электрод (электрод 3 – рис. 1, a и электрод 5 – рис. 1, b). Тогда мерой наклона ЧЭ служит изменение коэффициента деления (отличие от 0,5 для одноосевого ЭЧЭ на рис. 1, a) и отличие от 0,25 для двухосевого ЭЧЭ на рис. 1, b). Эта особенность обусловлена тем, что при изменении температуры окружающей среды существенно изменяется сопротивление электролита. Коэффициент деления делителя напряжения при этом остается неизменным и изменяется только под действием отклонения ЧЭ от горизонта.

На рис. 2 представлена измерительная схема для соответствующих ЧЭ. В схеме неизменная часть межэлектродного импеданса представлена в виде сопротивления Z , равного последовательно соединению неизменной части межэлектродного электрического сопротивления столба электролита R и эквивалентной межэлектродной емкости C , в виде ΔR , Δr представлены изменяющиеся в зависимости от положения ЧЭ части межэлектродного сопротивления. Сумматоры (на рис. 2 обозначены «Сумм») с соответствующими коэффициентами суммирования необходимы для формирования выходного напряжения измерительной схемы $U_{\text{вых}}$, которое является нулевым при горизонтальном положении ЧЭ.

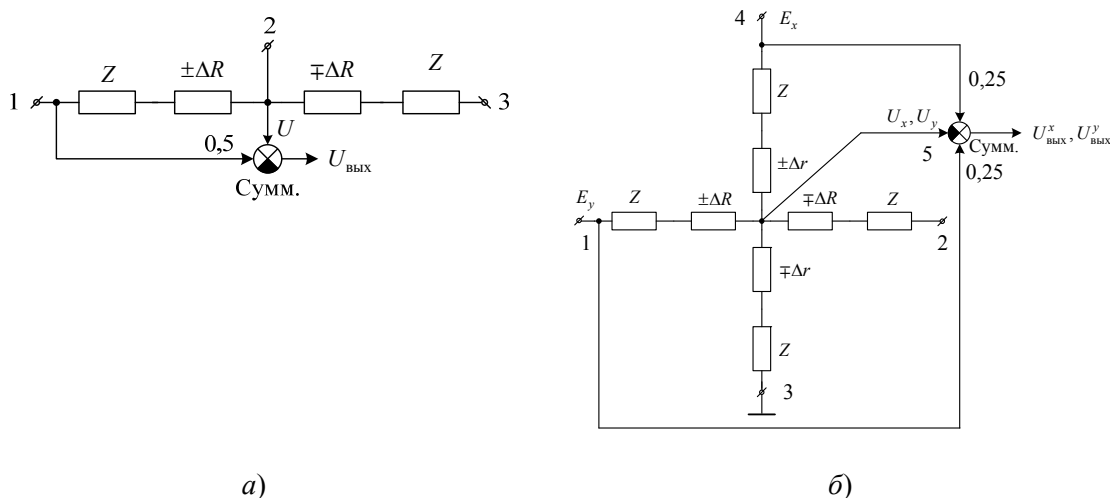


Рис. 2. Измерительные схемы для электролитических ЧЭ:
а – одноосевого; б – двухосевого

При питании ЧЭ синусоидальным напряжением выходное напряжение для одноосевого ЭЧЭ будет иметь вид:

$$\dot{U}_{\text{ВЫХ}} = 0,5 \dot{E} \frac{\omega T}{\sqrt{1 + (\omega T)^2}} e^{j \arctg \omega T} \delta_R = 0,5 E \frac{(\omega T)^2}{1 + (\omega T)^2} \delta_R + j \frac{\omega T}{1 + (\omega T)^2} \delta_R, \quad (1)$$

а для двухосевого ЭЧЭ:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{\text{ВЫХ}}^x &= 0,5 \dot{E}_x \frac{\omega T}{\sqrt{1 + (\omega T)^2}} \delta_r e^{j \arctg \omega T} = 0,25 \dot{E}_x \frac{(\omega T)^2}{1 + (\omega T)^2} \delta_r + j 0,25 \dot{E}_x \frac{\omega T}{1 + (\omega T)^2} \delta_r; \\ \dot{U}_{\text{ВЫХ}}^y &= 0,5 \dot{E}_y \frac{\omega T}{\sqrt{1 + (\omega T)^2}} \delta_r e^{j \arctg \omega T} = 0,25 \dot{E}_y \frac{(\omega T)^2}{1 + (\omega T)^2} \delta_r + j 0,25 \dot{E}_y \frac{\omega T}{1 + (\omega T)^2} \delta_r, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где δ_r / δ_R – относительные изменения электрического сопротивления столба электролита.

Из (1), (2) можно заключить, что наличие поляризационной емкости C не приводит к температурной погрешности нуля, при $\delta_r / \delta_R = 0$ выходные напряжения измерительных схем равны нулю, т. е. отсутствует погрешность нулевого уровня, вызванная изменением R и C .

В реальных условиях эксплуатации влияние изменения температуры окружающей среды приводит к изменению электрического сопротивления столба электролита R (поляризационная емкость C меньше подвержена температурным изменениям, поскольку определяется конструктивными параметрами ЧЭ). Таким образом, изменение температуры приводит к изменению коэффициента преобразования для одноосевого и двухосевого ЧЭ соответственно:

$$\delta_{K_1} = \frac{0,5}{(\omega C R_1)^2} \left(1 - \frac{1}{n^2} \right) \frac{1}{\Delta t}; \quad \delta_{K_2} = \frac{1}{(\omega C R_1)^2} \left(1 - \frac{1}{n^2} \right) \frac{1}{\Delta t},$$

где n – кратность изменения электрического сопротивления столба электролита при изменении температуры от t_1 до t_2 .

Из полученного видно, что измерительная схема с выпрямлением напряжений перед сумматором имеет температурную погрешность коэффициента преобразования вдвое меньше, чем схема с фазочувствительным выпрямлением.

УДК 62-50:62-529

МИКРОКОНТРОЛЛЕРНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ НАГРЕВАТЕЛЬНЫМ КОТЛОМ

Э. М. Виноградов

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

Рассмотрено использование программного пакета Scilab для анализа микроконтроллерной системы автоматического управления нагревательным котлом.

Ключевые слова: пакет Scilab, система автоматического управления, нагревательный котел, передаточная функция, временные характеристики.

MICROCONTROLLER AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR HEATING BOILER

E. M. Vinahradau

Sukhoi State Technical University Gomel, the Republic of Belarus

The report considers usage of software package Scilab for analysis automatic control system for heating boiler.

Keywords: package Scilab, automatic control system, heating boiler, transfer function, time response functions.

Современные вычислительные средства позволяют без особого труда и затрат времени решать задачи управления в технических системах с использованием математического аппарата любой степени сложности. В последнее время начал широко использоваться бесплатный, свободно распространяемый программный продукт – пакет Scilab, который предназначен для выполнения инженерных и научных вычислений. Следует отметить, что имеется очень мало русскоязычных руководств по Scilab, особенно его применения для решения задач автоматического управления. В работе [1] приведен пример исследования с помощью пакета Scilab линейной системы автоматического управления.

В статье рассмотрен пример применения пакета Scilab для исследования системы автоматического управления (САУ) электрическим водонагревателем. Она используется для поддержания температуры в резервуаре на желаемом уровне. Температура воды измеряется с помощью датчика (интегральная схема LM35DZ). Выходной сигнал датчика преобразуется микроконтроллером в цифровую форму и сравнивается с заданной желаемой температурой для формирования сигнала ошибки. Для нахождения передаточной функции системы надо рассмотреть математические модели ее элементов.

Теплоту E , поступающую в систему, примем равной сумме нагрева и тепловых потерь системы. Таким образом:

$$E = (m_1 c_1 + m_2 c_2) \frac{(dT_q)}{t} + h S T_q.$$

Здесь m_1 – масса воды внутри бака; c_1 – теплоемкость воды; m_2 – масса бака; c_2 – теплоемкость бака; S – площадь поверхности бака; h – постоянная, зависящая от внешних условий; T_q – изменение температуры.

Приняв $k_1 = m_1 c_1 + m_2 c_2$ и $k_2 = hS$ и выполнив преобразование по Лапласу, получим передаточную функцию бака в виде:

$$\frac{Tq(s)}{E(s)} = \frac{1}{sk_1 + k_2}.$$

Для управления нагревателем в САУ используется широтно-импульсная модуляция (ШИМ). Предполагая, что нагревательный элемент имеет только активное сопротивление R , средняя мощность, подаваемая на нагреватель, может быть рассчитана как:

$$P_{AV} = R I_{rms}^2 = R I_0^2 \frac{M}{\tau} = \alpha M,$$

где $\alpha = \frac{R I_0^2}{\tau}$, I_0 – амплитуда тока ШИМ; M – длительность импульса; τ – период ШИМ.

Если принять $R = 1,2$ Ом, $I_0 = 10$ А, $\tau = 1$ мс, то передаточная функция нагревателя будет:

$$P_{AV} = \frac{1,2 \cdot 100}{10^{-3}} M$$

или

$$\frac{P_{AV}}{M} = 1,2 \cdot 10^5.$$

В САУ используется датчик температуры LM35DZ, имеющий аналоговый выход с соотношением 10 мВ/°С. Его передаточная функция

$$V_0 = 0,01T,$$

где V_0 – выходное напряжение датчика, T – температура, °С.

Структурная схема САУ, состоящей из двух динамических звеньев, приведена на рис. 1.

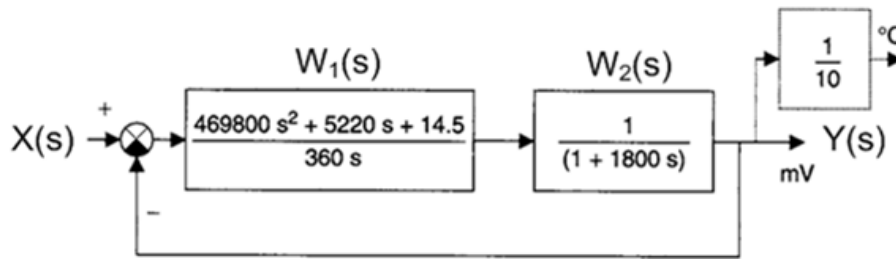


Рис. 1. Структурная схема САУ

Для анализа САУ требуется выполнить следующее:

- 1) преобразовать структурную схему и найти эквивалентную передаточную функцию САУ;
- 2) построить графики переходной и импульсно-переходной характеристик;
- 3) определить устойчивость САУ.

Для решения поставленных задач было создано несколько скрипт-файлов с помощью редактора SciNotes, входящего в пакет Scilab:

1. Текст скрипта для преобразования структурной схемы САУ и нахождения эквивалентной передаточной функции системы:

```
s = %s; // объявление символьной переменной
// определение передаточных функций отдельных звеньев
W1 = syslin('c', (469800*s*s+5220*s+14.5), (360*s));
W2 = syslin('c', 1, (1+1800*s));
// преобразование структурной схемы
W12 = W1 * W2;
W = W12 / (1 + W12);
// эквивалентная передаточная функция САУ
disp("Передаточная функция САУ: W = ");
disp(W);
```

Результат выполнения скрипта имеет следующий вид:

Передаточная функция САУ:

$$W = \frac{0,000013 + 0,0046699s + 0,4202899s^2}{0,000013 + 0,0049919s + s^2}.$$

2. Текст скрипта для построения графиков временных функций САУ:

```
t = 0 : 0.01 : 10000; // диапазон времени и шаг
h = csim('step', t, W);
plot(t, h); // график функции h(t) в окне с номером 0
xtitle("Переходная характеристика h(t)", "Время, с", "Амплитуда");
xgrid(); // отобразить сетку
scf(1); // открыть новое графическое окно с номером 1
g = csim('impulse', t, W);
plot(t, g); // график функции g(t) в окне с номером 1
xtitle("Импульсно-переходная характеристика g(t)", "Время, с", "Амплитуда");
xgrid(); // отобразить сетку
```

Результат выполнения скрипта представлен на рис. 2.

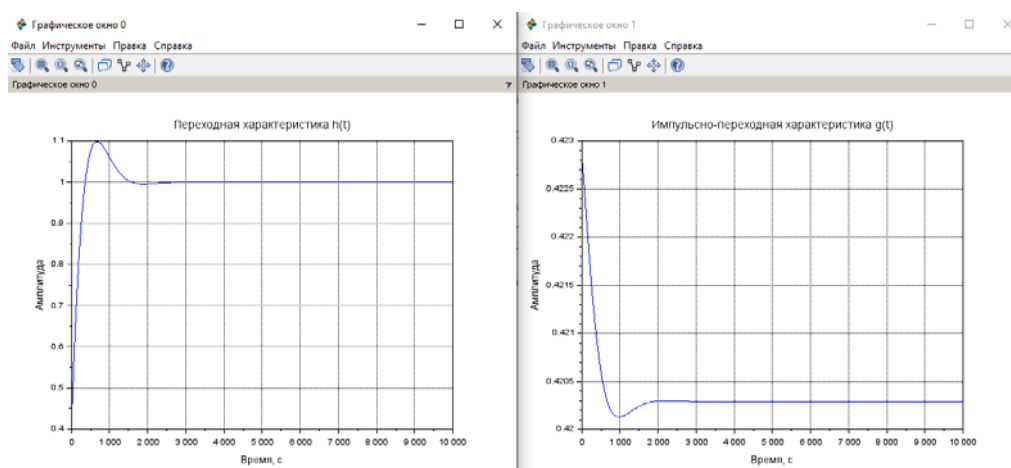


Рис. 2. Графики переходной и импульсно переходной характеристик САУ

3. Текст скрипта для вычисления корней характеристического уравнения САУ с целью определения устойчивости:

```
den = W.den; // вычисление знаменателя передаточной функции САУ
r = roots(den); // вычисление корней характеристического уравнения
disp("Корни характеристического уравнения САУ равны: ");
disp(r);
```

Результат выполнения скрипта имеет следующий вид:

Корни характеристического уравнения САУ равны:

– $0.002496 + 0.0025965i$

– $0.002496 - 0.0025965i$

Все корни характеристического уравнения имеют отрицательные вещественные части, поэтому можно сделать вывод, что заданная САУ будет устойчивой.

Литература

1. Виноградов, Э. М. Анализ системы автоматического управления с помощью программного пакета Scilab / Э. М. Виноградов // Современные проблемы машиноведения : сб. науч. тр. В 2 ч. Ч. 1 / М-во образования Респ. Беларусь [и др.] ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2023. – С. 197–200.

УДК 62-83-52

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В СТЕНДЕ НАГРУЖЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

М. Н. Погуляев, Д. Ю. Мельников

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

Представлен анализ процессов, протекающих при нагружении двигателей постоянно-го тока по методу взаимной нагрузки. На физической и на компьютерной моделях стенда проведены исследования характеристик двигателей постоянного тока ПЛ-062, приведены полученные результаты.

Ключевые слова: двигатель постоянного тока, стенд, имитационная модель, управляемый выпрямитель, тиристорный регулятор.

ANALYSIS OF PROCESSES OCCURRING IN THE STAND FOR LOADING DC MOTORS

M. N. Pogulyaev, D. Yu. Melnikov

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

This paper presents an analysis of the processes occurring during loading of DC motors using the mutual loading method. The physical and computer models of the stand were used to study the characteristics of PL-062 DC motors, and the results obtained are presented.

Keywords: DCmotor, stand, simulation model, controlled rectifier, thyristor regulat.

В последние годы вопрос энергосбережения становится все более актуальным. Эффективное использование энергии электродвигателей постоянного тока при проведении испытания под нагрузкой может существенно снизить затраты на электричество и уменьшить негативное воздействие на окружающую среду. Для их проведения используются энергосберегающие стенды, основанные на принципе взаимной нагрузки. Такая реализация стенда позволяет существенно сократить потребление электроэнергии из сети, так как основной поток энергии будет циркулировать в контуре между якорными цепями двигателей. Понимание процессов, происходящих при работе таких стендов, позволяет оптимизировать его настройки, заранее выявлять возможные риски и предотвращать аварийные ситуации, способствует лучшему анализу полученных данных и их интерпретации. Таким образом, детальное изучение процессов, происходящих в стенде, является ключевым для успешной подготовки и проведения натурных испытаний.

Цель работы – создание имитационной модели стенда для анализа рабочих и аварийных режимов, определения параметров силовых элементов, аппаратуры управления и защиты, а также получения необходимых электромеханических характеристик. Для верификации компьютерной модели провести натурные испытания на лабораторном стенде.

Имитационная модель стенда (рис. 1) разработана в программной среде Matlab/Simulink/SimPowerSystems, включающая как стандартные блоки этих пакетов, так и пользовательские блоки, разработанные специально для этой задачи. Модель позволяет проводить анализ работы стенда в установившихся, динамических и аварийных режимах, определять основные параметры (напряжения, токи, скорости, мощности), анализировать временные процессы. Кроме того, с ее помощью можно производить оптимизацию параметров силовых элементов и аппаратуры защиты. Было выполнено численное моделирование работы стенда с двигателями постоянного тока ПЛ-072.

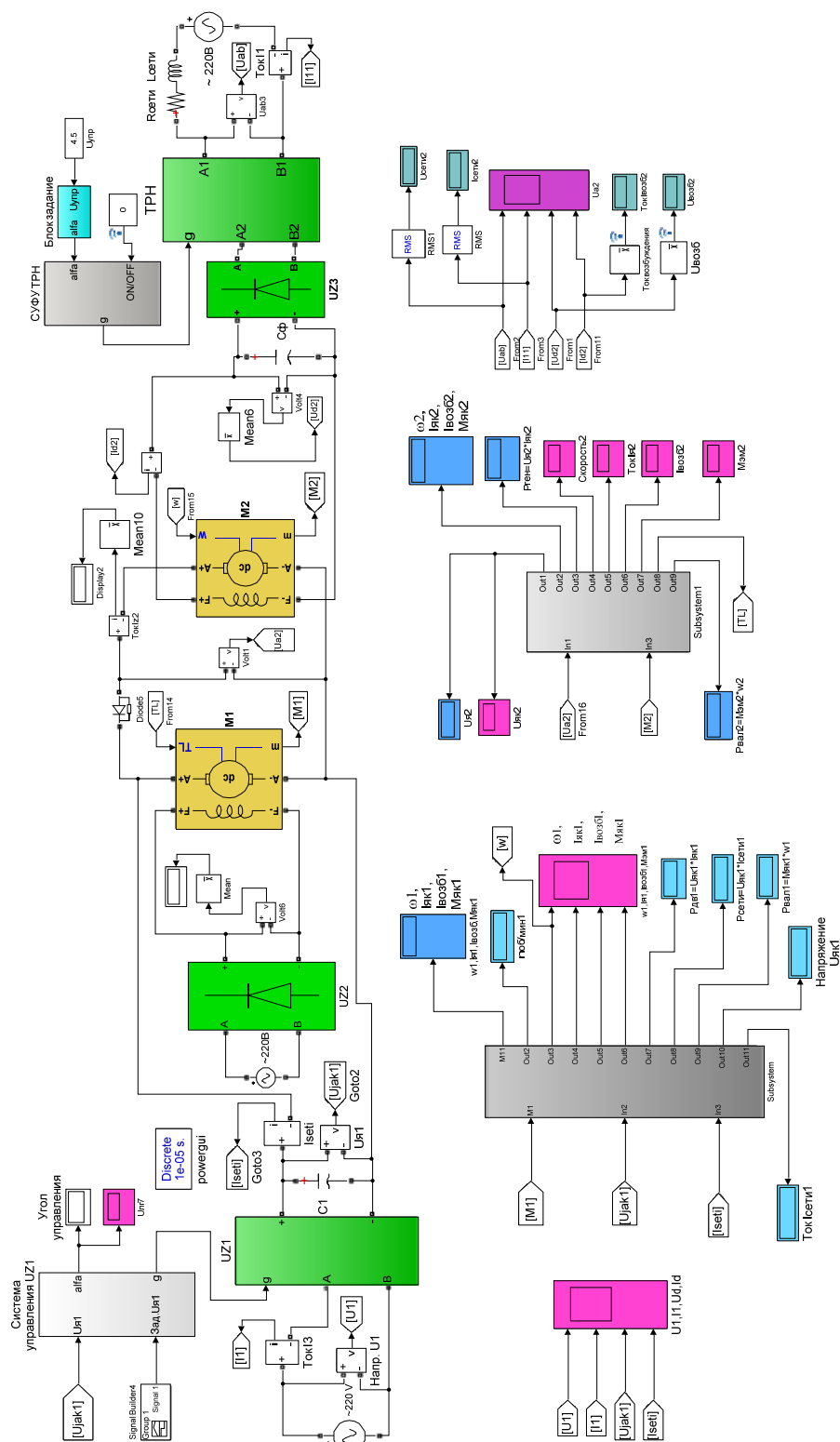


Рис. 1. Иммитационная модель стенда для испытаний двигателей постоянного тока

Получены временные диаграммы и численные значения параметров (угловая скорость, токи, момент и др.) при набросе нагрузки (рис. 2).

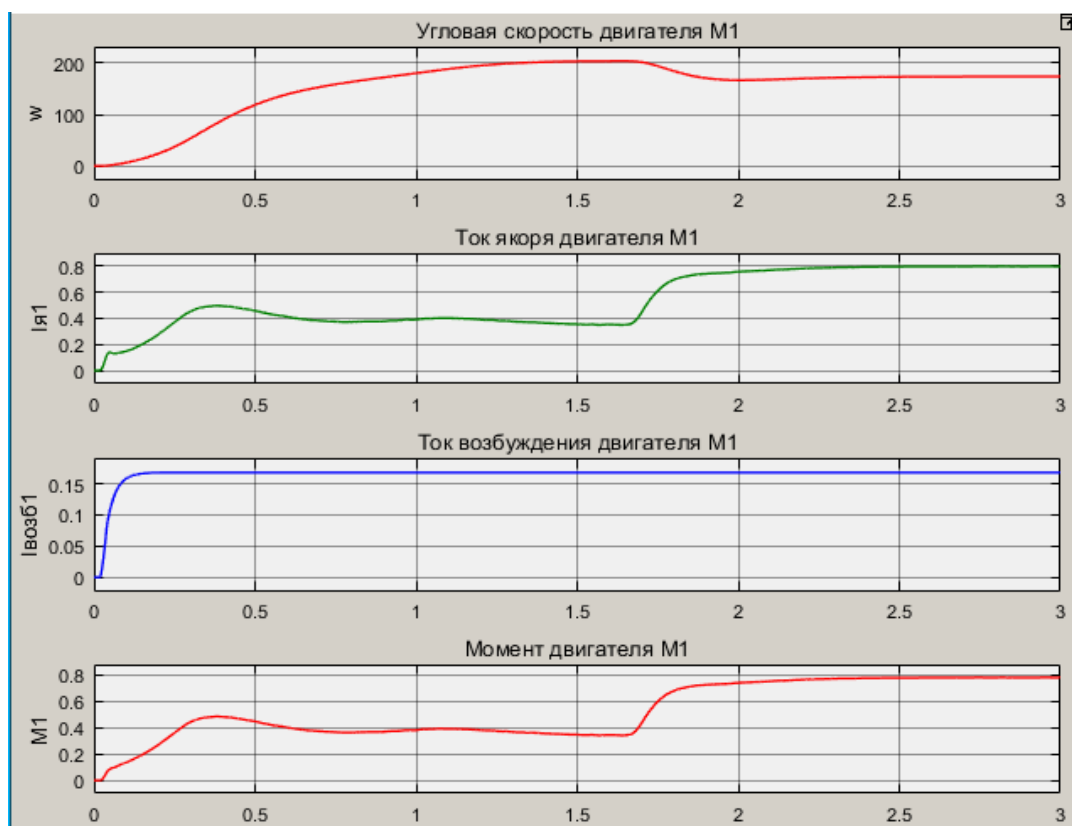


Рис. 2. Диаграммы работы стенда при набросе нагрузки

Проверка адекватности модели, проведенная на стенде в лаборатории «Электрические машины», показывает высокую точность разработанной имитационной модели. Максимальное различие между результатами численного моделирования и стендовых испытаний двигателя постоянного тока типа ПЛ-072 не превышает 4,8 %, что свидетельствует о высокой степени соответствия модели реальному оборудованию.

На основании этих результатов можно заключить, что разработанная имитационная модель может оказаться полезным инструментом в производственных условиях на этапе подготовки к натурным испытаниям. Она может помочь инженерам проводить виртуальные эксперименты и моделировать различные сценарии, чтобы оптимизировать работу стенда нагружения и повысить эффективность испытаний электродвигателей. Это может помочь сократить время и затраты, связанные с проведением реальных испытаний, и уменьшить риск повреждения дорогостоящего оборудования.

Кроме того, данная модель может сыграть важную роль и в учебном процессе. Она предоставляет студентам возможность визуализировать и анализировать работу различных компонентов испытательного стенда, что способствует более глубокому пониманию принципов работы систем нагружения. Знания, полученные на модели, облегчают понимание реальных испытаний и будут полезны в будущей профессиональной деятельности.

УДК 539.1.074:53.087.92

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ ДАТЧИКОВ НИЖНЕГО УРОВНЯ (LOW LEVEL) СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЕТЕКТОРОМ SPD ПРОЕКТА NICA

Л. А. Захаренко

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

Е. С. Кокоулина

*Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна,
Российская Федерация*

Представлены результаты работы по разработке измерительных преобразователей тока, напряжения и температуры, в результате которой были разработаны структурные схемы измерительных преобразователей, а также электронная система для управления и чтения данных с микросхемы АЦП LTC2308 на отладочной плате Terasic модели DE1-SoC-MTL2 на базе устройства FPGA Cyclone V.

Ключевые слова: измерение тока, измерение напряжения, измерение температуры, аналого-цифровой преобразователь LTC2308, отладочная плата DE1-SoC-MTL2, FPGA Cyclone V.

MEASURING TRANSDUCERS FOR LOW LEVEL SENSORS OF THE SPD DETECTOR CONTROL SYSTEM OF THE NICA PROJECT

L. A. Zakharanka

Sukhoi State Technical University of Gomel, Gomel, Republic of Belarus

E. S. Kokoulina

Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russian Federation

The results of the work on the development of measuring converters of current, voltage and temperature are presented, as a result of which structural diagrams of measuring converters were developed, an electronic system for control and reading data from the LTC2308 ADC chip on the Terasic DE1-SoC-MTL2 debug board based on the Cyclone V FPGA device was developed.

Keywords: Current measurement, voltage measurement, temperature measurement, LTC2308 A/D converter, DE1-SoC-MTL2 development board, Cyclone V FPGA.

Детектор SPD (Spin Physics Detector) ускорительного комплекса NICA, функционирующего в Объединенном институте ядерных исследований, создается как универсальная установка для всеобъемлющего изучения спиновой структуры нуклона (формирования понимания структуры и фундаментальных свойств нуклона непосредственно из динамики его кварков и глюонов) [1].

Анализ набора измерительных параметров системы управления детектором DCS показал, что наиболее востребованными являются параметры напряжения, тока и температуры. Исходя из этого в статье представлены структурные схемы измерительных преобразователей тока, напряжения и температуры. Структурная схема измерительного преобразователя тока представлена на рис. 1.

Для измерения тока в токовую цепь включается шунт сопротивлением $R_{ш}$, напряжение с которого усиливается дифференциальным усилителем ДУ и подается на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Блок управления (БУ) на основе

FPGA Altera Cyclone V (предполагается один БУ для 32 измерительных преобразователей) управляет АЦП и считывает выходной код АЦП и отправляет по открытому сетевому протоколу CANopen по запросу от модулей среднего уровня.

Для расширения функциональных возможностей измерительного преобразователя тока опорное напряжение $U_{оп}$ АЦП задается цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП) [2].

Блок быстрого преобразования Фурье (БПФ), который может быть реализован на FPGA Cyclone V, предназначен для расчета спектральных составляющих тока.

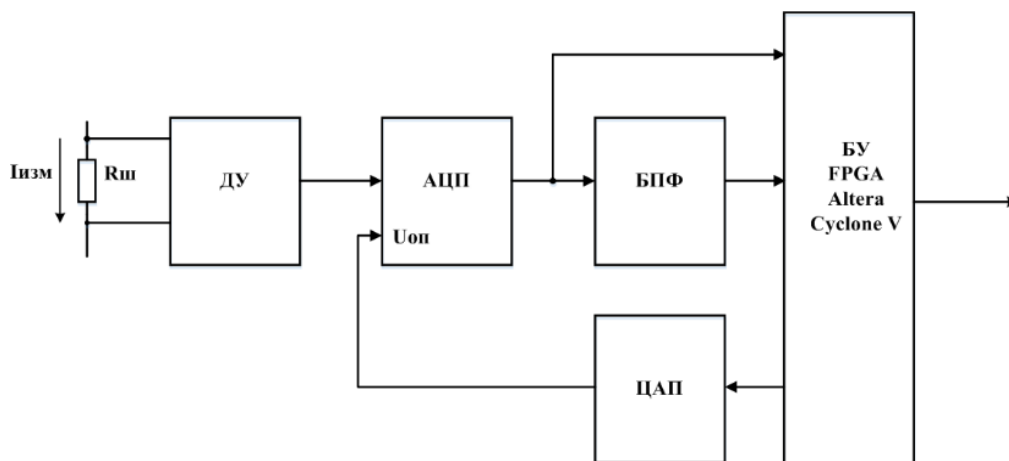


Рис. 1. Структурная схема измерительного преобразователя тока

Структурная схема измерительного преобразователя напряжения незначительно отличается от структурной схемы измерительного преобразователя тока и приведена на рис. 2. Отличия заключаются в отсутствии шунта и использовании усилителя с недифференциальным входом.

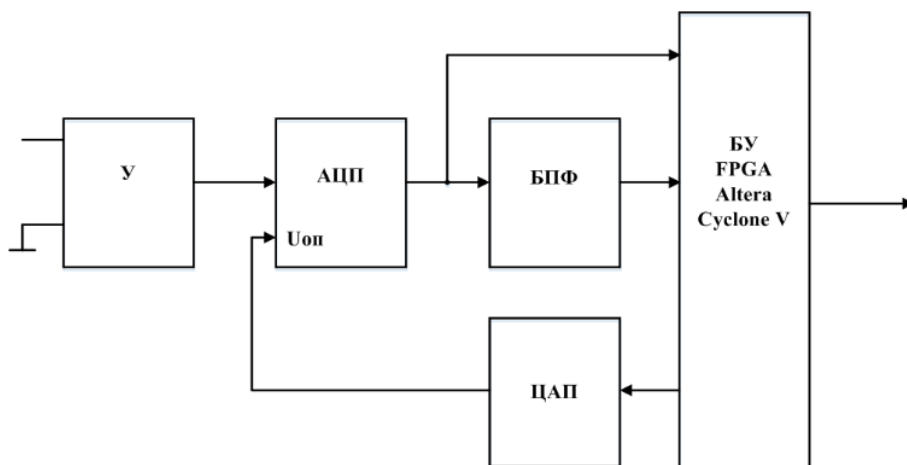


Рис. 2. Структурная схема измерительного преобразователя напряжения

Для измерения температуры в качестве измерительного преобразователя температуры предлагается использовать датчик MLX90614, который является инфракрасным термометром для бесконтактного измерения температуры [3]. Как инфра-

красный чувствительный термоэлементный детекторный чип, так и преобразователь сигнала ASSP интегрированы в один корпус ТО-39.

Благодаря малому шумящему усилителю, 17-битному АЦП и мощному блоку DSP достигается высокая точность и разрешение термометра.

Термометр поставляется с заводской калибровкой и с цифровым выходом широтно-импульсной модуляции (ШИМ) и SMBus (шина управления системой). В стандартной комплектации 10-битный ШИМ настроен на непрерывную передачу измеренной температуры в диапазоне -20 – 120 °C с выходным разрешением $0,14$ °C.

Для проверки функциональных возможностей программно-аппаратного комплекса (интегрированная среда разработки (IDE) – создание новой схемы – программирование FPGA – проверка результатов) была разработана электронная система для управления и чтения данных с микросхемы АЦП LTC2308, встроенной на отладочной плате DE1-SoC-MTL2. Данные передаются на 6-разрядный светодиодный дисплей и по видеоинтерфейсу VGA.

LTC2308 – это 8-канальный, 12-битный АЦП с интерфейсом SPI, разработанный для приложений с низким энергопотреблением и высокой скоростью выборки. Он обладает дифференциальными входами, что позволяет точно измерять аналоговые сигналы, минимизируя шум.

Основные характеристики – диапазон входных напряжений: от 0 до 5 В (может быть настроен в зависимости от режима работы); скорость выборки: до 500 тыс. выборок в секунду (500 kSPS); интерфейс: последовательный (SPI-совместимый); интегральная нелинейность (INL): ± 1 LSB; дифференциальная нелинейность (DNL): гарантированная монотонность; режимы работы: одноканальный, дифференциальный, автоматическое обновление выборки.

Для разработки электронной системы использовалась интегрированная среда разработки (IDE) Quartus 22.1, предназначенная для проектирования, моделирования, синтеза и реализации цифровых схем на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) и специализированных интегральных схемах (ASIC).

На рис. 3 приведены основные схемные модули.

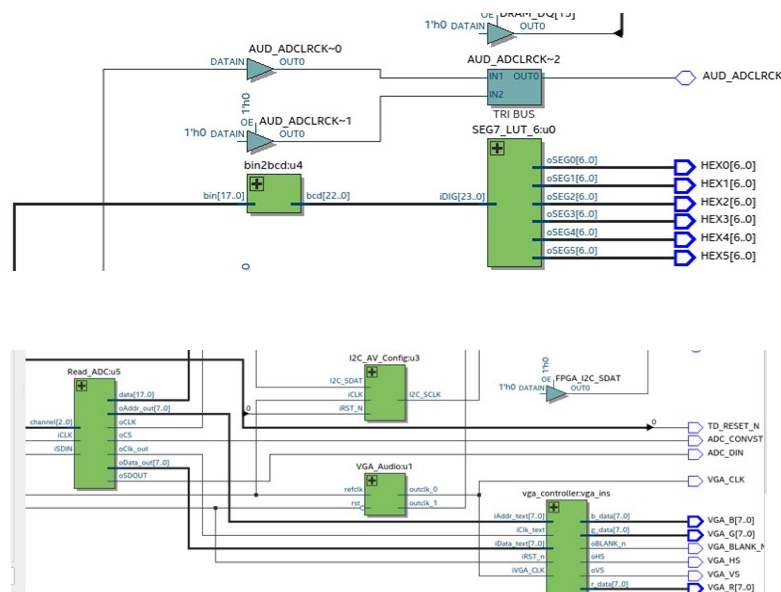


Рис. 3. Основные схемные модули управления и чтения данных АЦП LTC2308

К ним относятся: Read_ADC – схемный модуль, осуществляющий управление и чтение данных по интерфейсу SPI; bin2bcd – схемный модуль, преобразующий двоичный код в двоично-десятичный код BCD; SEG7_LUT_6 – схемный модуль, содержащий 6 модулей преобразующих двоично-десятичный код в семисегментный, предназначен для выдачи информации на шестirazрядный семисегментный индикатор; vga_controller – схемный модуль, осуществляющий выдачу информации на VGA-монитор.

Результаты работы показывают, что построение блока управления на основе FPGA Cyclone V для управления и обработки информации измерительных преобразователей значительно расширяют функциональные возможности системы.

Литература

1. Technical Design Report of the Spin Physics Detector (For the SPD collaboration) / JOINT INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH. – 2024. – February 6. – Version 2.00. – 349 p.
2. Захаренко, Л. А. Разработка автономных датчиков технологических параметров с передачей данных по сети «Интернет» / Л. А. Захаренко, Ю. В. Крышнев // Современные проблемы машиноведения : материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. 125-летию со дня рождения П. О. Сухого), Гомель, 22 окт. 2020 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Филиал ПАО «Компания «Сухой» ОКБ «Сухого» ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2020. – С. 176–178.
3. Универсальный измеритель температуры / В. А. Карпов, Е. А. Лядвин, Л. А. Захаренко [и др.] // Современные проблемы машиноведения : тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П. О. Су-хому), Гомель, 4–6 июля 2002 г. / под общ. ред. С. Б. Сарело. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2002. – С. 123–124.

УДК 004.42:81.374

РЭАЛІЗАЦЫЯ КРОСПЛАТФОРМЕННАГА КОМПЛЕКСУ ДЛЯ АНГЛА-РУСКА-БЕЛАРУСКАГА СЛОЎНІКА ТЭХНІЧНЫХ ТЭРМІНАЎ

Ю. В. Крышнеў, М. І. Гапоненка, М. У. Буракова, А. Я. Запольскі, М. М. Белка

*Установа адукацыі «Гомельскі дзяржаўны тэхнічны ўніверсітэт
імя П. А. Сухого», Рэспубліка Беларусь*

Разгледжана рэалізацыя праграмнага кросплатформеннага комплексу для англа-руска-беларускага слоўніка тэрмінаў на радыёэлектроніцы, аўтаматыцы і інфармацыйна-вымяральной тэхніцы.

Ключавыя словы: мабільнае прыкладанне, праграмнае забеспячэнне, персанальны камп'ютар, слоўнік, англа-руска-беларускі слоўнік, радыёэлектроніка, аўтаматыка, інфармацыйна-вымяральная тэхніка, C++, QML, Qt.

IMPLEMENTATION OF A CROSS-PLATFORM COMPLEX FOR THE ENGLISH-RUSSIAN-BELARUSIAN DICTIONARY OF TECHNICAL TERMS

Y. V. Kryshneu, M. I. Haponenka, M. U. Burakova, A. Y. Zapolski, M. M. Belka

Sukhoi State Technical University of Gomel, tht Republic of Belarus

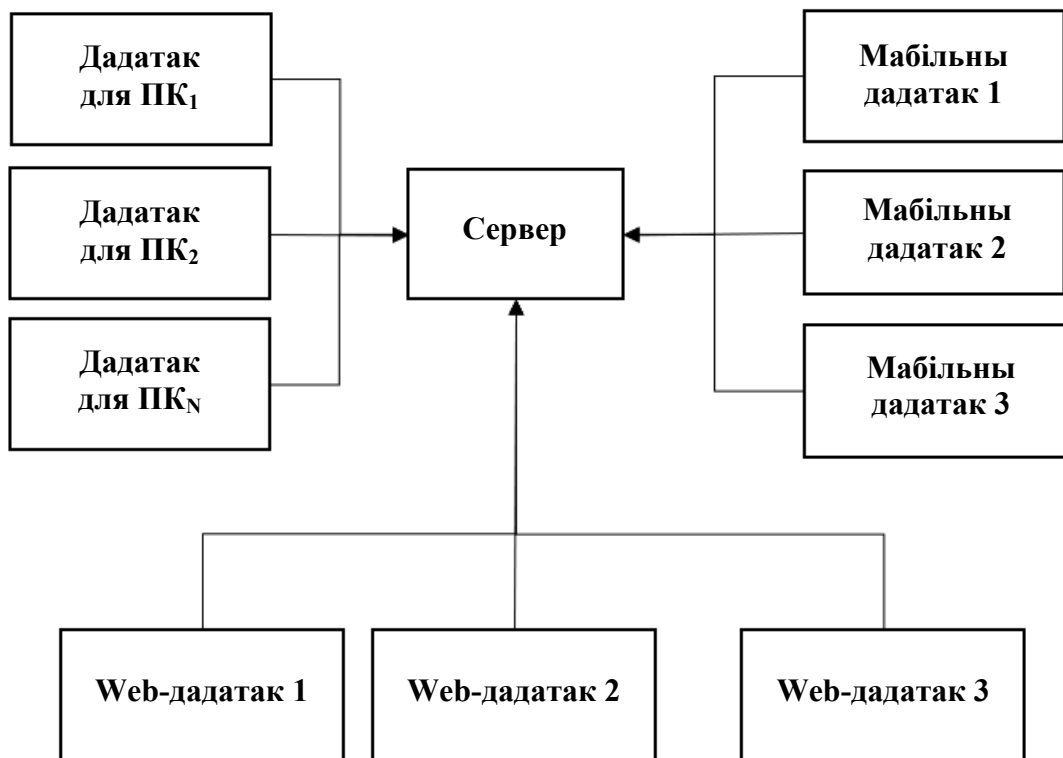
The paper considers the implementation of a cross-platform software package for the English-Russian-Belarusian dictionary of terms on radio electronics, automation and information and measurement technology.

Keywords: mobile application, software, personal computer, dictionary, English-Russian-Belarusian dictionary, radio electronics, automation, information and measuring equipment, C++, QML, Qt.

У любой краіне развіцце і падтрымка роднай мовы з'яўляецца важнай задачай. Для рэалізацыі гэтай мэты выкарыстоўваецца комплексны падыход, які ўключае ў сябе правядзенне розных мерапрыемстваў, а таксама рэалізацыю праграм.

У сучасным свеце чалавецтва выкарыстоўвае для вырашэння розных задач праграмнае забеспячэнне, якое працуе на персанальных камп'ютарах або мабільных прыладах (смартфоны, планшэты). Зыходзячы з сучасных тэндэнцый, было прынята рашэнне распрацаваць праграмнае забеспячэнне для англа-руск-беларускага слоўніка тэрмінаў па радыёэлектроніцы, аўтаматыцы і інфармацыйна-вымяральной тэхніцы [1].

Структурная схема праекта прадстаўлена на мал. 1. Адным з галоўных звенаў апаратна-праграмнага комплексу з'яўляецца сервер, які апрацоўвае запыты ад карыстальнікаў розных прылад.



Мал. 1. Структурная схема праграмнага кросплатформеннага комплексу для слоўніка

Сістэма кіравання базамі даных, якія знаходзяцца на аднаплатным камп'ютары, забяспечвае надзейнае захоўванне і струкутурызацыю лексікаграфічных кампанентаў для кожнай адзінкі слоўніка: саміх тэхнічных тэрмінаў на 3-х мовах, іх кантэкстаў і дэфініцый.

У праграме можна вылучыць тры асноўныя кампаненты: бізнэс-логіка, графічны інтэрфейс QML і ўбудаваная сістэма кіравання базамі даных (СКБД) SQLite. Гэтыя кампаненты цесна звязаны адно з адным і забяспечваюць эфектыўнае і надзейнае функцыянаванне мабільнага дадатку.

Апаратная часть комплексу ўяўляе з сябе аднаплатны камп'ютар, падлучаны да сеткі Інтэрнэт, які рэалізуе сервер сістэмы. Сервер захоўвае і апрацоўвае даныя. Тэхнічнай інструментальнай платформай для рэалізацыі сервера ў праекце служыць аднаплатны камп'ютар Orange Pi 4 [2].

Для забеспячэння функцыянавання праграмы слоўніка неабходна стварыць файл базы даных, які змяшчае табліцы для захоўвання тэрмінаў і ўсёй дадатковай інфармацыі да іх. У дадзеным выпадку будзе выкарыстоўвацца СКБД SQLite3 для стварэння і кіравання базай даных. Даныя ў базе захоўваюцца ў выглядзе запісаў, якія можна дадаваць, змяняць, выдаляць і здабываць з дапамогай мовы запытаў, такой як SQL (Structured Query Language). Узаемадзеянне з данымі ў базе адбываецца праз выкананне пэўных аперацый [3].

Кожная табліца павінна захоўваць даныя аб тэхнічных тэрмінах на адпаведнай мове з неабходнай дадатковай інфармацыяй для паспяховага перакладу. База даных будзе складацца з трох табліц, кожная з якіх будзе адказваць за пэўную мову.

Для спрашчэння стварэння файла базы даных і легкага дадання даных у табліцы было прынята рашэнне выкарыстоўваць дапаможную праграму SQLiteStudio.

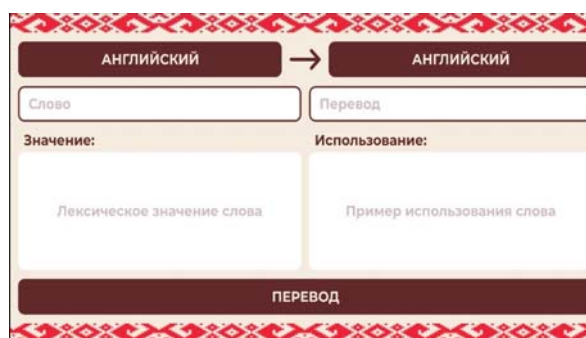
Праграмае забеспячэнне англа-руска-беларускага перакладчыка тэхнічных тэрмінаў напісана з выкарыстаннем моў QML і C++. Дэкларатыўная мова QML выкарыстоўваецца для стварэння логікі інтэрфейсу, а C++ – для напісання логікі праграмы. Выкарыстанне фрэймворка Qt дазваляе зрабіць бачнымі функцыі мовы C++ у якасці ўласцівасцяў, якія могуць выкарыстаць элементы QML [4, 5].

Інтэрфейс мабільнага дадатку адаптаваны для выкарыстання як у партрэтным рэжыме, так і ў ландшафтным. Вонкавы выгляд інтэрфейсу прадстаўлены на малюнку 2.

Інтэрфейс падзелены на 3 раздзелы: настройка перакладу, увод тэксту, інфармацыя аб перакладзеным тэрміне. Першы раздзел складаецца з двух выпадаючых меню, прызначаных для выбару мовы перакладу. Меню дазваляе выбіраць зыходную мову для ўводу тэрміна і мову, на якую будзе ажыццяўляцца пераклад.



а)



б)

Мал. 2. Інтэрфейс дадатку:

а – партрэтны рэжым; б – ландшафтны рэжым

Матэрыял падрыхтаваны ў рамках навукова-даследчай работы «Тэрміналогія электратэхнікі беларускай, рускай і англійскай моў: тлумачальны слоўнік» задання 12.6 «Беларуская лексікалогія, тэрміналогія, тэрмінаграфія, аўтаматызаваная апрацоўка тэкставых масіваў: актуальныя праблемы тэорыі і практыкі» падпраграмы «Беларуская мова і літаратура» дзяржаўнай праграмы навуковых даследаванняў «Грамадства і гуманітарная бяспека беларускай дзяржавы» на 2021–2025 гг.

Літаратура

1. Мабільны дадатак для англа-руска-беларускага слоўніка па радыёэлектроніцы, аўтаматыцы і інфармацыйна-вымяральной тэхніцы / М. І. Гапоненка, А. Я. Запольскі, Ю. В. Крышнёў, А. В. Сахарук // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XXIII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 27–28 крас. 2023 г. В 2 ч. Ч. 2 / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2023. – С. 54–56.
2. Аднаплатны камп'ютар Orange Pi 4. – URL: <http://www.orangepi.org/html/hardWare/computerAndMicrocontrollers/index.html> (дата звароту: 25.05.2024).
3. SQLite. – URL: <https://blog.skillfactory.ru/glossary/sqlite/> (дата звароту: 19.06.2024).
4. Дакументацыя C++. – URL: <https://learn.microsoft.com/ruru/cpp/cpp/?view=msvc-170> (дата звароту: 24.09.2024).
5. Аб Qt. – URL: <https://blog.skillfactory.ru/glossary/qt/> (дата звароту: 01.10.2024).

УДК 539.213.27+539.25+539.264

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^\circ$, ПОЛУЧЕННЫХ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ GWYDDION

М. Ф. С. Х. Аль-Камали

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

Рассмотрен золь-гель метод как ключевая технология для получения различных материалов, включая наноматериалы. Описан процесс формирования золя, который превращается в гель, а также методы синтеза наночастиц в жидких средах. Особое внимание уделено важности однородности гранулометрического и химического состава исходного материала для качественного вакуумного напыления. Применение высокочистых компонентов и аэрозоля способствует равномерному распределению легирующих добавок, создавая оптимальные условия для получения высококачественных покрытий. Также акцентируется внимание на компьютерном анализе микроскопических изображений, полученных с использованием сканирующей электронной микроскопии, для оценки топографии и размеров наночастиц в композиционных материалах $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^\circ$.

Ключевые слова: золь-гель метод, наноматериалы, СЭМ, компьютерный анализ, наночастицы, композиционные материалы, $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^\circ$.

RESEARCH OF THE SURFACE PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^\circ$ OBTAINED BY THE SOL-GEL METHOD USING THE GWYDDION PROGRAM

M. F. S. H. AL-Kamali

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

This paper discusses the sol-gel method as a key technology for obtaining various materials, including nanomaterials. The process of forming a sol that turns into a gel, as well as methods for

synthesizing nanoparticles in liquid media, is described. Particular attention is paid to the importance of homogeneity of the granulometric and chemical composition of the source material for high-quality vacuum deposition. The use of high-purity components and aerosil promotes uniform distribution of alloying additives, creating optimal conditions for obtaining high-quality coatings. Attention is also focused on the computer analysis of microscopic images obtained using scanning electron microscopy to assess the topography and size of nanoparticles in $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^\circ$ composite materials.

Keywords: Sol-gel method, Nanomaterials, SEM, Computer analysis, Nanoparticles, Composite materials, $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^\circ$.

Золь-гель метод является важной технологией для получения различных материалов, включая наноматериалы. Он включает в себя создание золя, который превращается в гель – коллоидную систему, состоящую из жидкой среды и пространственной сети частиц. Формирование наночастиц в жидких средах включает методы осаждения, синтеза в сверхкритических жидкостях и физического воздействия. Для качественного вакуумного напыления критически важна высокая однородность гранулометрического и химического состава исходного материала. Использование высокочистых компонентов и аэросила как матрицы позволяет достичь равномерного распределения легирующих добавок на поверхности аэросила. Это способствует созданию оптимальных условий для высококачественных покрытий. В связи с этим актуально применять компьютерный анализ микроскопических изображений, полученных с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), для количественной оценки топографии, размеров наночастиц и упорядоченности пористого массива в композиционных материалах $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^\circ$.

Целью данной работы является исследование свойств и характеристик нанокompозитов, полученных методом золь-гель, с акцентом на процесс анализа и оптимизации их структуры через методы компьютерной обработки изображений.

Нанокompозиты были синтезированы методом золь-гель, при котором сначала получался золь на основе оксида кремния, затем добавлялись соли нитрата меди в различных концентрациях. Смесь термообработывалась: сначала сушилась при 80°C в течение недели, затем при 800°C в течение часа. После сушки смесь измельчали для получения нанокompозитного порошка $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^\circ$. Поверхностные характеристики порошка исследовались с помощью сканирующего электронного микроскопа S-4800 (Hitachi, Япония). Распределение наночастиц и межпористое расстояние рассчитывались на основе электронных микрофотографий с использованием программного обеспечения Gwyddion [1, 2].

Для анализа изображений, полученных методом СЭМ, использовался комплекс Gwyddion, который позволяет визуализировать данные и анализировать агломераты. В процессе обработки рассчитывались параметры, такие как общее число агломератов, их площадь, длина границ и средний размер. Применялись маски для выделения областей агломератов, что обеспечивало более точную оценку их характеристик. В результате анализа были определены средняя площадь сферических агломератов, пористость поверхности и средний размер агломератов. Пористость поверхности рассчитывалась по специальной формуле [3, 4]:

$$D_{\text{сф}} = \sqrt{\frac{4S_{\text{сф}}}{\pi}},$$

где $S_{\text{сф}}$ – средняя площадь сферообразных агломератов; $P_{\text{сф}}$ – пористость поверхности; $D_{\text{сф}}$ – средний размер сферообразных агломератов.

Изображения ксерогелей, содержащих ионы меди, обработанные на воздухе при температуре 800 °С. Это подтверждается визуальными данными, демонстрирующими изменения в структуре образцов (рис. 1).

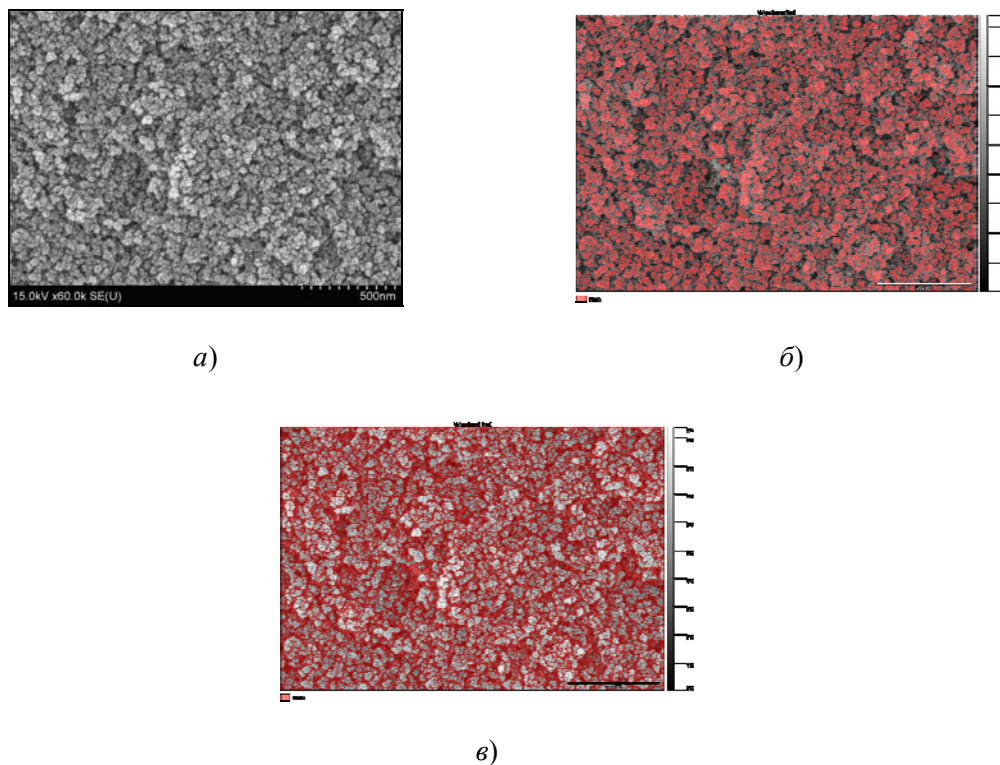


Рис. 1. Анализ СЭМ-изображения, обработанного программой Gwyddion ксерогеля (термообработан в среде водорода при $T = 800$ °С, 1 час, концентрация меди 0,40 моля на содержания 1 моль SiO_2):
 а – исходное СЭМ-изображение; б – изображение исследуемого образца с зернами, покрытыми «маской»; в – изображение инвертированной «маски» для поверхности исследуемого образца

В таблице представлены результаты статистического анализа распределения агломератов по размерам, полученные с помощью программы Gwyddion, а также соответствующие измерения, выполненные с помощью СЭМ. Видно, что средний размер сферических агломератов остается практически одинаковым, измеряясь в нанометрах, нм.

Результаты статистического анализа распределения агломератов по размерам с помощью программы Gwyddion, СЭМ и РФА

Состав	Параметры					
	Количество агломератов	Общая площадь $\mu, \text{м}^2$	Средняя площадь сферических агломератов $S_{\text{сф}}, \text{нм}^2$	Средний размер сферообразных агломератов, нм		
				Gwyddion	СЭМ	РФА
$\text{SiO}_2 : \text{Cu}^\circ$	900	1,76	480,87	24,7	24,1	22,49

Из таблицы видно, что программа Gwyddion согласуется и с данными СЭМ, и с результатами рентгенографии, обеспечивая считывание всей поверхности образца.

Однако в процессе обработки возникают некоторые дефекты, при слабой точности рисования результаты могут быть неточными. Тем не менее Gwyddion демонстрирует результаты, близкие к более точным программам для анализа поверхностей. Полученные данные показывают, что восстановленный металл интегрируется в структуру SiO_2 -глобул, образуя металлическую оболочку с градиентом концентрации. Модифицированные ксерогели и микропорошки обладают эффективным распределением допантов и высокой однородностью концентрации восстановленного металла. Методы золь-гель синтеза, включая использование аэросилов, активно применяются в производстве керамических и оптических материалов, что способствует улучшению температуры спекания и достижению монолитного стеклообразного состояния. Результаты обработки изображений показывают, что средний размер наночастиц в порошке $\text{SiO}_2 : \text{Cu}^0$ составляет 17–35 нм, что соответствует литературным данным.

Литература

1. AL-Kamali, M. F. S. H. Structural properties of micropowders composition $\text{SiO}_2:\text{CuO}$ & $\text{SiO}_2:\text{Cu}^0$ prepared by sol-gel method / M. F. S. H. AL-Kamali, A. A. Alexeenko, M. H. AL-Buhiri [et al.] // Al-Andalus Journal of Applied Sciences. – 2021. – Vol. 8, № 13 (Jan.–Jun.). – P. 99–117. – ISSN 2410-7727. – URL: <http://www.andalusuniv.net/AUSTNEW/contentCustom.php?pid=515&menu=showNumM&page=4> (date of access: 30.06.2021).
2. Аль-Камали, М. Ф. С. Х. Структурообразование SiO_2 -ксерогелей, содержащих соединения меди различного фазового состава / М. Ф. С. Х. Аль-Камали, А. А. Алексеев, О. А. Титенков // Проблемы физики, математики и техники. – 2020. – № 3 (44). – С. 7–12.
3. Manual pages // Gwyddion – Free SPM (AFM, SNOM/NSOM, STM, MFM) data analysis software. – URL: <http://gwyddion.net/documentation/user-guide-ru/presentations-masks.html> (дата обращения: 27.08.2021).
4. An, V. Optical and AFM studies on p-SnS thin films deposited by magnetron sputtering/ V. An, M. Dronova, A. Zakharov // Chalcogenide Letters. – September 2015. – Vol. 12, N 9. – P. 483–487.

УДК 539.1.074:621.311.6

АНАЛИЗ СТРУКТУР И СХЕМОТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ VME-64 САЕН ДЛЯ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЕТЕКТОРОМ SPD ПРОЕКТА NICA

**С. Н. Кухаренко¹, Ю. В. Крышнев¹, В. В. Терещенко², А. Е. Запольский¹,
М. М. Белка¹**

¹Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

²Объединенный институт ядерных исследований,
г. Дубна, Российская Федерация

Представлены результаты работы по анализу варианта электропитания системы управления детектором SPD проекта NICA при помощи преобразователя САЕН VME-64, изучению ключевых особенностей организации подобных систем. Проведен анализ структуры и схемотехники преобразователя.

Ключевые слова: система управления детектором, SPD, NICA, VME-64, система питания, электромагнитная совместимость, энергетическая эффективность.

ANALYSIS OF STRUCTURES AND CIRCUIT DESIGN SOLUTIONS OF THE VME-64 CAEN CONVERTER FOR THE POWER SUPPLY OF THE NICA SPD DETECTOR CONTROL SYSTEM

S. M. Kukharenska¹, Y. V. Kryshneu¹, V. V. Tereshchenko², A. Y. Zapolski^{1,6}
M. M. Belka¹

¹*Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus*

²*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russian Federation*

The results of the analysis of the power supply option of the SPD detector control system of the NICA project using the CAEN VME-64 converter are presented, and the key design features of such systems are studied. The structure and circuitry of the converter are analyzed.

Keywords: detector control system, SPD, NICA, VME-64, power supply system, electromagnetic compatibility, energy efficiency.

Система управления детектором SPD (Spin Physics Detector) ускорительного комплекса NICA (Nuclotron based Ion Collider Facility) выполняет сбор, регистрацию и обработку сигналов с первичных датчиков, а также управление исполнительными механизмами. По своей структуре она представляет собой линейную макросистему управления с последовательным включением:

- первичных измерительных преобразователей, схем аналого-цифровой обработки и регистрации сигналов (измерительный тракт);
- контроллеров, формирователей, актуаторов (управляющий тракт), а также интерфейсных систем.

На суммарное потребление системы определяющее влияние оказывает необходимость обслуживания большого количества каналов. Предполагается реализация 70 каналов, которые будут работать в параллельном режиме, потребляя, по предварительным расчетам, от 1,6 до 2 кВт каждый.

Данный факт, совместно с высокой плотностью монтажа, приводит к необходимости оптимизации системы электропитания по коэффициенту полезного действия. Структурная схема, описывающая систему электропитания SPD, показана на рис. 1.

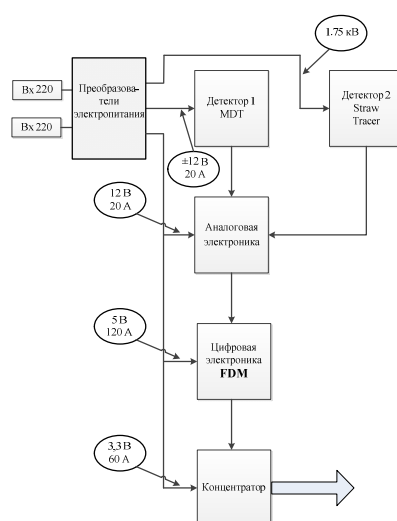


Рис. 1. Структурная схема системы электропитания SPD

При разработке устройства электропитания системы одним из определяющих факторов является проработка вопросов электромагнитной совместимости. Наличие электромагнитных помех оказывает негативное влияние на корректную работу элементов системы (аналоговая электроника, включая высокочувствительные датчики и аналого-цифровые преобразователи – АЦП). При этом решение данной проблемы невозможно без проведения экспериментальных измерений [1, 2].

Для разработки источника питания были проанализированы технические решения от различных производителей, включая преобразователь CAEN VME-64, структурная схема которого показана на рис. 2.

Сетевое напряжение поступает на вход выпрямителя и регулятора коэффициента мощности (рис. 3), который ликвидирует нелинейные искажения потребляемого из сети тока, а также содержит фильтр кондуктивных помех. Входной выпрямитель необходим для повышения и стабилизации напряжения на уровне 400 В. Так как он не имеет гальванической развязки с электрической сетью, то эту функцию выполняют последующие каналы преобразователя напряжения со стабилизированными выходными параметрами.

Функционально каналы преобразователей выполнены по схеме однотактного «прямоходового» преобразователя с прямым включением диода. Частота ШИМ модуляции, используемая в преобразователе CAEN, находится в пределах 40–60 кГц. Частота ограничена свойствами используемых компонентов и топологическими решениями.

В сетевом выпрямителе (рис. 3) сетевое напряжение поступает на фильтр кондуктивных помех, поступающих в электрическую сеть, с типовой частотной характеристикой, который снижает их уровень и воздействие на чувствительные элементы SPD. В преобразователе CAEN использован четырехзвенный фильтр, поэтому в типовом его исполнении следует ожидать подавления помех на уровне 80–90 дБ. Для реализации выпрямителя используется мостовая схема. Сервисный источник небольшой мощности с гальванической развязкой от сети предназначен для питания схемы управления и схемы связи с управляющим блоком. Схема управления выполнена с применением типового решения на микросхеме UC2823 (аналог 1156EY3). Дополнительно в схеме управления осуществляется контроль температуры теплоотвода, значение сопротивления терморезистора поступает в управляющий блок.

Выходной емкостный фильтр предназначен для сглаживания пульсаций выходного напряжения, реализованный включением четырех конденсаторов 470 мкФ параллельно.

Функциональная схема одного канала стабилизатора напряжения приведена на рис. 4. Входной емкостный фильтр 470 мкФ подключен к выходной шине выпрямителя с напряжением 400 В. При включении четырех каналов параллельно создается суммарная с выпрямителем емкость фильтра 4000 мкФ, необходимая для компенсации провалов и скачков напряжений в питающей сети. Однако такое значение буферной емкости требует принятия мер по устранению импульсных токов. Такие мероприятия в системе электропитания CAEN не выполнены и, соответственно, это обстоятельство приводит к заменам входных выпрямительных мостов (было выявлено по результатам осмотра). Сервисный источник гальванически развязан с сетью 400 В. Выходное напряжение этого источника гальванически связано с выходным стабилизированным 3,3 В, что существенно упрощает схему диагностики и управления преобразователем. Управление силовыми ключами инвертора реализовано через импульсный трансформатор управления, тем самым обеспечена гальваническая развязка между схемой управления и выходной цепью. Выходной фильтр пульсаций состоит из параллельно включенных электролитических конденсаторов общей ем-

кость 48000 мкФ. Такая емкость потребовалась для обеспечения уровня пульсаций выходного напряжения на уровне 5 мВ. Помимо емкости выходной фильтр содержит фильтр синфазной составляющей помех в виде ферритового кольца из материала ТЗ8.

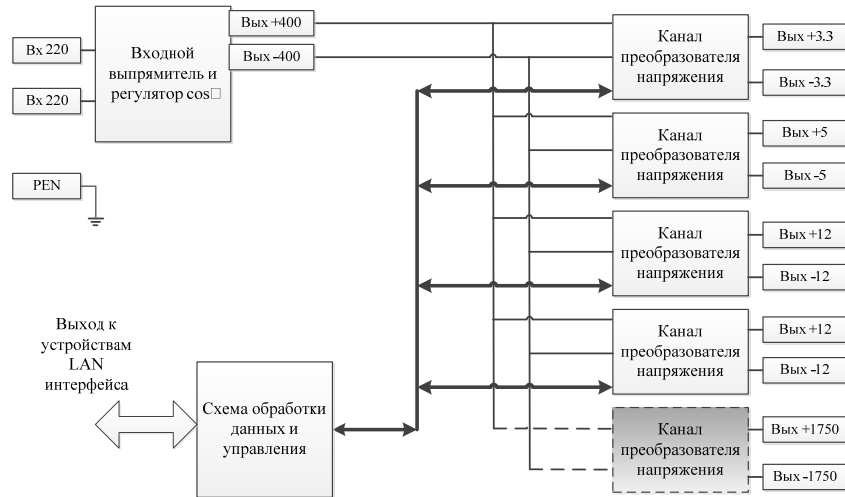


Рис. 2. Структурная схема системы электропитания VME-64 CAEN (канал, выделенный пунктирной линией, указывает на возможность наращивания дополнительных стабилизаторов)

Схема управления инвертором содержит 4-канальный 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь, один канал которого использован для управления выходным напряжением (алгоритм управления неизвестен). Весьма вероятно, что схема управления и обработки данных (рис. 2) корректирует значения выходного напряжения стабилизаторов с целью компенсации потерь напряжения на соединительных проводах. Также управление выходным напряжением может использоваться для формирования алгоритмов плавного запуска и алгоритма последовательного включения (это два очень важных момента в реализации систем питания).

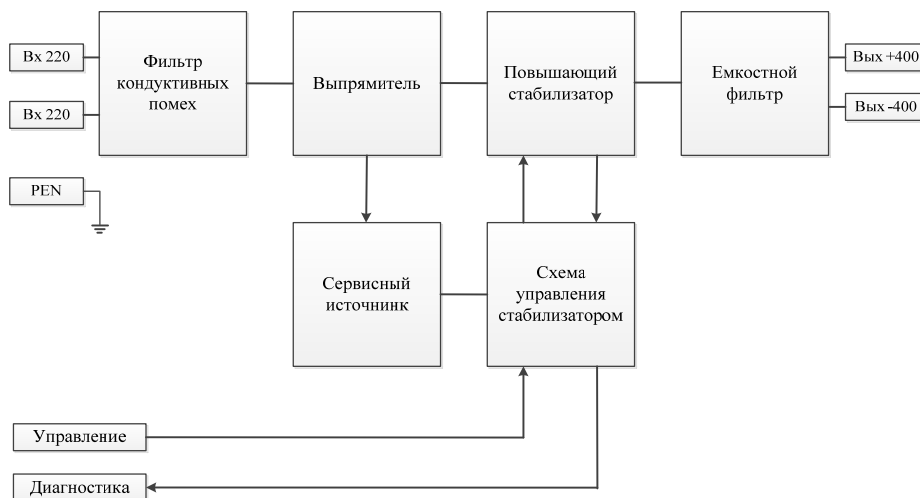


Рис. 3. Функциональная схема выпрямителя с регулятором коэффициента мощности

Необходимо отметить, что структура, показанная на рис. 2, содержит значительное количество узлов с высоковольтными (не менее 600 В) силовыми полупроводниковыми приборами, которые имеют значительно большую энергию переключения и более высокую стоимость (в два и более раз) в сопоставлении с низковольтными. Динамические потери (потери на переключение) ограничивают рабочую частоту преобразователя и увеличивают объемы теплоотводящих конструкций. Типовыми частотами преобразователей рассматриваемой мощности являются 60–120 кГц. Известно, что объем реактивных компонентов, применяемых в фильтрах пульсаций, обратно пропорционален квадрату частоты работы ШИМ. Следовательно, структура, показанная на рис. 2, может быть признана неэффективной по энергетическим и экономическим соображениям.

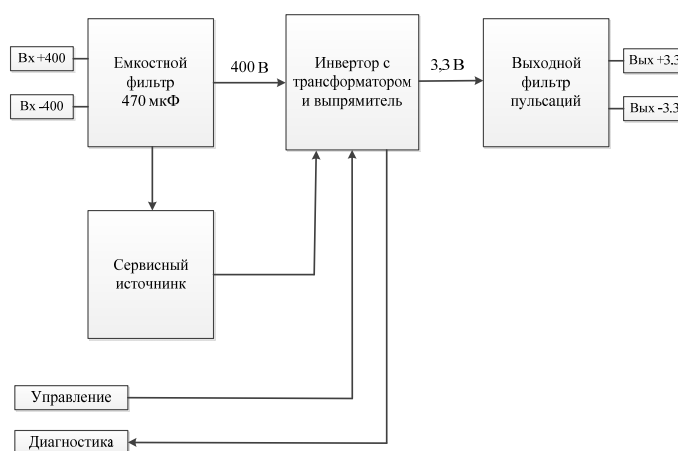


Рис. 4. Функциональная схема одного канала стабилизатора напряжения

В техническом решении VME-64 производителя CAEN один общий фильтр кондуктивных помех, выпрямитель и регулятор коэффициента мощности используются для подключения группы гальванически развязанных преобразователей. Каждый из этих преобразователей преобразует высокое напряжение (около 400 В) в конкретное напряжение низкого уровня и имеет отдельный канал настройки и диагностики.

Таким образом, проведенный анализ преобразователя VME-64 показывает, что для возможности использования в системе управления детектором SPD проекта NICA его отдельные узлы нуждаются в функциональном совершенствовании.

Л и т е р а т у р а

1. Technical Design Report of the Spin Physics Detector (For the SPD collaboration) / JOINT INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH. – February 6, 2024. – Version 2.00. – 349 p.
2. V. M. Abazov, V. Abramov, L. G. Afanasyev [et al.]. Conceptual design of the Spin Physics Detector. 1 2021, 2102.00442.
3. CAEN. Tools for Discovery. Nuclear. Products Catalog, 2007. – 114 p. (Application Note).
4. Кухаренко, С. Н. Фильтр кондуктивных помех / С. Н. Кухаренко, Ю. Е. Котова, Ю. А. Козусев // Современные проблемы машиноведения : материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. (науч. чтения, посвящ. П. О. Сухому), Гомель, 22–23 нояб. 2018 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого, Филиал ПАО «Компания «Сухой» ОКБ «Сухого» ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – С. 170–171.

УДК 539.1.074:53.087.92

ПРИНЦИПЫ ОРГАНИЗАЦИИ СРЕДНЕГО УРОВНЯ (MIDDLE LEVEL) В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ДЕТЕКТОРАМИ SPD ПРОЕКТА NICA И ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ФУНКЦИЙ ДИСПЕТЧЕРСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Ю. В. Крышнев¹, Е. С. Кокоулина², А. В. Сахарук¹, А. Е. Запольский¹

¹Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

²Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна, Российская Федерация

Рассмотрены основы принципов управления средним уровнем (Middle Level) системы управления детектором SPD проекта NICA, который создается Объединенным институтом ядерных исследований, а также возможности реализации функций диспетчерского контроля.

Ключевые слова: система управления детектором, диспетчерский контроль, дистанционное управление, FPGA, Altera Cyclone 5, протокол обмена, SCADA, WinCC OA, CANopen, Modbus, SPD, NICA.

DESIGN PRINCIPLES OF THE MIDDLE LEVEL IN THE NICA PROJECT SPD DETECTOR CONTROL SYSTEM AND FEATURES OF THE IMPLEMENTATION OF DISPATCH CONTROL FUNCTIONS

Y. V. Kryshneu¹, E. S. Kokoulina², A. U. Sakharuk¹, A. Y. Zapolski¹

¹Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

²Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russian Federation

The paper considers the fundamentals of the Middle Level management principles of the NICA SPD detector control system, which is created by the Joint Institute for Nuclear Research, as well as the possibilities of implementing dispatch control functions.

Keywords: detector control system, dispatch control, remote control, FPGA, Altera Cyclone 5, exchange protocol, SCADA, WinCC OA, CANopen, Modbus, SPD, NICA.

Основной целью данной работы является разработка элементов аппаратно-программного комплекса на основе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) FPGA Altera Cyclone 5 для системы управления детектором SPD. Решение данной задачи позволит организовать управление как основными режимами работы частей детектора, так и детектором в целом, обеспечит непрерывный контроль медленно изменяющихся параметров детектора и технических средств, обеспечивающих его работу.

Главной задачей детектора SPD (Spin Physics Detector) является возможность всестороннего изучения спиновой структуры нуклона, что позволит сформировать понимание структуры и фундаментальных свойств нуклона непосредственно из динамики его кварков и глюонов [1].

Синхронизация системы управления детектором (СУД) с основными режимами работы ускорительного комплекса NICA осуществляется посредством подсистемы синхронизации, общей для СУД и системы сбора данных SPD DAQ.

Система управления детектором предназначена для обеспечения автономной работы подсистем детектора на этапе первоначального запуска, поддержания режимов его работы, а также выполнения необходимых операций при обслуживании, калибровке и плановой модернизации детектора. Основными целями и задачами данной системы являются управление и мониторинг, анализ полученных данных, управление системой безопасности [1–3].

Функции управления и мониторинга заключаются в контроле всех подсистем (питание, термостабилизация, криогенные системы, газовые системы); синхронизация с ускорительным комплексом NICA, автоматизация операций (запуск, обслуживание, калибровка).

Функция анализа данных заключается в архивировании параметров для анализа нештатных ситуаций и хранении конфигураций параметров для различных режимов работы.

Функция управления системой безопасности заключается в реакции на аварийные события и автоматическом отключении детектора для предотвращения повреждений.

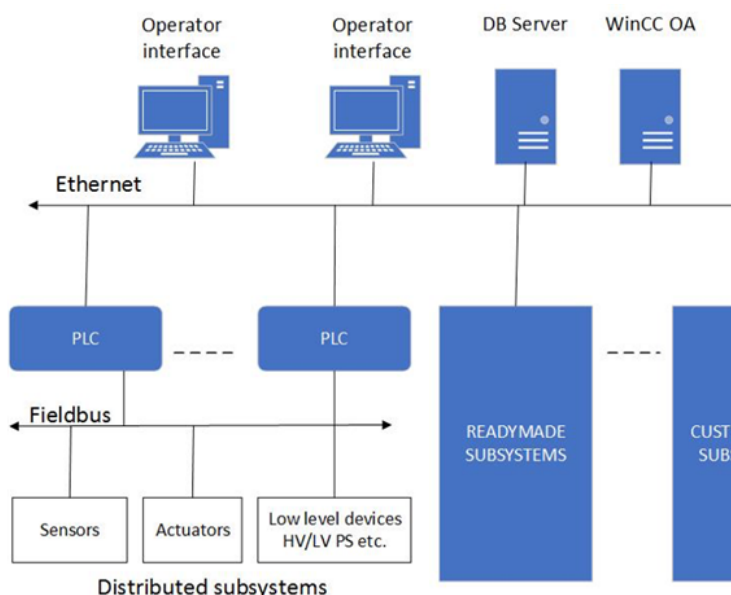


Рис. 1. Трехуровневая структура СУД

Система управления детектором разделена на три уровня (нижний, средний, верхний), каждый из которых выполняет свои определенные задачи (рис. 1).

Средний уровень (Middle Level) состоит из программируемых логических элементов, а также готовых и заказных подсистем (например, вакуумные и газовые системы). Данный уровень обеспечивает сбор данных с компонентов нижнего уровня (DAQ), управление компонентами нижнего уровня (**Low Level**), передачу обработанных данных в систему верхнего уровня (**High Level**) [1]. Для организации обмена данными с верхним уровнем можно использовать протокол Ethernet. Особенность данного уровня заключается в том, что он включает модули для реализации интерфейсов и управления локальными подсистемами.

К **Middle Level** относятся устройства управления и сбора данных, которые собирают измерительную информацию, передают ее на центральный сервер верхнего

уровня, а также формируют управляющие воздействия для исполнительных устройств нижнего уровня. Также к среднему уровню относятся схемы нормализации и обработки сигналов (преобразователи). Схемы сопряжения необходимы для согласования значений уровней или преобразования сигналов для согласования с входами системы управления и сбора данных. В качестве такой системы можно использовать ПЛИС (сокр. англ. – FPGA), например, Altera Cyclone 5 (рис. 2). Для работы с датчиками используется 8-канальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП), для формирования аналоговых управляющих сигналов – 24-битный цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), для формирования дискретных управляющих сигналов – цифровые порты вывода, для цифровой обработки измеряемых сигналов в реальном времени и передачи их в операционную систему (ОС) – ядро FPGA.

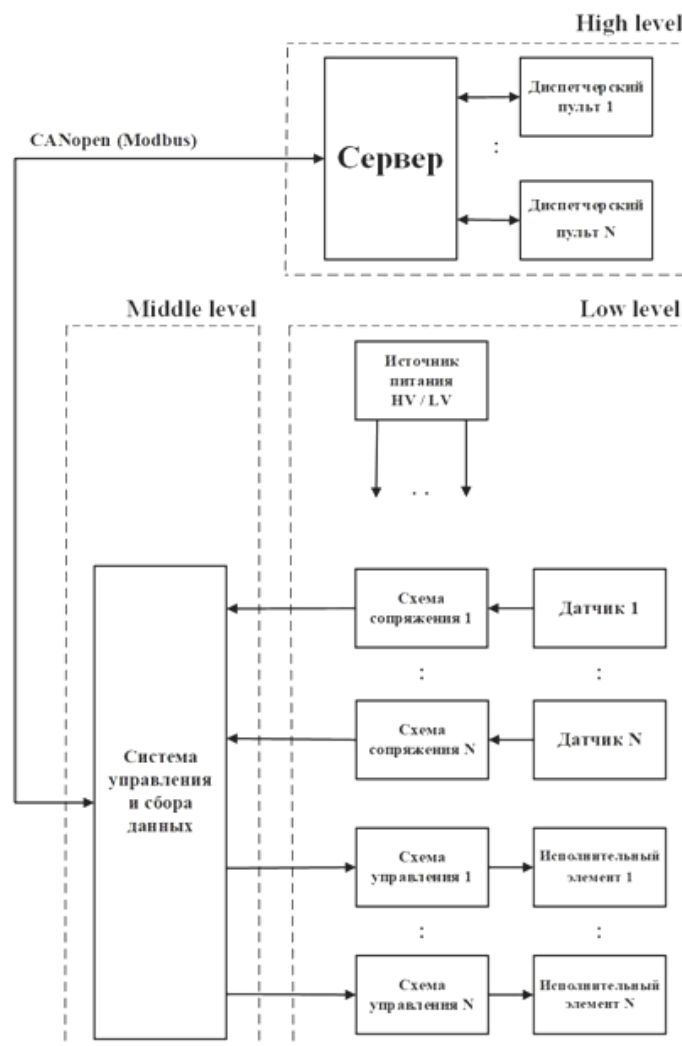


Рис. 2. Предлагаемая структурная схема СУД

Структурирование информации и осуществление коммуникации с сервером через сетевой интерфейс возможны через специальные модули на основе ОС. FPGA Cyclone 5 имеет в своем составе ядро процессора на основе архитектуры ARM. Это позволяет запускать полноценную операционную систему на базе ядра Linux, реализовать графический интерфейс для локального управления и отображения информа-

ции [4]. Процессорные ядра FPGA основаны на архитектуре ARM Cortex-A9 Dual Core, который представляет собой двухъядерный процессор с поддержкой многопоточности.

В рамках предлагаемого проектного решения предполагается использование отладочной платы Terasic модели DE1-SoC-MTL2 на базе устройства FPGA Cyclone 5. Устройство содержит 85000 логических элементов, включает в себя HPS (Hard Processor System) – интегрированную систему на кристалле (SoC), и непосредственно FPGA. В HPS входит процессорное ядро, контроллер памяти, интерфейсы ввода-вывода, шина связи с FPGA. Интерфейс памяти включает в себя 1 GB DDR3 (для HPS), 64 MB SDRAM, имеется поддержка карт памяти стандарта MicroSD (для HPS). Для хранения конфигурационных данных FPGA отвечает микросхема Flash-памяти EPCQ256, которая имеет емкость 32 MB, поддерживает последовательный интерфейс передачи SPI и имеет стандартное напряжение питания 3,3 В. Интерфейсы коммуникации состоят из 1GbE Port (HPS), 2 портов USB 2.0 Host Port (HPS), UART to USB (HPS), PS/2, IR TX / RX.

Мультимедийные интерфейсы включают сенсорный жидкокристаллический дисплей диагональю 7 дюймов с поддержкой технологии Multi-Touch, а также ТВ-декодер и поддержку видеокodeка 24-bit Codec. Наличие дисплея упрощает процесс отработки и отладки системы. Порты расширения представлены двумя коннекторами формата 40-Pin GPIO, 10-выводным АЦП Input Header, коннектором LTC. Пользовательские порты ввода/вывода представлены наличием 10+1 светодиодов (HPS), 4+1 кнопок без фиксации (HPS), 10-ю переключателями и 6-ю семисегментными индикаторами.

Для тестирования, отладки, мониторинга и программирования имеется поддержка интерфейса JTAG (Joint Test Action Group), что значительно упрощает разработку и тестирование электронных систем. Кроме того, для отладки и программирования имеется возможность использовать USB Blaster II – фирменный программатор и отладчик, подключаемый к компьютеру через USB-порт. Для работы с устройством применяется интегрированная среда разработки Quartus Prime [4].

Ввод измерительной информации и управление исполнительными элементами целесообразно осуществить на основе средств современной аналоговой и цифровой электроники, а также общей системы управления на основе FPGA Altera Cyclone 5. Использование данной платформы позволяет рассчитывать в перспективе также и на реализацию части функций диспетчерского контроля системы.

Литература

1. Technical Design Report of the Spin Physics Detector (For the SPD collaboration) / JOINT INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH. – February 6, 2024. – Version 2.00. – 349 p.
2. V. M. Abazov, V. Abramov, L. G. Afanasyev [et al.]. Conceptual design of the Spin Physics Detector. 1 2021, 2102.00442.
3. Gavrischuk, O. P. Electromagnetic calorimeter for the SPD experiment / O. P. Gavrischuk, A. I. Maltsev, V. V. Tereshenko. // Physics of Particles and Nuclei. – – 2021. – Vol. 52 (975)
4. Terasic DE1-SoC Board – URL: <https://www.terasic.com.tw/cgi-bin/page/archive.pl?Language=English&CategoryNo=165&No=836&PartNo=2#contents> (date of access: 08.09.2024).

УДК 539.1.074:621.311.6

**АНАЛИЗ СТРУКТУР И СХЕМОТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ PWS-441P SUPERMICRO И NMP-650
MEAN WELL ДЛЯ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ДЕТЕКТОРОМ SPD ПРОЕКТА NICA**

С. Н. Кухаренко¹, Ю. В. Крышнев¹, В. В. Терещенко², А. Е. Запольский¹

¹Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

²Объединенный институт ядерных исследований,
г. Дубна, Российская Федерация

Представлены результаты работы по анализу организации системы электропитания системы управления детектором SPD проекта NICA. Приведен анализ преобразователей PWS-441P от SUPERMICRO и NMP-650 от MEAN WELL и их сравнение с преобразователем VME-64 от CAEN.

Ключевые слова: система управления детектором, SPD, NICA, CAEN VME-64, SUPERMICRO PWS-441P, MEAN WELL NMP-650, система питания.

**ANALYSIS OF STRUCTURES AND CIRCUIT DESIGN SOLUTIONS
OF THE PWS-441P SUPERMICRO AND NMP-650 MEAN WELL
CONVERTERS FOR THE POWER SUPPLY OF THE NICA SPD
DETECTOR CONTROL SYSTEM**

S. M. Kukharenska¹, Y. V. Kryshneu¹, V. V. Tereshchenko², A. Y. Zapolski¹

¹Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

²Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russian Federation

The results of work on the analysis of the organization of the power supply system of the SPD detector control system of the NICA project are presented. This paper presents an analysis of the PWS-441P converters from SUPERMICRO and NMP-650 from MEAN WELL and compares them with the VME-64 converter from CAEN.

Keywords: detector control system, SPD, NICA, CAEN VME-64, SUPERMICRO PWS-441P, MEAN WELL NMP-650, power supply system.

Подсистема электропитания для системы управления детектором SPD (Spin Physics Detector) ускорительного комплекса NICA (Nuclotron based Ion Collider Facility) имеет ряд специфических требований (поддержка большого количества средне-мощных каналов, высокие требования к электромагнитной совместимости, теплоотведение). Поэтому имеется необходимость реализации специализированного решения для электропитания детектора.

При разработке структурной схемы источника питания проведен анализ существующих технических решений, используемых в промышленных, медицинских и телекоммуникационных системах [1].

Преобразователь PWS-441P (рис. 1) отличается от преобразователя CAEN VME-64 тем, что гальваническая развязка с электросетью выполнена одним функциональным узлом со стабилизацией напряжения 12 В [2].

Для получения остальных выходных напряжений используются гальванически связанные стабилизаторы. Применение такого схемотехнического решения обеспечивает

технические и экономические преимущества перед другими системами электропитания. Использование одного высоковольтного преобразователя с высоковольтными полупроводниковыми и реактивными компонентами существенно повышает КПД, уменьшает габариты системы и уменьшает в несколько раз паразитную емкость между сетью и питаемой схемой, что очень существенно для обеспечения электромагнитной совместимости. Каналы стабилизаторов могут реализовать частоту модуляции в диапазоне 0,1–1 МГц, что существенно уменьшает объем и КПД системы.

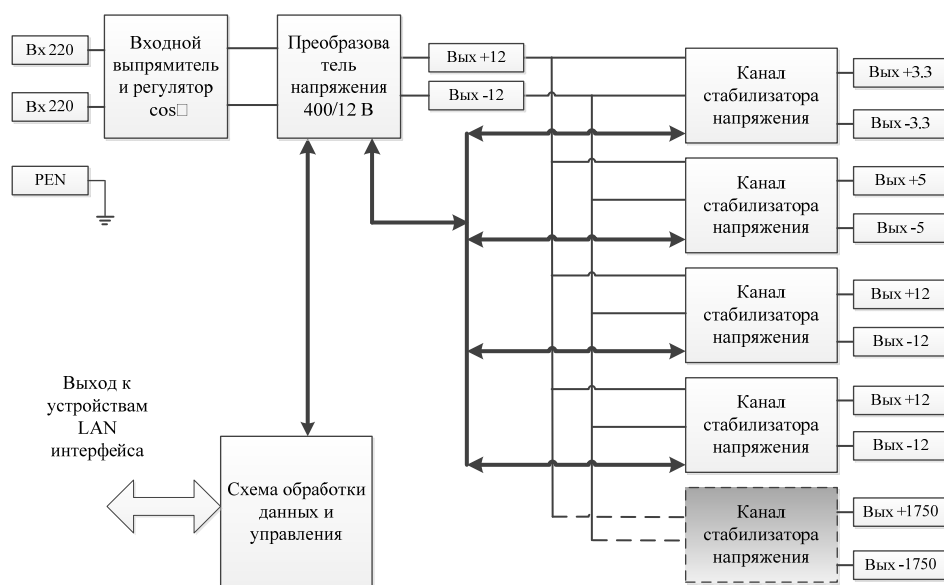


Рис. 1. Структурная схема преобразователя PWS-441P SUPERMICRO (канал, выделенный пунктирной линией, указывает на возможность наращивания дополнительных стабилизаторов)

Достигнутый уровень энергетической плотности рассматриваемого преобразователя SUPERMICRO PWS-441P составляет 500 Вт/дм^3 при непрерывной нагрузке 100%-й мощности.

Преимуществом структуры (рис. 1), является возможность синхронизации работы преобразователей и стабилизаторов напряжения. Синхронизация преобразователей позволяет снизить или избавиться от фликер-шума электромагнитной помехи. Это очень важно при питании чувствительных компонентов, так как при удовлетворительной работе одиночных преобразователей, электромагнитный шум не проявляется как помеха. Однако совместная работа нескольких преобразователей, включенных в систему, сопровождается периодическими сбоями, с которыми сложно синхронизироваться. Как следствие, сложно провести и исследование таких преобразователей.

Функциональная схема преобразователя стабилизатора, применяемого в SUPERMICRO PWS-441P [3], приведена на рис. 2. Преимуществом функционального решения преобразователя стабилизатора напряжения 400/12 В является организация системы подчиненного регулирования с внутренним контуром тока и датчиком тока ACS758KCB-150B. Внешний контур напряжения реализован на основе датчика напряжения в виде прецизионного делителя, что обеспечивает высокое быстродействие системы стабилизации напряжения с защитными функциями по току в виде токоограничения. Применение в схеме контроля и ограничения вставки по току де-

лает возможной реализацию селективной защиты не только преобразователя напряжения, но и подключаемых устройств. Быстродействие системы регулирования избавляет от необходимости применения большой буферной емкости выходного фильтра и проблем, связанных с ее перезарядом.

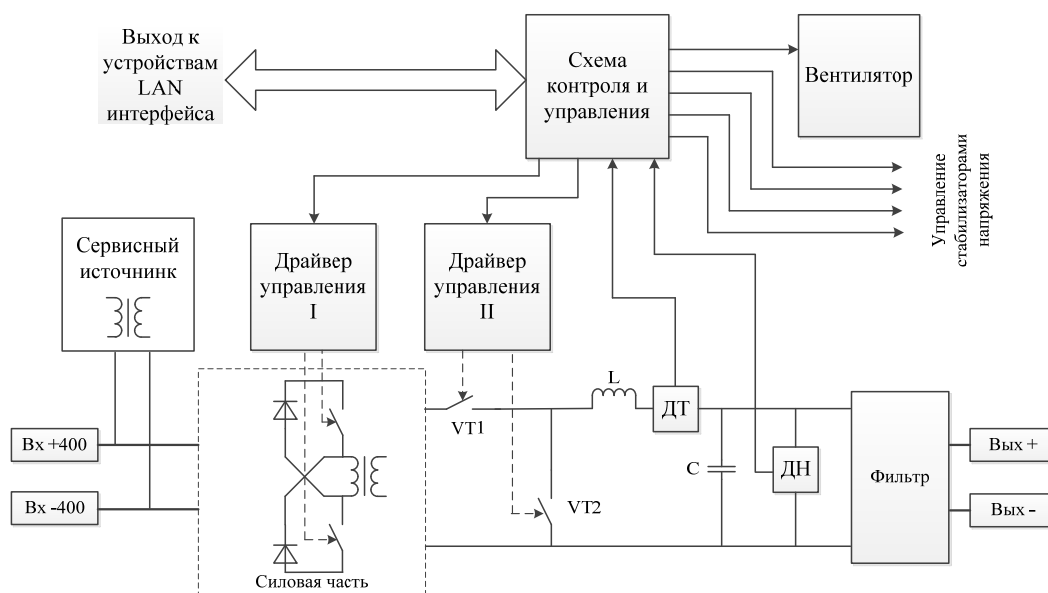


Рис. 2. Функциональная схема преобразователя стабилизатора напряжения 400/12 В: (ДТ и ДН – датчики тока и напряжения; L и C – реактивные элементы выходного фильтра; $VT1$ и $VT2$ – ключи активного выпрямителя с использованием полевых транзисторов)

Еще одним вариантом построения системы электропитания является применение независимых преобразователей на каждый номинал требуемого напряжения. Анализ проводился на примере преобразователей MEAN WELL [4].

Этот вариант обладает всеми возможными недостатками, описанными выше. В каждом канале выходного напряжения содержится высоковольтный преобразователь, выполненный с применением низкоэффективной элементной базы. Дополнительно, в плане электромагнитной совместимости, при таком решении возникает проблема подключения к общей шине фильтра электромагнитных помех. Клемма заземления FG подключена к корпусу устройства и имеет емкостную связь с фильтром кондуктивных помех. Ток кондуктивной помехи стекает по этому проводу и создает падение напряжения на нем. Таким образом, возникает проблема создания эквипотенциального подключения (между корпусами блоков питания возникает разность потенциалов с частотой помехи). Таким образом, между корпусами отдельных источников всегда будет присутствовать высокочастотное напряжение. Объединение общей шиной практически не улучшает ситуацию по причине наличия существенной индуктивной составляющей сопротивления этой шины [4].

Проведенный анализ преобразователей указывает на необходимость функционального совершенствования их отдельных узлов.

Л и т е р а т у р а

1. Technical Design Report of the Spin Physics Detector (For the SPD collaboration) / JOINT INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH. – February 6, 2024. – Version 2.00. – 349 p.

2. CAEN. Tools for Discovery. Nuclear. Products Catalog, 2007. – 114 p. (Application Note). Supermicro PWS-441P-1H, 2022. – 17 p. (Application Note).
3. MEAN WELL You Reliable Power Partner. Standard Switching Power Supply Manufacturer, 2023. – 100 p. (Application Note).

УДК 620.197.5

АНАЛІЗ НАРМАТЫЎНЫХ ПАТРАБАВАННЯЎ ДА АРГАНІЗАЦЫІ АКТЫЎНЫХ І ПАСІЎНЫХ СПАСАБАЎ АБАРОНЫ МАГІСТРАЛЬНЫХ ТРУБАПРАВОДАЎ

Ю. В. Крышнеў¹, А. Я. Запольскі¹, Бай Вэй Вэй², А. А. Шаўчэнка¹,
С. І. Моцар¹, К. А. Хадакоўскі¹

¹Установа адукацыі «Гомельскі дзяржаўны тэхнічны ўніверсітэт
імя П. В. Сухого», Рэспубліка Беларусь

²Універсітэт Кайлі, Кітайская Народная Рэспубліка

У дадзенай рабоце прааналізаваны нарматыўныя патрабаванні да абароны розных відаў магістральных трубаправодаў, разгледжаны спосабы пасіўнай і актыўнай абароны, крытэрыі электрахімічнай абароны, асноўныя тыпы сучасных прылад катоднай абароны.

Ключавыя словы: карозія, каразійнае паражэнне, металічныя канструкцыі, магістральныя трубаправоды, электрахімічная абарона, падземны трубаправод, падводны трубаправод.

ANALYSIS OF REGULATORY REQUIREMENTS FOR THE DESIGN OF ACTIVE AND PASSIVE PROTECTION METHODS OF MAIN PIPELINES

Y. V. Kryshneu¹, A. Y. Zapolski¹, Bai Wei Wei², A. A. Shauchenka¹, S. I. Motsar¹,
K. A. Hadakouski¹

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

²Kaili University, People's Republic of China

This work analyzes regulatory requirements for the protection of various types of main pipelines, considers methods of passive and active protection, criteria for electrochemical protection, and the main types of modern cathodic protection devices.

Keywords: corrosion, corrosion damage, metal structures, main pipelines, electrochemical protection, underground pipeline, underwater pipeline.

Карозія – гэта фізіка-хімічны працэс, які прыводзіць да акіслення металу. Гэты працэс працякае як на паверхнасці, так і пад зямлей, і наносіць вялікую шкоду канструкцыям трубаправодаў. Страты ад карозіі значна большыя, чым ўсе астатнія страты, звязаныя з працаздольнасцю і абслугоўваннем трубаправодных сістэм [1].

Галоўная прычына ўзнікнення карозіі – тэрмадынамічная няўстойлівасць металаў, з-за чаго ў прыродзе яны заўсёды знаходзяцца ў акісленым стане. Па гэтай прычыне для абароны акісленую паверхнасць трэба палярызаваць (актыўная абарона) і/або ізаляваць (пасіўная абарона) ад кантакта з каразійна-актыўным асяроддзем.

Для паспяховай абароны трэба ведаць: механізм працякання карозіі (хімічная або электрахімічная), умовы працякання і асаблівасці знешняга асяроддзя. У залежнасці ад характару разбурэння, карозія можа быць поўнай (усеагульнай),

агульнай і частковай (лакальнай). Пры гэтым першыя два віды робяць практычна немагчымым выкарыстанне такіх металаканструкцый.

Шэраг асаблівасцей мае падземная карозія. Трубаправоды ўкладаюцца ў грунт на глыбіню ад 2,5 да 5 м. Грунт – гэта шматфазная дысперсная сістэма. Цвёрдая аснова грунта ў працэсе карозіі ўдзелу не прымае, але аказвае ўплыў на фізіка-механічныя ўласцівасці грунту [2].

Грунт змяшчае ў сабе вадкасць з наборам мінеральных соляў, якая з’яўляецца электралітам і ўдзельнічае ў біяхімічных рэакцыях. Глебавае паветра – яшчэ адзін кампанент грунту, які ўяўляе з сябе сумесь газападобных рэчываў, што запаўняюць свабодныя пустэчы ў глебе (азот, кісларод, вуглякіслы газ і пары вады) [3].

Так як вільготнасць глебавага паветра блізкая да 100 %, то на павернасці падземных трубаправодаў заўсёды ўтвараецца вільготная плёнка.

Хуткасць працякання каразійных працэсаў ў грунце залежаць ад яго каразійнай актыўнасці, якая вызначаецца наборам фізіка-хімічных фактараў (хімічныя фактары – наяўнасць кіслот, солей, шчолачаў; фізічныя – вільготнасць, электраправоднасць).

Для вызначэння колькаснай ацэнкі прымяняюць удзельнае электрычнае супраціўленне ρ , якое вызначаецца як супраціўленне працякання электрычнага тока праз грунту праваднік плошчай сячэння, роўнай 1 м^2 і даўжыней, роўнай 1 м. Чым менш дадзены паказчык, тым больш актыўны працэс карозіі. Дадзеную ацэнку праводзяць рознымі омметрамі у вясну або ўвосень, гэта значыць у сезоны вялікай вільготнасці ў кліматычных умовах Беларусі.

Нарматыўна-правовым тэхнічным актам, які апісвае хуткасць працякання каразійнага працэсу ў залежнасці ад удзельнага электрычнага супраціўлення, з’яўляецца ГОСТ 9.602-2016 [4].

Так, грунты падзяляюцца на 3 ступені каразійнай актыўнасці – высокую (пры $\rho \leq 20 \text{ Ом} \cdot \text{м}$: тарфянікі, чарназёмы з высокай вільготнасцю), сярэдняю (пры $\rho = 20\text{--}50 \text{ Ом} \cdot \text{м}$: тарфянікі, чарназёмы з малай вільготнасцю), нізкую (пры $\rho \geq 20 \text{ Ом} \cdot \text{м}$: пясок, гліна, бедны чарназём). Падземныя металаканструкцыі падвяргаюцца электра-хімічнай карозіі, драйверам якой з’яўляецца агрэсіўнае асяроддзе. Пры гэтым дадзены працэс узмацняецца пры прысутнасці ў грунце блукаючых токаў.

Метады абароны падзяляюцца на пасіўны і актыўны [1–6].

Пасіўны метады – гэта прымяненне розных ізаляцыйных пакрыццяў, сэнс якіх заключаецца ў стварэнні буфернага слоя паміж металаканструкцыяй і агрэсіўным асяроддзем (электралітам грунту), а таксама паніжэнні каразійных токаў. «Класічным» пакрыццём з’яўляецца бітумна-гумовае. У сучаснасці ўсе больш знаходзяць прымяненне розныя палімеры, якая маюць у разы большы эканамічны эффект. Ізаляцыйнае пакрыццё павінна характарызавацца воданепранікальнасцю, адгезіяй, сцэльнасцю, хімічнай устойлівасцю, тэрмаўстойлівасцю, механічнай трываласцю, дыэлектрычнымі ўласцівасцямі, нейтральнасцю да абараняемага аб’екта.

Прымяненне розных тэхнічных сродкаў для абароны адносіцца да актыўных метадаў: электрадрэнажная і электрахімічная абарона (ЭХА).

Электрадрэнаж (прамы, палярызаваны і ўзмоцнены) прымяняецца для абароны ад блукаючых токаў у грунце, калі яго выкарыстоўваюць як токаправоднае асяроддзе. Напрыклад, трубаправод знаходзіцца блізка да чыгуначных шляхоў. Пры гэтым, блукаючы ток у шмат разоў павышае хуткасць каразійных працэсаў.

Прынцып электрахімічнай абароны заключаецца ва ўздзеянні на абараняемы аб’ект электрычнага тока пастаяннай велічыні, які стварае катодную палярызацыю да ўзроўню «ахоўнага патэнцыялу» (патэнцыял анодных участкаў) ад крыніцы

сілкування або пратэктара. Вынікам катоднай палярэзыцыі з'яўляецца пераход анодных участкаў на паверхні метала ў катодныя і, як канчатковы вынік, – разбурэнне ахвярнага анода, а не абараняемай металаканструкцыі [1, 3, 6].

У залежнасці ад напрамку зруху патэнцыяла абараняемай металічнай паверхні, электрахімічную абарону дзеляць на анодную і катодную.

Паверхня металаканструкцыі – сістэма, якая ўключае ў сабе мноства анодных і катодных участкаў. Прычына карозіі – іянізацыя металу на анодным участку сістэмы «метал – электраліт». Пры далучэнні ў такую сістэму метала з патэнцыялам меншым, чым патэнцыял аноднай рэакцыі, адбываецца ўраўненне патэнцыялаў участкаў, і ўся металаканструкцыя робіцца катодам.

Электрычны ток, неабходны для абароны, можа быць атрыманы ад работы гальванічнай пары або асобнай крыніцы току. Пры выкарыстанні 2-га спосабу, абараняемая металаканструкцыя далучаецца да адмоўнага полюсу крыніцы пастаяннага току, а да дадатнага полюсу далучаецца анод, выраблены, як правіла, са слабарастваральнага матэрыялу – катодная абарона накладзеным токам [1, 3].

Асноўныя крытэрыі электрахімічнай абароны – электрычны патэнцыял абараняемага металу і велічыня зруху ад яго звычайнага значэння. Пры гэтым вылучаюць мінімальныя і максімальныя крытэры абароны паводле ГОСТ 9.602-2016. Да мінімальнага крытэра адносяць мінімальна дапушчальнае значэнне патэнцыялу, неабходнага да спынення працэса разбурэння – мінімальны ахоўны патэнцыял складае мінус 0,85 В (меднасульфатны электрод). Для абароны ад шкоднага ўздзеяння вадароду, які выдзяляецца пры вялікіх значэннях ахоўных патэнцыялаў (вадароднае акрохванне высокатрывалых металаў, разбурэнне і адслаенне ізаляцыі), уведзены максімальны крытэр абароны – максімальна магчымае значэнне ахоўнага патэнцыяла [1, 3].

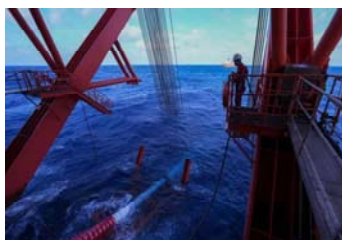
Для арганізацыі электрахімічнай абароны трубаправодаў выкарыстоўваюць станцыі катоднай абароны (СКА), якія выступаюць у ролі крыніцы сілвання: адмоўны выхад падключаецца да абараняемай металаканструкцыі, дадатны – да аноднага зазімляльніка. Негледзячы на пастаяннае развіццё і эвалюцыю тэхнічных рашэнняў, СКА маюць шэраг праблем: нераўнамернасць размеркавання патэнцыяла пры вялікай працягласці аб'екта і нізкая энергаэфектыўнасць [1].

Сучасныя станцыі катоднай абароны могуць быць прадстаўлены трыма асноўнымі тыпамі – выпрамяляльныя, тырыстарныя і інвертарныя. Інвертарныя станцыі з'яўляюцца найбольш эфектыўным рашэннем (больш высокая энергетычная і эканамічная эфектыўнасць, аператыўнае рэагаванне на змяненне патэнцыяла, наяўнасць алгарытму стабілізацыі абараняемага патэнцыялу і рэгулявання па амплітудзе і працягласці выхадных імпульсаў, магчымасць прымянення сістэм аўтаматызацыі з тэлеметрыяй і тэлемеханікай).

Усе станцыі катоднай абароны павінны адпавядаць патрабаванням ГОСТ 9.602-2016 [4] і ГОСТ Р 51164-2001 [5].

Другім спосабам ЭХА з'яўляецца пратэктарная (знешняя або ўнутраная) абарона, якая мае аналагічны механізм, але ў параўнанні з катоднай абаронай не патрабуе актыўнай крыніцы току. Для яе рэалізацыі прымяняюць пратэктар (ахвярны анод з больш нізкім электрычным патэнцыялам, чым у абараняемага аб'екта). Такія аноды робяць з магнію, цынку, алюмінію. Апошнія выкарыстоўваюцца ў якасці абароны трубаправодаў, якія працуюць ва ўмовах пясчана-парафінавых адкладанняў з больш нізкай удзельнай электраправоднасцю, чым пластавыя воды. Пратэктары з алюмінію абараняюць зварныя злучэнні трубаправодаў. Электрычны кантакт металаканструкцыі з пратэктарам прыводзіць да зруху патэнцыялу і ўзнікнення катоднай палярэзацыі на паверхні абараняемага аб'екта.

Асобным па складанасці рэалізацыі антыкаразійных мерапрыемстваў выпадкам з'яўляецца пракладанне падводных трубаправодаў. Адным з прыкладаў сучасных тэхналогій падводнай пракладкі з'яўляецца нафтагазаправод, пракладзены ў 2023 г. Кітайскай нацыянальнай афшорнай нафтавай карпарацыяй (CNOOC), які злучыў правінцыю Хайнань з паўпагружанай плывучай платформай «Шэньхай-1». Гэта першая ў свеце паўпагружная глыбокаводная платформа масай 100 тыс. тон. Максимальная глыбіня ў раене пракладкі нафтагазаправода ў Паўднева-Кітайскім моры склала каля 1 тыс. метраў. Канструкцыя дадзенага збудавання абаронена ад знешняй карозіі з дапамогай бітумнага і эпаксіднага пакрыццяў, дапоўненых актыўнай (катоднай) абаронай з «ахвярнымі» анодамі.



а)



б)

Мал. 1. Нафтагазаправод ў Паўднева-Кітайскім моры:

а – пракладка труб; б – паўпагружная глыбокаводная платформа «Шэньхай-1»

Такім чынам, у цяперашні час, эфектыўным спосабам абароны падземных і падводных металічных трубаправодаў, рэзервуараў, механізмаў, з'яўляецца комплекснае ўжыванне пасіўных і актыўных спосабаў. Комплекснае ўжыванне ізаляцыйных пакрыццяў з электрахімічнай антыкаразійнай абаронай змяняе агульныя энергастраты на ЭХА, дзякуючы паніжэнню неабходнай сілы ахоўнага току праз павялічэнне палярызавальнага супраціўлення катода.

Літаратура

1. Александров, Ю. В. Разработка методологии эффективного предупреждения разрушения длительно эксплуатируемых газопроводных систем, подверженных стресс-коррозии: автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 25.00.19 / Александров Юрий Викторович. – Ухта : УГТУ, 2013. – 43 с.
2. Глазков, В. И. Определение переходного сопротивления подземных металлических трубопроводов / В. И. Глазков, В. Г. Котик, Н. П. Глазов // Коррозия и защита в нефтедобывающей промышленности. – 1967. – № 5. – С. 29–34.
3. Иванов, В. Т. Влияние неоднородных участков изоляции на распределение тока при электрохимической защите металлов от коррозии / В. Т. Иванов, Ф. Г. Гадилова // Электрохимия. – 1981. – Вып. 2, Т. 17. – С. 321–325.
4. ГОСТ 9.602-2016. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. Издание официальное. – Москва: Стандартинформ, 2016.
5. ГОСТ Р 51164-2001. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии. – Минск : БелГИСС, 2002.
6. Умовы фарміравання ахоўнага тока ў сістэмах электрахімічнай абароны / Ю. В. Крышнеў, У. І. Собалеў, А. Я. Запольскі, М. В. Дравіца // Современные проблемы машиноведения: сборник научных трудов: в 2 ч. Ч. 1 / Министерство образования Республики Беларусь, Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого, ПАО «ОАК» ОКБ Сухого, Таизский университет (Йеменская Республика) ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2023. – С. 190–193.

Научное издание

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МАШИНОВЕДЕНИЯ

Сборник научных трудов

**В двух частях
Часть 1**

Ответственный за выпуск *Н. Г. Мансурова*

Редактор *Т. Н. Мисюрова*

Компьютерная верстка: *Н. Б. Козловская, И. П. Минина*

Подписано в печать 21.03.25.

Формат 60х84/8. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 29,76. Уч.-изд. л. 23,16.

Тираж 26 экз. Заказ № 194/35.

Издатель и полиграфическое исполнение
Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого.
Свидетельство о гос. регистрации в качестве издателя
печатных изданий за № 1/273 от 04.04.2014 г.
246746, г. Гомель, пр. Октября, 48